

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Petar P. Marković

**RAZVOJ HIBRIDNOG MODELA ZA
UPRAVLJANJE RIZIKOM PRI STRATEŠKOM
PLANIRANJU POVRŠINSKIH KOPOVA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2026.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Petar P. Marković

**DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR
RISK MANAGEMENT IN STRATEGIC
OPEN-PIT MINE PLANNING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2026.

Mentor:

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

Članovi komisije:

dr Dragan Ignjatović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici

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

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

Datum odbrane: _____

Zahvalnost

Izradu ove doktorske disertacije ne bih mogao realizovati bez podrške i pomoći brojnih ljudi, kojima ovim putem želim da izrazim iskrenu zahvalnost.

Posebnu zahvalnost dugujem svom mentoru, prof. dr Dejanu Stevanoviću, ne samo na stručnoj podršci, već i na kontinuiranom poverenju, razumevanju i sveobuhvatnoj podršci tokom celokupnog istraživačkog procesa. Njegovo znanje, iskustvo i posvećenost naučnoistraživačkom radu, uz spremnost da u ključnim trenucima pruži jasne smernice i podstrek, u velikoj meri su oblikovali tok i kvalitet ove disertacije.

Veliku zahvalnost upućujem i prof. dr Boži Kolonji, čiji je uticaj na moj profesionalni razvoj bio izuzetno značajan. Njegovi saveti, način razmišljanja i pristup problemima u rudarstvu u velikoj meri su oblikovali moje stručno usmerenje.

Zahvaljujem se članovima komisije: prof. dr Draganu Ignjatoviću, doc. dr Mirjani Banković i dr Danielu Kržanoviću, na izdvojenom vremenu, korisnim komentarima i sugestijama, koje su doprinele unapređenju kvaliteta ove disertacije.

Posebnu i najdublju zahvalnost dugujem svojoj supruzi, Dragani Slavković Marković, na bezrezervnoj podršci, strpljenju i razumevanju tokom celokupnog procesa izrade disertacije. Njena vera u mene, kao i stalna podrška u izazovnim trenucima, bili su od presudnog značaja za završetak ovog važnog životnog i profesionalnog poglavlja.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj porodici — roditeljima, Predragu i Snežani, kao i bratu Nikoli i sestri Milici — na podršci, poverenju i vrednostima koje su mi usadili, a koje su me oblikovale kako kao čoveka, tako i kao profesionalca.

RAZVOJ HIBRIDNOG MODELA ZA UPRAVLJANJE RIZIKOM PRI STRATEŠKOM PLANIRANJU POVRŠINSKIH KOPOVA

Sažetak

Strateško planiranje površinskih kopova predstavlja kompleksan proces donošenja odluka u uslovima izražene neizvesnosti, koja proističe iz geoloških, ekonomskih i tehničkih faktora. Tradicionalni deterministički pristupi zasnovani na jedinstvenim vrednostima ulaznih parametara često ne obuhvataju stvarni opseg varijabilnosti, što može dovesti do odstupanja između planiranih i ostvarenih rezultata.

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijen je hibridni model za upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova, koji integriše determinističke metode optimizacije, stohastičko modelovanje neizvesnosti i principe međunarodnog standarda ISO 31000. Model omogućava sistematsku identifikaciju, analizu, evaluaciju i tretman rizika kroz jedinstven metodološki okvir.

Geološka neizvesnost modelovana je primenom geostatističkih simulacija, dok su ekonomski i tehnički parametri analizirani primenom Monte Carlo simulacija. Na osnovu generisanih scenarija izvršena je optimizacija površinskog kopa, čime je dobijen skup optimalnih rešenja. Njihovom integracijom razvijen je probabilistički model eksploatacije blokova, kojim se za svaki blok određuje verovatnoća eksploatacije (eng. Block Extraction Probability - BEP) i kvantifikuje pouzdanost optimizacionog rešenja.

Rezultati istraživanja omogućavaju kvantifikaciju rizika kroz distribucije ekonomskih pokazatelja, uključujući verovatnoću negativnog ishoda $P(NPV < 0)$, kao i pokazatelje VaR i CVaR. Dobijeni rezultati ukazuju da, iako projekat zadovoljava definisane kriterijume prihvatljivosti rizika, značajni izvori neizvesnosti ostaju prisutni u segmentima geološke varijabilnosti, kapitalnih troškova, tržišnih cena i operativnih parametara proizvodnje, koji imaju ključni uticaj na ekonomsku i tehničku evaluaciju projekta.

Razvijeni model omogućava identifikaciju stabilnih i rizičnih zona unutar ležišta, unapređuje proces donošenja odluka i obezbeđuje realističniju procenu ekonomskih performansi rudarskih projekata u ranim fazama razvoja. Time se omogućava prelazak sa determinističkog na probabilistički pristup planiranju, čime se značajno unapređuje upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova.

Ključne reči: upravljanje rizikom, strateško planiranje, površinski kopovi, optimizacija kopa, geostatističke simulacije, Monte Carlo simulacija, probabilistički pristup, pouzdanost eksploatacije, neto sadašnja vrednost (NPV), Value-at-Risk (VaR), Conditional Value-at-Risk (CVaR)

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Projektovanje i planiranje površinskih kopova

UDK broj: 622.015:519.245(043.3)

DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR RISK MANAGEMENT IN STRATEGIC OPEN-PIT MINE PLANNING

Abstract

Strategic planning in open-pit mining represents a complex decision-making process under significant uncertainty arising from geological, economic, and technical factors. Traditional deterministic approaches, based on single-value input parameters, often fail to capture the full range of variability, which may lead to discrepancies between planned and actual project outcomes.

This doctoral dissertation presents the development of a hybrid risk-based model for strategic open-pit mine planning, integrating deterministic optimization methods, stochastic uncertainty modeling, and the principles of the ISO 31000 risk management framework. The proposed model enables systematic risk identification, analysis, evaluation, and treatment within a unified methodological approach.

Geological uncertainty is modeled using geostatistical simulations, while economic and technical parameters are analyzed through Monte Carlo simulations. Based on the generated scenarios, open-pit optimization is performed, resulting in a set of optimal solutions. Their integration leads to the development of a probabilistic block extraction model, which defines the probability of extraction for each block (eng. Block Extraction Probability – BEP), and quantifies the reliability of the optimization outcome.

The results enable risk quantification through distributions of economic indicators, including the probability of negative outcomes $P(NPV < 0)$, as well as Value-at-Risk (VaR) and Conditional Value-at-Risk (CVaR). The findings indicate that, although the project meets the defined risk acceptance criteria, significant sources of uncertainty remain present in geological variability, capital costs, commodity prices, and operational parameters, all of which have a critical impact on both the economic and technical evaluation of the project.

The developed model enables the identification of stable and high-risk zones within the deposit, improves the decision-making process, and provides a more realistic assessment of project performance in the early stages of development. This approach represents a transition from deterministic to probabilistic planning, significantly enhancing risk management in strategic open-pit mine planning.

Keywords: risk management, strategic planning, open-pit mining, pit optimization, geostatistical simulations, Monte Carlo simulation, probabilistic approach, mining confidence, Net Present Value (NPV), Value-at-Risk (VaR), Conditional Value-at-Risk (CVaR)

Scientific field: Mining engineering

Scientific subfield: Open-pit mine planning and design

UDK number: 622.015:519.245(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Predmet i cilj istraživanja.....	2
1.2. Osnovne hipoteze.....	2
1.3. Naučne metode i očekivani doprinos	3
1.4. Struktura disertacije	4
2. KONTEKST RAZVOJA RUDARSKIH PROJEKATA I UPRAVLJANJA RIZIKOM	5
2.1. Podela procesa planiranja u površinskoj eksploataciji.....	5
2.2. Faze razvoja rudarskog projekta	7
2.2.1. Koncept životnog ciklusa rudarskog projekta.....	7
2.2.2. Linearni i iterativni pristupi razvoju rudarskog projekta	10
2.2.3. Procene mineralnih resursa i rudnih rezervi	11
2.2.4. Preliminarna ekonomska analiza i strateško pozicioniranje	14
2.3. Upravljanje rizikom u rudarskim projektima.....	16
2.3.1. Pojam i definicija rizika	16
2.3.2. Faze u procesu upravljanja rizikom	18
2.3.3. Rizici u rudarstvu — specifičnosti, klasifikacija i dominantni faktori	19
2.3.4. Ciljevi upravljanja rizikom	22
2.3.5. Uloga upravljanja rizikom	24
2.3.6. Metodološki pristupi upravljanju rizicima.....	26
2.3.6.1. Kvalitativne metode upravljanja rizikom.....	28
2.3.6.2. Kvantitativne metode upravljanja rizikom.....	29
3. MODELI OPTIMIZACIJE POVRŠINSKIH KOPOVA	33
3.1. Ulazni parametri optimizacije	35
3.1.1. Geološki blok model ležišta.....	36
3.1.2. Geometrijski elementi konstrukcije kopa	38
3.1.3. Godišnji kapacitet proizvodnje	41
3.1.4. Troškovi eksploatacije i prerade rude	44
3.1.5. Gubici i razblaženja prilikom eksploatacije.....	46
3.1.6. Iskorišćenje metala u procesu prerade	50
3.1.7. Cena proizvoda	51
3.1.8. Troškovi prodaje	53
3.1.9. Granični sadržaj metala u rudi (cut-off grade).....	55
3.2. Ekonomski blok model	59

3.3.	Deterministički modeli optimizacije površinskih kopova	61
3.3.1.	Algoritmi za optimizaciju završne konture kopa (Ultimate Pit Limit)	61
3.3.1.1.	Metoda Plutajućeg konusa (Floating Cone).....	62
3.3.1.2.	Lerchs–Grossmann algoritam	64
3.3.1.3.	Pseudoflow algoritam	66
3.3.1.4.	Sistematizacija i komparativna analiza algoritama za optimizaciju	67
3.3.2.	Algoritmi za optimizaciju redosleda otkopavanja i planiranje proizvodnje	68
3.3.2.1.	Tradicionalni Whittle fazni pristup - Nested Pits i Milawa algoritam	69
3.3.2.2.	Matematičko programiranje - Linear programming (LP) i MILP (Mixed Integer Linear Programming).....	72
3.3.2.3.	Fundamental Tree Algorithm	74
3.3.2.4.	Direct Block Scheduling pristup (DBS).....	76
3.3.2.5.	Heuristički i metaheuristički pristupi.....	77
3.4.	Stohastički modeli optimizacije površinskih kopova	80
3.4.1.	Metodološki pristupi za modelovanje neizvesnosti u stohastičkim modelima	80
3.4.1.1.	Monte Carlo simulacije.....	80
3.4.1.2.	Geostatističke simulacije.....	81
3.4.1.3.	Robusna optimizacija.....	83
3.4.1.4.	Machine learning algoritmi.....	84
3.4.2.	Izvori neizvesnosti u stohastičkoj optimizaciji površinskih kopova.....	84
3.5.	Zaključna razmatranja i polazne osnove za razvoj modela.....	88
4.	RAZVOJ HIBRIDNOG MODELA ZA UPRAVLJANJE RIZIKOM	90
4.1.	Konceptualni okvir hibridnog modela upravljanja rizikom.....	90
4.2.	Uspostavljanje konteksta.....	92
4.2.1.	Ekonomski pokazatelji kao osnovne mere vrednosti.....	93
4.2.2.	Kriterijumi prihvatljivosti rizika	93
4.2.3.	Izvori podataka i obuhvat analize	95
4.3.	Identifikacija rizika	97
4.4.	Analiza rizika	100
4.4.1.	Geostatističke simulacije ležišta	100
4.4.2.	Monte Carlo simulacija.....	102
4.4.3.	Generisanje realizacija ekonomskog blok modela.....	103
4.4.4.	Optimizacija površinskog kopa i analiza osetljivosti.....	104
4.5.	Evaluacija rizika.....	107
4.5.1.	Struktura evaluacije rizika	108

4.5.2.	Kriterijumi donošenja odluka.....	109
4.6.	Tretman rizika	110
4.7.	Sinteza razvijenog hibridnog modela.....	111
5.	IMPLEMETACIJA HIBRIDNOG MODELA NA METALIČNOM LEŽIŠTU.....	113
5.1.	Opis lokaliteta i karakteristike ležišta	113
5.1.1.	Istražni radovi na prostoru ležišta	114
5.1.2.	Geološki blok model ležišta i procena resursa.....	115
5.2.	Deterministički model – formiranje baznog scenarija i definisanje ulaznih parametara optimizacije.....	119
5.2.1.	Geometrijski i rudarski parametri	121
5.2.2.	Troškovi proizvodnje i prerade	121
5.2.3.	Iskorišćenja u preradi i metalurgiji	121
5.2.4.	Prodajna cena metala	122
5.2.5.	Granični sadržaj bakra u rudi (cut-off grade).....	124
5.2.6.	Početni investicioni troškovi (CAPEX) i diskontna stopa	124
5.3.	Analiza osetljivosti ključnih parametara.....	126
5.4.	Stohastički simulaciono-optimizacioni model.....	127
5.4.1.	Identifikacija i izbor stohastičkih parametara	127
5.4.2.	Geostatističke simulacije analiziranog ležišta bakra.....	128
5.4.2.1.	Metodologija geostatističkih simulacija.....	128
5.4.2.2.	Generisanje realizacija ležišta	131
5.4.2.3.	Kvantifikacija geološke neizvesnosti.....	133
5.4.2.4.	Ograničenja i pretpostavke.....	135
5.4.3.	Definisanje raspodela verovatnoće tehno-ekonomskih parametara.....	135
5.4.3.1.	Raspodele cena metala (Cu, Au, Ag)	136
5.4.3.2.	Raspodele operativnih troškova (otkopavanje i prerada).....	140
5.4.3.3.	Raspodela iskorišćenja u ležištu (gubitaka rude).....	141
5.4.3.4.	Raspodela iskorišćenja metala	142
5.4.3.5.	Raspodela troškova prodaje metala.....	144
5.4.3.6.	Raspodela investicionih troškova (CAPEX).....	146
6.	ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA	148
6.1.	Rezultati determinističke optimizacije.....	149
6.2.	Rezultati analize osetljivosti	151
6.3.	Rezultati stohastičkog modela	153
6.3.1.	Distribucije ekonomskih pokazatelja	153

6.3.2.	Kvantifikacija rizika ($P(NPV < 0)$, VaR, CVaR)	156
6.3.3.	Probabilistički model eksploatacije blokova.....	157
6.3.4.	Sinteza rezultata i tretman rizika.....	160
7.	ZAKLJUČAK.....	162
	LITERATURA	164

Spisak slika

Slika 1.1. Konceptualni prikaz prenosa neizvesnosti kroz proces planiranja	1
Slika 2.1. Hijerarhijska struktura planiranja u površinskoj eksploataciji	5
Slika 2.2. Linearni model životnog ciklusa rudarskog projekta	8
Slika 2.3. Faze razvoja rudarskog projekta sa prikazom promene pouzdanosti i nivoa aktivnosti kroz životni ciklus	8
Slika 2.4. Prikaz stvaranja vrednosti kroz životni ciklus rudarskog projekta (Lassonde kriva)	9
Slika 2.5. Integrisani prikaz ključnih faktora uspešnosti rudarskog projekta i mogućih scenarija neuspeha	10
Slika 2.6. Prevođenje mineralnih resursa u rudne rezerve	12
Slika 2.7. Proces procene mineralnih resursa	13
Slika 2.8. Komponente rizika: verovatnoća i posledice	17
Slika 2.9. Faze u procesu upravljanja rizikom - ISO 31000:2018	18
Slika 2.10. Odnos rizika u odnosu na investicije tokom svih faza u razvoju rudarskog projekta	20
Slika 2.11. Najznačajniji poslovni rizici u rudarskoj industriji u 2025. godini	21
Slika 2.12. Metodološki pristupi upravljanju rizicima	26
Slika 2.13. Dijagram analize osetljivosti - uticaja ključnih parametara na IRR	30
Slika 2.14. Primer izloženosti riziku kroz analizu scenarija u slučaju novčanog toka projekta	31
Slika 2.15. Distribucija verovatnoće NPV-a sa prikazom indikatora rizika	31
Slika 2.16. Primer stabla odlučivanja za modelovanje rizika u fazama razvoja rudarskog projekta	32
Slika 2.17. Primena stabla odlučivanja za evaluaciju optimalne investicione odluke u uslovima rizika	32
Slika 3.1. Interaktivni ciklus planiranja i optimizacije rudarskog projekta	34
Slika 3.2. Tok procesa strateškog planiranja površinskih kopova	34
Slika 3.3. Konceptualna razlika između determinističkog i stohastičkog pristupa planiranju	35
Slika 3.4. Formiranje 3D geološkog domena na osnovu digitalizovanih profila istražnih bušotina	36
Slika 3.5. Trodimenzionalni solid rudnog tela	36
Slika 3.6. Prostorna geometrija blok modela	37
Slika 3.7. Prikaz rudnih blokova u modelu ležišta u odnosu na površinski kop	38
Slika 3.8. Geometrijski elementi konstrukcije površinskog kopa	39
Slika 3.9. Uticaj promene ugla završne kosine na faktor sigurnosti kosina i NPV projekta	40
Slika 3.10. Uticaj promene ugla završne kosine na NPV rudarskog projekta uz uključivanje troškova geotehničkog rizika i identifikaciju optimalnog projektantskog rešenja	40
Slika 3.11. Princip ekonomije obima	42
Slika 3.12. Zavisnost između proizvodnog kapaciteta rudnika i NPV-a projekta	43
Slika 3.13. Opšta struktura troškova rudarskog sistema	45
Slika 3.14. Rudarski lanac vrednosti (mine value chain)	46
Slika 3.15. Gubici i razblaženja rude u površinskoj eksploataciji	47
Slika 3.16. Odnos selektivne rudarske jedinice (SMU) i stvarnih granica rudnog tela	48
Slika 3.17. Šematski prikaz lanca proizvodnje metala od rudnog bloka u ležištu do finalnog proizvoda	50
Slika 3.18. Kretanje cene bakra u periodu od 04.2021. do 02.2026. godine (LME)	52
Slika 3.19. Uticaj graničnog sadržaja (cut-off) na tokove materijala u rudarskom sistemu	56
Slika 3.20. Odnos između cut-off sadržaja, količine (tonaže) i prosečnog sadržaja rude	57
Slika 3.21. Promena ekonomske vrednosti rudarskog projekta u funkciji cut-off sadržaja	58
Slika 3.22. Šematski prikaz rada algoritma „Plivajućeg konusa“ u blok modelu	63
Slika 3.23. Princip rada algoritma „Plivajućeg konusa“ u dvodimenzionalnom preseku blok modela	64
Slika 3.24. Izračunavanje sumiranih vrednosti za moguće konture kopa	64
Slika 3.25. Šematski prikaz geometrijskih i logičkih ograničenja pri otkopavanju blokova	65
Slika 3.26. Problem maksimalnog zatvorenog grafa za određivanje optimalne konture površinskog kopa	66
Slika 3.27. Primer redosleda otkopavanja blokova po godinama	68

Slika 3.28. Generisanje sukcesivnih kontura (nested pits shells) primenom faktora prihoda i njihov uticaj na ekonomsku vrednost projekta.....	70
Slika 3.29. Faze razvoja površinskog kopa (pushbacks).....	70
Slika 3.30. Razlika između Worst Case (a) i Best Case (b) scenarija.....	71
Slika 3.31. Whittle grafikon optimizacije kopa sa prikazom scenarija vrednosti.....	72
Slika 3.32. Problem parcijalne eksploatacije blokova u Johnson-ovom modelu linearnog programiranja.....	73
Slika 3.33. Primer agregacije blokova u fundamentalna stabla u dvodimenzionalnom blok modelu.....	74
Slika 3.33. Koraci FTA za identifikaciju fundamentalnih stabala u blok modelu	75
Slika 3.35. Poređenje tradicionalnog pristupa planiranju proizvodnje i DBS metodologije	76
Slika 3.36. Metodološki okvir Monte Carlo simulacije	81
Slika 3.37. Generisanje jednako verovatnih realizacija ležišta primenom geostatističkih simulacija	82
Slika 4.1. Konceptualni prikaz hibridnog modela upravljanja rizikom.....	91
Slika 4.2. Integrisani tok hibridnog modela upravljanja rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova ..	91
Slika 4.3. Koncept prihvatljivosti rizika prema ALARP principu	94
Slika 4.4. Konceptualni model formiranja ekonomske vrednosti bloka (EVB) u uslovima neizvesnosti	98
Slika 4.5. Ilustracija uticaja geološke neizvesnosti na verovatnoću klasifikacije blokova kroz geostatističke simulacije	101
Slika 4.6. Modelovanje neizvesnih tehno-ekonomskih parametara u cilju primene Monte Carlo simulacija	102
Slika 4.7. Generisanje višestrukih realizacija ekonomskog blok modela kombinovanjem geostatističkih simulacija ležišta i Monte Carlo simulacija tehno-ekonomskih parametara	104
Slika 4.8. Rezultati optimizacije površinskog kopa na osnovu više realizacija ekonomskog blok modela: raspodele ekonomskih pokazatelja i probabilistički model eksploatacije	106
Slika 4.9. VaR i CVaR za interval poverenja od 95%.	108
Slika 4.10. Sinteza hibridnog modela upravljanja rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova	112
Slika 5.1. Položaj istražnih bušotina na istražnom prostoru analiziranog ležišta	114
Slika 5.2. Presek kroz geološki blok model ležišta sa litološkim kodovima	116
Slika 5.3. Karta kategorizacije resursa na Indicated (zeleni poligon) i Inferred (crveni poligon)	117
Slika 5.4. Prostorni položaj blok modela sa sadržajem Cu% > 0.15%.....	118
Slika 5.5. Zahvaćeni blokovi sa sadržajem Cu% > 0.15%, presek po dubini ležišta	118
Slika 5.6. Kretanje cene bakra (USD/t) u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine	123
Slika 5.7. Kretanje cene zlata (USD/kg) u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine	123
Slika 5.8. Kretanje cene srebra (USD/kg) u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine	123
Slika 5.9. Položaj postojeće železničke pruge (existing railway) u odnosu na rudno telo (ore body)	125
Slika 5.10. Prikaz string fajla kao nosilaca podataka o kompozitima unutar ležišta (prikaz u planu)	129
Slika 5.11. Prikaz string fajla kao nosilaca podataka o kompozitima unutar ležišta (3D prikaz)	129
Slika 5.12. Eksperimentalni i teorijski variogram za bakar (Cu) – Domen 1	130
Slika 5.13. Eksperimentalni i teorijski variogram za bakar (Cu) – Domen 2.....	130
Slika 5.14. Upporedni prikaz determinističkog modela i realizacija geostatističkih simulacija u planu i vertikalnom preseku	131
Slika 5.15. Krive „Sadržaj – Tonaža“ sa prikazom determinističkog modela i opsega varijabilnosti dobijenog geostatističkim simulacijama.....	132
Slika 5.16. Prostorna raspodela koeficijenta varijacije (CV) sadržaja Cu kao mera geološke neizvesnosti u blok modelu ležišta.....	134
Slika 5.17. Dinamika kretanja cene bakra sa istaknutim trendom rasta nakon 2020. godine	136
Slika 5.18. Dinamika kretanja cene zlata sa istaknutim trendom rasta nakon 2020. godine	137
Slika 5.19. Dinamika kretanja cene srebra sa istaknutim trendom rasta nakon 2020. godine	137
Slika 5.20. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za cenu bakra (USD/t) u stohastičkom modelu.....	138
Slika 5.21. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za cenu zlata (USD/kg) u stohastičkom modelu	138
Slika 5.22. Usvojene Beta raspodela verovatnoće za cenu srebra (USD/kg) u stohastičkom modelu.....	139

Slika 5.23. Promena troškova energije i rada u periodu 2019–2024 (indeks 2019 = 100)	140
Slika 5.24. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za troškove otkopavanja (USD/t) u stohastičkom modelu	141
Slika 5.25. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za troškove prerade (USD/t) u stohastičkom modelu	141
Slika 5.26. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje u ležištu u stohastičkom modelu.....	142
Slika 5.27. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje bakra (%) u stohastičkom modelu	143
Slika 5.28. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje zlata (%) u stohastičkom modelu.....	143
Slika 5.29. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje srebra (%) u stohastičkom modelu.....	144
Slika 5.30. Usvojena Pert raspodela za troškove prodaje bakra (USD/t) u stohastičkom modelu.....	145
Slika 5.31. Usvojena Pert raspodela za troškove prodaje zlata (USD/kg) u stohastičkom modelu	145
Slika 5.32. Usvojena Pert raspodela za troškove prodaje srebra (USD/kg) u stohastičkom modelu	146
Slika 5.33. Usvojena Pert raspodela za investicione troškove (USD) u stohastičkom modelu	147
Slika 6.1. Optimalna kontura kopa sa prikazom rudnih blokova – 3D prikaz.....	150
Slika 6.2. Optimalna kontura kopa sa prikazom rudnih blokova – prikaz u planu.....	150
Slika 6.3. Preliminarna dinamika eksploatacije u okviru optimalne konture kopa sa projektovanim kapacitetom od 10 Mt rude.....	151
Slika 6.4. Osetljivost interne stope rentabilnosti (IRR) usled promene ulaznih parametara optimizacije	152
Slika 6.5. Distribucija NPV (miliona): (a) histogram raspodele; (b) kumulativna funkcija raspodele	154
Slika 6.6. Distribucija IRR (%): (a) histogram raspodele; (b) kumulativna funkcija raspodele	154
Slika 6.7. Distribucija PBP (godina): (a) histogram raspodele; (b) kumulativna funkcija raspodele	155
Slika 6.8. Novčani tokovi po scenarijima	155
Slika 6.9. Histogrami i kumulativne funkcije raspodele NPV za interval poverenja od CI=90%	156
Slika 6.10. Histogrami i kumulativne funkcije raspodele NPV za interval poverenja od CI=95%	156
Slika 6.11. Histogrami i kumulativne funkcije raspodele NPV za interval poverenja od CI=97%	157
Slika 6.12. Probabilistički model eksploatacije blokova - prikaz u planu.....	158
Slika 6.13. Probabilistički model eksploatacije blokova – 3D prikaz.....	158
Slika 6.14. Probabilistički model eksploatacije blokova – vertikalni presek	159

Spisak tabela

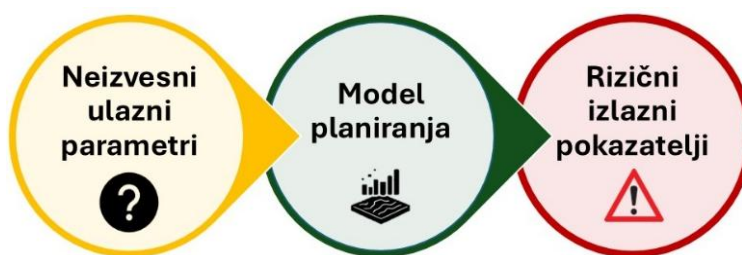
Tabela 2.1. Karakteristike i nivoi tačnosti PEA, PFS i FS studija	15
Tabela 2.2. Primenljivost metoda u odnosu na fazu procesa upravljanja rizikom	27
Tabela 2.3. Primer matrice za procenu rizika.....	29
Tabela 3.1. Uporedne karakteristike algoritama za optimizaciju završne konture kopa.....	67
Tabela 3.2. Poređenje egzaktnih optimizacionih metoda i metaheurističkih pristupa u planiranju proizvodnje.....	79
Tabela 3.3. Pregled najznačajnijih radova iz oblasti stohastičke optimizacije u planiranju rudnika ..	86
Tabela 4.1. Najvažniji izvori neizvesnosti koji utiču na ekonomsku vrednost bloka	98
Tabela 5.1. Atributi u blok modelu ležišta	115
Tabela 5.2. Izdvojeni tipovi geoloških domena u ležištu	115
Tabela 5.3. Geološki resursi analiziranog ležišta bakra (Cut off = 0,15% Cu).....	117
Tabela 5.4. Osnovne vrednosti tehno-ekonomskih parametara optimizacije.....	120
Tabela 5.5. Struktura početnih investicionih ulaganja	125
Tabela 6.1. Rezultati determinističke optimizacije	149
Tabela 6.2. Uticaj promene parametara na NPV	151
Tabela 6.3. Uticaj promene parametara na IRR	152
Tabela 6.4. Uticaj promene parametara na PBP.....	152
Tabela 6.5. Sumirani rezultati stohastičke analize ključnih ekonomskih i tehničkih pokazatelja ...	155
Tabela 6.6. VaR i CVaR za različite intervale poverenja	157

1. UVOD

Rudarska industrija predstavlja jedan od ključnih sektora savremene ekonomije, jer obezbeđuje mineralne sirovine neophodne za razvoj brojnih industrijskih grana, energetike i infrastrukture. Istovremeno, rudarski projekti spadaju među kapitalno najintenzivnije i tehnički najsloženije industrijske poduhvate, čiji razvoj često traje više decenija i zahteva značajna finansijska ulaganja.

Specifičnost rudarskih projekata ogleda se u tome što se odluke od strateškog značaja donose u uslovima izražene neizvesnosti. Geološka varijabilnost ležišta, promenljivost sadržaja korisne komponente, fluktuacije tržišnih cena, odstupanja u tehnološkim parametrima prerade i neizvesnost investicionih i operativnih troškova predstavljaju ulazne faktore koji direktno utiču na tehničke i ekonomske performanse projekta. U tom smislu, rizik se može posmatrati kao rezultat prenosa neizvesnosti ulaznih parametara kroz proces planiranja i optimizacije, pri čemu izlazni pokazatelji, kao što su neto sadašnja vrednost, dinamika proizvodnje i granice kopa, ne predstavljaju jedinstvene veličine, već skup mogućih ishoda.

Ovakav odnos između neizvesnosti ulaznih parametara i rezultata planiranja može se posmatrati kao proces transformacije, u kome se neizvesnost prenosi kroz model i manifestuje kao varijabilnost izlaznih pokazatelja, odnosno rizik (slika 1.1). Na taj način, proces planiranja površinskih kopova može se konceptualno predstaviti kao funkcija prenosa koja povezuje neizvesne ulazne veličine sa rizičnim ishodima.



Slika 1.1. Konceptualni prikaz prenosa neizvesnosti kroz proces planiranja

Upravo zbog toga, strateško planiranje površinskih kopova ne bi trebalo posmatrati isključivo kao optimizacioni problem zasnovan na jednom geološkom modelu i jednom skupu tehno-ekonomskih parametara. Takav deterministički pristup, iako dugo dominantan u rudarskoj praksi, često prikriva stvarni opseg neizvesnosti i može dovesti do generisanja planova koji su osetljivi na promene ulaznih pretpostavki. U realnim uslovima eksploatacije se to manifestuje kroz odstupanja između planiranih i ostvarenih rezultata, kako u tehničkom, tako i u ekonomskom smislu.

Posebno značajnu fazu u razvoju rudarskog projekta predstavlja preliminarna ekonomska procena (PEA – Preliminary Economic Assessment), koja predstavlja jednu od prvih tehničko-ekonomskih analiza potencijalne isplativosti eksploatacije mineralnog ležišta. U ovoj fazi razmatraju se osnovni geološki, tehnički i ekonomski parametri projekta kako bi se procenila njegova potencijalna održivost i donela odluka o daljem razvoju kroz naredne faze izvodljivosti. Međutim, upravo u ovoj fazi nivo neizvesnosti je najveći, dok posledice pogrešnih investicionih odluka mogu biti veoma značajne.

Savremeni razvoj računarskih metoda, geostatističkih simulacija i optimizacionih algoritama omogućio je prelazak sa klasičnih determinističkih modela ka stohastičkim pristupima, koji eksplicitno uključuju neizvesnost u proces planiranja. Paralelno sa tim, međunarodni standardi upravljanja rizikom (poput ISO 31000) pružaju sistematičan okvir za identifikaciju, analizu, evaluaciju i tretman rizika u kompleksnim industrijskim sistemima. Uprkos značajnom napretku u pojedinačnim oblastima, njihova integracija u jedinstven metodološki okvir za strateško planiranje površinskih kopova i dalje predstavlja značajan istraživački izazov.

Polazeći od navedenih činjenica, ova disertacija usmerena je na razvoj hibridnog modela za upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova, koji integriše determinističke

modele optimizacije, stohastičke metode modelovanja neizvesnosti i principe međunarodnog standarda ISO 31000. Osnovna ideja predloženog pristupa jeste da se proces planiranja ne zasniva samo na određivanju optimalnog rešenja, već i na proceni njegove pouzdanosti, čime se obezbeđuje realističnija, jasnija i robusnija osnova za donošenje strateških odluka u ranim fazama razvoja rudarskih projekata.

1.1. Predmet i cilj istraživanja

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije jeste razvoj metodološkog pristupa za integraciju optimizacije površinskih kopova, stohastičkog modelovanja neizvesnosti i principa upravljanja rizikom u okviru jedinstvenog modela strateškog planiranja rudarskih projekata.

Istraživanje je usmereno na kvantifikaciju uticaja ključnih izvora neizvesnosti, uključujući geološku varijabilnost ležišta, tehno-ekonomske parametre eksploatacije i tržišne uslove, na rezultate optimizacije površinskih kopova i ekonomsku vrednost projekta. Poseban fokus stavljen je na integraciju geostatističkih simulacija i Monte Carlo pristupa u proces generisanja i evaluacije alternativnih scenarija dugoročnog razvoja kopa.

Cilj istraživanja je razvoj hibridnog modela strateškog planiranja površinskih kopova zasnovanog na riziku, koji povezuje determinističke metode optimizacije, stohastičke simulacione modele i principe standarda ISO 31000 za upravljanje rizikom. Model omogućava sistematsku identifikaciju, analizu i kvantifikaciju neizvesnosti, kao i procenu rizika, odnosno pouzdanosti optimalnih rešenja kroz probabilistički pristup.

Dodatni cilj istraživanja jeste unapređenje procesa donošenja odluka u svim fazama razvoja rudarskih projekata kroz uvođenje kvantitativnih pokazatelja rizika, kao što su distribucije ekonomskih rezultata, verovatnoća negativnog ishoda i prostorna raspodela pouzdanosti eksploatacije blokova.

1.2. Osnovne hipoteze

Formulacija osnovnih hipoteza u ovoj disertaciji zasniva se na identifikovanoj istraživačkoj praznini u oblasti strateškog planiranja površinskih kopova, koja se ogleda u nedostatku integrisanih pristupa koji istovremeno obuhvataju optimizaciju kopa, kvantifikaciju neizvesnosti i sistematsko upravljanje rizikom. Polazeći od navedenih saznanja, definisane su sledeće osnovne hipoteze istraživanja:

- **Hipoteza 1:** Integracija determinističkih i stohastičkih metoda u jedinstveni hibridni model omogućava realističniju procenu rezultata optimizacije površinskih kopova u odnosu na klasične determinističke pristupe, kroz uvažavanje varijabilnosti ulaznih parametara i generisanje spektra mogućih rešenja.
- **Hipoteza 2:** Istovremeno modelovanje više izvora neizvesnosti (geoloških, tehničkih i ekonomskih) u okviru hibridnog modela omogućava pouzdaniju kvantifikaciju rizika rudarskog projekta, izraženu kroz distribucije ekonomskih pokazatelja i pokazatelje rizika kao što su verovatnoća negativne neto sadašnje vrednosti, VaR i CVaR.
- **Hipoteza 3:** Primena principa upravljanja rizikom zasnovanih na standardu ISO 31000 u procesu optimizacije površinskih kopova omogućava strukturisanu identifikaciju, analizu, evaluaciju i tretman rizika, čime se unapređuje transparentnost i konzistentnost donošenja strateških odluka.
- **Hipoteza 4:** Primena stohastičkog pristupa optimizaciji omogućava definisanje probabilističkog modela eksploatacije blokova rezervi rude u samom modelu ležišta, kojim se kvantifikuje pouzdanost eksploatacije i identifikuju stabilne i rizične zone unutar granica kopa, što nije moguće postići determinističkim pristupom.

1.3. Naučne metode i očekivani doprinos

U cilju realizacije postavljenih istraživačkih ciljeva u disertaciji je primenjen integrisani skup naučnih metoda koji obuhvata teorijsku analizu, numeričko modelovanje, statističke i geostatističke metode, kao i simulacione pristupe. Kombinacijom ovih metoda omogućena je sveobuhvatna analiza uticaja geoloških, tehničkih i ekonomskih faktora neizvesnosti na rezultate strateškog planiranja površinskih kopova.

U početnoj fazi istraživanja primenjene su kabinetske metode, koje su obuhvatile sistematsku analizu relevantne naučne i stručne literature iz oblasti optimizacije površinskih kopova, modelovanja neizvesnosti i upravljanja rizikom. Na osnovu ove analize identifikovani su nedostaci dosadašnjih pristupa, koji se odnose na nedostatak integrisanih metodoloških pristupa koji objedinjuju optimizaciju, kvantifikaciju neizvesnosti i upravljanje rizikom.

U analitičkom delu istraživanja primenjene su metode determinističke optimizacije površinskih kopova, zasnovane na ekonomskom obliku blok modela i algoritmima za definisanje optimalnih granica kopa. Ovi modeli predstavljaju osnovu za formiranje baznog scenarija i poređenje sa rezultatima stohastičkog modelovanja.

Za kvantifikaciju geološke neizvesnosti primenjene su geostatističke simulacije, koje omogućavaju generisanje više podjednako verovatnih realizacija ležišta i očuvanje prostorne varijabilnosti sadržaja. Paralelno sa tim, varijabilnost tehno-ekonomskih parametara modelovana je primenom Monte Carlo simulacija, čime je omogućeno generisanje distribucija ekonomskih pokazatelja projekta.

Kvantifikacija rizika izvršena je primenom statističkih pokazatelja, uključujući verovatnoću negativnog ekonomskog ishoda $P(NPV < 0)$, kao i pokazatelje rizika VaR i CVaR. Ovi indikatori omogućavaju sagledavanje nivoa rizika i procenu stabilnosti ekonomskih performansi projekta.

Na osnovu rezultata stohastičkih simulacija formiran je probabilistički model eksploatacije blokova, zasnovan na učestalosti pojavljivanja blokova unutar optimalnih kontura kroz više realizacija. Ovim pristupom omogućena je prostorna kvantifikacija pouzdanosti eksploatacije i identifikacija stabilnih i rizičnih zona unutar granica kopa.

Naučni doprinos disertacije ogleda se u razvoju integrisanog metodološkog okvira koji povezuje optimizaciju površinskih kopova, modelovanje neizvesnosti i upravljanje rizikom u jedinstven metodološki okvir za strateško planiranje rudarskih projekata.

Glavni doprinosi istraživanja obuhvataju:

- razvoj integrisanog metodološkog okvira zasnovanog na riziku, koji omogućava uključivanje geološke i tehno-ekonomske neizvesnosti u strateško planiranje površinskih kopova
- uspostavljanje jedinstvenog pristupa za simultano razmatranje geološke, tehničko-tehnološke i ekonomske neizvesnosti kroz kombinaciju geostatističkih i simulacionih modela u okviru procesa optimizacije;
- razvoj probabilističkog modela eksploatacije blokova zasnovanog na višestrukim optimizacionim scenarijima, kojim se omogućava kvantifikacija prostorne stabilnosti granica kopa;
- uvođenje novog kvantitativnog indikatora — verovatnoće eksploatacije bloka (eng. Block Extraction Probability – BEP), kojim se definiše nivo pouzdanosti uključenja pojedinačnih blokova u optimalnu konturu kopa;
- unapređenje interpretacije rezultata optimizacije kroz definisanje probabilističkih kontura kopa i identifikaciju stabilnih i rizičnih zona eksploatacije;
- unapređenje procesa donošenja strateških odluka kroz integraciju rezultata optimizacije i kvantifikovanih pokazatelja rizika u jedinstven analitički okvir.

Rezultati istraživanja biće verifikovani kroz primenu razvijenog modela na studiji slučaja iz realnog rudarskog sistema, čime će se demonstrirati njegova praktična primenljivost i doprinos unapređenju procesa strateškog planiranja u rudarskoj industriji.

1.4. Struktura disertacije

Doktorska disertacija strukturisana je u sedam međusobno povezanih poglavlja, koja obuhvataju teorijski okvir istraživanja, razvoj metodološkog pristupa, njegovu implementaciju, analizu dobijenih rezultata i zaključna razmatranja.

U prvom poglavlju dat je uvod u problematiku istraživanja, definisani su predmet i cilj istraživanja, postavljene osnovne hipoteze, opisane primenjene naučne metode i istaknuti očekivani naučni doprinosi.

Drugo poglavlje obuhvata analizu konteksta razvoja rudarskih projekata i upravljanja rizikom. U ovom delu razmatraju se faze razvoja rudarskih projekata, procesi planiranja u površinskoj eksploataciji, kao i osnovni pojmovi, klasifikacija i metodološki pristupi upravljanju rizikom.

Treće poglavlje posvećeno je modelima optimizacije površinskih kopova. U okviru ovog poglavlja analiziraju se ulazni parametri optimizacije, koncept ekonomskog blok modela, deterministički i stohastički modeli optimizacije, kao i postojeći pristupi modelovanju neizvesnosti.

Poglavlja 2 i 3 zajedno čine pregled dosadašnjih istraživanja i teorijsko-metodoloških osnova na kojima se zasniva ovo istraživanje. Na osnovu sprovedene analize i sinteze postojećih pristupa, na kraju ovog poglavlja definisana su zaključna razmatranja i polazne osnove za razvoj hibridnog modela

Četvrto poglavlje obuhvata razvoj hibridnog modela upravljanja rizikom. U ovom delu definisan je konceptualni okvir modela u skladu sa principima standarda ISO 31000, uključujući faze identifikacije, analize, evaluacije i tretmana rizika, kao i integraciju determinističkih i stohastičkih pristupa.

Peto poglavlje odnosi se na implementaciju razvijenog modela na konkretnom metaličnom ležištu bakra. U ovom delu prikazane su osnovne karakteristike ležišta i geološki blok model, ulazni parametri determinističke optimizacije, analiza osetljivosti i formiranje stohastičkog simulaciono-optimizacionog modela.

Šesto poglavlje obuhvata analizu i diskusiju rezultata. U okviru ovog poglavlja prikazani su rezultati determinističke optimizacije, analize osetljivosti, rezultati stohastičkog modelovanja kroz distribucije ekonomskih pokazatelja i kvantifikaciju rizika, kao i probabilistički model eksploatacije blokova. Na kraju poglavlja izvršena je sinteza rezultata i definisane su implikacije za donošenje odluka u uslovima neizvesnosti i upravljanje rizikom u strateškom planiranju

U sedmom poglavlju izneti su zaključci istraživanja, sumirani glavni naučni doprinosi i ukazano na mogućnosti daljih istraživanja u ovoj oblasti.

2. KONTEKST RAZVOJA RUDARSKIH PROJEKATA I UPRAVLJANJA RIZIKOM

U ovom poglavlju razmatra se razvoj rudarskog projekta kao višefazni i dinamičan proces, u okviru koga se potencijal mineralnog ležišta postepeno transformiše u tehničko-ekonomski definisan rudarski sistem eksploatacije rudnih rezervi. Poseban akcenat stavljen je na životni ciklus projekta, kao i na ulogu i značaj strateškog planiranja u različitim fazama njegovog razvoja.

U tom kontekstu analiziran je način na koji se neizvesnost i rizik manifestuju kroz pojedine faze projekta, uključujući njihovu redukciju usled prikupljanja novih podataka, ali i njihov potencijalni rast usled složenosti tehničkih i ekonomskih odluka. Posebno je istaknuta faza procene i konverzije mineralnih resursa u rudne rezerve, kao ključni korak u kome se geološki model ležišta prevodi u parametre koji definišu ekonomsku vrednost i izvodljivost projekta.

Takođe, u okviru ovog poglavlja razmatraju se osnovni koncepti i metodološki pristupi upravljanju rizikom u rudarskim projektima, sa ciljem sagledavanja njihove uloge u procesu donošenja strateških odluka.

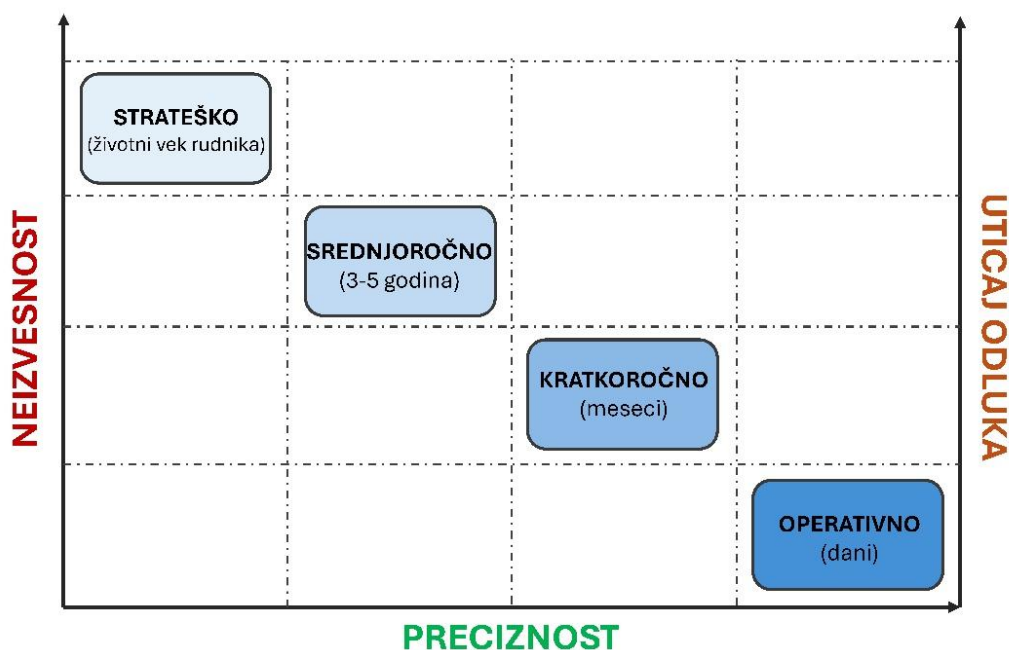
Na ovaj način definiše se teorijski i konceptualni okvir za razumevanje problema strateškog planiranja u uslovima neizvesnosti, dok će optimizacioni modeli i algoritmi koji se koriste za rešavanje ovih problema biti detaljno analizirani u narednom poglavlju.

2.1. Podela procesa planiranja u površinskoj eksploataciji

Proces planiranja u površinskoj eksploataciji može se sistematizovati prema vremenskom horizontu odlučivanja, stepenu detaljnosti razrade i pouzdanosti ulaznih parametara. U stručnoj i naučnoj literaturi najčešće se razlikuju četiri osnovna nivoa planiranja [1] [2] [3]:

- 1) strateško (dugoročno),
- 2) srednjoročno,
- 3) kratkoročno i
- 4) operativno planiranje.

Ovakva hijerarhijska struktura omogućava usklađivanje dugoročnih ciljeva projekta sa svakodnevnim proizvodnim aktivnostima, uz postepeno povećanje preciznosti podataka i detaljnosti rešenja (slika 2.1)



Slika 2.1. Hijerarhijska struktura planiranja u površinskoj eksploataciji

Važno je naglasiti da se kroz sve nivoe planiranja razmatraju slični fundamentalni elementi rudarske proizvodnje (rezerve, kapaciteti, odlaganje jalovine, kvalitet rude, tehnologija), ali se razlike javljaju u stepenu pouzdanosti podataka, vremenskom okviru i fleksibilnosti odlučivanja. Kako projekat napreduje i kako se prikupljaju dodatni geološki i tehno-ekonomski podaci, smanjuje se nivo neizvesnosti a povećava preciznost planova. Istovremeno, odluke donete na višim nivoima planiranja direktno utiču na rizik i fleksibilnost odlučivanja u nižim fazama, čime se uspostavlja snažna međuzavisnost između nivoa planiranja (slika 2.1) [1] [2].

Strateško planiranje predstavlja najviši nivo odlučivanja i obuhvata definisanje ključnih elemenata u razvoju rudarskog projekta, odnosno [1]:

- ukupnih mineralnih resursa
- graničnog sadržaj u rudi (cut-off grade)
- optimalne eksploatacione granice kopa i procenu rudnih rezervi
- kapacitet proizvodnje i vek kopa
- dinamiku eksploatacije

Ključni cilj strateškog planiranja jeste maksimizacija neto sadašnje vrednosti (NPV), obezbeđivanje tehničke izvodljivosti i dugoročne održivosti projekta tokom celokupnog životnog veka rudnika (Life-of-Mine Planning). Realizaciju ovih ciljeva neophodno je postići u okviru datih geoloških, tehničkih, ekonomskih, ekoloških i socijalnih ograničenja [1] [4] [5].

Karakteristika ovog nivoa planiranja jeste relativno visok stepen neizvesnosti ulaznih podataka, naročito u pogledu geoloških parametara, cene sirovine i procene troškova. Zbog toga se strateške odluke donose na osnovu generalizovanih (prosečnih) i iskustvenih podataka, često uz primenu optimizacionih algoritama (kao što je npr. Lerchs–Grossmann [4]). Strateško planiranje se dominantno sprovodi u fazama konceptualne i preliminarne studije izvodljivosti [1] [5] [6].

Srednjoročno planiranje predstavlja vezu između strateškog koncepta i operativne realizacije. Njegova osnovna svrha je razrada godišnjih i višegodišnjih planova eksploatacije (najčešće u vremenskom intervalu od 3 do 5 godina), uz detaljnije definisanje dinamike otkopavanja, faza razvoja kopa i raspodele kapaciteta [1] [3] [7].

Na ovom nivou se vrši dodatna razrada proizvodnih scenarija, uz veću pouzdanost geološkog modela i precizniju procenu troškova. Srednjoročni plan omogućava korekciju pojedinih strateških odluka, kao što su granice kopa, dinamika otkopavanja ili prilagođavanje kapaciteta promenama tržišnih uslova. Ovaj nivo planiranja često podrazumeva iterativni proces usklađivanja tehničkih i ekonomskih ciljeva [1] [8].

Kratkoročno planiranje obuhvata razradu mesečnih i kvartalnih planova proizvodnje, sa fokusom na ostvarenje ciljeva definisanih srednjoročnim planom. U ovoj fazi se precizno definišu radni frontovi, dinamika bušenja i miniranja, transportni tokovi, planovi mešanja rude (blending) i angažovanje opreme [1] [3] [9].

Za razliku od strateškog nivoa, kratkoročno planiranje se oslanja na visoko pouzdane i ažurirane podatke (operativna geologija, stvarni troškovi, raspoloživost mehanizacije). Njegova uloga nije redefinisane dugoročnih ciljeva, već njihova efikasna implementacija. Izolovano donošenje odluka u ovoj fazi bez usklađivanja sa strateškim ciljevima (npr. selektivno otkopavanje samo rude visokog sadržaja radi kratkoročnog povećanja profita), može dovesti do narušavanja dugoročne vrednosti projekta [10] [11].

Operativno planiranje predstavlja najdetaljniji nivo i odnosi se na dnevne, nedeljne i smenske aktivnosti. Uključuje planiranje rasporeda rada opreme, organizaciju transporta, kontrolu kvaliteta rude i praćenje realizacije plana. Odluke na ovom nivou moraju biti u potpunosti usklađene sa kratkoročnim planom, uz istovremeno reagovanje na operativne poremećaje (kvarovi, geološka odstupanja, vremenski uslovi, nepredviđene situacije i dr.) [1] [3].

Ovaj nivo planiranja karakteriše minimalna vremenska distanca između planiranja i realizacije, kao i najveći stepen detaljnosti (definiše koji radnici, sa kojom opremom, na kom radilištu i u kom trenutku). Iako operativne odluke imaju ograničen strateški domet, njihov kumulativni efekat značajno utiče na ukupnu efikasnost i ekonomiku projekta [12] [7].

Iz navedenog se može zaključiti da različiti nivoi planiranja ne predstavljaju izolovane faze, već međusobno povezane komponente jedinstvenog sistema, u kome se neizvesnost i rizik prenose i transformišu kroz proces donošenja odluka, od strateškog do operativnog nivoa.

2.2. Faze razvoja rudarskog projekta

2.2.1. Koncept životnog ciklusa rudarskog projekta

Razvoj rudarskog projekta predstavlja složen, višefazni proces u kojem se geološka hipoteza o postojanju mineralnog ležišta postepeno transformiše u operativni eksploatacioni sistem sa definisanom tehničkom, ekonomskom i regulatornom strukturom. Životni ciklus rudarskog projekta može se sistematizovati kroz sledeće faze (slika 2.2) [2] [11] [13] [14]:

1. **Faza istraživanja (Exploration)** obuhvata inicijalno identifikovanje mineralizacije putem geološkog kartiranja, geofizičkih i geochemijskih istraživanja, površinskog i dubinskog uzorkovanja. Cilj ove faze jeste potvrda postojanja mineralnog potencijala i formiranje preliminarne geološke hipoteze o ležištu. U ovoj etapi dominantna je geološka neizvesnost, a kapitalna ulaganja su relativno ograničena.
2. **Procena mineralnih resursa (Resource Estimation)** predstavlja fazu u kojoj se, na osnovu prikupljenih podataka, izrađuje geološki i blok model ležišta i vrši klasifikacija resursa (Inferred, Indicated, Measured) u skladu sa međunarodnim standardima. Ova faza uvodi kvantitativnu procenu količine i kvaliteta mineralizacije, ali bez potvrde ekonomske isplativosti
3. **Procena rudnih rezervi** podrazumeva fazu gde se kroz Preliminarnu ekonomsku analizu (PEA) i Prethodnu studiju izvodljivosti (PFS) geološki model ležišta integriše sa konceptualnim rudarskim planom. U ovoj fazi se određuju preliminarne granice kopa, granični sadržaj, osnovni tehnološki parametri i okvirni ekonomski pokazatelji. Upravo u ovom segmentu započinje proces konverzije dela mineralnih resursa u rezerve rude, uz primenu modifikujućih faktora
4. **Studija izvodljivosti (Feasibility Study)** podrazumeva detaljnu tehničku i ekonomsku razradu projekta, preciziranje kapitalnih i operativnih troškova, izbor optimalne varijante razvoja i konačnu klasifikaciju rezervi (Proved i Probable). Ova faza predstavlja osnov za donošenje investicione odluke.
5. **Detaljno projektovanje (Detailed Engineering / Detailed Design)** sledi nakon pozitivne investicione odluke i obuhvata razradu projektnih rešenja do nivoa izvršnih planova i tehničkih specifikacija. U ovoj fazi se definišu rudarski, građevinski i procesni detalji, vrši optimizacija rasporeda opreme i infrastrukture, izrađuju se tehnička dokumentacija za nabavku i realizaciju radova. Iako se geološka neizvesnost u ovoj etapi značajno smanjuje, rizici vezani za preciznost procene troškova, rokova i tehničke izvodljivosti ostaju prisutni.
6. **Izgradnja i razvoj rudnika (Construction & Development)** obuhvata realizaciju projektnih rešenja kroz infrastrukturne i rudarske radove, nabavku opreme i uspostavljanje operativnog sistema eksploatacije. U ovoj fazi geološka neizvesnost je značajno smanjena, ali rastu tehnički i finansijski rizici vezani za realizaciju projekta.
7. **Eksploatacija (Operation)** predstavlja fazu komercijalne proizvodnje, tokom koje se vrši kontinuirano prilagođavanje planova stvarnim uslovima na terenu. Dominantni rizici prelaze sa geoloških na operativne, tržišne i regulatorne faktore [2][8].

8. **Zatvaranje i sanacija (Closure & Decommissioning)** podrazumeva iscrpljivanje rezervi, rekultivaciju i sanaciju prostora uz ispunjavanje ekoloških i društvenih obaveza. Ova faza ima značajan uticaj na ukupnu ekonomsku i reputacionu održivost projekta.

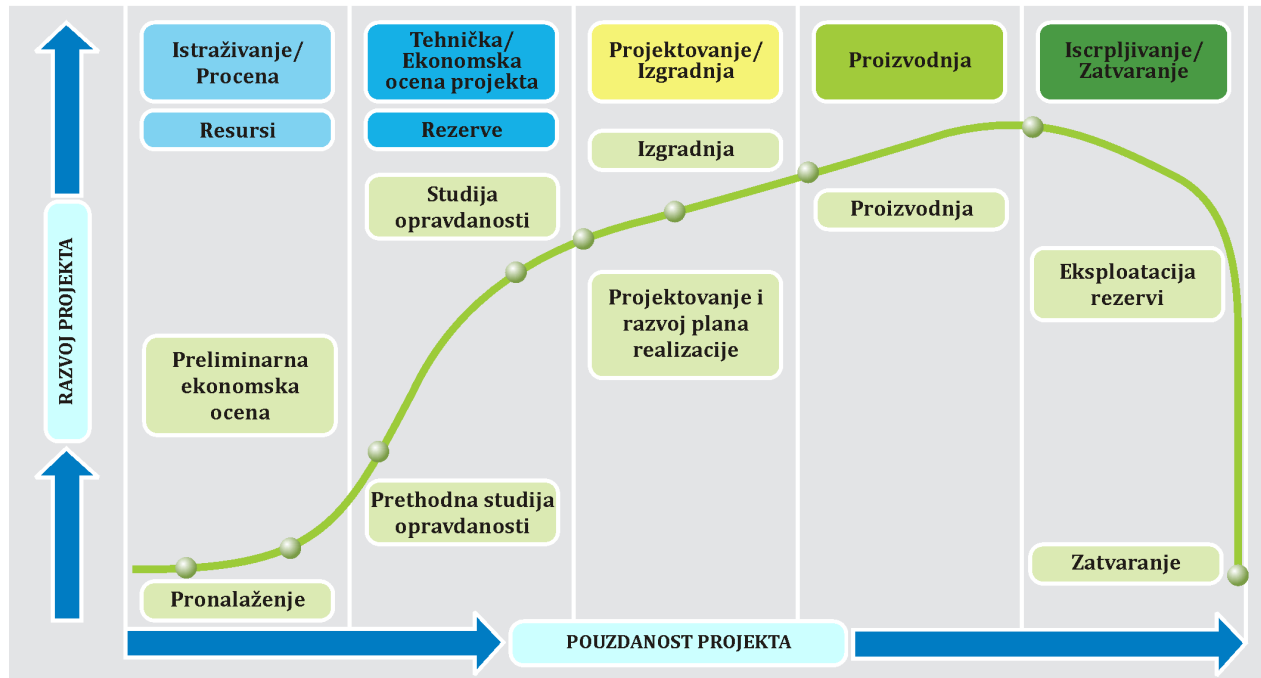


Slika 2.2. Linearni model životnog ciklusa rudarskog projekta

Svaka od ovih faza predstavlja posebnu celinu sa jasno definisanim ciljevima, skupom ulaznih podataka i kriterijumima za donošenje odluka.

Za razliku od mnogih drugih industrijskih projekata, rudarski projekti se zasnivaju na iscrpivom prirodnom resursu čija količina, kvalitet i prostorna distribucija nikada nisu u potpunosti poznati u trenutku donošenja inicijalnih investicionih odluka. Zbog toga se koncept životnog ciklusa rudarskog projekta u literaturi najčešće posmatra kao proces progresivne redukcije neizvesnosti, praćen postepenim povećanjem nivoa aktivnosti i detaljnosti planiranja (slika 2.3) [2] [11] [13].

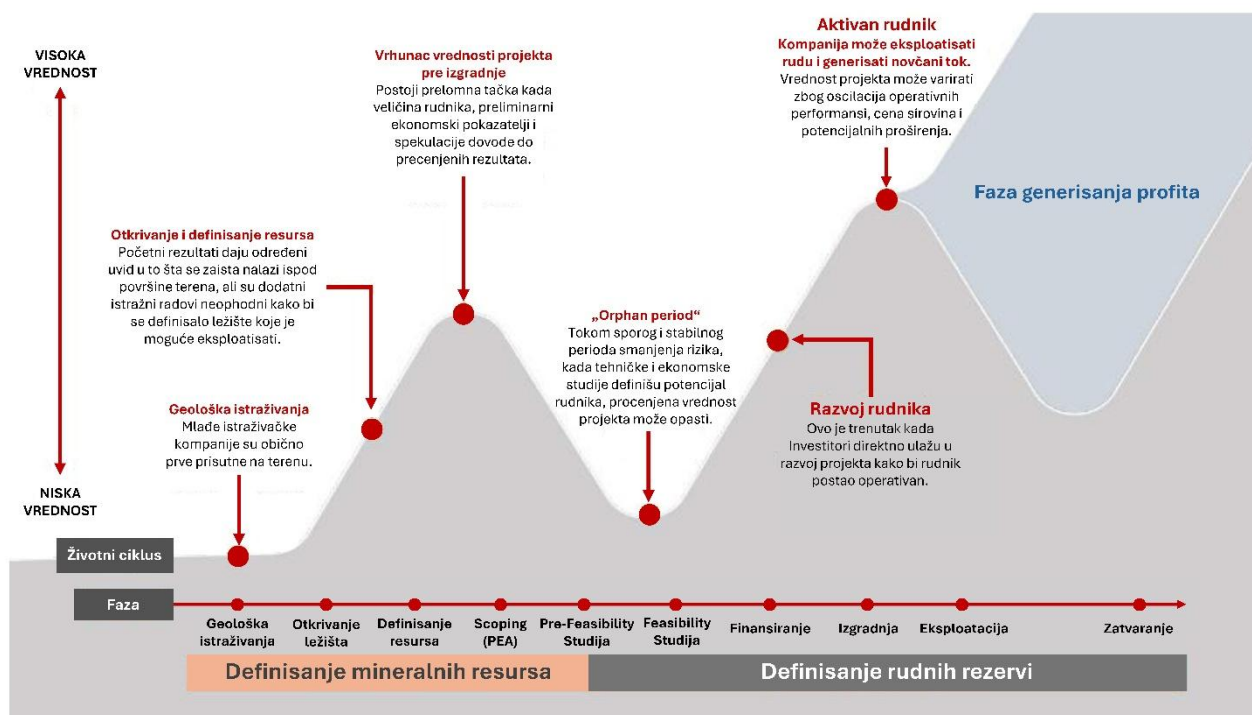
Na slici 2.3 prikazan je razvoj rudarskog projekta kroz ključne faze — od istraživanja i procene resursa, preko tehničko-ekonomske evaluacije i projektovanja, do izgradnje, eksploatacije i zatvaranja. Zelena kriva ilustruje rast pouzdanosti projekta sa napredovanjem faza, usled povećanja količine dostupnih podataka i unapređenja modela ležišta, dok svaku narednu fazu karakterišu viši nivo aktivnosti i veća složenost odlučivanja. U ranim fazama dominira geološka neizvesnost, koja se smanjuje kroz dodatna istraživanja, dok sa napredovanjem projekta raste značaj tehničkih, operativnih i ekonomskih faktora. U fazi izgradnje i eksploatacije geološki rizik je umanjen, dok sve izraženiji postaju operativni, tržišni i regulatorni rizici [2] [11] [13].



Slika 2.3. Faze razvoja rudarskog projekta sa prikazom promene pouzdanosti i nivoa aktivnosti kroz životni ciklus [15]

Iako se progresija projekta najčešće prikazuje kroz porast pouzdanosti podataka i tehničko-ekonomskih procena, razvoj rudnika može se analizirati i sa aspekta generisanja vrednosti tokom vremena. U tom kontekstu, pojedini autori ukazuju na postojanje dva ključna perioda rasta vrednosti rudarskog projekta koja se mogu uočiti na „Lassonde Curve (Lassondeova kriva)“ [16] [17] [18] [19]:

- 1) tokom faze istraživanja,
- 2) prilikom prelaska u komercijalnu proizvodnju (slika 2.4).



Slika 2.4. Prikaz stvaranja vrednosti kroz životni ciklus rudarskog projekta (Lassonde kriva) [16] [20]

U fazi istraživanja dolazi do rasta vrednosti projekta usled smanjenja geološke neizvesnosti i potvrde postojanja mineralnog potencijala. Tržište kapitala u ovoj fazi reaguje na nova otkrića i povećanje baze resursa, ali istovremeno projekat ostaje visoko rizičan. Nakon inicijalnog rasta često dolazi do perioda stagnacije ili čak pada vrednosti, posebno u fazi između potvrde resursa i obezbeđenja finansiranja za razvoj, što se u literaturi opisuje kao „development gap” ili „orphan period” [16] [17] [18].

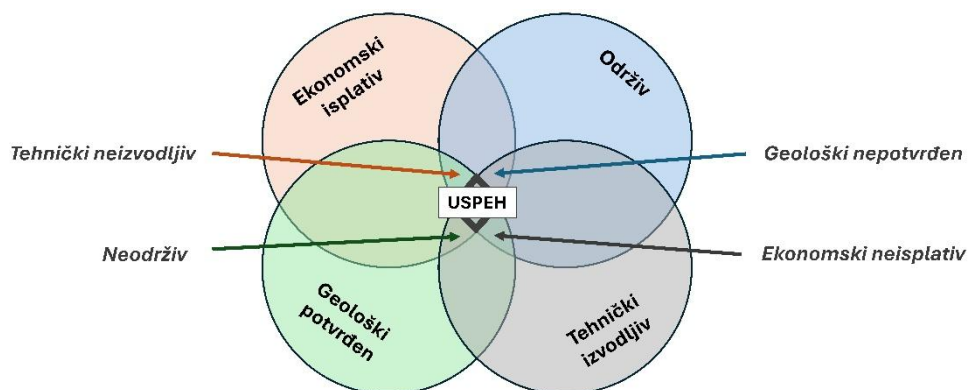
Drugi značajan rast vrednosti nastupa tek nakon završetka razvoja i početka eksploatacije, kada projekat prelazi iz spekulativne u operativnu fazu i počinje da generiše realne novčane tokove. Ovaj prelaz predstavlja transformaciju projekta iz visokorizične investicione opcije u aktivu sa stabilnijim profilom rizika i povrata [16] [17] [18].

U skladu sa tim se rudarski projekat može interpretirati kao niz sukcesivnih investicionih odluka, pri čemu svaka faza predstavlja opciju za nastavak ulaganja ili izlazak iz projekta. Ovakva interpretacija bliska je konceptu realnih opcija u upravljanju kapitalnim investicijama, gde se odluka o prelasku iz jedne faze u drugu zasniva na proceni odnosa između preostale neizvesnosti i očekivane vrednosti projekta [21].

Pored vremenske dimenzije, realizacija i uspeh rudarskog projekta definisan je istovremenim ispunjenjem četiri kritična uslova [17]:

- 1) **Geološka potvrđenost (Explorable/Discoverable)** – postojanje mineralnih resursa koji su adekvatno istraženi, definisani i prostorno ograničeni,
- 2) **Tehnička izvodljivost (Developable)** – mogućnost primene odgovarajućih rudarskih metoda i izgradnje neophodne infrastrukture u datim geološkim i prostornim uslovima,
- 3) **Ekonomska isplativost (Mineable)** – sposobnost projekta da generiše pozitivan novčani tok uz pokrivanje kapitalnih i operativnih troškova tokom životnog veka rudnika,
- 4) **Održivost (Sustainable)** – usklađenost projekta sa ekološkim, društvenim i upravljačkim (ESG) principima kroz sve faze razvoja, od istraživanja do zatvaranja rudnika.

Izostanak bilo kog od navedenih uslova dovodi do različitih oblika neuspeha rudarskog projekta, što je konceptualno prikazano na slici 2.5. Na primer, projekat može biti geološki pozitivno potvrđen i ekonomski privlačan, ali tehnički neizvodljiv (Undevelopable) zbog nepremostivih infrastrukturnih prepreka ili društveno neprihvatljiv (Unsustainable) ukoliko ne može da se izbori sa problemima uticaja na životnu sredinu tokom samog rada [17].



Slika 2.5. Integrisani prikaz ključnih faktora uspešnosti rudarskog projekta i mogućih scenarija neuspeha [17]

Savremeni koncept održivog rudarstva ne odnosi se samo na fazu nakon eksploatacije, već predstavlja baznu dimenziju koja se provlači kroz sve faze razvoja projekta. Iako je zatvaranje rudnika kritična tačka jer ne generiše prihode a stvara obaveze, održivost se osigurava još u fazi projektovanja. Projekat koji je ekonomski uspešan tokom rada ali zanemaruje ESG standarde, rizikuje gubitak „društvene dozvole za rad“ (Social License to Operate) ili generisanje gubitaka usled ekoloških nezgoda koje poništavaju ostvareni profit.

Ovaj koncept naglašava da uspeh rudarskog projekta nije određen isključivo veličinom i kvalitetom ležišta, već je rezultat interakcije geoloških, inženjerskih, tržišnih i društveno-socijalnih faktora. Ovakav pristup zahteva da se svaka strateška odluka donosi kroz sve četiri dimenzije istovremeno, osiguravajući da projekat ostane u centralnoj zoni „Uspeha“ (slika 2.5) tokom decenija svog trajanja [11] [17].

2.2.2. Linearni i iterativni pristupi razvoju rudarskog projekta

U literaturi i praksi rudarskog planiranja životni ciklus rudarskog projekta se najčešće prikazuje kao linearan sled sukcesivnih faza, od istraživanja ležišta do zatvaranja rudnika. Ovakav pristup ima značajnu metodološku vrednost jer omogućava jasno razgraničenje aktivnosti, odgovornosti i kriterijuma odlučivanja u svakoj etapi razvoja. Međutim, brojni autori ukazuju da linearni model predstavlja pojednostavljenje složenog procesa koji se u realnim uslovima odvija uz višestruke povratne veze (međusobne interakcije) i iterativne revizije ključnih parametara projekta [22] [23] [24] [25] [26].

Linearni model implicitno pretpostavlja da svaka faza proizvodi skup pouzdanih izlaznih informacija koje postaju stabilna osnova za narednu etapu. U takvom okviru, procena resursa prethodi proceni rezervi, studija izvodljivosti prethodi investicionoj odluci, a eksploatacija sledi nakon završetka projektovanja i izgradnje.

U praksi se ipak pokazalo da:

- rezultati Prethodne studije izvodljivosti mogu ukazati na potrebu za dodatnim istražnim radovima [27] [28] [29],
- promene tržišnih cena mogu zahtevati reviziju graničnog sadržaja i granica kopa [30] [31],
- operativni problemi mogu dovesti do korekcije modela ležišta [32] [33],
- regulatorni zahtevi i društveni faktori mogu usloviti izmene projektnih rešenja [34] [35].

Rendu [11] naglašava da procena vrednosti ležišta mineralnih sirovina nikada ne predstavlja jednokratan proces, već kontinuirano ažuriranje podataka u uslovima neizvesnosti [25]. Slično tome, Darling u svojoj knjizi „SME Mining Engineering Handbook“ [2] ističe da su studije izvodljivosti po svojoj prirodi iterativni dokument, kao i da su podložne reviziji kako se prikupljaju novi tehnički i tržišni podaci koji su bitni za razvoj projekta. Međunarodni standardi za izveštavanje o mineralnim resursima i rezervama (JORC [36], NI 43-101 [27], ili PERC [37]) takođe predviđaju redovno ažuriranje procena u skladu sa novim informacijama i promenama modifikujućih faktora, čime se potvrđuje da razvoj rudarskog projekta ne predstavlja strogo linearan proces.

U skladu sa tim se sve više ističe iterativni model razvoja rudarskog projekta, u kojem se faze životnog ciklusa posmatraju kao međuzavisni segmenti. Ovakav pristup podrazumeva postojanje povratnih veza (feedback loops) između faza, pri čemu nove informacije mogu retroaktivno uticati na ranije donete odluke. Time se proces razvoja transformiše u kontinuirano preispitivanje tehničkih, ekonomskih i institucionalnih parametara projekta [23].

Jedna od ključnih implikacija iterativnog modela jeste promena odnosa između fleksibilnosti odlučivanja i kapitalne izloženosti. U ranim fazama razvoja kada su ulaganja relativno ograničena, prostor za prilagođavanje projektnih rešenja je najveći. Moguće je redefinisati koncept eksploatacije, prilagoditi proizvodni kapacitet ili odustati od projekta uz relativno niske finansijske posledice. Kako projekat prelazi u faze detaljnog projektovanja, izgradnje i komercijalne proizvodnje, dolazi do rasta investicione nepovratnosti (capital irreversibility), dok se mogućnost fundamentalnih izmena progresivno smanjuje [38] [39] [40] [41].

Ovakva dinamika razvoja bliska je konceptu realnih opcija u upravljanju kapitalnim investicijama, prema kojem investicioni projekti predstavljaju niz sekvencijalnih odluka čija se vrednost zasniva na fleksibilnosti odlučivanja u uslovima neizvesnosti [42]. Umesto jedne velike odluke investitori razmatraju opcije odlaganja, proširenja ili napuštanja investicije. Time se osigurava da se kapital troši samo kada su uslovi povoljni, što je ključno za opstanak u promenljivom okruženju [38] [43].

Sa aspekta upravljanja rizikom linearni model često implicira da se rizik progresivno smanjuje kako projekat napreduje. Međutim, u okviru iterativnog pristupa rizik se ne eliminiše, već menja svoj karakter i distribuira kroz faze razvoja. Linearni model ima prvenstveno deskriptivnu funkciju, dok iterativni model ima analitičku i upravljačku vrednost, jer omogućava sagledavanje međuzavisnosti između faza razvoja i njihove refleksije na profil rizika tokom vremena. Takvo razumevanje predstavlja konceptualnu osnovu za integraciju kvantitativnih metoda planiranja sa formalnim okvirima upravljanja rizikom, što je od ključnog značaja u strateškom planiranju površinskih kopova.

2.2.3. Procene mineralnih resursa i rudnih rezervi

Procena mineralnih resursa i rudnih rezervi predstavlja ključnu tehničku i regulatornu osnovu za razvoj rudarskog projekta. Sve kasnije faze planiranja koje uključuju preliminarne ekonomske analize i strateške odluke o investiranju, direktno zavise od pouzdanosti i interpretacije rezultata ove procene [2] [11].

U savremenoj rudarskoj praksi procene se sprovode u skladu sa međunarodno priznatim standardima za izveštavanje, koji su u velikoj meri usklađeni sa CRIRSCO International Reporting Template [44], kao krovnim međunarodnim okvirom za klasifikaciju i izveštavanje o mineralnim resursima i rezervama. U okviru CRIRSCO standarda najznačajniji su:

- JORC Code (Australian Joint Ore Reserves Committee) [36],
- PERC Reporting Standard (Pan-European Reserves & Resources Reporting Committee) [37],
- CIM Guidelines (CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines) [45],
- SME Guide (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, USA) [46],

kao i regulatorni dokument NI 43-101 u Kanadi [27], koji se oslanja na CIM definicije.

Ovi standardi uvode jasnu terminološku i metodološku razliku između:

- Mineralnih resursa (Resources)
- Rudnih rezervi (Reserves)

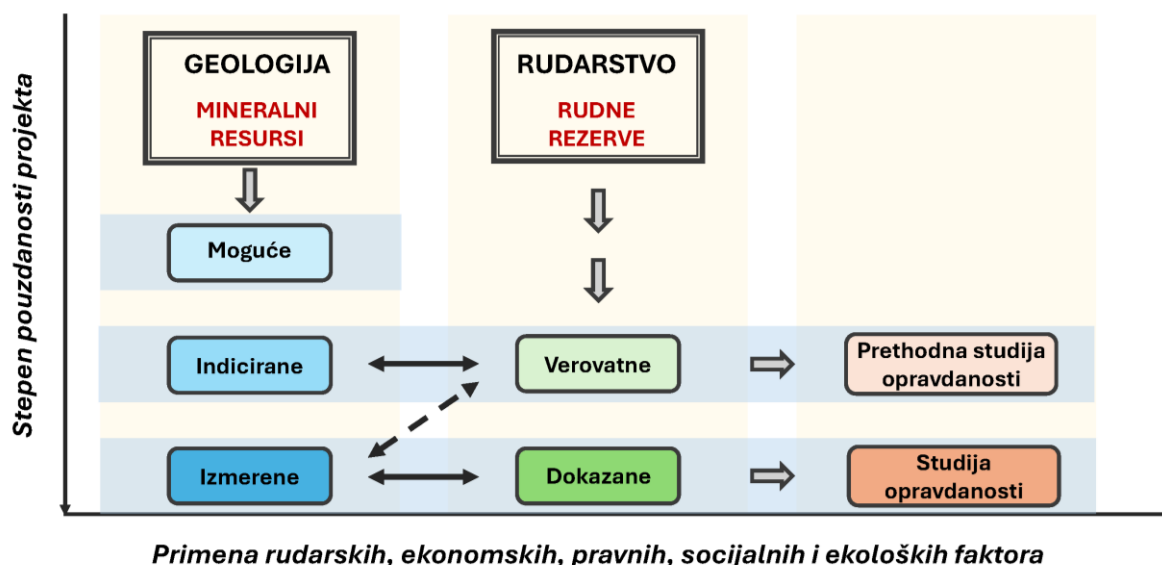
Mineralni resursi predstavljaju koncentraciju ili pojavu mineralnog materijala u Zemljinoj kori za koju postoje razumne geološke pretpostavke o količini, kvalitetu i prostornom rasporedu, ali bez potvrde ekonomske isplativosti [36].

Resursi se dele na [36] [27] [37]:

- Inferred Resource (Mogući resursi) – zasnovani na ograničenim geološkim podacima i široj interpretaciji kontinuiteta; nivo pouzdanosti je nizak i ne omogućava konverziju u rudne rezerve. Iako se u određenim regulatornim okvirima može koristiti u preliminarnoj ekonomskoj analizi (PEA), rezultati takvih analiza smatraju se konceptualnim i visoko neizvesnim.
- Indicated Resource (Indicirani resursi) – zasnovani na dovoljnom broju istražnih podataka koji omogućavaju preliminarnu procenu kontinuiteta i geoloških karakteristika; može predstavljati osnovu za preliminarnu ekonomsku analizu.
- Measured Resource (Izmereni resursi) – najviši nivo geološke pouzdanosti; podaci omogućavaju detaljnu tehničku i ekonomsku evaluaciju (slika 2.6).

Rudne rezerve predstavljaju deo resursa za koji je dokazano da se može tehnički i ekonomski eksploatirati pod definisanim uslovima, odnosno kroz primenu modifikujućih faktora. Rezerve se klasifikuju na [36] [27] [37]:

- Probable Reserve (Verovatne rezerve) – deo Indiciranih (a ponekad i Izmerenih) resursa za koji je kroz najmanje Pre-Feasibility (Prethodna studija izvodljivosti) nivo analize potvrđena ekonomska izvodljivost.
- Proved Reserve (Dokazane rezerve) – deo Izmerenih resursa sa najvišim stepenom tehničke i ekonomske pouzdanosti, potvrđen kroz detaljnu Studiju izvodljivosti (slika 2.6).

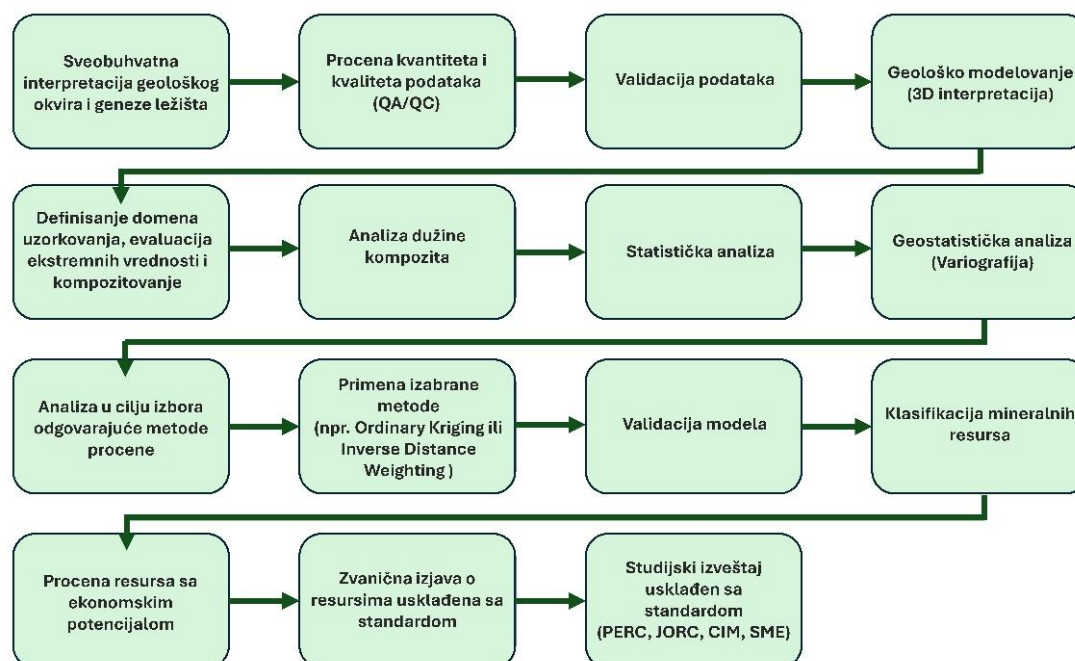


Slika 2.6. Prevođenje mineralnih resursa u rudne rezerve [36]

Proces procene resursa zasniva se na sledećim koracima [47] [48]:

- U početnoj fazi vrši se verifikacija i validacija podataka (QA/QC), koja obuhvata proveru kvaliteta laboratorijskih analiza, tačnosti koordinata bušotina i konzistentnosti baze podataka. Pouzdanost procene direktno zavisi od kvaliteta ulaznih podataka, zbog čega ova faza predstavlja osnovu celokupnog procesa.
- Nakon toga sledi geološko i strukturno modeliranje, kojim se definišu trodimenzionalni domeni mineralizacije na osnovu litoloških, strukturnih i mineraloških karakteristika ležišta. Ova faza omogućava razgraničenje različitih tipova rude i uspostavljanje geološkog okvira za dalju analizu.
- U narednom koraku sprovodi se statistička analiza podataka, uključujući identifikaciju i tretman ekstremnih vrednosti (top-cutting), čime se sprečava precenjenost resursa usled prisustva abnormalno visokih sadržaja. Paralelno sa tim vrši se kompozitovanje uzoraka, odnosno svođenje podataka na jedinstvene dužine intervala, čime se obezbeđuje njihova statistička uporedivost.
- Sledeća faza obuhvata geostatističku analizu, pre svega variografsku analizu, kojom se modelira prostorni kontinuitet i korelacija sadržaja unutar ležišta. Na osnovu definisanog variograma vrši se izbor odgovarajuće metode procene i parametara interpolacije.
- U fazi procene sadržaja, vrednosti se interpoliraju u blok model primenom metoda kao što su Ordinary Kriging (OK) ili Inverse Distance Weighting (IDW), čime se formira kvantitativna osnova za procenu resursa.
- Dobijeni blok model zatim prolazi kroz proces validacije, koji podrazumeva upoređivanje procenjenih vrednosti sa originalnim podacima bušotina, kako na lokalnom tako i na globalnom nivou, u cilju provere tačnosti i pouzdanosti modela.
- U završnoj fazi vrši se klasifikacija resursa, pri čemu se resursi kategorizuju u Moguće (Inferred), Indicirane (Indicated) i Izmerene (Measured), u skladu sa stepenom geološke pouzdanosti, gustinom istražne mreže i kvalitetom podataka.

Celokupan proces se završava izradom izjave o resursima i izveštaja u skladu sa međunarodnim standardima (npr. PERC, JORC ili NI 43-101), čime se obezbeđuje transparentnost i uporedivost rezultata procene (slika 2.7).



Slika 2.7. Proces procene mineralnih resursa [47] [48]

Pouzdanost procene zavisi od gustine istražnih radova, kvaliteta uzorkovanja, validnosti geološke interpretacije i primenjene geostatističke metodologije. Rossi i Deutsch [47] naglašavaju da blok model uvek predstavlja pojednostavljenu aproksimaciju kompleksne i prostorno varijabilne mineralizacije. U tom kontekstu, podela na kategorije (Inferred–Indicated–Measured) služi kao diskretni okvir za prikazivanje inače kontinuiranog spektra geološke neizvesnosti.

Upravo u toj tački javlja se jedan od prvih i najznačajnijih izvora neizvesnosti. Geološki model ne može u potpunosti reflektovati prirodnu kompleksnost ležišta, s obzirom da je on stručna interpretacija izvedena iz ograničenog broja podataka. Oslanjajući se na poznatu naučnu paradigmu da su „svi modeli pogrešni, ali su neki korisni“ [49], važno je prepoznati da svaki model predstavlja samo aproksimaciju stvarnosti, čija upotrebna vrednost zavisi od stepena odstupanja od stvarnog stanja u ležištu [50].

Kada se jednom definiše geološki okvir i kvantifikuje nivo poverenja u resurse, sledeći kritičan korak je ispitivanje njihove tehničke i ekonomske održivosti. Konverzija resursa u rezerve označava upravo taj prelazak iz domena geološkog potencijala u sferu tehničko-ekonomske izvodljivosti. Kako bi se obezbedila realna osnova za eksploataciju, vrši se rigorozna primena modifikujućih faktora. Prema prethodno pomenutim međunarodnim standardima za izveštavanje ovi faktori obuhvataju rudarske, metalurške, infrastrukturne, ekonomske, tržišne, ekološke, društvene i regulatorne parametre koji resurse transformišu u rezerve [36].

U savremenoj inženjerskoj praksi proces konverzije podrazumeva integraciju geološkog modela sa rudarskim planiranjem i ekonomskom evaluacijom, pri čemu se koriste kompleksni optimizacioni algoritmi za definisanje granica eksploatacije, graničnog sadržaja i dugoročnog plana proizvodnje. O metodama strateškog planiranja površinskih kopova i primeni ovih algoritama biće detaljnije reči u poglavlju 2.4. Takođe, imajući u vidu da modifikujući faktori direktno utiču na konačnu procenu rezervi i projektovanu ekonomsku vrednost, oni će biće posebno analizirani s obzirom na njihovu ključnu ulogu u razvoju i primeni hibridnog modela upravljanja rizikom.

Važno je naglasiti da međunarodni standardi za izveštavanje prvenstveno definišu kriterijume klasifikacije, transparentnosti i minimalne tehničke pouzdanosti procena, dok eksplicitno modelovanje neizvesnosti ulaznih parametara i njihovog uticaja na krajnje ekonomske pokazatelje projekta nije u njihovom formalnom domenu. Time se razlikuje regulatorni okvir izveštavanja od analitičkog okvira kvantifikacije rizika i procene varijabilnosti projektnih ishoda.

Stoga procena mineralnih resursa i rudnih rezervi ne predstavlja samo tehničku operaciju kvantifikacije mineralizacije, već ključnu fazu u kojoj se formira početni okvir ekonomskih pretpostavki i strateškog profila rizika rudarskog projekta. Neizvesnost geoloških podataka, interpretacije modela i primene modifikujućih faktora direktno se reflektuje na ekonomske pokazatelje projekta, posebno u ranim fazama razvoja kada su odluke o nastavku ulaganja najosetljivije. Razumevanje izvora, strukture i dometa ove neizvesnosti predstavlja osnov za preliminarnu ekonomsku evaluaciju projekta, koja će biti razmotrena u narednom poglavlju, kao i za integraciju kvantitativnih pristupa u okviru hibridnog modela upravljanja rizikom.

2.2.4. Preliminarna ekonomska analiza i strateško pozicioniranje

Preliminarna ekonomska analiza (Preliminary Economic Assessment – PEA) predstavlja prvi formalni korak u kojem se geološka procena resursa integriše sa konceptualnim rudarskim planom i osnovnim ekonomskim parametrima projekta. U regulatornom smislu, PEA se definiše kao studija nižeg nivoa pouzdanosti u odnosu na Pre-Feasibility (PFS) i Feasibility (FS) studije, ali sa jasno definisanom svrhom – procenom osnovne ekonomske opravdanosti projekta [36] [27] [51] [52]

Za razliku od Pre-Feasibility (PFS) i Feasibility (FS) studija, Preliminarna ekonomska analiza (PEA) može uključivati i deo Inferred Resources, uz jasno naglašavanje njihove geološke neizvesnosti i ograničenja u pogledu konverzije u rezerve. Time PEA predstavlja fazu u kojoj je nivo tehničke i

geološke neizvesnosti i dalje značajan, dok se istovremeno donose prve strateške investicione odluke [27].

U okviru PEA analize procenjuju se [51] [53]:

- preliminarne granice eksploatacije i koncept rudarskog sistema,
- proizvodni kapacitet i okvirna dinamika razvoja,
- kapitalni i operativni troškovi na konceptualnom nivou,
- diskontovani novčani tokovi (NPV, IRR),
- analiza osetljivosti na ključne parametre (cena, sadržaj, trošak, diskontna stopa).

PEA predstavlja prvi trenutak u kojem ležište mineralnih sirovina dobija određenu vrednost kroz ekonomske pokazatelje. U toj fazi dolazi do direktnog susreta geološke neizvesnosti i tehničko-ekonomskih pretpostavki, pri čemu varijabilnost ulaznih podataka (geološki model ležišta, cena metala, operativni troškovi, parametri iskorišćenja, diskontna stopa) može imati presudan uticaj na to da li će projekat biti ocenjen kao profitabilan.

Zbog toga se PEA u praksi često smatra ključnim „Go/No-Go“ korakom, jer omogućava investitorima i kompanijama da procene da li projekat poseduje potencijal za dalja ulaganja u detaljnije studije i razvoj. Odluka doneta u ovoj fazi ima strateški karakter, budući da projekat i dalje poseduje relativno visoku fleksibilnost, ali istovremeno i značajnu neizvesnost.

Tok tehničko-ekonomske dokumentacije u rudarskim projektima može se sistematizovati kroz tri osnovna nivoa studija: PEA (Preliminary Economic Assessment), PFS (Pre-Feasibility) i FS (Feasibility), pri čemu svaki naredni nivo podrazumeva veći stepen tehničke razrade, preciznosti procene troškova i smanjenja neizvesnosti (tabela 2.1) [54].

Tabela 2.1. Karakteristike i nivoi tačnosti PEA, PFS i FS studija [54]

Kriterijum	Tehničko-ekonomske studije		
Studija	Preliminarna ekonomska analiza (PEA)	Prethodna studija izvodljivosti (PFS)	Studija izvodljivosti (FS)
Koncept	*Šta bi moglo biti*	*Šta bi trebalo da bude*	*Šta će biti*
Cilj	Rana konceptualna procena <u>potencijalne ekonomske isplativosti mineralnih resursa</u>	Realne ekonomske i inženjerske studije dovoljne da <u>dokažu ekonomsku isplativost</u> i utvrde mineralne rezerve.	Detaljna studija izgradnje rudnika, koja služi kao osnova za <u>donošenje odluke o proizvodnji</u> .
Tačnost troškova	+/- 50%	+/-25%	+/-15%
Nivo inženjeringa	<1%	1-5%	5-25%
Ulazni podaci	Mogući / Indicirani / Izmereni resursi	Indicirani i izmereni resursi	
Izlazni rezultati	Mogući / Indicirani / Izmereni resursi	Dokazane i verovatne rezerve	

Kao što je prikazano u tabeli 2.1, PEA predstavlja konceptualnu procenu (“šta bi moglo biti”), sa procenjenom tačnošću troškova od približno $\pm 50\%$ i ograničenim obimom inženjerske razrade ($<1\%$). PFS povećava tehničku pouzdanost i smanjuje raspon greške ($\pm 25\%$), dok FS predstavlja detaljnu studiju (“šta će biti”) sa visokom preciznošću troškova ($\pm 15\%$) i značajno razvijenim inženjerskim rešenjima [54].

Posebno je važno uočiti da PEA može uključivati Inferred, Indicated i Measured resurse, dok konverzija u rezerve (Proven & Probable) prema zvaničnim standardima zahteva najmanje Pre-Feasibility (PFS) nivo razrade. Shodno tome, preliminarno određene granice eksploatacije u PEA fazi ne definišu rezerve, već identifikuju deo mineralnih resursa koji pokazuje ekonomski potencijal pod pretpostavljenim tehničko-ekonomskim parametrima. Time se jasno potvrđuje da PEA funkcioniše u uslovima povišene geološke, tehničke i tržišne neizvesnosti.

Ipak, savremena praksa pokazuje da u određenim uslovima rudnici mogu biti razvijeni i na osnovu PEA nivoa analize, naročito kod projekata manjeg obima, jednostavne geometrije ležišta i niske tehničke kompleksnosti. Prema Daniels-u [54], projekti koji se razvijaju na osnovu PEA karakterišu:

- relativno jednostavna geologija i niski zahtevi za otkrivanjem,
- ograničena tehnička kompleksnost prerade,
- dobra infrastrukturna pozicija i povoljan regulatorni okvir,
- visoka tolerancija investitora na rizik,
- niži kapitalni zahtevi u ranoj fazi.

Takvi projekti su najčešće manjih razmera, sa kraćim periodom povrata investicije i nižim apsolutnim iznosima kapitalne izloženosti. Međutim, njihov razvoj podrazumeva preuzimanje povećanog nivoa tehničke i tržišne neizvesnosti.

Kako projekat napreduje ka PFS i FS nivou, preciznost procene troškova i tehničkih parametara se povećava, ali se istovremeno smanjuje fleksibilnost fundamentalnih izmena koncepta projekta, usled rasta kapitalne izloženosti i investicione nepovratnosti.

U tom kontekstu, preliminarne ekonomska analiza predstavlja optimalnu tačku za primenu kvantitativnih metoda koje eksplicitno modeluju neizvesnost ulaznih parametara i njihov uticaj na ekonomske pokazatelje. Upravo u ovoj fazi hibridni model razvijen u okviru ove disertacije dobija svoju punu primenljivost, jer omogućava:

- kvantifikaciju raspona mogućih ekonomskih ishoda,
- procenu verovatnoće negativnog finansijskog rezultata,
- podršku strateškoj odluci o nastavku razvoja projekta u uslovima neizvesnosti.

Na taj način, PEA se može posmatrati ne samo kao tehnički dokument preliminarne evaluacije, već i kao jedna od ključnih faza strateškog pozicioniranja projekta u odnosu na rizik, vrednost i dugoročnu održivost.

2.3. Upravljanje rizikom u rudarskim projektima

Rudarski projekti se po svojoj prirodi odlikuju visokim stepenom složenosti, kapitalne zahtevnosti i izloženosti brojnim izvorima neizvesnosti koji mogu značajno uticati na njihovu uspešnu realizaciju. Od geoloških uslova, preko tržišnih fluktuacija i regulatornih zahteva, pa do tehničkih kvarova i organizacionih ograničenja, svaki segment rudarskog sistema nosi sa sobom potencijalne rizike. Upravo zbog toga, upravljanje rizikom postaje ključna komponenta u donošenju strateških i operativnih odluka tokom celog životnog ciklusa rudarskog projekta.

U okviru ovog poglavlja razmatraju se osnovni pojmovi i principi upravljanja rizikom, sa akcentom na njegovu primenu u rudarstvu. Biće predstavljene definicije, klasifikacije i komponente rizika, kao i specifičnosti koje ga izdvajaju u rudarskom kontekstu. Takođe, razmatraju se različiti teorijski i praktični pristupi koji se primenjuju u analizi i tretmanu rizika u okviru rudarskih projekata.

2.3.1. Pojam i definicija rizika

Rizik predstavlja jedan od centralnih pojmova u planiranju i donošenju odluka u inženjerskim sistemima, a posebno u rudarstvu gde je svaki projekat izložen velikom broju unutrašnjih i spoljašnjih neizvesnosti. Iako se termin često koristi u svakodnevnom jeziku kao sinonim za opasnost, u inženjerskom i upravljačkom kontekstu rizik ima jasno definisano značenje. On se ne odnosi isključivo na negativne posledice, već na efekat neizvesnosti na postavljene ciljeve, što podrazumeva i mogućnost pozitivnih ishoda ukoliko se rizikom upravlja na adekvatan način [55].

Prema međunarodnom standardu ISO 31000:2018, rizik se definiše kao „efekat neizvesnosti na ciljeve“ [56]. Ovakva definicija polazi od činjenice da se svako planiranje odvija u kontekstu ograničene predvidljivosti, pri čemu efekat može biti negativan (npr. finansijski gubitak) ili pozitivan (npr. iskorišćena prilika). U rudarskoj praksi se rizik uglavnom posmatra kao negativno odstupanje od očekivanih tehničko-ekonomskih rezultata i kao takav se kvantitativno opisuje kroz parametre kao što su verovatnoća pojave i težina posledica [57].

Ključne komponente rizika su:

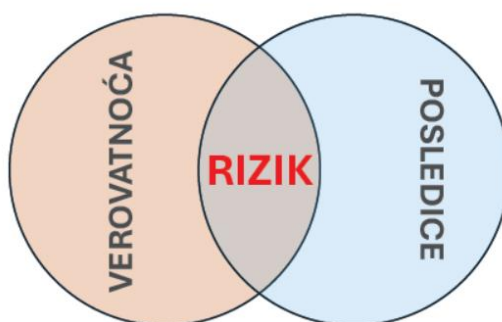
- verovatnoća (ili frekvencija) da neki neželjeni događaj nastane, i
- posledica koju taj događaj izaziva po sistem, odnosno po ostvarenje definisanih ciljeva [58].

Na osnovu toga, rizik se često izražava kao proizvod verovatnoće i posledice (slika 2.8):

$$\text{Rizik} = P \times C \quad (2.1)$$

gde je:

- P - verovatnoća pojave događaja, a
- C - težina posledice.



Slika 2.8. Komponente rizika: verovatnoća i posledice

Iako je ova formula pojednostavljena, u realnim inženjerskim sistemima se često koriste i proširene varijante koje uključuju višekriterijumske i vremenski zavisne faktore.

Važno je naglasiti i razliku između rizika, neizvesnosti i opasnosti [59]:

- Neizvesnost predstavlja nedostatak sigurnosti u informacijama ili predviđanjima, bez obzira na posledicu.
- Opasnost predstavlja potencijalni izvor negativnih efekata, ali ne podrazumeva nužno verovatnoću ni konkretnu posledicu.
- Rizik je vezan za konkretan scenario u kojem neizvesnost dovodi do posledice sa određenom verovatnoćom.

Ovakvo tumačenje je posebno važno u rudarstvu, gde neizvesnosti mogu biti rezultat složene geološke prirode ili fluktuacija tržišnih cena. Razumevanje prirode rizika, njegovih komponenti i načina na koji se isti procenjuje, predstavlja osnov za kreiranje sistema koji su otporniji na poremećaje i koji omogućavaju donošenje odluka u uslovima ograničene predvidljivosti.

Savremeni modeli upravljanja rizikom nastoje da prevaziđu isključivo reaktivne pristupe i da uvedu proaktivnu strategiju, odnosno pristup gde se rizici identifikuju i analiziraju unapred, pri čemu se definišu granice prihvatljivog rizika, mehanizmi kontrole i strategije za ublažavanje [60]. Takav pristup omogućava integraciju upravljanja rizikom u strateško planiranje, što je naročito važno za projekte površinske eksploatacije koji podrazumevaju velike investicije, dugačak životni vek i ograničene mogućnosti za korekcije nakon početka eksploatacije.

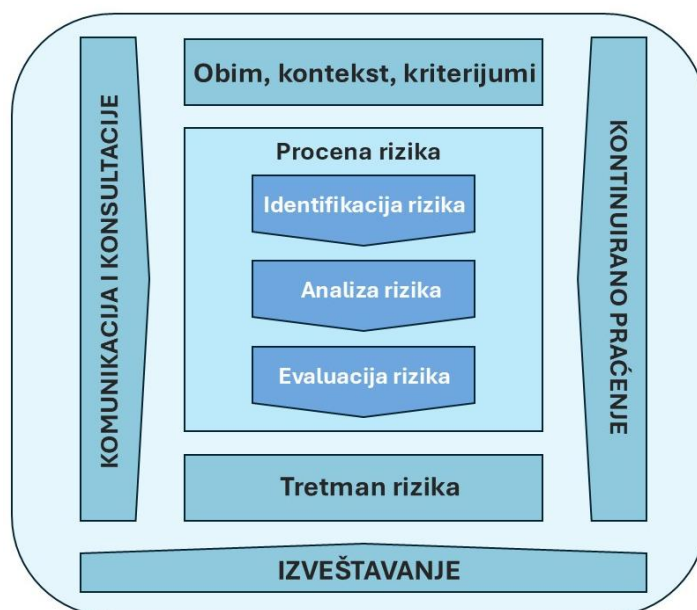
2.3.2. Faze u procesu upravljanja rizikom

Upravljanje rizikom nije jednokratni događaj, već kontinuiran i iterativan proces koji pomaže organizacijama da donose bolje odluke u uslovima neizvesnosti. Standard ISO 31000 definiše proces upravljanja rizikom kao sistematičan, iterativan i integrisan skup aktivnosti koje se primenjuju kroz ceo životni ciklus projekta ili organizacije [56]. Proces je univerzalan (primenljiv u svim sektorima) i u rudarstvu se može primeniti kroz sve faze razvoja rudarskih projekata (od istraživanja ležišta do zatvaranja rudnika).

Prema aktuelnoj verziji međunarodnog standarda ISO 31000:2018 [56], proces efikasnog upravljanja rizicima se sastoji od sledećih faza:

- 1) Komunikacija i konsultovanje (Communication & Consultation)
- 2) Uspostavljanje konteksta (Scope, Context and Criteria)
- 3) Analiza rizika (Risk Analysis)
- 4) Evaluacija rizika (Risk Evaluation)
- 5) Tretman rizika (Risk Treatment)
- 6) Praćenje i preispitivanje (Monitoring & Review)
- 7) Dokumentovanje i izveštavanje (Recording & Reporting)

Celokupan proces je ilustrovan na slici 2.9.



Slika 2.9. Faze u procesu upravljanja rizikom - ISO 31000:2018 [56]

Kao što je prikazano na slici 2.9, proces je predstavljen u obliku integrisanog ciklusa, gde se centralni deo odnosi na procenu rizika, dok komunikacija, praćenje i dokumentovanje predstavljaju kontinuirane aktivnosti koje prate sve faze.

Prva faza procesa odnosi se na komunikaciju i konsultovanje sa svim relevantnim zainteresovanim stranama. Ova aktivnost se ne sprovodi linearno, već paralelno sa svim ostalim fazama procesa. Njen cilj je obezbeđivanje razmene informacija, usaglašavanje percepcije rizika i transparentnost u donošenju odluka. U kontekstu rudarskih projekata ovaj proces bi podrazumevao koordinaciju između menadžmenta, tehničkog tima, finansijskih analitičara i eksternih regulatornih tela.

Nakon toga sledi uspostavljanje konteksta (Scope, Context and Criteria), koje predstavlja temelj celokupnog procesa. U ovoj fazi definišu se interni i eksterni faktori koji utiču na projekat, kao i kriterijumi za vrednovanje rizika. Jasno definisani kriterijumi (npr. prihvatljiv nivo finansijskog

gubitka, granične vrednosti odstupanja troškova ili proizvodnje) omogućavaju doslednu i objektivnu procenu rizika u narednim fazama.

Centralni deo procesa predstavlja procena rizika (Risk Assessment), koja obuhvata identifikaciju, analizu i evaluaciju rizika. Identifikacija rizika podrazumeva sistematsko utvrđivanje potencijalnih izvora neizvesnosti i neželjenih događaja. Analiza rizika obuhvata procenu verovatnoće i posledica identifikovanih rizika, bilo kvalitativno ili kvantitativno. Evaluacija rizika podrazumeva poređenje rezultata analize sa prethodno definisanim kriterijumima i donošenje odluke o potrebi njihovog tretmana. Na slici 2.9 je ova faza grafički istaknuta kao centralni deo procesa, čime se naglašava njen ključni značaj.

Na fazu procene nadovezuje se faza tretmana rizika, koja obuhvata izbor i implementaciju odgovarajućih mera upravljanja. Strategije tretmana mogu uključivati izbegavanje, smanjenje, prenos ili prihvatanje rizika. U rudarskim projektima to može značiti dodatna geološka istraživanja, optimizaciju dinamike eksploatacije, tehničke modifikacije projekta ili primenu mehanizama finansijske zaštite.

Praćenje i preispitivanje (Monitoring & Review) prikazana je na slici 2.9 kao vertikalni element koji obuhvata čitav proces i naglašava dinamičku prirodu upravljanja rizikom. S obzirom na to da se uslovi poslovanja, tržišni parametri i tehničke pretpostavke menjaju tokom vremena, proces zahteva kontinuirano ažuriranje i prilagođavanje.

Na kraju, dokumentovanje i izveštavanje predstavljaju osnovu transparentnosti i usklađenosti procesa. Sistematsko evidentiranje svih faza, odluka i rezultata omogućava reviziju, institucionalno unapređenje i usklađenost sa regulatornim i profesionalnim standardima.

2.3.3. Rizici u rudarstvu — specifičnosti, klasifikacija i dominantni faktori

Iako se svi industrijski sektori suočavaju sa određenim oblicima rizika, upravljanje rizikom u rudarstvu poseduje niz specifičnosti koje ga izdvajaju u odnosu na druge industrijske sektore. Ove specifičnosti proizilaze iz složene prirode geoloških uslova koji su delom van kontrole čoveka, što uz visoku kapitalnu intenzivnost i decenijske investicione cikle, stvara jedinstven okvir izloženosti.

U rudarstvu se odluke donose na osnovu podataka koji su često nepotpuni ili nesigurni, dok se njihove implikacije manifestuju kroz dugoročnu finansijsku i operativnu stabilnost. Pored prirodnih faktora, uspešnost eksploatacije je direktno povezana i sa spoljašnjim faktorima, uključujući tržište sirovina, regulativu, političku stabilnost i odnos sa lokalnom zajednicom.

U tom kontekstu, identifikacija i sistematizacija rizika postaju ključne komponente efikasnog upravljanja rudarskim projektima. Iako se konkretni faktori rizika mogu razlikovati od slučaja do slučaja, iskustva iz industrijske prakse i rezultati brojnih istraživanja ukazuju na visok stepen sličnosti u načinu na koji se ovi rizici prepoznaju i kategorizuju. Savremeni pristupi ne podrazumevaju samo prepoznavanje potencijalnih izvora rizika, već i procenu njihove važnosti u odnosu na različite interesne strane (investitore, lokalne zajednice, države i društvo u celini).

Kao odgovor na potrebu za jasnijom strukturom, Rendu [11] predlaže klasifikaciju rudarskih rizika u tri osnovne grupe:

1. Finansijski rizici

Obuhvataju sve faktore koji mogu uticati na isplativost i održivost investicije:

- Operativni troškovi (troškovi otkopavanja, prerade, energenti), inflacija, trošak radne snage
- Promene cena proizvoda i valutni rizici
- Troškovi zatvaranja rudnika i rekultivacije
- Sposobnost finansiranja projekta

2. Tehnički i operativni rizici

Ova grupa rizika vezana je za tehničku izvodljivost, performanse sistema i pouzdanost ulaznih podataka:

- Pouzdanost geološkog modela ležišta
- Adekvatna procena iskorišćenja u preradi i metalurgiji
- Produktivnost opreme i procesa (planirano u odnosu na ostvareno)
- Neplanirani zastoji, kvarovi, problemi u lancu snabdevanja
- Infrastrukturni zahtevi (saobraćajna infrastruktura, voda, struja, IT sistemi)

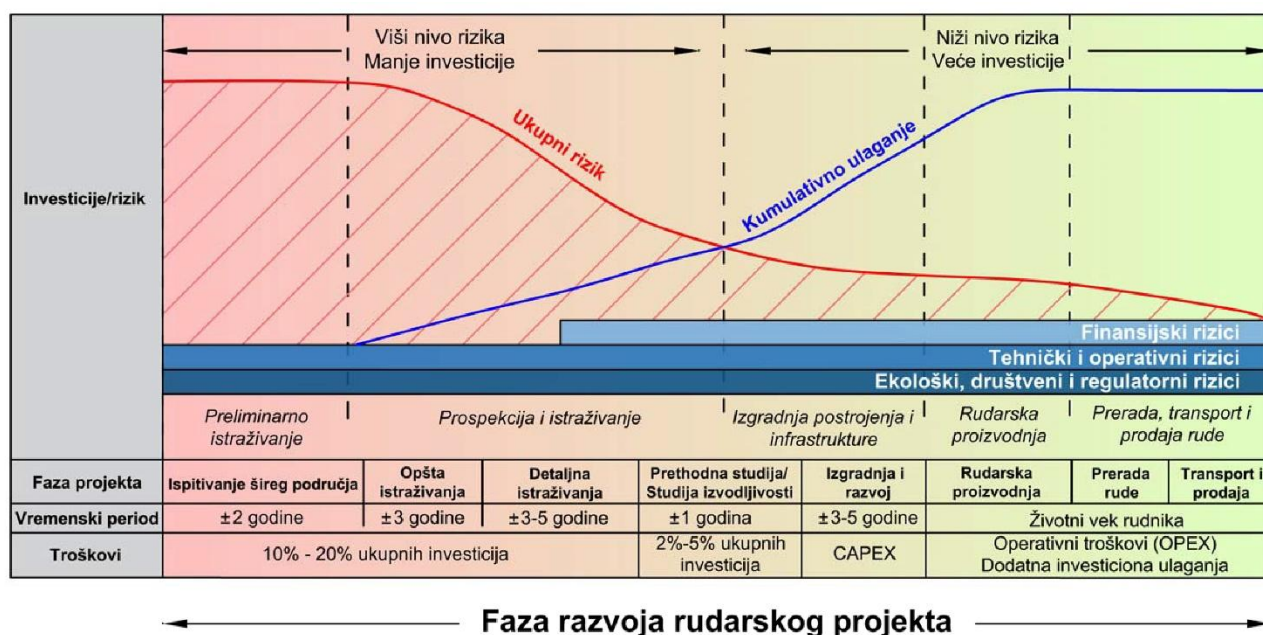
3. Ekološki, društveni i regulatorni rizici (ESG)

Uključuju eksterno nametnute rizike koji mogu uticati na dozvole, prihvatanje i kontinuitet projekta:

- Dozvole, prava na eksploataciju, zakonska regulativa
- Ekološki standardi i sprovođenje mera za zaštitu životne sredine
- Odnosi sa zajednicom i stepen društvene prihvaćenosti projekta
- Poreski režimi, nadoknade za korišćenje resursa
- Klimatske promene, politička stabilnost, nevladine organizacije

U skladu sa navedenom klasifikacijom, važno je naglasiti da se priroda i intenzitet rizika značajno menjaju tokom različitih faza razvoja rudarskog projekta. Upravljanje rizikom zahteva sveobuhvatan pristup koji uzima u obzir dinamiku neizvesnosti od faze preliminarnog istraživanja do aktivnosti zatvaranja rudnika. Svaka od ovih faza nosi karakteristične oblike rizika koji zavise od tehničkog konteksta, regulatornog okruženja, tržišnih okolnosti i prirode ležišta. Shodno tome, efikasno upravljanje rizicima mora biti dinamičko i fazno strukturirano.

Na slici 2.10 prikazan je odnos između investicija i nivoa rizika tokom razvoja rudarskog projekta. Primetno je da su rizici najveći u početnim fazama (naročito geološki), dok se intenzitet ulaganja povećava u kasnijim fazama kada je neizvesnost značajno smanjena [61].



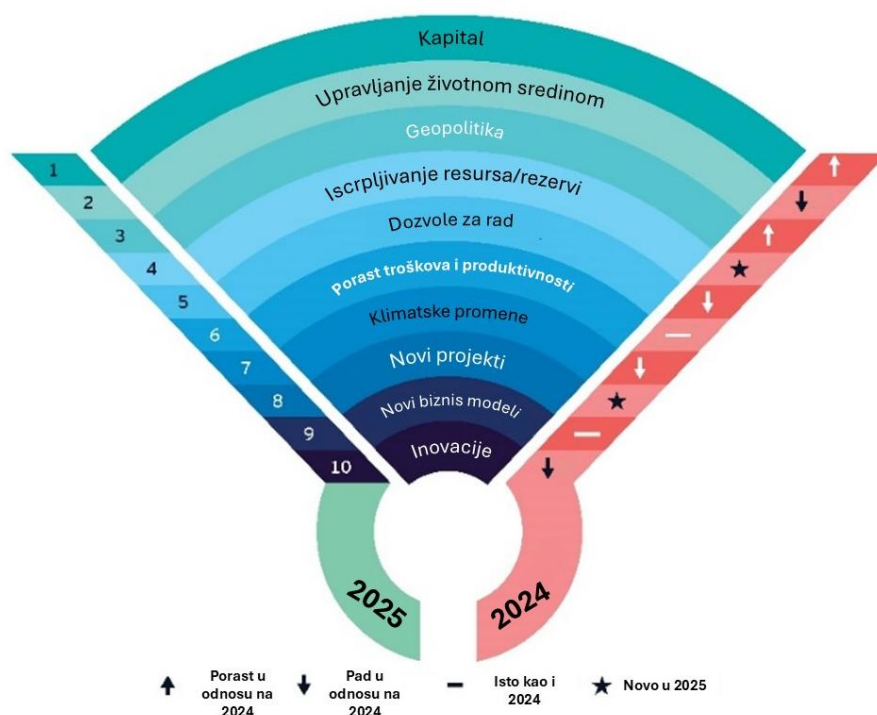
Slika 2.10. Odnos rizika u odnosu na investicije tokom svih faza u razvoju rudarskog projekta [61]

U ranim fazama, naročito tokom istraživanja ležišta i izrade studija izvodljivosti, dominiraju geološki rizici, usled ograničene količine dostupnih podataka i visokog stepena nepoznanica u vezi sa raspodelom, količinom i kvalitetom mineralne sirovine. U ovom periodu rizik je visok, a ulaganja relativno niska, što ukazuje na visok stepen neizvesnosti u donošenju strateških odluka.

Kako se projekat razvija i prelazi u faze izgradnje, eksploatacije i prerade, geološki rizici postepeno opadaju, dok istovremeno rastu operativni i finansijski rizici, uključujući troškove kapitalnih ulaganja, održavanja infrastrukture, stabilnosti tržišta i troškova rada. Ulaganja značajno rastu kako bi se obezbedila potrebna oprema, obučio kadar i osigurao kontinuitet proizvodnje. Ovi faktori dodatno komplikuju finansijsku održivost projekta, posebno u uslovima fluktuacije cena metala (ili drugih sirovina poput uglja ili građevinskih agregata), inflacije i promene valutnih kurseva. Upravo zato, upravljanje finansijskim rizicima postaje ključni zadatak menadžmenta, jer i najmanje odstupanje od predviđenih troškova može ugroziti celokupnu isplativost projekta.

Paralelno sa tim, u savremenom rudarstvu raste značaj ekoloških, društvenih i regulatornih rizika, koji se mogu manifestovati kroz otežano dobijanje dozvola, pritisak lokalnih zajednica, zahteve za sprovođenjem mera zaštite životne sredine ili iznenadne regulatorne promene. Ove komponente prisutne su tokom svih faza razvoja projekta, a postaju naročito izražene u fazama prerade, transporta i zatvaranja rudnika, kada se projekat suočava sa potrebom ispunjavanja brojnih obaveza prema državi, zajednici i životnoj sredini. U tom kontekstu, jasno je da rizici ne nestaju sa početkom eksploatacije, već transformišu svoj oblik i zahtevaju stalno prilagođavanje strategija upravljanja tokom čitavog životnog ciklusa rudarskog projekta.

Takođe je važno naglasiti da značaj pojedinačnih kategorija rizika nije statičan, već se dinamički menja u zavisnosti od tržišnih, regulatornih, tehnoloških i društveno-političkih faktora. Na primer, u periodima visoke inflacije ili energetske krize, finansijski i operativni rizici mogu dominirati, dok u uslovima pojačane regulative i klimatskih izazova, u prvi plan izlaze ekološki i društveni rizici. Globalne konsultantske kuće kao što su KPMG [62] i EY [63] redovno objavljuju izveštaje o najvažnijim rudarskim rizicima, na osnovu anketa sprovedenih među vodećim kompanijama iz sektora. Ovi izveštaji, kao što je to prikazano na slici 2.11, pokazuju da se prioriteti industrije menjaju iz godine u godinu, što dodatno potvrđuje potrebu za adaptivnim i hibridnim pristupom upravljanju rizikom.



Slika 2.11. Najznačajniji poslovni rizici u rudarskoj industriji u 2025. godini [63] [64]

2.3.4. Ciljevi upravljanja rizikom

Upravljanje rizikom kao sistemski pristup identifikaciji, analizi, evaluaciji i tretmanu neizvesnosti, postalo je nezaobilazna komponenta efikasnog strateškog i operativnog planiranja u rudarstvu. Njegova primena prevazilazi ulogu zaštite od neželjenih događaja, pri čemu se ono sve više koristi kao alat za unapređenje donošenja odluka, očuvanje finansijske stabilnosti i ostvarenje dugoročne održivosti projekta [65].

Na osnovu pregleda međunarodnih standarda, akademske literature i industrijske prakse, mogu se izdvojiti četiri ključna cilja upravljanja rizikom u rudarskim projektima [66]:

1. Zaštita zdravlja i bezbednosti

Bezbednost i zdravlje zaposlenih, kao i zaštita opreme i imovine, predstavljaju jedan od najvažnijih domena upravljanja rizikom u rudarstvu. Rudarska delatnost spada u fizički i tehnološki rizične sektore, gde su radnici izloženi opasnostima kao što su klizišta, mehaničke povrede, izlaganje prašini i toksičnim supstancama i dr. Statistički podaci pokazuju da je rudarska industrija među najopasnijim industrijama u pogledu učestalosti teških povreda i fatalnih ishoda, što zahteva sveobuhvatan pristup proceni rizika i preventivnim merama u organizaciji rada [67] [68].

Upravljanje bezbednošću (Occupational Health and Safety – OHS) u rudarstvu podrazumeva identifikaciju opasnih faktora, sistematsku procenu verovatnoće i posledica incidenata, implementaciju kontrolnih mera i kontinuirano praćenje njihovog efekta. Ovaj pristup ne uključuje samo tehnološke i organizacione aspekte, već obuhvata i pristupe moderne teorije rizika zasnovane na risk-based thinking (integrisano, sistematsko i proaktivno razmatranje rizika u svim fazama planiranja i upravljanja organizacijom), gde se bezbednosni rizici tretiraju kao sastavni deo upravljačkog sistema [69].

Stručna literatura ukazuje da je razvoj i primena sistema bezbednosti u rudarskoj industriji povezan sa organizovanjem procesa rizika i zaštite ljudi i opreme kroz formalizovane postupke, obuku, nadzor i tehnološka rešenja koja minimiziraju štetne uticaje i nesreće na radu. U savremenim studijama, faktori kao što su stručna obuka radnika, aktivno uključivanje menadžmenta, komunikacija o bezbednosnim praksama i bezbednosna kultura organizacije prepoznati su kao ključni elementi koji utiču na smanjenje incidentnih događaja [70] [71].

2. Zaštita opreme i kontinuiteta operacija

Pored zaštite zdravlja i bezbednosti zaposlenih, upravljanje rizikom u rudarskim projektima ima ključnu ulogu u očuvanju tehničke pouzdanosti sistema i kontinuiteta proizvodnje. Neadekvatno upravljanje operativnim rizicima može imati direktne ekonomske posledice kroz prekide eksploatacije, oštećenja opreme, poremećaje u lancu snabdevanja, povećane troškove održavanja i osiguranja, kao i gubitak planiranih prihoda [72] [73] [66] [74].

Rudarske sisteme karakterišu visoka kapitalna intenzivnost i međuzavisnost podsistema (rudarska mehanizacija, transport, prerada, odlagališta, infrastruktura), zbog čega incident u jednom segmentu može generisati kaskadne poremećaje u čitavom operativnom lancu. Integracija bezbednosnih i tehničkih rizika u šire okvire upravljanja rizikom omogućava identifikaciju kritičnih tačaka sistema, procenu verovatnoće zastoja i definisanje preventivnih i korektivnih mera [66] [75].

Literaturna istraživanja ukazuju da sistemaska integracija operativnih i bezbednosnih rizika u proces strateškog planiranja doprinosi ne samo smanjenju incidentnih događaja, već i unapređenju operativne efikasnosti, stabilnosti novčanih tokova i ukupne ekonomske performanse projekta. Zbog toga se operativni i bezbednosni rizici ne mogu tretirati izolovano, već moraju biti integralni deo modela upravljanja rizikom kroz čitav životni ciklus rudarskog projekta – od faze planiranja i projektovanja, preko eksploatacije, do zatvaranja i rekultivacije [76] [77]. Ovakav integrisani pristup omogućava ranije otkrivanje potencijalnih tehničkih slabosti i povećanje pouzdanosti sistema, čime se istovremeno doprinosi sigurnosti zaposlenih i dugoročnoj održivosti rudarskih operacija.

3. Održivi razvoj, zaštita životne sredine i regulatorna usaglašenost (ESG faktori)

Sistematičan i transparentan pristup upravljanju rizikom služi kao primarni mehanizam za jačanje kredibiliteta rudarskih organizacija kod ključnih interesnih strana, uključujući investitore, finansijske institucije, lokalne zajednice, državne institucije i širu javnost. U sektoru koji karakteriše decenijska izloženost različitim vrstama rizika, demonstracija kontrole nad neizvesnostima interpretira se kao indikator operativne zrelosti. Efikasno upravljanje rizicima predstavlja signal stabilnosti i predvidljivosti poslovanja, što je ključno za privlačenje i održavanje investicionog kapitala. Na ovaj način upravljanje rizikom prestaje da bude interna procedura i postaje strateški alat za pozicioniranje kompanije kao pouzdanog partnera u očima šire javnosti [78].

Posebno se ističe rastući uticaj ESG faktora (Environmental, Social and Governance) na investicione odluke u rudarskom sektoru. ESG performanse rudarskih kompanija sve više utiču na tok kapitala, jer institucije i investitori sve češće koriste ESG ocene kao merilo održivosti poslovanja, reputacije i sposobnosti kompanije da odgovori na društvene i ekološke izazove [79]. Kompanije koje pokazuju visok nivo odgovornosti u pogledu zaštite životne sredine, odnosa sa lokalnim zajednicama i korporativnog upravljanja ostvaruju veće poverenje finansijskih partnera i lakši pristup finansiranju, što se odražava kroz povoljnije uslove zaduživanja, širu bazu investitora i dugoročne investicione ugovore [80].

Pored toga, prisustvo jasnih i transparentnih sistema upravljanja rizikom omogućava organizacijama da efikasno komuniciraju o svojim strategijama i performansama sa širom javnošću, što predstavlja osnovu koncepta „društvene licence za rad“ (Social License to Operate — SLO). SLO označava neformalnu, ali ključnu društvenu legitimaciju koju kompanija mora steći i održavati kako bi nesmetano poslovala, a gubitak ove licence (npr. zbog loše komunikacije, prikrivanja podataka o potencijalnim rizicima ili neadekvatnog upravljanja neželjenim posledicama) često dovodi do prekida operacija ili snažnih negativnih reakcija javnosti [81] [82].

Upravljanje rizikom na visokom nivou transparentnosti i odgovornosti prema ESG principima ne samo da smanjuje percepciju rizika kod investitora, već i ojačava društveni konsenzus o opravdanosti projekta, što je posebno važno u regijama sa aktivnim lokalnim zajednicama, snažnim ekološkim zahtevima i visokom javnom pažnjom.

4. Finansijska otpornost i zaštita ekonomske vrednosti

Jedan od osnovnih ciljeva upravljanja rizikom je svođenje verovatnoće i posledica nepovoljnih finansijskih ishoda na mogući minimum. Za projekte poput rudarskih, tradicionalne metode procene ekonomskih pokazatelja (npr. neto sadašnja vrednost – NPV) često ne odražavaju realnu visinu rizika jer ne uzimaju u obzir varijabilnost ekonomskih parametara i operativnih uslova tokom životnog veka rudnika. Uvođenje sistemskih metoda procene rizika omogućava definisanje pragova finansijske prihvatljivosti, poput verovatnoće negativne neto sadašnje vrednosti ($P(NPV < 0)$), što omogućava blagovremeno planiranje mera za povećanje otpornosti na spoljne i unutrašnje poremećaje.

Modeli koji integrišu rizik u finansijske projekcije pokazuju da prilagođavanje vrednosti budućih tokova novca kroz simulacione tehnike (npr. Monte Carlo) [83] i kvantitativne metrike rizika (kao što su Value at Risk – VaR i Conditional Value at Risk – CvaR) [84] [85], omogućavaju donošenje odluka na osnovu verovatnoće negativnih ishoda, a ne samo na osnovu jedne determinističke procene. Takav pristup omogućava investitorima da sagledaju ne samo očekivanu vrednost projekta, već i raspon mogućih rezultata i scenarije u kojima projekat može generisati gubitke [86].

Pored toga, upravljanje finansijskim rizikom doprinosi finansijskoj otpornosti rudarskog sistema time što identifikuje potencijalne izvore varijabilnosti (npr. fluktuacije cena metala ili promena troškova) i omogućava implementaciju strategija kao što su prilagođavanje dinamike ulaganja, „hedžing aranžmane“ [87] ili rezervisanje kapitala za neočekivane događaje. Uključivanjem takvih kvantitativnih i strukturiranih pristupa u strateško planiranje, rudarski projekti lakše izbegavaju scenarije koji bi mogli dovesti do gubitka vrednosti, što je posebno važno u kontekstu dugoročnih projekata [88] [89].

2.3.5. Uloga upravljanja rizikom

Pored prethodno definisanih ciljeva, upravljanje rizikom ima operativnu i stratešku ulogu u okviru rudarskih projekata kroz:

1. Anticipaciju i identifikaciju

Rani stadijumi razvoja rudarskih projekta često imaju najviši nivo informacione neizvesnosti (geološka varijabilnost, ograničeni podaci, promjenljivi tržišni uslovi), dok se ključne strateške odluke donose upravo u tom periodu. Zato upravljanje rizikom u startu mora da bude usmereno na sistematsko mapiranje izvora rizika, otkrivanje njihovog pravog uzroka i definisanje „okidača” (engl. risk trigger) koji mogu izazvati prelazak u nepovoljne scenarije. U operativnom smislu to znači da se rizici ne posmatraju samo kao „spisak opasnosti”, već kao hipoteze o tome kako i zašto projekat može odstupiti od ciljeva. Ovakvim pristupom se smanjuje verovatnoća da se ključne slabosti uoče tek u kasnijim fazama projekta kada su korektivne mere skuplje i sporije, a u pojedinim slučajevima i neizvodljive [90] [91].

2. Podršci odlučivanju

Nakon identifikacije i razumevanja izvora rizika, sledeći korak upravljanja rizikom jeste njihova transformacija u analitičku osnovu za donošenje odluka. U rudarskim projektima, koji su karakterisani visokim kapitalnim ulaganjima (CAPEX), dugim periodom povrata i izraženom tržišnom nestabilnošću, odluke se retko svode na izbor između „sigurne” i „rizične” opcije, već na poređenje alternativnih razvojnih scenarija sa različitim profilima rizika i povrata [66].

Efikasno upravljanje rizikom omogućava da se neizvesnost kvantifikuje i prevede u format kompatibilan sa procesom strateškog odlučivanja, putem verovatnoća, raspona mogućih ishoda i osetljivosti ključnih pokazatelja projekta. Time se odluka ne zasniva na jednoj determinističkoj proceni (npr. jednoj vrednosti NPV-a), već na poređenju distribucija mogućih rezultata i identifikaciji scenarija u kojima projekat može odstupiti od planirane vrednosti [92] [93].

U kontekstu rudarskih investicija ovaj pristup je posebno značajan jer male promene ulaznih pretpostavki (poput cene metala, kapitalnih i operativnih troškova ili dinamike realizacije), mogu dovesti do značajnih promena u optimalnoj strategiji razvoja projekta. Istraživanja u oblasti ekonomike rudarstva ukazuju da su procene kapitalnih troškova u ranim fazama razvoja često podložne sistematskim odstupanjima, što može uticati na precenjivanje ili potcenjivanje projektovane vrednosti. Zbog toga se sve češće u stručnoj literaturi insistira na integraciji probabilističkih analiza i faznog odlučivanja tokom razvoja rudarskih projekata. U skladu sa navedenim, jasno je da upravljanje rizikom ne predstavlja samo zaštitni mehanizam, već strukturu za racionalizaciju investicionih odluka [94] [95] [39].

3. Implementaciju kontrolnih mera

Da bi upravljanje rizikom imalo operativni značaj, ono mora rezultovati implementacijom kontrolnih mera koje smanjuju rizik na prihvatljiv nivo i obezbeđuju stabilnost projektnih performansi. U rudarskim projektima to podrazumeva povezivanje procenjenog rizika sa jasno definisanim kriterijumima prihvatljivosti (risk criteria), nakon čega sledi izbor i primena adekvatnih tehničkih, organizacionih i proceduralnih kontrola. One mogu biti tehničke, poput inženjerskih rešenja i stalnog nadzora, ili proceduralne, kao što su planovi održavanja ili QA/QC protokoli. Da bi ove mere bile efikasne, njihov učinak se mora stalno meriti. To omogućava da se sistem na vreme popravi ukoliko dođe do bilo kakvih odstupanja [56] [96] [97].

Važno je naglasiti da se kontrolne mere ne mogu posmatrati kao jednokratne intervencije, već kao deo cikličnog procesa upravljanja. Kako se tokom razvoja projekta menjaju geološki podaci, tehničke pretpostavke, tržišni uslovi ili regulatorni zahtevi, tako se menja profil rizika, što dalje zahteva periodičnu reviziju postojećih kontrola i eventualno uvođenje novih mera.

Ovakav iterativni pristup je u skladu sa savremenim konceptima upravljanja kompleksnim sistemima, omogućavajući da tretman rizika ostane usklađen sa realnim stanjem projekta i nivoom preostale neizvesnosti [96] [72] [98].

Na taj način implementacija kontrolnih mera predstavlja vezu između analitičkog dela upravljanja rizikom i svakodnevnog upravljanja rudarskim operacijama, čime se obezbeđuje da procenjeni rizici budu sistematski kontrolisani tokom čitavog životnog ciklusa projekta.

4. Razvoj organizacione kulture

Savremeni pristupi upravljanju rizicima u rudarstvu sve više prepoznaju da formalni alati, poput registara rizika i procedura, predstavljaju samo strukturnu osnovu sistema koji ostaje nefunkcionalan bez razvijene organizacione kulture. Literatura naglašava koncept zrelosti upravljanja rizikom (Risk Maturity), gde organizacija evoluira od pukog zadovoljavanja zakonske forme ka stanju u kojem se odgovornost za rizik (risk ownership) jasno definiše i prihvata na svim nivoima organizacije, u skladu sa ovlašćenjima zaposlenih [99].

U rudarskom okruženju je ovaj ljudski faktor presudan za identifikaciju tzv. „incident bez posledica“ (near-miss events). Prema teoriji „pravedne kulture“ (Just Culture), ključno je stvoriti atmosferu u kojoj se zaposleni podstiču da prijavljuju greške bez straha od neosnovane kazne, jer se upravo kroz te rane signale identifikuju sistemске slabosti pre nego što eskaliraju u katastrofalan udes [100].

Zbog toga uloga menadžmenta rizika prevazilazi administrativne aktivnosti, već obuhvata i izgradnju kulture kroz [100] [101] [102]:

- Transparentnu komunikaciju - redovne „risk review“ sastanke na svim nivoima, od uprave do smene na kopu;
- Inkluzivnu procenu - direktno uključivanje operativaca u proces identifikacije opasnosti, čime se osigurava da kontrole budu praktično primenljive, a ne samo teorijski definisane;
- Kontinuirano učenje - pretvaranje svakog odstupanja u lekciju koja menja procedure i ponašanje, čime se postiže operativna otpornost (resilience) celokupnog projekta.

5. Kontinuirano unapređenje

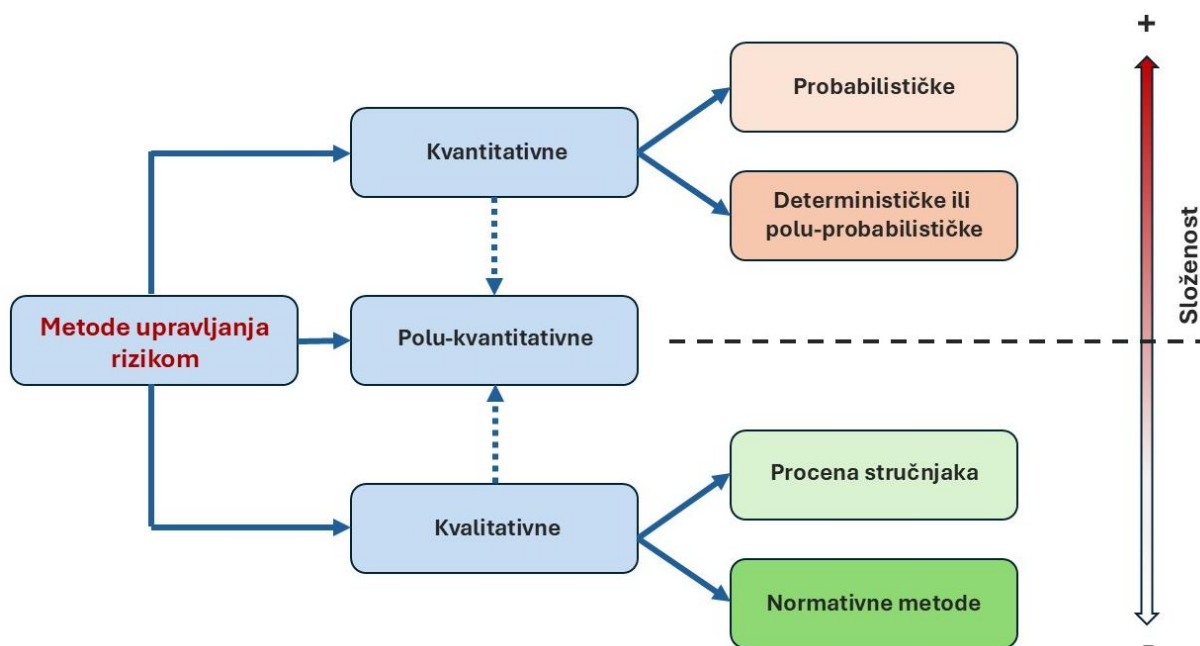
Upravljanje rizikom u rudarskim projektima mora biti kontinuiran proces, jer se uslovi na terenu i tržištu stalno menjaju (geološki model se menja novim bušotinama i proizvodnim podacima, troškovi i logistika variraju, regulatorni i društveni kontekst evoluira itd.). Umesto jednokratne procene i jednokratne izrade rudarskih dokumenata, neophodno je stalno prilagođavanje planova realnim podacima iz proizvodnje. To uključuje redovno preispitivanje ključnih pretpostavki projekta, od geološke interpretacije i operativnih parametara (gubici rude, iskorišćenje), do eksternih faktora poput tržišnih cena, operativnih i regulatornih zahteva. Na taj način menadžment dobija osnovu za pametnije upravljanje portfoliom i donošenje strateških odluka. Ovakav pristup omogućava kompaniji da pravovremeno reaguje na promene, tako što će npr. izmeniti dinamiku otkopavanja, odložiti određene investicije ili čak ubrzati razvoj kada su tržišni i operativni uslovi povoljni [11] [23] [39] [40] [103].

2.3.6. Metodološki pristupi upravljanju rizicima

Upravljanje rizikom podrazumeva sistematičan proces identifikacije, analize, evaluacije, tretmana i monitoringa rizika u cilju zaštite projekata, ljudi, imovine i performansi poslovanja. Iako rudarsku industriju karakterišu specifični geološki, tehnički i ekonomski izazovi, osnovni metodološki okvir oslanja se na univerzalno prihvaćene modele i alate.

U okviru pomenutih faza procesa upravljanja rizikom koriste se različite tehnike i pristupi, koji se u literaturi najčešće grupišu u tri osnovne kategorije (slika 2.12):

1. Kvalitativne metode,
2. Kvantitativne metode i
3. Polu-kuantitativne metode



Slika 2.12. Metodološki pristupi upravljanju rizicima [66]

Svaka od ovih grupa ima specifične prednosti i uloge u zavisnosti od faze procesa u kojoj se primenjuje. U okviru standarda ISO/IEC 31010:2019 — Risk assessment techniques [104] jasno se opisuje niz tehnika koje se mogu koristiti pri proceni rizika unutar procesa upravljanja rizikom definisanog u standardu ISO 31000. Ovaj standard pruža smernice za izbor i primenu tehnika procene rizika tako da se one primene u skladu sa fazom u kojoj se procena obavlja, obezbeđujući tako relevantne informacije za teme i ciljeve određene faze. ISO 31010 naglašava da odabir tehnike zavisi od dostupnosti informacija, složenosti projekta, očekivanog nivoa preciznosti i stepena neizvesnosti, uz preporuku da se sredstva odaberu tako da obezbede dovoljan nivo pouzdanosti za donošenje odluka.

Tabela 2.2 prikazuje primenljivost različitih tehnika procene rizika u odnosu na faze procesa upravljanja rizikom (npr. identifikacija, analiza posledica i verovatnoće, evaluacija rizika itd.), na osnovu sadržaja navedenog standarda [104]. Ovakva klasifikacija pomaže da se te metode koriste na najprikladniji način, odnosno tamo gde njihovi rezultati mogu najviše doprineti razumevanju i kontrolisanju rizika u projektu.

Tabela 2.2. Primenljivost metoda u odnosu na fazu procesa upravljanja rizikom [104] [105]

Alati i metode	Proces procene rizika				
	Identifikacija rizika	Analiza rizika			Evaluacija rizika
		Posledice	Verovatnoća	Nivo rizika	
<i>Brainstorming</i>	VP ¹⁾	NP ²⁾	NP	NP	NP
Strukturirani ili polustrukturirani intervjui	VP	NP	NP	NP	NP
<i>Delphi</i>	VP	NP	NP	NP	NP
Kontrolne liste	VP	NP	NP	NP	NP
Analiza primarne opasnosti	VP	NP	NP	NP	NP
Studije opasnosti i operabilnosti (<i>Hazard and operability studies - HAZOP</i>)	VP	VP	p ³⁾	P	P
Analiza opasnosti i kritične kontrolne tačke (<i>Hazard Analysis and Critical Control Points - HACCP</i>)	VP	VP	NP	NP	VP
Procena rizika po životnu sredinu (toksičnosti)	VP	VP	VP	VP	VP
Struktura « Šta ako? » (<i>SWIFT</i>)	VP	VP	VP	VP	VP
Analiza scenarija	VP	VP	P	P	P
Analiza uticaja na poslovanje	P	VP	P	P	P
Analiza uzroka	NP	VP	VP	VP	VP
Analiza režima i efekata otkaza (<i>Failure Mode and Effects Analysis - FMEA i Failure Mode, Effect & (Criticality) Analysis - FMECA</i>)	VP	VP	VP	VP	VP
Analiza stabla grešaka	P	NP	VP	P	P
Analiza stabla događaja	P	VP	P	P	NP
Analiza uzroka i posledica	P	VP	VP	P	P
Uzročno-posledična analiza	VP	VP	NP	NP	NP
Analiza slojeva zaštite (<i>Layer protection analysis - LOPA</i>)	P	VP	P	P	NP
Stablo odlučivanja	NP	VP	VP	P	P
Analiza ljudske pouzdanosti	VP	VP	VP	VP	P
Analiza leptir mašna	NP	P	VP	VP	P
Održavanje usredsređeno na pouzdanost (<i>Reliability Centred Maintenance - RCM</i>)	VP	VP	VP	VP	VP
Analiza prikrivenog kola	P	NP	NP	NP	NP
Markovljeva analiza	P	VP	NP	NP	NP
Monte Karlo simulacija	NP	NP	NP	NP	VP
Bajesova statistika i Bajesove mreže	NP	VP	NP	NP	VP
FN krive	P	VP	VP	P	VP
Indeksi rizika	P	VP	VP	P	VP
Matrica posledica/verovatnoća	VP	VP	VP	VP	P
Analiza troškova i koristi	P	VP	P	P	P
Analiza višekriterijumskog odlučivanja (<i>Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA</i>)	P	VP	P	VP	P
1) VP - Veoma primenljivo.					
2) NP - Nije primenljivo.					
3) P - Primenljivo.					

2.3.6.1. Kvalitativne metode upravljanja rizikom

Kvalitativne metode predstavljaju fundamentalni nivo procene rizika i najčešće su prvi korak u procesu upravljanja rizicima u rudarstvu. Njihova osnovna karakteristika jeste oslanjanje na deskriptivnu procenu verovatnoće nastanka neželjenog događaja i ozbiljnosti njegovih posledica, pri čemu se koriste kvalitativne skale definisane kroz kategorije poput „zanemarljivo“, „umereno“, „ozbiljno“ ili „katastrofalno“. Ovakav pristup omogućava sistematizaciju stručne procene u situacijama kada kvantitativni podaci nisu dostupni ili su nedovoljno pouzdani, što je čest slučaj u ranim fazama razvoja rudarskog projekta. Prema standardu IEC 31010:2019, kvalitativne tehnike su naročito pogodne za inicijalnu identifikaciju i preliminarnu analizu rizika, jer omogućavaju strukturirano razmatranje neizvesnosti bez zahteva za kompleksnim statističkim modelima [104].

U rudarskoj industriji je kvalitativna procena rizika institucionalizovana kroz industrijske smernice, bezbednosne protokole i interne procedure upravljanja. Nacionalni vodiči za procenu rizika u mineralnoj industriji (National Minerals Industry Safety and Health Risk Assessment Guide, 2007) naglašavaju da se najveći broj operativnih i bezbednosnih rizika inicijalno identifikuje kroz timske radionice, strukturisane diskusije i primenu kontrolnih lista zasnovanih na prethodnim incidentima [106]. U tom kontekstu, alati poput Brainstorminga, Check-lista predstavljaju osnovu sistematskog prikupljanja informacija o hazardima, posebno u operativnim uslovima gde iskustvo zaposlenih ima presudnu ulogu. Ovakav pristup omogućava da se znanje operativnog osoblja formalizuje u okviru dokumentovanog procesa upravljanja rizikom, čime se jača organizaciona kultura bezbednosti [90] [106] [107].

Slično tome, What-if analiza predstavlja dinamičan i fleksibilan kvalitativni pristup zasnovan na strukturiranom preispitivanju hipotetičkih scenarija odstupanja od normalnog rada. Primena ove metode fokusirana je na identifikaciju ranjivosti rudarskog sistema na operativne poremećaje, greške ljudskog faktora ili kritične otkaze opreme [107]. U rudarskoj praksi se What-if analiza pokazala kao nezamenljiv alat za ispitivanje robusnosti proizvodnog lanca, gde se simulacijom scenarija poput „šta ako dođe do zagušenja primarne drobilice“ ili „šta ako otkaze glavni ventilacioni sistem“ detektuju kritične tačke koje mogu ugroziti kontinuitet proizvodnje ili bezbednost osoblja. Posebna vrednost ove metode leži u tome što otkriva kako naizgled bezazleni kvarovi mogu izazvati lančane reakcije sa teškim posledicama po ceo sistem. Na taj način, What-if analiza omogućava pravovremenu izradu planova za nepredviđene situacije (contingency planning), čime se sprečavaju kritični zastoji u transportnim sistemima i prekid napajanja ključnih postrojenja [108] [109].

Posebno mesto u kvalitativnoj proceni zauzima matrica rizika, koja predstavlja najrasprostranjeniji alat u rudarskoj praksi iz ove kategorije metoda. Matrica kombinuje kategorije verovatnoće i posledica i omogućava klasifikaciju rizika u nivoe prihvatljivosti, čime se obezbeđuje vizuelna i intuitivna prioritizacija. Iako se u literaturi često prikazuje kao jednostavan dvodimenzionalni grafički prikaz (tabela 2.3), matrica rizika ima značajnu upravljačku ulogu jer uspostavlja vezu između procene rizika i kriterijuma prihvatljivosti definisanih u okviru organizacije. Međutim, savremena istraživanja ukazuju i na metodološka ograničenja ovog pristupa. Kabanov (2021) ističe da standardne matrice rizika često ne odražavaju realne nelinearne odnose između verovatnoće i posledica, dok Hubbard (2020) upozorava da korišćenje uprošćenih skala (npr. od 1 do 5) stvara lažni osećaj matematičke tačnosti, jer ti brojevi služe samo za rangiranje, a ne za precizno numeričko izračunavanje stvarne veličine rizika. Uprkos tim ograničenjima, matrica rizika ostaje dominantan alat u operativnoj proceni bezbednosnih i tehničkih rizika u rudarstvu.

Primer u tabeli 2.3 prikazuje matricu rizika koja služi za brzu kategorizaciju pretnji kroz proizvod dve dimenzije: verovatnoće i finansijskih posledica. Struktura matrice je takva da su obe ose podeljene u pet nivoa (matrica 5x5), pri čemu se verovatnoća procenjuje u opsezima od < 10% do > 75%, dok se posledice podeljene prema visini potencijalne štete u rasponu od < 5 M € do > 100 M €. Vrednost rizika (rangiranje) predstavlja proizvod dodeljenih klasa (1-5), čime se identifikovani hazardi vizuelno prioritizuju u tri zone: niski (zeleno), srednji (žuto) i visoki rizik (crveno) [105].

Tabela 2.3. Primer matrice za procenu rizika [105]

Verovatnoća		1	2	3	4	5
Posledica		< 10%	10% - 35%	35% - 55%	55% - 75%	> 75%
1	< 5 M €	1	2	3	4	5
2	5 - 15 M €	2	4	6	8	10
3	15 - 50 M €	3	6	9	12	15
4	50 - 100 M €	4	8	12	16	20
5	> 100 M €	5	10	15	20	25

Nisko
Srednje
Visoko

Primena kvalitativnih metoda razlikuje se u zavisnosti od faze rudarskog ciklusa. U fazi geoloških istraživanja, one služe za preliminarno rangiranje geološke neizvesnosti i regulatornih rizika, posebno u kontekstu dobijanja dozvola i procene uticaja na životnu sredinu. Tokom projektovanja, koriste se za identifikaciju geotehničkih hazarda, rizika povezanih sa izborom tehnologije i potencijalnih bezbednosnih slabosti sistema. U operativnoj fazi, kvalitativne metode predstavljaju osnovni instrument svakodnevnog upravljanja bezbednošću rada, uključujući procenu stabilnosti kosina, rizika od zastoja opreme i rizika po zdravlje zaposlenih. U fazi zatvaranja rudnika, njihova primena usmerena je na identifikaciju dugoročnih ekoloških i socijalnih rizika povezanih sa rehabilitacijom prostora. Ovakva široka primenljivost potvrđuje da kvalitativne metode imaju trajnu ulogu kroz čitav životni ciklus rudarskog projekta [72] [106] [110] [111] [112] [113].

U strateškom planiranju površinskih kopova, gde investicione odluke podrazumevaju dugoročne finansijske implikacije i značajan kapital, kvalitativna procena sama po sebi ipak nije dovoljna. Ona omogućava identifikaciju i kategorizaciju rizika, ali ne pruža osnov za procenu monetarnog uticaja niti distribucije mogućih ishoda. Upravo zbog toga, savremeni pristupi upravljanju rizikom u rudarstvu sve češće kombinuju kvalitativne i kvantitativne metode, pri čemu kvalitativna analiza predstavlja inicijalni filter i osnovu za selekciju rizika koji zahtevaju detaljnije numeričko modelovanje.

U tom smislu, kvalitativne metode treba posmatrati kao neophodnu, ali ne i dovoljnu komponentu integrisanog sistema upravljanja rizikom. Njihova snaga leži u sposobnosti da strukturiraju stručnu procenu, olakšaju komunikaciju i omoguće preliminarnu prioritizaciju, dok njihova ograničenja jasno ukazuju na potrebu za prelaskom ka kvantitativnim tehnikama u fazama strateškog odlučivanja.

2.3.6.2. Kvantitativne metode upravljanja rizikom

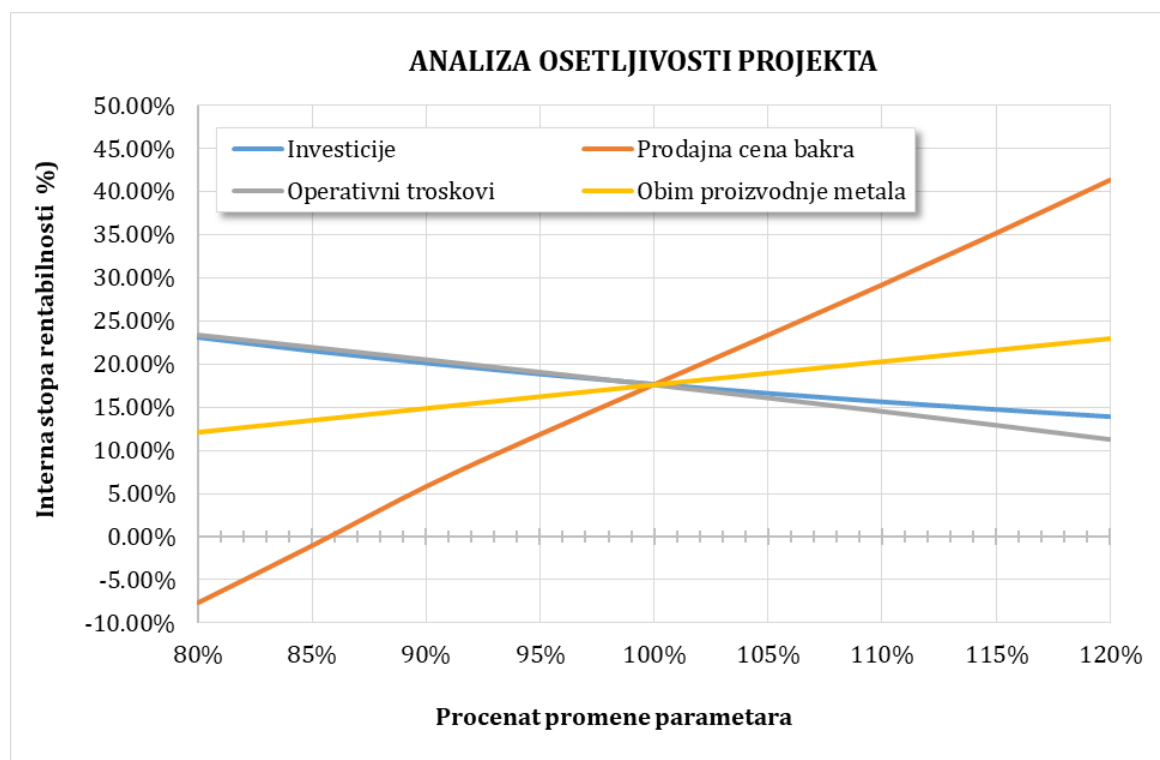
Kvantitativne metode predstavljaju napredni nivo analize rizika u kojem se neizvesnosti u sistemu modeluju numerički, uz korišćenje probablističkih modela i statističkih tehnika. Za razliku od kvalitativnih pristupa koji se oslanjaju na subjektivne kategorije verovatnoće i posledica, kvantitativne metode omogućavaju eksplicitno modelovanje distribucija verovatnoće i procenu očekivanih ishoda (ekonomskih, operativnih, ekoloških, bezbednosnih itd.). Na taj način rizik se izražava kroz merljive pokazatelje, kao što su verovatnoća određenog događaja, očekivana vrednost gubitka ili raspodela finansijskih rezultata projekta. Upravo zbog toga kvantitativne metode imaju ključnu ulogu u fazama strateškog odlučivanja, gde je neophodno sagledati širok spektar mogućih ishoda i proceniti otpornost investicionih odluka u uslovima neizvesnosti [104] [114].

U rudarskoj industriji kvantitativne metode imaju široku primenu u analizi različitih kategorija rizika. U oblasti geologije koriste se za procenu geološke neizvesnosti i varijabilnosti sadržaja korisne komponente kroz geostatističke modele i simulacije blok modela [115]. U operativnom upravljanju rudnicima primenjuju se za analizu pouzdanosti opreme, procenu zastoja proizvodnih sistema i optimizaciju transportnih i logističkih procesa [116]. Sa aspekta procene ekoloških rizika, kvantitativni pristupi se sve češće koriste za modelovanje širenja zagađenja, procenu uticaja rudarskih aktivnosti na životnu sredinu i analizu dugoročnih posledica zatvaranja rudnika [105].

Pored prethodno navedenih kategorija, značajan izvor neizvesnosti predstavljaju i ekonomski parametri, kao što su cena mineralne sirovine, troškovi eksploatacije i investicioni troškovi, čije

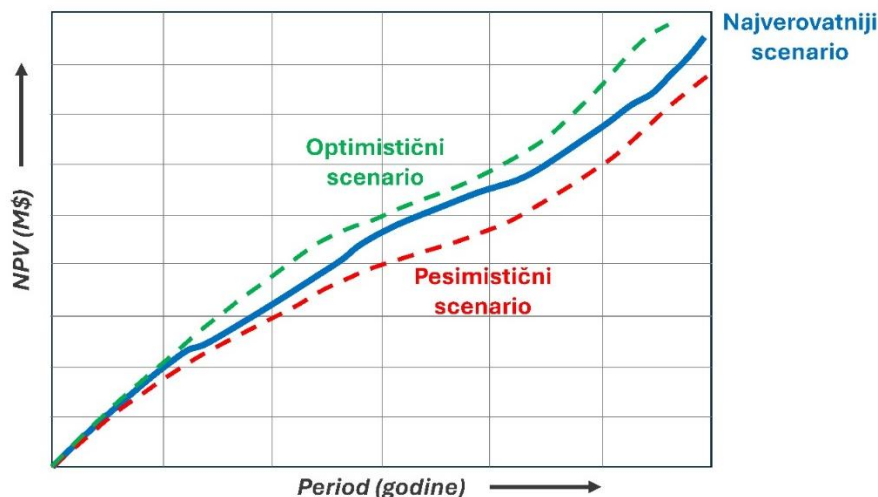
promene mogu značajno uticati na finansijsku održivost projekta. U savremenoj rudarskoj praksi, ovi parametri se više ne posmatraju kao statične vrednosti, već kao stohastičke varijable koje se analiziraju primenom simulacija kvantitativnih tehnika. Ovakav pristup omogućava generisanje kriva verovatnoće neto sadašnje vrednosti (NPV) i procenu rizika od negativnih novčanih tokova u uslovima tržišne promenljivosti. Poseban značaj ima integrisana analiza koja kombinuje geološku neizvesnost sa ekonomskim parametrima, čime se identifikuje prag osetljivosti projekta na fluktuacije cena metala i operativnih troškova, optimizujući na taj način strategiju eksploatacije i investicionu dinamiku. Zbog ovako širokog spektra primene, kvantitativna analiza predstavlja jedan od ključnih alata savremenog upravljanja rizikom u rudarstvu [117] [118].

U praksi rudarskih projekata, kvantitativna analiza rizika najčešće započinje **analizom osetljivosti**, koja predstavlja inicijalni korak u identifikaciji najvažnijih faktora koji utiču na ekonomski rezultat projekta. Ova metoda omogućava procenu uticaja promena pojedinačnih parametara, poput cene metala, troškova eksploatacije ili količine otkrivke, na ključne ekonomske indikatore kao što su neto sadašnja vrednost (NPV) ili interna stopa rentabilnosti (IRR). Rezultati analize osetljivosti često se prikazuju pomoću Spider dijagrama (slika 2.13), koji omogućavaju vizuelnu identifikaciju parametara sa najvećim uticajem na varijabilnost ekonomskog ishoda. U rudarskim studijama izvodljivosti ova metoda se rutinski koristi za identifikaciju faktora koji zahtevaju detaljniju analizu rizika ili dodatna geološka istraživanja [3] [119].



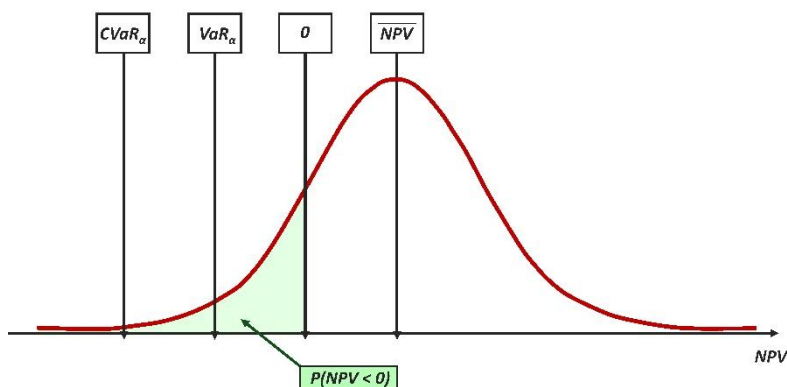
Slika 2.13. Dijagram analize osetljivosti - uticaja ključnih parametara na IRR

Analiza scenarija predstavlja proširenje analize osetljivosti, jer omogućava sagledavanje kombinovanog uticaja više parametara kroz definisanje alternativnih scenarija razvoja projekta. Za razliku od analize osetljivosti, u kojoj se menja samo jedan ulazni parametar uz konstantnost ostalih, scenarijska analiza podrazumeva simultanu promenu više ključnih faktora kao što su cena mineralne sirovine, operativni troškovi, sadržaj korisne komponente ili tehnološki parametri eksploatacije. U praksi se najčešće definišu optimistički, pesimistički i najverovatniji scenario, pri čemu se za svaki od njih procenjuju ekonomski indikatori projekta poput neto sadašnje vrednosti ili stope rentabilnosti (slika 2.14). Na taj način moguće je proceniti robusnost rudarskog projekta u odnosu na različite kombinacije tržišnih, geoloških i operativnih uslova [120] [121].



Slika 2.14. Primer izloženosti riziku kroz analizu scenarija u slučaju novčanog toka projekta

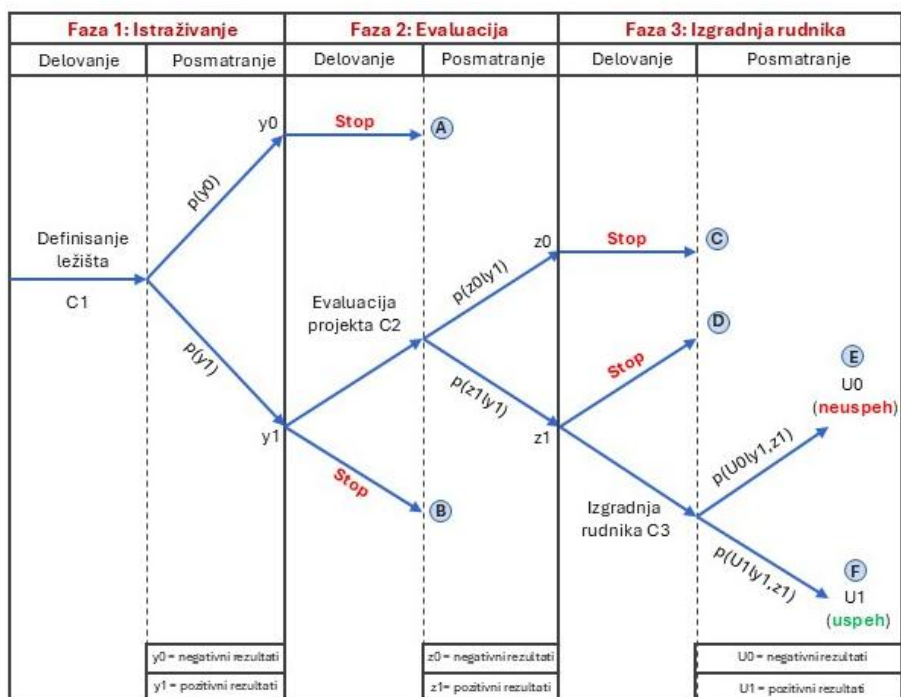
Za detaljniju probabilističku procenu finansijskog i operativnog rizika često se koristi **Monte Carlo simulacija**, koja predstavlja jednu od najrasprostranjenijih kvantitativnih metoda u savremenoj analizi rudarskih projekata. Ova tehnika omogućava generisanje velikog broja mogućih scenarija projekta na osnovu definisanih distribucija verovatnoće ulaznih parametara, kao što su cena metala, sadržaj korisne komponente u rudi ili operativni troškovi. Rezultat simulacije nije jedinstvena deterministička vrednost ekonomskog indikatora, već distribucija mogućih ishoda, koja omogućava procenu verovatnoće ostvarivanja određenog finansijskog rezultata ili identifikaciju rizika negativne neto sadašnje vrednosti projekta [117] [122] [123]. Na osnovu takvih distribucija moguće je primeniti i napredne metrike rizika, poput **Vrednosti pod rizikom (Value-at-Risk – VaR)** i **Uslovne vrednosti pod rizikom (Conditional Value-at-Risk – CVaR)**, koje omogućavaju kvantifikaciju potencijalnih gubitaka u ekstremnim tržišnim uslovima (slika 2.15) [124] [125] [126].



Slika 2.15. Distribucija verovatnoće NPV-a sa prikazom indikatora rizika [126]

Pored metoda koje se primarno koriste za procenu ekonomskih ishoda rudarskih projekata, značajnu ulogu u upravljanju rizikom imaju i tehnike koje podržavaju donošenje investicionih odluka u uslovima neizvesnosti. Jedna od najčešće primenjivanih metoda u tom kontekstu jeste **analiza stabla odlučivanja (decision tree)**, koja omogućava grafičku i kvantitativnu reprezentaciju različitih puteva razvoja projekta, uz pridružene verovatnoće pojave i ekonomske posledice svakog mogućeg ishoda.

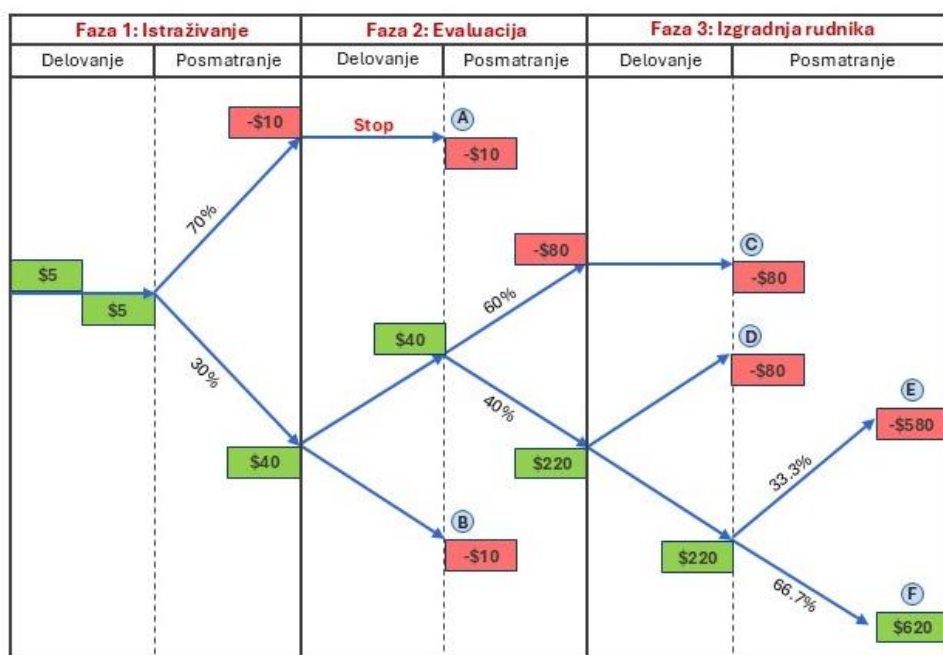
Ova metoda je naročito pogodna za modelovanje faznog razvoja rudarskih projekata, gde se ključne odluke donose sekvencijalno, u zavisnosti od rezultata prethodnih faza istraživanja i evaluacije ležišta. Struktura stabla odlučivanja sastoji se od čvorova odluke (slika 2.16), koji predstavljaju tačke izbora između alternativnih strategija razvoja projekta, i čvorova slučaja, koji opisuju moguće ishode sa pripadajućim verovatnoćama pojave. Grane stabla predstavljaju različite scenarije razvoja, pri čemu se svakom ishodu dodeljuje određena verovatnoća i odgovarajuća ekonomska vrednost.



Slika 2.16. Primer stabla odlučivanja za modelovanje rizika u fazama razvoja rudarskog projekta [11]

Kao što je prikazano na slici 2.17, razvoj rudarskog projekta može se modelovati kroz niz uzastopnih odluka koje prate faze istraživanja, tehničko-ekonomske evaluacije i izgradnje rudnika. Na primer, nakon inicijalne faze istraživanja donosi se odluka o nastavku ili obustavi projekta. U slučaju pozitivnih rezultata, projekat prelazi u fazu detaljnije evaluacije i studije izvodljivosti, koja može rezultirati konačnom odlukom o razvoju rudnika. Svaka od ovih odluka povezana je sa određenim nivoom neizvesnosti i mogućim ekonomskim ishodima.

Na osnovu definisanih verovatnoća i ekonomskih rezultata moguće je izračunati očekivanu novčanu vrednost projekta (Expected Monetary Value – EMV) za svaki scenario razvoja. Poređenjem dobijenih vrednosti identifikuje se strategija koja maksimizuje očekivani ekonomski rezultat, čime stablo odlučivanja predstavlja efikasan alat za donošenje optimalnih odluka u uslovima rizika i neizvesnosti [11].



Slika 2.17. Primena stabla odlučivanja za evaluaciju optimalne investicione odluke u uslovima rizika [11]

Napredniji pristup analizi investicionih odluka u rudarstvu predstavlja **teorija realnih opcija (Real Options Valuation – ROV)**, koja rudarski projekat posmatra kao skup fleksibilnih strateških odluka koje menadžment može doneti tokom životnog ciklusa rudnika. Za razliku od tradicionalne NPV analize, koja pretpostavlja unapred definisan i nepromenljiv plan eksploatacije, pristup realnih opcija vrednuje mogućnost prilagođavanja projekta promenama tržišnih uslova, uključujući opcije privremene obustave eksploatacije, proširenja kapaciteta ili trajnog napuštanja projekta. Na taj način u procenu vrednosti projekta uvodi se i vrednost menadžerske fleksibilnosti, koja može imati značajan uticaj na dugoročnu ekonomsku održivost rudarskih investicija [127].

Posebnu kategoriju kvantitativnih metoda u savremenom rudarstvu predstavljaju **stohastički modeli strateškog planiranja eksploatacije**, koji integrišu koncept neizvesnosti direktno u proces optimizacije dugoročnog plana. Umesto tretiranja ključnih parametara kao fiksnih vrednosti, ovi modeli se oslanjaju na stohastičko modelovanje ulaznih varijabli putem distribucija verovatnoće, koje odražavaju njihovu prirodnu varijabilnost i statističku neizvesnost [128].

Primenom naprednih tehnika, poput geostatističkih uslovnih simulacija i Monte Carlo metode, generiše se širok spektar mogućih scenarija, čime se finalni ishod transformiše iz jedinstvene vrednosti u raspodelu verovatnoće. Na osnovu ovih rezultata moguće je proceniti robusnost proizvodnog plana i smanjiti rizik neispunjenja proizvodnih ciljeva ili ekonomskih očekivanja projekta [128].

Zahvaljujući sposobnosti da integrišu geološku, tehnološku i ekonomsku neizvesnost u jedinstveni optimizacioni okvir, stohastički modeli strateškog planiranja danas se smatraju jednim od najnaprednijih pristupa u planiranju eksploatacije površinskih kopova. Detaljnija razrada ovih pristupa, kao i njihova primena u okviru razvijenog hibridnog modela, biće prikazana u narednom poglavlju.

3. MODELI OPTIMIZACIJE POVRŠINSKIH KOPOVA

Strateško planiranje površinskih kopova predstavlja jedan od ključnih procesa u razvoju rudarskih projekata, jer određuje osnovne tehničke i ekonomske parametre eksploatacije tokom celokupnog životnog veka rudnika (Life-of-Mine Planning). U okviru ovog procesa donose se odluke o optimalnim granicama kopa, razgraničenju rude i jalovine, proceni rudnih rezervi, definisanju kapaciteta proizvodnje, kao i prostorno-vremenskoj dinamici eksploatacije. Ove odluke imaju dugoročne posledice na tehničku izvodljivost i ekonomsku održivost projekta, zbog čega predstavljaju osnovu za izradu studija izvodljivosti i donošenje investicionih odluka [1].

Dugoročno planiranje proizvodnje u površinskim kopovima predstavlja kompleksan optimizacioni problem u kome su geometrija kopa, ekonomska vrednost blokova i redosled njihove eksploatacije međusobno zavisni. Još je Whittle ukazao da optimalna kontura kopa ne može biti određena nezavisno od dinamike eksploatacije, kao što ni redosled otkopavanja ne može biti definisan bez prethodno određenih granica kopa [129]. Ova međuzavisnost predstavlja jednu od ključnih poteškoća u optimizaciji rudarskih projekata i dovela je do razvoja sekvencijalnog pristupa planiranju, u kome se kompleksan problem razlaže na međusobno povezane segmente, kao što su određivanje završne konture kopa, definisanje faza eksploatacije i planiranje dinamike proizvodnje [10].

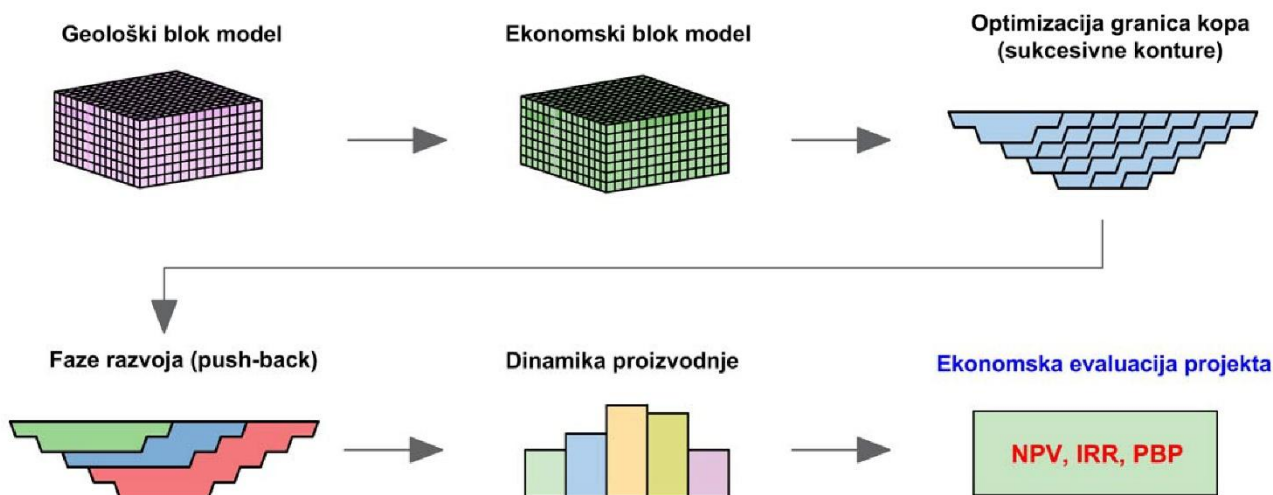
Jedna od osnovnih karakteristika ovog procesa jeste izražena međuzavisnost velikog broja tehničkih i ekonomskih parametara. Promene pojedinih ulaznih veličina, kao što su kapacitet proizvodnje ili granični sadržaj, mogu značajno uticati na granice kopa, životni vek rudnika i ukupnu ekonomsku vrednost projekta. Zbog toga se proces planiranja u praksi sprovodi iterativno, kroz postupno prilagođavanje i usklađivanje pojedinih faza analize, sve do postizanja tehnički i ekonomski prihvatljivog rešenja (slika 3.1).



Slika 3.1. Interaktivni ciklus planiranja i optimizacije rudarskog projekta [10]

U savremenoj rudarskoj praksi optimizacija proizvodnje najčešće se zasniva na ekonomskim kriterijumima, pri čemu je dominantan cilj maksimizacija neto sadašnje vrednosti projekta (Net Present Value – NPV). Ovaj pokazatelj objedinjuje uticaj geoloških, tehničkih, ekonomskih i tržišnih faktora u jedinstvenu meru uspešnosti projekta i omogućava poređenje različitih varijanti razvoja rudarskog sistema [31].

Proces strateškog planiranja površinskih kopova obuhvata niz međusobno povezanih faza koje započinju izradom geološkog modela ležišta, a zatim uključuju transformaciju geološkog u ekonomski blok model, optimizaciju granica kopa, definisanje faza razvoja (pushback) i planiranje dugoročne dinamike eksploatacije (slika 3.2). Rezultat ovog procesa predstavlja strateški plan eksploatacije koji omogućava procenu ekonomskih performansi projekta kroz ključne indikatore, kao što je NPV [130].

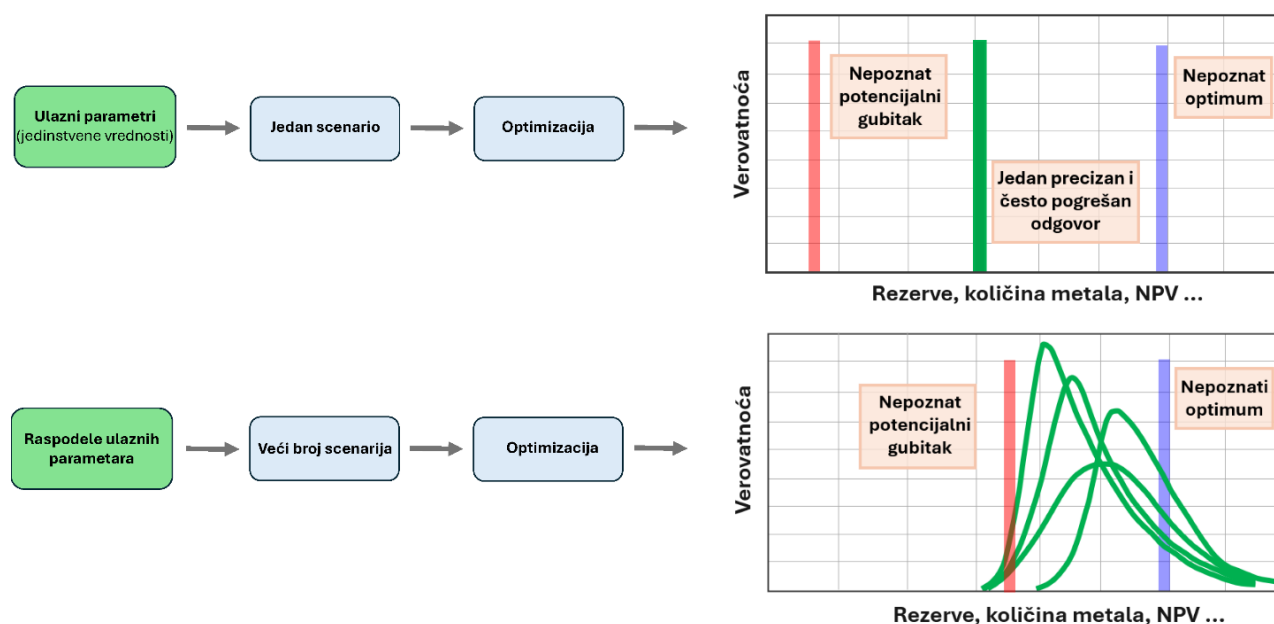


Slika 3.2. Tok procesa strateškog planiranja površinskih kopova [130]

Za rešavanje ovako kompleksnog problema razvijen je veliki broj matematičkih i računarskih modela. Tradicionalni pristupi zasnivaju se na determinističkim metodama optimizacije koje koriste jedinstvene procene ulaznih parametara, pri čemu se optimizacioni postupak sprovodi nad jednim scenarijem i rezultira jedinstvenim rešenjem. Iako ovakav pristup omogućava dobijanje preciznog numeričkog rezultata, on ne obuhvata varijabilnost ulaznih parametara i ne pruža uvid u opseg mogućih ishoda [128].

Sa druge strane, savremeni stohastički pristupi zasnivaju se na modelovanju ulaznih parametara putem simulacija i cilju generisanja većeg broja mogućih scenarija. Za svaki od generisanih scenarija sprovodi se optimizacija, čime se dobija skup mogućih rešenja koji se može analizirati kroz distribuciju rezultata. Ovakav pristup omogućava kvantifikaciju neizvesnosti i procenu rizika, kao i identifikaciju potencijalnih odstupanja od očekivanih ekonomskih performansi projekta [128].

Razlika između determinističkog i stohastičkog pristupa strateškom planiranju rudarskih projekata šematski je prikazana na slici 3.3, gde je jasno ilustrovano da deterministički modeli vode ka jedinstvenom, ali potencijalno nereprezentativnom rešenju, dok stohastički pristupi omogućavaju sagledavanje spektra mogućih ishoda i procenu njihove verovatnoće [128].



Slika 3.3. Konceptualna razlika između determinističkog i stohastičkog pristupa planiranju [128]

U nastavku ovog poglavlja biće prikazani osnovni modeli koji se koriste u optimizaciji površinskih kopova. Posebna pažnja biće posvećena ulaznim parametrima optimizacije i formiranju ekonomskog blok modela, kao i determinističkim i stohastičkim pristupima rešavanju problema strateškog planiranja eksploatacije.

3.1. Ulazni parametri optimizacije

Proces optimizacije površinskih kopova u velikoj meri zavisi od kvaliteta i pouzdanosti ulaznih parametara koji definišu geološke, tehničke i ekonomske karakteristike rudarskog projekta. Ovi parametri predstavljaju osnovu za formiranje ekonomskog blok modela, u kojem se svakom bloku pridružuje ekonomska vrednost kao ključni kriterijum optimizacije.

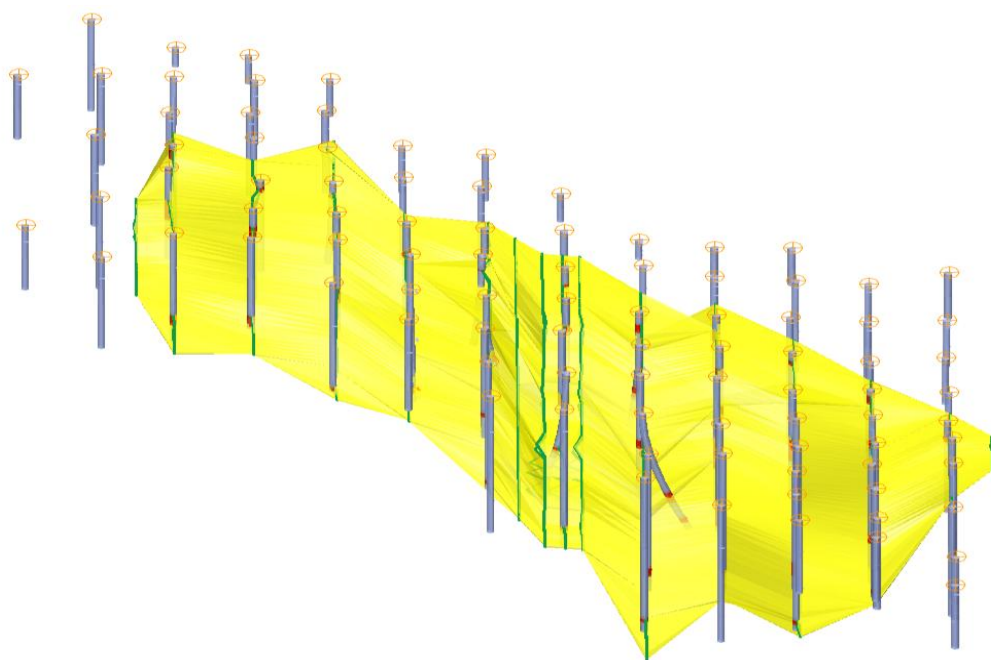
S obzirom na to da ulazni parametri direktno utiču na granice kopa, dinamiku eksploatacije i ukupnu ekonomsku vrednost projekta, njihovo pravilno definisanje predstavlja jedan od najvažnijih koraka u procesu strateškog planiranja. Poseban izazov u ovom kontekstu predstavlja činjenica da su mnogi od ovih parametara podložni neizvesnosti, što dodatno komplikuje proces optimizacije.

U nastavku ovog poglavlja prikazani su osnovni ulazni parametri koji se koriste u modelima optimizacije površinskih kopova, uključujući geološke, tehničke i ekonomske faktore, kao i njihov uticaj na formiranje ekonomskog blok modela i rezultate optimizacije.

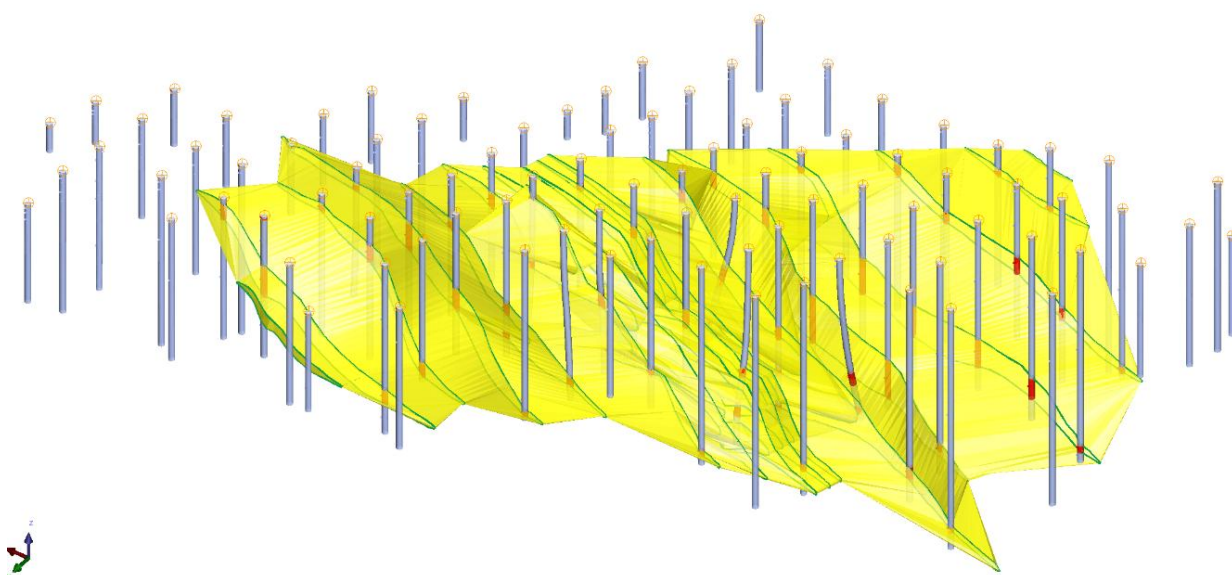
3.1.1. Geološki blok model ležišta

Osnovu za formiranje geološkog blok modela ležišta predstavlja proces procene mineralnih resursa koji se zasniva na interpretaciji rezultata geoloških istraživanja i analizi podataka dobijenih tokom istražnog bušenja i uzorkovanja. Na osnovu ovih podataka vrši se definisanje geometrije rudnog tela, procena resursa i procena prostorne raspodele sadržaja korisnih komponenti unutar ležišta.

Jedan od uobičajenih pristupa modeliranju rudnog tela zasniva se na kreiranju digitalnih geoloških profila na osnovu raspoloživih istražnih radova. Ovi profili se zatim međusobno povezuju radi formiranja trodimenzionalnih domena koji predstavljaju geometriju rudnog tela u prostoru (slika 3.4 i slika 3.5). Ovakav pristup pripada metodama eksplicitnog geološkog modeliranja, kod kojih se geometrija rudnog tela definiše direktnom geološkom interpretacijom dostupnih podataka. Prednost ovog pristupa jeste visok stepen geološke kontrole nad interpretacijom, ali može biti vremenski zahtevan i zavisi od iskustva stručnjaka [1].



Slika 3.4. Formiranje 3D geološkog domena na osnovu digitalizovanih profila istražnih bušotina



Slika 3.5. Trodimenzionalni solid rudnog tela

Iako se geometrija rudnog tela često definiše interpretacijom geoloških profila i njihovim povezivanjem u trodimenzionalni model, savremena rudarska praksa koristi i druge pristupe modeliranju.

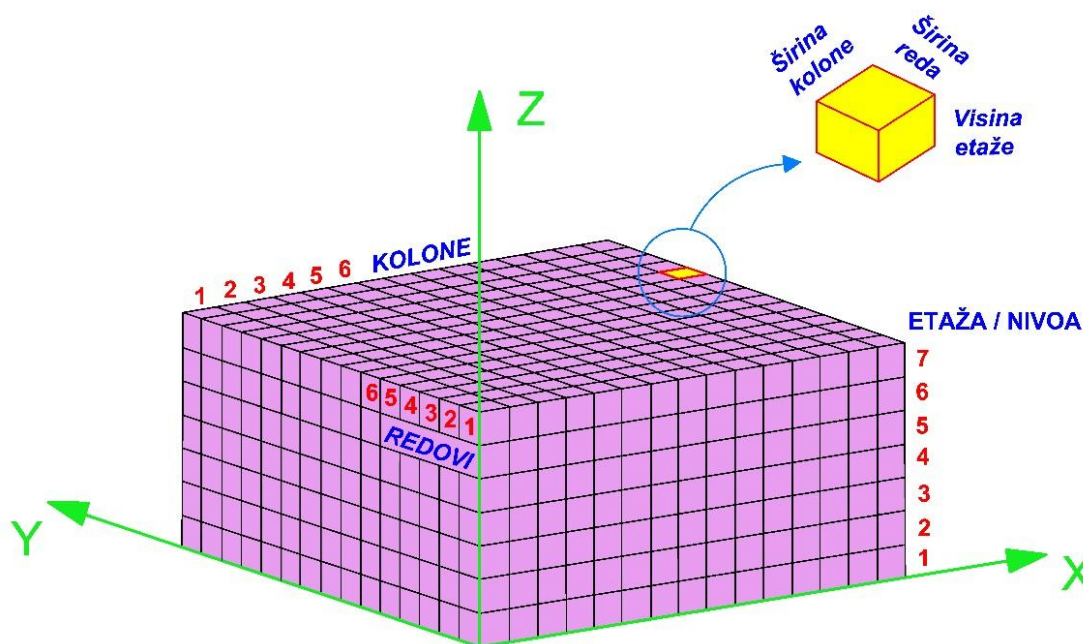
Razvojem savremenih softverskih alata sve češće se primenjuju implicitne metode geološkog modeliranja, kod kojih se geološke površine generišu automatski na osnovu podataka iz bušotina primenom matematičkih algoritama, kao što su Hermite Radial Basis Functions (HRBF) i slični postupci interpolacije. Prednost implicitnih metoda ogleda se u brzini modeliranja i mogućnosti jednostavnog ažuriranja modela pri pojavi novih istražnih podataka [131] [33].

Pored geometrizacije rudnog tela, važan deo izrade geološkog modela predstavlja i geostatistička procena raspodele sadržaja i drugih atributa u prostoru, koja omogućava kvantifikaciju prostorne varijabilnosti mineralizacije i procenu pouzdanosti dobijenih rezultata. U tu svrhu primenjuju se različite metode kojima se na bazi uzoraka iz istražnih radova vrši procena sadržaja rude (a takođe i drugih atributa) za svaki pojedinačni blok u modelu. Među metodama koje imaju najširu primenu izdvajaju se metoda Inverznog rastojanja (Inverse Distance Weighting – IDW) i geostatističke metode zasnovane na variogramskoj analizi i krigingu. Ove metode omogućavaju interpolaciju sadržaja između poznatih tačaka uzorkovanja i formiranje kontinuiranog modela raspodele mineralizacije u prostoru [47].

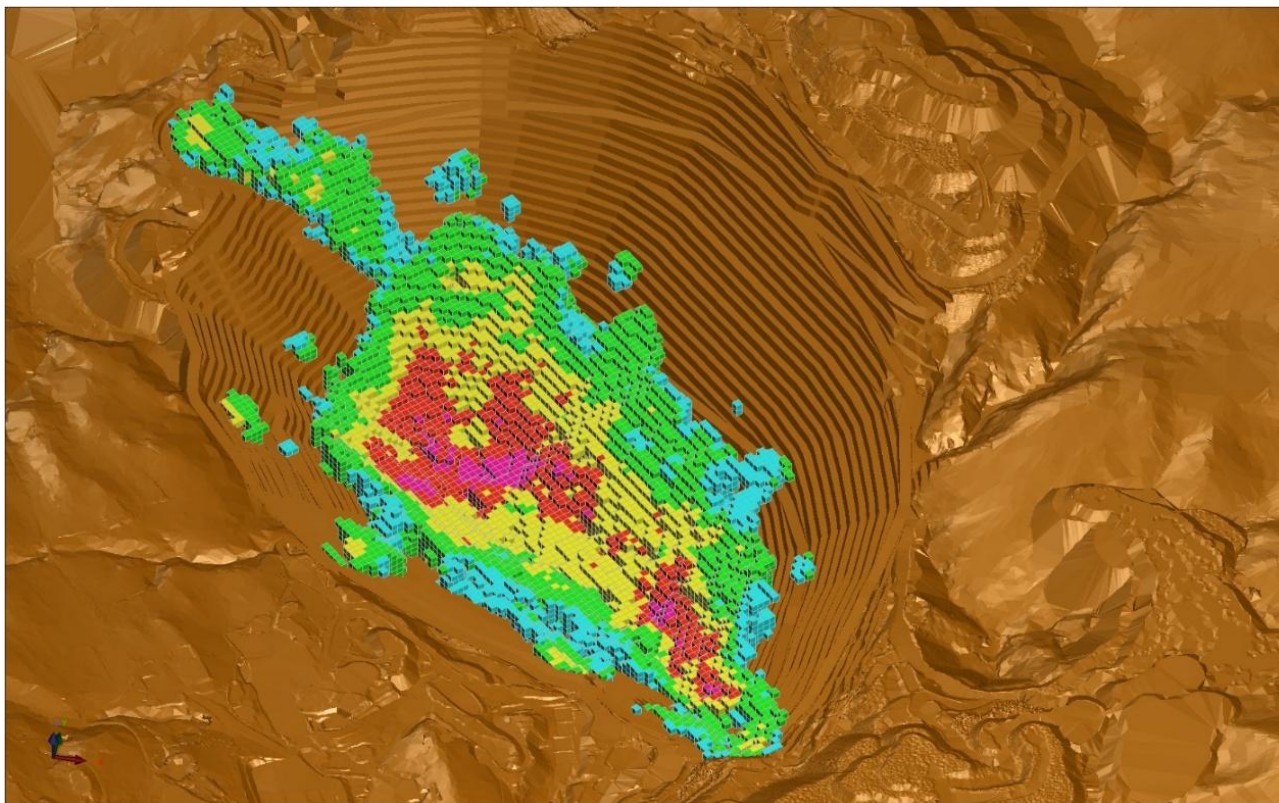
Pored pomenutih metoda, u savremenoj rudarskoj praksi sve veću ulogu imaju i geostatističke simulacije, koje omogućavaju generisanje više mogućih realizacija geološkog modela i predstavljaju osnovu za kvantifikaciju geološke neizvesnosti u daljim fazama strateškog planiranja rudnika [132].

Izbor metode modeliranja zavisi od složenosti geologije ležišta, raspoloživosti i kvaliteta istražnih podataka, kao i od ciljeva geološkog modeliranja, pri čemu se u praksi često kombinuju različiti pristupi kako bi se obezbedila što realističnija reprezentacija geološke strukture ležišta.

Rezultat procesa geološkog modeliranja predstavlja geološki blok model ležišta, koji predstavlja diskretizovanu trodimenzionalnu reprezentaciju ležišta podeljenu na veliki broj blokova definisanih u prostornoj mreži koordinata (slika 3.6). Svaki blok predstavlja zapreminsku jedinicu stenske mase kojem se dodeljuju odgovarajući geološki atributi, kao što su sadržaj korisne komponente, gustina, litološka pripadnost i drugi parametri relevantni za procenu resursa i planiranje eksploatacije. Primer izdvojenih rudnih blokova u modelu prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.6. Prostorna geometrija blok modela



Slika 3.7. Prikaz rudnih blokova u modelu ležišta u odnosu na površinski kop

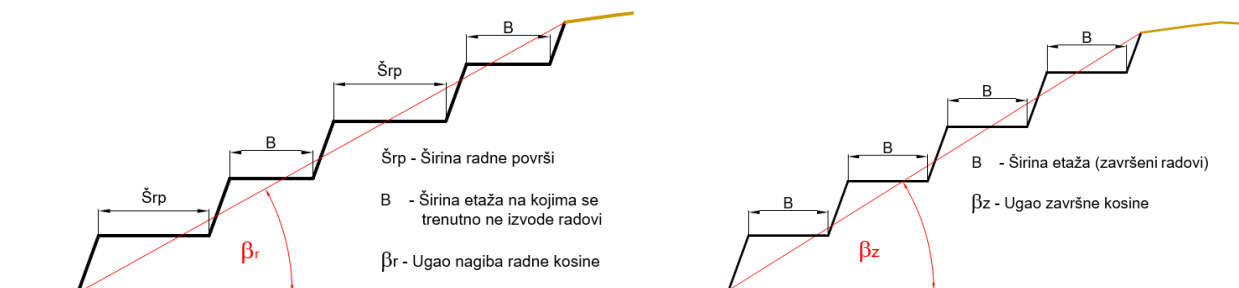
Geološki blok model predstavlja osnovu za kvantitativnu procenu mineralnih resursa. Na osnovu rezultata procene vrši se i klasifikacija mineralnih resursa prema stepenu pouzdanosti geoloških informacija. U međunarodnoj praksi najčešće se koriste kategorije Measured, Indicated i Inferred [36], dok se u domaćoj praksi često primenjuju kategorije A, B i C1 [133]. Ova klasifikacija ima značajnu ulogu u procesu planiranja eksploatacije, jer nivo pouzdanosti procenjenih resursa direktno utiče na procenu rizika i neizvesnosti u rudarskim projektima.

U praktičnom smislu geološki blok model predstavlja osnovu za dalje faze rudarskog planiranja, jer se na njegovoj osnovi formira ekonomski blok model koji se koristi u procesima optimizacije granica površinskog kopa i planiranja eksploatacije. Istovremeno, neizvesnost procene geoloških parametara predstavlja jedan od ključnih izvora rizika u strateškom planiranju rudarskih projekata, što je posebno značajno u kontekstu primene stohastičkih modela optimizacije. Uloga geološke neizvesnosti i načini njenog uključivanja u modele strateškog planiranja rudarskih projekata biće detaljnije razmotreni u narednim poglavljima.

3.1.2. Geometrijski elementi konstrukcije kopa

Geometrijski elementi konstrukcije površinskog kopa predstavljaju važan skup parametara koji definišu prostorna i tehnička ograničenja u procesu optimizacije granica kopa. Ovi parametri određuju oblik rudarskog prostora, stabilnost kosina i geometriju radnih etaža, a samim tim imaju direktan uticaj na tehničku izvodljivost i ekonomsku efikasnost eksploatacije. U optimizacionim algoritmitima ovi parametri služe da postave striktna pravila o redosledu uklanjanja materijala (geometrijska uslovljenost), odnosno da bi se eksploatisao blok na nižem horizontu (u dubini), model nalaže obavezno uklanjanje određenog broja blokova iznad njega pod tačno definisanim uglom. Na taj način, odnosi među blokovima garantuju da će projektovana kontura kopa biti geotehnički stabilna, a ne samo ekonomski isplativa. Zbog toga oni predstavljaju jedan od osnovnih ulaznih parametara u procesu strateškog planiranja rudarskih projekata [2].

Najvažniji geometrijski parametri koji se uzimaju u obzir prilikom projektovanja površinskih kopova uključuju visinu etaže (bench height), širinu radnih platformi (bench width), širinu bezbednosnih bermi (berm width), ugao nagiba etaže (bench face angle) i ugao završne kosine kopa (overall slope angle). Ovi parametri definišu konačnu geometriju rudarskog prostora i predstavljaju osnovu za projektovanje stabilnih i operativno izvodljivih kosina. Njihove vrednosti određuju se na osnovu geomehaničkih karakteristika stenskog masiva, rezultata geotehničkih analiza stabilnosti kosina, kao i tehnoloških zahteva rudarske mehanizacije i transportnog sistema. Geometrijski elementi radne i završne kosine površinskog kopa prikazane su na slici 3.8. [3].



Slika 3.8. Geometrijski elementi konstrukcije površinskog kopa [134]

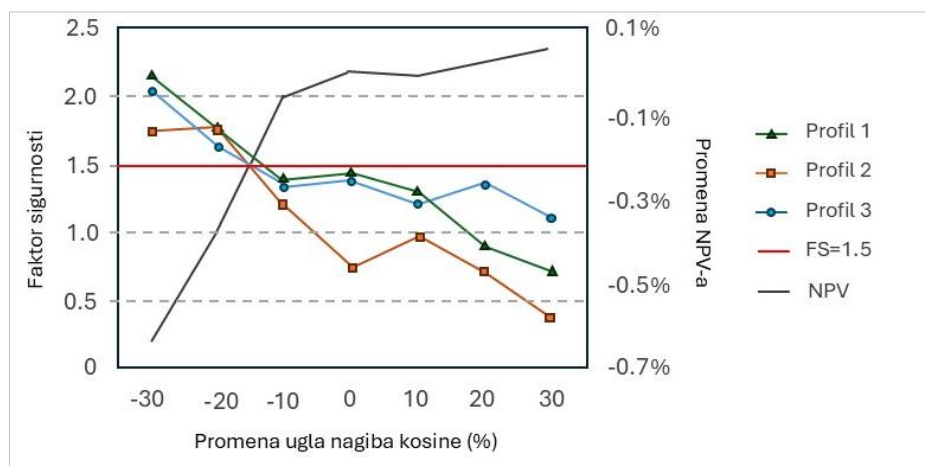
Posebno značajan parametar u procesu optimizacije površinskih kopova predstavlja ugao završne kosine (overall slope angle), koji definiše geometrijski odnos između visine i širine završne kosine kopa. Vrednost ovog parametra određuje se na osnovu detaljnih geotehničkih analiza koje obuhvataju karakterizaciju stenskog masiva, analizu diskontinuiteta, hidrogeološke uslove i procenu faktora sigurnosti kosina (Factor of Safety – FoS). U savremenoj rudarskoj praksi određivanje dozvoljenih uglova kosina zasniva se na kombinaciji empirijskih metoda, metoda granične ravnoteže i numeričkih modela stabilnosti, pri čemu je osnovni cilj definisanje geometrije kosina koja obezbeđuje dugoročnu stabilnost rudarskog prostora tokom celokupnog životnog veka rudnika [135].

Bitno je napomenuti da se prilikom projektovanja površinskih kopova geometrija kosina često definiše po sektorima kopa (slope sectors), pri čemu se različiti uglovi kosina primenjuju u zavisnosti od geoloških i geomehaničkih karakteristika stenskog masiva u pojedinim delovima ležišta. Ovakav pristup omogućava realističnije modeliranje geotehničkih uslova i preciznije određivanje optimalnih granica kopa, jer omogućava da se stabilniji delovi ležišta eksploatišu strmijim kosinama, dok se u geotehnički nepovoljnijim zonama primenjuju blaži uglovi kosina. Integracija ovih parametara u optimizacione algoritme predstavlja važan korak ka realističnijem modeliranju rudarskih sistema i pouzdanijoj proceni ekonomskih rezultata eksploatacije [135].

Sa aspekta optimizacije površinskih kopova ugao završne kosine predstavlja jedan od najuticajnijih geometrijskih parametara, jer direktno utiče na količinu jalovine koju je potrebno ukloniti da bi se pristupilo rudnom telu. Povećanje ugla kosine omogućava formiranje strmijih kosina, čime se smanjuje zapremina jalovine i koeficijent otkrivke, dok se istovremeno povećava količina ekonomski isplativih rezervi. Brojna istraživanja pokazuju da čak i relativno male promene ugla kosine mogu dovesti do značajnih promena u optimalnim granicama kopa i neto sadašnjoj vrednosti rudarskog projekta (NPV) [136] [137].

Međutim, povećanje ugla kosine istovremeno povećava geotehnički rizik nestabilnosti kosina. Odnos između promene ugla završne kosine, faktora sigurnosti kosina i neto sadašnje vrednosti rudarskog projekta prikazan je na slici 3.9.

Prikazani rezultati ilustruju da povećanje ugla kosine može dovesti do rasta ekonomske vrednosti projekta, ali istovremeno dovodi do smanjenja faktora sigurnosti, zbog čega se u praksi optimalna vrednost ugla kosine određuje kao kompromis između geotehničke stabilnosti i ekonomske efikasnosti eksploatacije [138] [139].



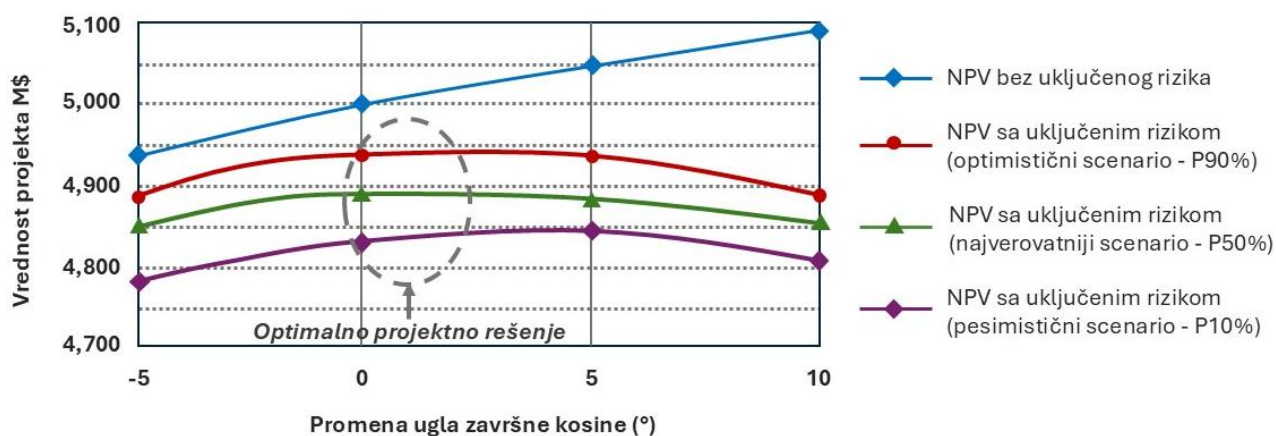
Slika 3.9. Uticaj promene ugla završne kosine na faktor sigurnosti kosina i NPV projekta [139]

U savremenim pristupima projektovanju površinskih kopova sve veći značaj dobija integracija geotehničkog rizika u ekonomske analize optimizacije kosina. Umesto da se dozvoljeni uglovi kosina definišu isključivo na osnovu kriterijuma stabilnosti (npr. faktor sigurnosti ili verovatnoća otkaza), pojedini autori predlažu kvantitativni pristup u kome se geotehnički rizik prevodi u ekonomske posledice i integriše u procenu vrednosti rudarskog projekta.

U tom pristupu promena ugla završne kosine utiče istovremeno na dve komponente, odnosno povećanje ugla kosine dovodi do smanjenja ukupnih količina jalovine i povećanja neto sadašnje vrednosti projekta, ali istovremeno povećava verovatnoću nestabilnosti kosina i potencijalne troškove usled njihovog otkaza [140].

Analizom odnosa između ekonomske vrednosti projekta i procenjenog troška geotehničkog rizika moguće je identifikovati optimalni ugao kosine koji predstavlja kompromis između maksimalne ekonomske dobiti i prihvatljivog nivoa geotehničkog rizika, što je ilustrativno prikazano na slici 3.10. Na prikazanom grafiku vrednost projekta izražena kroz neto sadašnju vrednost (NPV) prikazana je za različite scenarije rizika definisane percentilima raspodele rezultata (P10, P50 i P90). Vrednost P50 predstavlja medianu raspodele i odgovara najverovatnijem scenariju projekta, dok P10 predstavlja pesimističniji scenario (samo 10% simulacija daje nižu vrednost), a P90 optimističniji scenario (90% simulacija daje nižu vrednost).

Ovakva analiza omogućava sagledavanje uticaja geotehničkog rizika na ekonomsku vrednost projekta i identifikaciju optimalnog kompromisa između povećanja vrednosti projekta i prihvatljivog nivoa rizika stabilnosti kosina [140].



Slika 3.10. Uticaj promene ugla završne kosine na NPV rudarskog projekta uz uključivanje troškova geotehničkog rizika i identifikaciju optimalnog projektantskog rešenja [140]

Takav pristup omogućava definisanje optimalnog rešenja u kome se vrednost projekta maksimizuje uz eksplicitno uvažavanje neizvesnosti i potencijalnih posledica nestabilnosti kosina, što predstavlja značajan korak ka integrisanom upravljanju rizicima u strateškom planiranju površinskih kopova [138].

Uzimajući u obzir navedeno, geometrijski elementi konstrukcije kopa predstavljaju važan skup tehničkih ograničenja koja moraju biti uključena u optimizacione modele strateškog planiranja površinskih kopova. Tačna procena ovih parametara, posebno ugla završne kosine, omogućava generisanje tehnički izvodljivih i ekonomski optimalnih granica kopa, čime se obezbeđuje realistična procena eksploatacionih rezervi i dugoročne vrednosti rudarskog projekta.

3.1.3. Godišnji kapacitet proizvodnje

Definisanje optimalnog godišnjeg kapaciteta proizvodnje predstavlja jedan od ključnih zadataka u procesu strateškog planiranja površinskih kopova, naročito u fazama konceptualnog projektovanja i izrade studija izvodljivosti. Proizvodni kapacitet direktno utiče na dinamiku eksploatacije, projektovani životni vek rudnika (Life of Mine – LoM), obim kapitalnih ulaganja i konačne ekonomske pokazatelje projekta. Iako kapacitet proizvodnje ne predstavlja parametar koji direktno utiče na određivanje optimalnih granica površinskog kopa, on ima presudan značaj u kasnijim fazama planiranja, jer određuje dinamiku proizvodnje tokom životnog veka rudnika, čime neposredno utiče na generisanje novčanih tokova i ukupnu ekonomsku vrednost projekta [141] [142].

U praksi strateškog planiranja kapacitet proizvodnje često se inicijalno definiše kao ulazni parametar analize, ali se u daljim fazama optimizacije može redefinisati kao rezultat analize različitih varijanti razvoja rudnika, pri čemu se konačna vrednost kapaciteta određuje na osnovu kriterijuma maksimalne ekonomske efikasnosti projekta. Iz tog razloga se u savremenim studijama izvodljivosti kapacitet proizvodnje često određuje kroz iterativni proces u kojem se analiziraju različite varijante razvoja rudnika i njihovi ekonomski rezultati [143] [144].

Pri definisanju proizvodnog kapaciteta rudnika potrebno je uzeti u obzir i prirodu mineralne sirovine i karakteristike tržišta na kojem se ona plasira. Kod eksploatacije nemetalčnih mineralnih sirovina kapacitet proizvodnje često je primarno određen potražnjom na tržištu, dok raspoložive geološke rezerve u mnogim slučajevima ne predstavljaju ograničavajući faktor za trajanje eksploatacije. Nasuprot tome, kod eksploatacije metalčnih mineralnih sirovina proizvodni kapacitet rudnika najčešće je uslovljen količinom raspoloživih rezervi i projektovanim životnim vekom rudnika, dok tržišni plasman proizvoda u većini slučajeva ne predstavlja dominantno ograničenje razvoja projekta [145].

U inicijalnoj fazi planiranja rudarskih projekata, određivanje proizvodnog kapaciteta tradicionalno se zasniva na empirijskim odnosima [1]. Jedan od najpoznatijih i najčešće korišćenih pristupa u ovom kontekstu predstavlja tzv. Taylorovo pravilo [146] [147] [148], koje uspostavlja empirijsku vezu između ukupne količine rudnih rezervi i optimalnog godišnjeg kapaciteta eksploatacije rude. Na osnovu statističke analize većeg broja operativnih i zatvorenih površinskih kopova, Taylor je predložio sledeće relacije za procenu životnog veka rudnika i optimalnog kapaciteta proizvodnje:

$$V_k = 0.2 \cdot (R_e)^{0.25} \quad (3.1)$$

$$K_p = 5 \cdot (R_e)^{0.75} \quad (3.2)$$

gde su:

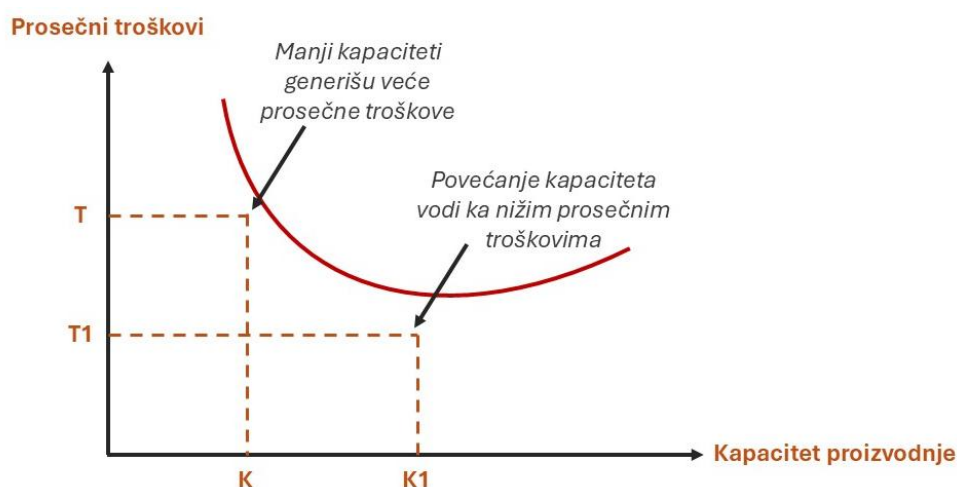
- V_k – projektovani životni vek kopa (godine),
- R_e – očekivane eksploatacione rezerve rude (t),
- K_p – godišnji kapacitet proizvodnje rude (miliona t/god).

Ove relacije predstavljaju pojednostavljeni empirijski model koji se primarno koristi u ranim fazama strateškog planiranja, dok se u kasnijim fazama projektovanja optimalni proizvodni kapacitet određuje detaljnijom tehno-ekonomskom analizom rudarskog sistema.

Kasnija empirijska istraživanja zasnovana na znatno većem skupu podataka ukazuju da je stvarni odnos između raspoloživih rezervi i proizvodnog kapaciteta znatno složeniji. Long [149] je analizirajući preko 1200 rudarskih operacija različitih tipova ležišta i metoda eksploatacije, pokazao da povećanje eksploatacionih rezervi ne dovodi do proporcionalnog povećanja proizvodnog kapaciteta rudnika, kako je to implicitno pretpostavljeno u originalnom Taylorovom modelu. Utvrđeno je da instalirani kapacitet kod površinskih kopova raste približno sa stepenom od oko 0.65 ukupnih rezervi, što ukazuje na postojanje značajnih fizičkih i tehnoloških ograničenja koja limitiraju mogućnost proporcionalnog povećanja proizvodnje.

Ovakvo ponašanje posledica je činjenice da definisanje kapaciteta proizvodnje u realnim uslovima ne zavisi isključivo od količine raspoloživih rezervi, već od složene interakcije geoloških, tehničko-tehnoloških i ekonomskih faktora koji zajednički određuju dugoročnu vrednost rudarskog projekta.

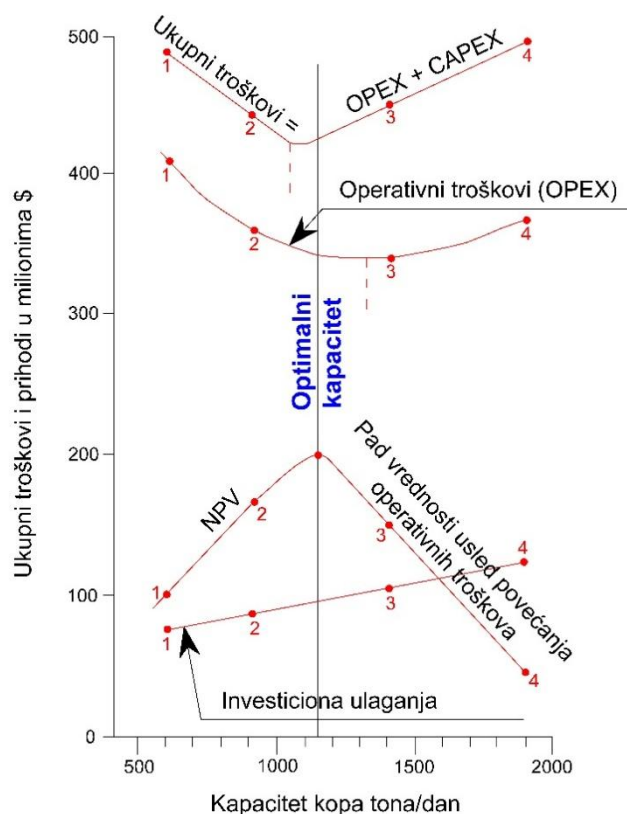
Jedan od ključnih faktora koji utiče na definisanje proizvodnog kapaciteta jeste princip ekonomije obima, koji je ilustrovan na slici 3.11. Povećanje proizvodnog kapaciteta u ranim fazama razvoja rudnika omogućava smanjenje jediničnih operativnih troškova po toni proizvedene rude, prvenstveno usled efikasnijeg korišćenja rudarske mehanizacije, smanjenja specifične potrošnje energije i raspodele fiksnih troškova na veći obim proizvodnje. Paralelno sa tim, veći proizvodni kapacitet omogućava povoljniju raspodelu kapitalnih ulaganja (CAPEX), jer se visoki inicijalni troškovi razvoja rudnika i rudničkih objekata raspodeljuju na veći broj proizvedenih tona tokom životnog veka projekta [150] [151].



Slika 3.11. Princip ekonomije obima

Međutim, neograničeno povećanje proizvodnog kapaciteta može postati kontraproduktivno. U određenoj tački dodatna kapitalna ulaganja u rudarsku opremu, infrastrukturu i postrojenja za preradu rude prestaju da donose proporcionalno povećanje ekonomske koristi. Kao posledica toga, odnos između proizvodnog kapaciteta i ekonomske vrednosti rudarskog projekta često ima oblik krive sa jasno izraženim optimumom, pri čemu NPV raste sa povećanjem kapaciteta do određene tačke, nakon čega počinje da opada usled povećanja investicionih i operativnih troškova [152] [153].

Na slici 3.12 šematski je prikazana tipična zavisnost između proizvodnog kapaciteta rudnika i neto sadašnje vrednosti projekta (NPV) [154]. Početno povećanje kapaciteta dovodi do rasta ekonomske vrednosti projekta zahvaljujući efektima ekonomije obima, dok nakon dostizanja optimalnog kapaciteta dodatno povećanje proizvodnje zahteva značajna kapitalna ulaganja koja mogu prevazići ostvarene ekonomske koristi [152] [153].



Slika 3.12. Zavisnost između proizvodnog kapaciteta rudnika i NPV-a projekta [154] [155]

Pored ekonomskih faktora, definisanje proizvodnog kapaciteta rudnika uslovljeno je i nizom tehničko-tehnoloških ograničenja koja mogu predstavljati tzv. uska grla u proizvodnom sistemu. Dok prethodno opisani odnosi između proizvodnog kapaciteta i ekonomske vrednosti projekta ukazuju na postojanje ekonomskog optimuma, u realnim uslovima povećanje kapaciteta često je ograničeno tehničkim mogućnostima pojedinih segmenata rudarskog sistema. Jedno od najznačajnijih ograničenja predstavlja kapacitet postrojenja za preradu rude, koje u mnogim rudarskim projektima predstavlja jedan od tehnološki i investiciono najzahtevnijih delova rudarskog sistema. Kapacitet drobilica, mlinova i flotacionih linija najčešće određuje maksimalni protok rude kroz proizvodni sistem, čime praktično postavlja gornju granicu proizvodnje rudnika [141].

Savremena istraživanja ukazuju da ekonomija obima i odnos fiksnih i varijabilnih troškova različito utiču na rudarski i preradni deo sistema. Povećanje kapaciteta prerade u početnim fazama dovodi do rasta NPV usled efekta ekonomije obima, dok nakon dostizanja optimalnog kapaciteta dodatno povećanje proizvodnje zahteva veća kapitalna ulaganja i operativne troškove, što dovodi do opadanja NPV. Analiza takođe pokazuje da promene kapaciteta rudarskog sistema imaju veći uticaj na ekonomsku vrednost projekta nego promene kapaciteta prerade, što naglašava značaj pravilnog određivanja kapaciteta eksploatacije u strateškom planiranju rudnika [150].

Pored toga, značajnu ulogu imaju i infrastrukturna ograničenja, uključujući raspoloživost energetske kapaciteta, transportne infrastrukture, skladišnih kapaciteta i logističkih sistema za transport koncentrata ili finalnog proizvoda. U slučajevima kada ovi sistemi nisu u mogućnosti da podrže planirani intenzitet eksploatacije, oni postaju tzv. usko grlo (bottleneck) u proizvodnom lancu rudarskog sistema [156].

Sa tehnološkog aspekta, povećanje kapaciteta može biti ograničeno geometrijskim i operativnim karakteristikama površinskog kopa. Prostorna ograničenja unutar kopa, pre svega dužina raspoloživog fronta radova, minimalna radna širina etaža i bezbedni razmaci između rudarske mehanizacije, direktno mogu limitirati intenzitet rudarskih radova (maksimalnu količinu iskopina po dužnom metru etaže). Kritično ograničenje predstavlja i dinamika otkopavanja jalovine, gde nagli porast koeficijenta otkrivke u određenim fazama razvoja može stvoriti nerealne zahteve za

angažovanjem dodatne mehanizacije. Nemogućnost efikasnog ujednačavanja koeficijenta otkrivke tokom životnog veka rudnika često dovodi do operativnih uskih grla, ugrožavajući kontinuitet proizvodnje rude i stabilnost novčanog toka [1] [2] [3].

Uzimajući u obzir sve prethodno razmatrane geološke, tehničko-tehnološke, infrastrukturne i ekonomske faktore, savremeni pristupi strateškom planiranju rudarskih projekata proizvodni kapacitet ne posmatraju kao unapred zadatu konstantu, već kao rezultat optimizacionog procesa u kojem se istovremeno analiziraju geološki potencijal ležišta, ograničenja rudarskog i preradnog sistema, raspoloživa infrastruktura i ekonomski parametri projekta. Iz tog razloga definisanje optimalnog kapaciteta predstavlja važan korak u uspostavljanju dugoročnog plana eksploatacije i jedan je od ključnih ulaznih parametara u modelima optimizacije površinskih kopova i planiranja proizvodnje.

3.1.4. Troškovi eksploatacije i prerade rude

U procesu strateškog planiranja površinskih kopova analiza troškova proizvodnje ima ključnu ulogu u proceni ekonomske održivosti rudarskog projekta i definisanju optimalnih parametara eksploatacije. Troškovi nastaju u različitim fazama razvoja i eksploatacije rudnika i mogu imati različitu ekonomsku prirodu i vremensku dinamiku nastanka. Iz tog razloga, u rudarskoj ekonomici i planiranju rudnika neophodno je jasno razlikovati osnovne kategorije troškova prema njihovom poreklu i načinu nastanka.

U okviru rudarskog planiranja troškovi proizvodnje mogu se klasifikovati prema njihovom poreklu i načinu nastanka na četiri osnovne kategorije [2]:

- kapitalne troškove,
- varijabilne troškove,
- fiksne troškove i
- troškove zatvaranja rudnika.

Kapitalni troškovi (CAPEX) predstavljaju investiciona ulaganja koja nastaju u fazama razvoja rudarskog projekta i obuhvataju izgradnju rudnika, nabavku rudarske opreme, izgradnju postrojenja za prerađu rude, izgradnju energetskih sistema, transportne infrastrukture i drugih objekata neophodnih za funkcionisanje rudarskog sistema. Ovi troškovi se najčešće javljaju jednokratno ili u nekoliko faza tokom razvoja rudnika i predstavljaju osnovu za uspostavljanje projektovanog proizvodnog kapaciteta [2].

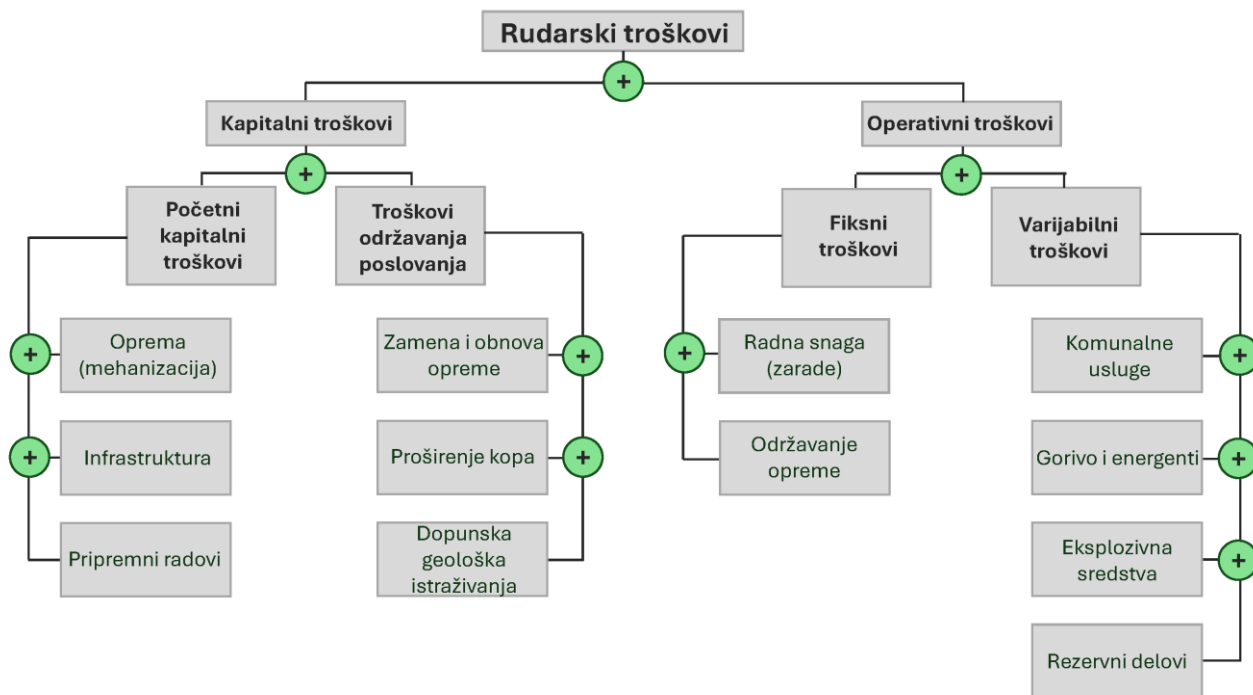
Varijabilni troškovi prate dinamiku eksploatacije i menjaju se u skladu sa njenim obimom. U ovu kategoriju spadaju troškovi bušenja i miniranja, utovara, transporta materijala, prerade rude, potrošnje energenata, reagensa i drugih potrošnih materijala. U rudarskom planiranju ovi troškovi se najčešće izražavaju kao jedinični troškovi po toni materijala (€/t ili \$/t) i predstavljaju osnovne ulazne parametre u optimizacione modele za određivanje granica površinskog kopa [2].

Fiksni troškovi predstavljaju troškove koji se javljaju periodično i koji u kraćim vremenskim intervalima ne zavise direktno od obima proizvodnje. Ovi troškovi uključuju administrativne troškove, troškove održavanja infrastrukture, deo troškova radne snage i druge organizacione rashode rudarskog sistema. Iako se fiksni troškovi u ekonomskim analizama uzimaju u obzir prilikom procene ukupne profitabilnosti rudarskog projekta, u procesu optimizacije granice površinskog kopa oni se često transformišu u ekvivalentne varijabilne troškove kako bi se omogućila njihova integracija u ekonomski blok model [2].

Posebnu kategoriju troškova predstavljaju troškovi zatvaranja rudnika i rekultivacije, koji obuhvataju aktivnosti vezane za sanaciju eksploatisanog prostora, uklanjanje rudarskih objekata, stabilizaciju jalovišta i dugoročnu zaštitu životne sredine. Ovi troškovi imaju značajnu ulogu u ukupnoj ekonomskoj proceni rudarskih projekata, ali se u procesu optimizacije granica površinskog kopa

obično ne uključuju direktno u model troškova, već se analiziraju u kasnijim fazama ekonomske evaluacije projekta [2].

Struktura troškova rudarskih projekata može se posmatrati i kroz širu podelu na kapitalne troškove (CAPEX) i operativne troškove (OPEX), pri čemu operativni troškovi obuhvataju kako fiksne tako i varijabilne troškove proizvodnje. U širem smislu razmatraju se i troškovi zatvaranja rudnika i rekultivacije koji nastaju na kraju životnog veka rudarskog projekta. Šematski prikaz opšte strukture troškova rudarskog sistema dat je na slici 3.13 [157].



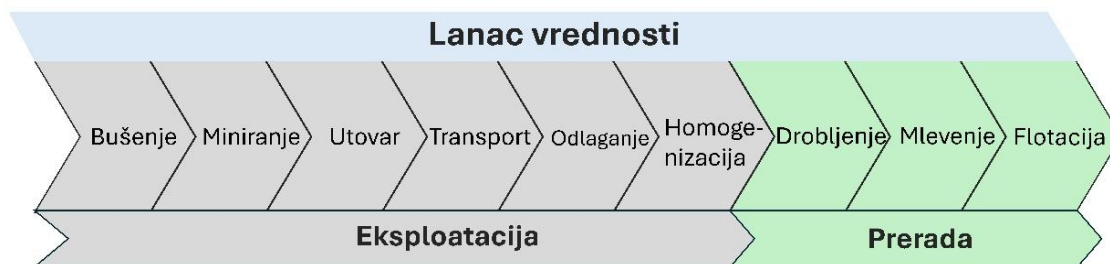
Slika 3.13. Opšta struktura troškova rudarskog sistema [157]

U procesu optimizacije granica površinskog kopa u model troškova najčešće se uključuju samo varijabilni troškovi proizvodnje. Razlog za to je činjenica da optimizacioni algoritmi određuju optimalnu konturu kopa na osnovu ekonomske vrednosti pojedinačnih blokova, koja se formira kao razlika između prihoda od eksploatacije i varijabilnih troškova proizvodnje. Fiksni troškovi se u tom slučaju ne mogu direktno koristiti u optimizacionom modelu, već se najčešće transformišu u ekvivalentne varijabilne troškove raspodelom na jedinicu proizvodnje. Na primer, ukoliko je proizvodnja rudnika ograničena kapacitetom postrojenja za preradu, ukupni fiksni troškovi rudarskog sistema mogu se podeliti sa godišnjim kapacitetom prerade kako bi se dobio ekvivalentni trošak po toni materijala koji se zatim dodaje varijabilnim troškovima prerade [2].

Kapitalni troškovi i troškovi zatvaranja rudnika, sa druge strane, ne uključuju se direktno u optimizacioni model za određivanje granice kopa. Razlog za to je činjenica da optimizacija kopa predstavlja postupak koji maksimizuje razliku između varijabilnih prihoda i varijabilnih troškova proizvodnje. Stvarna ekonomska vrednost rudarskog projekta dobija se tek u kasnijim fazama planiranja, kada se kapitalni troškovi i troškovi zatvaranja uključe u analizu novčanih tokova i proračun neto sadašnje vrednosti projekta (NPV) [2].

U savremenoj rudarskoj literaturi troškovi proizvodnje često se analiziraju u okviru koncepta rudarskog lanca vrednosti (mine value chain), koji obuhvata niz međusobno povezanih tehnoloških faza od eksploatacije ležišta do prerade mineralne sirovine i plasmana finalnog proizvoda na tržište. Ovaj pristup omogućava identifikaciju ključnih faza proizvodnog procesa u kojima nastaju operativni troškovi rudarskog sistema.

Kao što je prikazano na slici 3.14, rudarski lanac vrednosti obuhvata niz operacija koje se mogu podeliti na faze eksploatacije (drilling, blasting, loading, hauling, stockpiling i blending) i faze prerade rude (crushing, milling i flotation). Svaka od ovih faza generiše specifične operative troškove koji zajedno čine ukupne troškove proizvodnje rudarskog sistema [158].



Slika 3.14. Rudarski lanac vrednosti (mine value chain) [158]

U skladu sa navedenim, varijabilni operativni troškovi eksploatacije (mining costs) i prerade rude (processing costs) predstavljaju ključne ulazne parametre u procesu formiranja ekonomskog blok modela koji se koristi u optimizaciji granica površinskog kopa. Promene u jediničnim troškovima proizvodnje direktno utiču na ekonomsku vrednost blokova u modelu ležišta, čime mogu značajno promeniti optimalnu konturu kopa i projektovane parametre eksploatacije. Zbog toga tačna procena ovih troškova predstavlja jedan od osnovnih preduslova za pouzdano vrednovanje rudarskih projekata i realističnu procenu njihove ekonomske održivosti [159].

I pored toga što kapitalni troškovi (CAPEX) i troškovi zatvaranja rudnika obično nisu direktno uključeni u algoritme optimizacije granica površinskog kopa, oni imaju ključnu ulogu u kasnijim fazama ekonomske evaluacije rudarskih projekata kroz proračun novčanih tokova i neto sadašnje vrednosti (NPV). Savremena istraživanja ukazuju da tačna procena kapitalnih ulaganja predstavlja jedan od najvažnijih faktora u proceni ekonomske održivosti rudarskih projekata, jer značajno utiče na procenu investicionog rizika i dugoročnu vrednost projekta. Zbog toga se u savremenim pristupima strateškom planiranju rudnika kapitalni i operativni troškovi analiziraju integrisano u okviru ekonomskih modela vrednovanja rudarskih projekata [160].

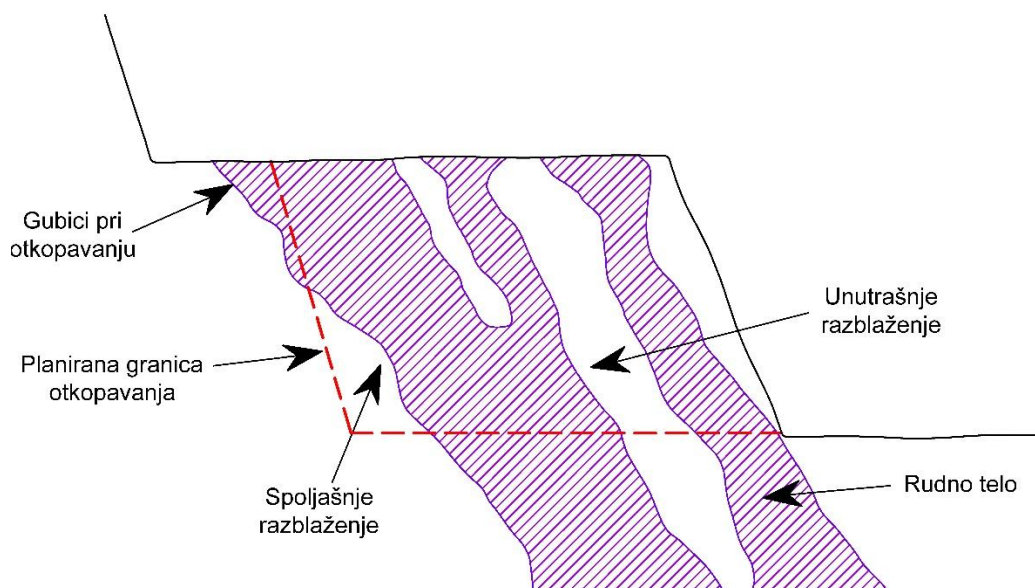
3.1.5. Gubici i razblaženja prilikom eksploatacije

U procesu eksploatacije mineralnih ležišta gotovo je nemoguće ostvariti potpuno selektivno izdvajanje rude od jalovine. Tokom rudarskih operacija dolazi do pojave gubitaka rude i razblaženja, koji predstavljaju neizbežne posledice tehničkih i tehnoloških ograničenja rudarske proizvodnje. Ovi faktori imaju značajan uticaj na procenu eksploatacionih rezervi, kvalitet rude koja se doprema u postrojenje za preradu i ukupnu ekonomsku vrednost rudarskog projekta. Zbog toga se prilikom izrade ekonomskog blok modela i optimizacije granica površinskog kopa geološki podaci o sadržaju i tonaži rude koriste primenom faktora gubitaka i razblaženja kako bi se dobila realističnija procena proizvodnih parametara rudnika [161].

Gubici rude (ore losses) predstavljaju deo mineralne sirovine koji ostaje neeksploatisan u ležištu ili se gubi tokom procesa eksploatacije i transporta. Sa druge strane, razblaženje (osiromašenje) rude (dilution) predstavlja mešanje rude sa okolnim jalovinskim materijalom tokom eksploatacije, čime dolazi do povećanja ukupne mase materijala koja se transportuje i prerađuje, ali uz smanjenje prosečnog sadržaja korisne komponente u rudi. Razblaženje se najčešće izražava kao odnos količine jalovine koja se zajedno sa rudom transportuje u postrojenje za preradu i ukupne mase materijala koji ulazi u proces prerade [161].

Savremena rudarska teorija i praksa klasifikuju razblaženje primarno prema mestu nastanka i mogućnosti kontrole, razlikujući interne i eksterne faktore. Interno razblaženje (internal dilution) javlja se unutar samog rudnog bloka usled prisustva jalovinskih ili niskosadržajnih inkluzija koje se ne mogu selektivno izdvojiti tokom eksploatacije. Spoljašnje razblaženje (external ili contact

dilution) nastaje kada se tokom eksploatacije zahvati deo jalovine izvan rudnog tela, najčešće u zoni kontakta rude i jalovine (slika 3.15). Ovaj oblik razblaženja zavisi od geometrije ležišta, geometrije površinskog kopa, tehnike bušenja i miniranja, kao i od veličine i selektivnosti rudarske opreme.



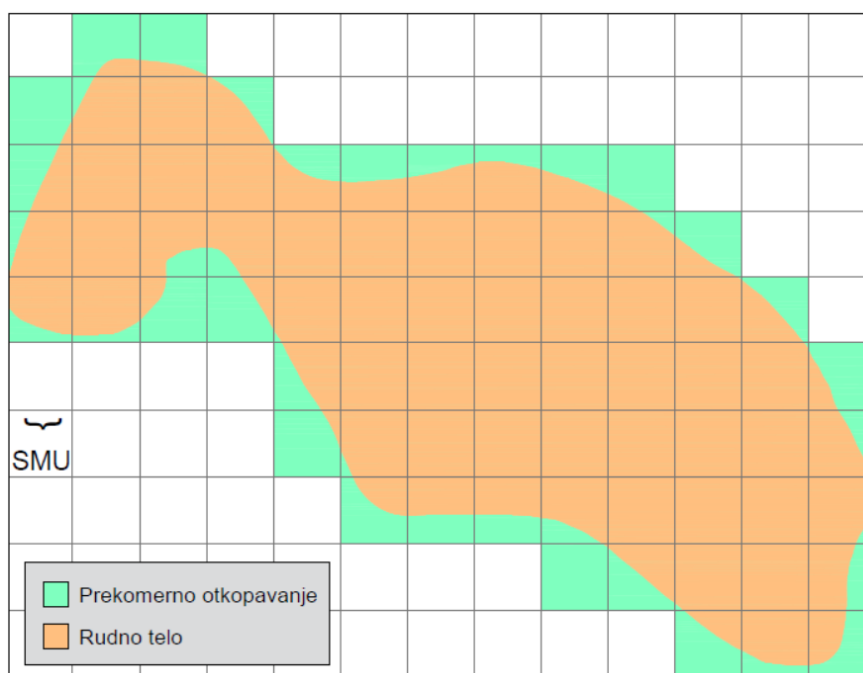
Slika 3.15. Gubici i razblaženja rude u površinskoj eksploataciji

Ova dva parametra imaju suprotne efekte na proizvodnju rude, pri čemu povećanje gubitaka dovodi do smanjenja ukupne količine eksploatisane rude, dok povećanje razblaženja smanjuje sadržaj korisne komponente u rudi koja se doprema u postrojenje za preradu.

Strategija upravljanja ovim parametrima zavisi prvenstveno od specifične vrednosti mineralne sirovine. Kod ruda visoke vrednosti (plemeniti metali, bakar sa visokim procentima), ekonomski je opravdano prihvatiti veće razblaženje kako bi se gubici sveli na minimum i osiguralo maksimalno iscrpljenje resursa. Nasuprot tome, kod sirovina niže vrednosti ili ležišta sa marginalnim sadržajima, prioritet je kontrola razblaženja. U takvim slučajevima, prerada jalovog materijala koji prati rudu može učiniti proces koncentracije neprofitabilnim, zbog čega se svesno prihvataju veći gubici na kontaktima kako bi se očuvao tehnološki prag rentabilnosti prerade [1] [161].

U praksi je nastanak gubitaka i razblaženja u rudarskim operacijama posledica više tehničkih i tehnoloških faktora. Jedan od najvažnijih faktora predstavlja geometrija ležišta i način modelovanja rudnog tela. U geološkim blok modelima ležišta prostor se deli na pravilne blokove pravougaonog oblika, dok su stvarna rudna tela često nepravilne geometrije. Zbog toga dolazi do pojave kontakt razblaženja (contact dilution), gde se prilikom eksploatacije zajedno sa rudom zahvata i deo jalovine koji se nalazi u istom bloku [162].

Drugi značajan faktor koji određuje nivo gubitaka i razblaženja je granica selektivnosti rudarske opreme, definisana kroz koncept selektivne rudarske jedinice (Selective Mining Unit – SMU). Na slici 3.16 je prikazano kako kruta mreža SMU blokova ne može savršeno pratiti prirodne granice rudnog tela. Upotreba krupne mehanizacije uslovljava otkopavanje celih blokova, pri čemu zelena polja na slici jasno ilustruju proces prekomernog otkopavanja (over-mining) koji uzrokuje razblaženje rude. Ovaj problem je dodatno naglašen u fazi bušenja i miniranja, gde usled eksplozije dolazi do prostornog rasipanja i mešanja rude sa okolnom jalovinom. Rezultat je otežana selekcija tokom utovara, čime se inicijalno projektovano razblaženje dodatno uvećava u realnim operativnim uslovima [163] [164] [165].



Slika 3.16. Odnos selektivne rudarske jedinice (SMU) i stvarnih granica rudnog tela [165]

Sa ekonomskog aspekta, gubici i razblaženje imaju značajan uticaj na ekonomsku vrednost rudarskog projekta. Gubici rude direktno smanjuju količinu metala koja se može proizvesti i prodati na tržištu, dok razblaženje povećava količinu materijala koji mora biti eksploatisan, iako deo tog materijala nema ekonomsku vrednost. Time dolazi do povećanja operativnih troškova rudnika i smanjenja prosečnog sadržaja metala u rudi koja ulazi u postrojenje za preradu. U ekstremnim slučajevima razblaženje može dovesti do toga da rudni blokovi koji se nalaze na obodima rudnog tela, a koji su prema geološkom modelu bili ekonomski isplativi, nakon razblaženja postanu neekonomični za preradu [161].

U savremenim softverima za rudarsko planiranje (kao što je npr. Whittle), gubici i razblaženje se u model uvode kroz tzv. rudarske faktore (mining factors). Ovi faktori se najčešće definišu u obliku procentualnih parametara, kao što su faktor iskorišćenja rude (mining recovery) i faktor razblaženja (dilution). Na primer, faktor iskorišćenja od 95% znači da se 95% rude iz geološkog modela može eksploatisati, dok preostalih 5% predstavlja gubitke rude. Slično tome, razblaženje od 5% znači da se na svakih 100 tona eksploatisane rude zahvata dodatnih 5 tona jalovine. U procesu pripreme blok modela često se primenjuje i postupak umanjivanja osnovne veličine bloka (re-blocking), kojim se geološki blokovi prilagođavaju veličini selektivne rudarske jedinice (Selective Mining Unit – SMU), čime se softverski simulira operativno razblaženje tokom eksploatacije.

Uticaj gubitaka i razblaženja na količinu i kvalitet eksploatisane rude može se kvantitativno opisati odgovarajućim matematičkim relacijama. Količina otkopane rude može se odrediti na osnovu količine rude u masivu primenom koeficijenata rudarskog iskorišćenja i razblaženja prema sledećem izrazu [145]:

$$Q_{or} = Q_{rm} \cdot K_i \cdot K_r \quad (3.3)$$

gde su:

- Q_{or} – količina otkopane rude,
- Q_{rm} – količina rude u masivu prema geološkom modelu,
- K_i – koeficijent iskorišćenja rude,
- K_r – koeficijent razblaženja rude.

Koeficijenti iskorišćenja i razblaženja mogu se izraziti kao funkcija procenta gubitaka i razblaženja [145]:

$$K_i = 1 - \frac{G}{100} \quad (3.4)$$

$$K_r = 1 + \frac{R}{100} \quad (3.5)$$

gde su:

- G – gubici rude tokom eksploatacije (%),
- R – razblaženje rude (%).

Sadržaj korisne komponente u otkopanoj rudi može se odrediti primenom sledeće relacije [145]:

$$S_{or} = K_i \cdot S_{rm} + (K_r - 1) \cdot S_r \quad (3.6)$$

gde su:

- S_{or} – srednji sadržaj metala u otkopanoj rudi,
- S_{rm} – srednji sadržaj rude u masivu (prema geološkom modelu),
- S_r – sadržaj metala u materijalu koji učestvuje u razblaženju.

Iz navedenih relacija može se zaključiti da su za procenu količine i kvaliteta eksploatisane rude, pored geoloških podataka o sadržaju i tonaži rude u masivu, neophodni i podaci o gubicima i razblaženju. Ovi parametri se u fazi projektovanja rudnika obično određuju na osnovu empirijskih procena i iskustva sa sličnih rudarskih operacija, dok se u fazi eksploatacije mogu preciznije odrediti na osnovu analize proizvodnih podataka i bilansiranja proizvodnje [145].

Poseban značaj gubici i razblaženje imaju i u procesu određivanja graničnog sadržaja rude (cut-off grade). Budući da razblaženje dovodi do smanjenja prosečnog sadržaja metala u rudi koja ulazi u postrojenje za preradu, projektovani sadržaj metala u rudnim blokovima u ekonomskom blok modelu koriguje se primenom faktora gubitaka i razblaženja. Na taj način dobija se realističnija procena sadržaja i tonaže rude koja će biti dostupna tokom eksploatacije, što omogućava pouzdanije određivanje optimalnih granica površinskog kopa i ekonomskih parametara rudarskog projekta. S obzirom na značaj graničnog sadržaja u procesu vrednovanja mineralnih resursa i optimizacije rudarskih projekata, detaljnija analiza koncepta graničnog sadržaja i metoda njegovog određivanja biće predstavljena u posebnom poglavlju disertacije (*poglavlje 3.1.9*).

Nakon svega navedenog jasno je da precizna procena gubitaka i razblaženja nije samo tehničko pitanje, već jedan od značajnijih koraka u definisanju ekonomske održivosti rudarskog projekta. S obzirom na to da ovi parametri direktno utiču na količinu i kvalitet korisne mineralne sirovine, njihovo pravilno uključivanje u proces strateškog planiranja omogućava realnu procenu eksploatacionih rezervi. Kvantifikacija ovih faktora kroz savremene softverske alate osigurava da strateški planovi ne budu samo teoretski optimalni, već i operativno ostvarivi u realnim uslovima eksploatacije.

3.1.6. Iskorišćenje metala u procesu prerade

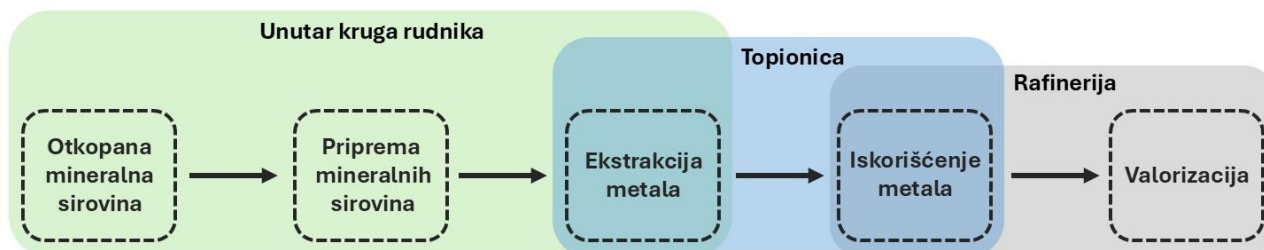
Iskorišćenje metala predstavlja jedan od ključnih parametara u procesu vrednovanja mineralnih resursa i ekonomskog modelovanja rudarskih projekata. U ekonomskom blok modelu iskorišćenje metala ima značajnu ulogu jer omogućava transformaciju geološki definisanog sadržaja metala u realnu količinu metala koja se može proizvesti i prodati na tržištu. Drugim rečima, iskorišćenje predstavlja procenat korisne komponente koji se može tehnički i ekonomski izdvojiti iz rude tokom procesa prerade [166]. Na taj način iskorišćenje predstavlja jedan od osnovnih parametara koji utiče na procenu prihoda rudarskog projekta i ekonomsku vrednost rudnih blokova.

Ukupno iskorišćenje metala sa praktičnog aspekta predstavlja rezultat niza uzastopnih tehnoloških faza kroz koje sirovina prolazi. U rudarsko-metalurškim sistemima koji obuhvataju proizvodnju koncentrata i njegovu dalju metaluršku preradu, ovaj parametar se primarno deli na dve ključne komponente:

- Iskorišćenje u postrojenju za pripremu i preradu mineralnih sirovina (processing recovery) - Ova faza obuhvata procese kao što su drobljenje, mlevenje, flotacija ili drugi postupci koncentracije, u kojima se korisna komponenta izdvaja iz rude i koncentriše. Rezultat ove faze je koncentrat koji sadrži značajno viši sadržaj korisne komponente u odnosu na ulaznu rudu [166].
- Metalurško iskorišćenje u fazi rafinacije (metallurgical recovery) - Ova komponenta se ostvaruje tokom procesa topljenja i rafinacije dobijenog koncentrata. U ovoj finalnoj fazi, metal se izdvaja iz koncentrata i proizvodi u obliku tržišno upotrebljivog proizvoda visokog stepena čistoće, kao što je npr. katodni bakar [167].

Tokom oba ova procesa dolazi do određenih tehnoloških gubitaka metala. Integracijom ovih faktora dobija se finalni koeficijent ukupnog iskorišćenja metala, koji predstavlja proizvod iskorišćenja u postrojenju za preradu i iskorišćenja u metalurškoj fazi prerade. Ovaj koeficijent je ključan za proces optimizacije, jer geološki sadržaj u ležištu prevodi u realno naplativu količinu rafinisanog metala.

Važno je napomenuti da struktura proizvodnog lanca može značajno uticati na način definisanja ovih parametara u ekonomskim analizama. U mnogim rudarskim projektima, proizvođači prodaju koncentrat kao finalni proizvod, pri čemu se dalja metalurška prerada obavlja u nezavisnim topionicama i rafinerijama. U takvim slučajevima, u ekonomskom modelu rudarskog projekta najčešće se primenjuje samo iskorišćenje u postrojenju za preradu rude, dok se gubici u topionici implicitno uzimaju u obzir kroz tržišne faktore kao što su troškovi topljenja i rafinacije (TC/RC - treatment and refining charges) i procenat plaćenog metala u koncentratu (payability). Nasuprot tome, u integrisanim rudarsko-metalurškim sistemima gde kompanija upravlja celokupnim lancem, ukupno iskorišćenje metala obuhvata sve faze i predstavlja integrisani pokazatelj efikasnosti celokupnog proizvodnog sistema [2] [168]. Šematski prikaz lanca vrednosti od eksploatacije rude do valorizacije proizvoda prikazan je na slici 3.17.



Slika 3.17. Šematski prikaz lanca proizvodnje metala od rudnog bloka u ležištu do finalnog proizvoda [168]

Stepen iskorišćenja u velikoj meri zavisi od mineraloških i tehnoloških karakteristika rude. Različiti tipovi mineralizacije mogu pokazivati značajne razlike u ponašanju tokom procesa prerade. Na primer, oksidne i sulfidne rude često zahtevaju potpuno različite tehnološke postupke, kao što su

flotacija, luženje ili kombinovani procesi. Pored same mineralogije, na iskorišćenje značajno utiču i prisustvo štetnih primesa, granulometrijske karakteristike materijala, kao i fizičko-hemijska svojstva rude [166].

U ranim fazama razvoja projekata, iskorišćenje se najčešće definiše kao prosečna fiksna vrednost zasnovana na laboratorijskim ili pilot ispitivanjima. Iako ovakav pristup olakšava ekonomsku analizu, on često zanemaruje prostornu varijabilnost ležišta. Savremeni pristupi u rudarskom planiranju stoga sve više koriste geometalurške modele, koji povezuju geološke karakteristike sa metalurškim ponašanjem rude, omogućavajući definisanje prostornih varijacija iskorišćenja u okviru samog blok modela [169].

Konačno, iskorišćenje ima direktan uticaj na selekciju rude i jalovine (cut-off grade strategy). Viši stepen iskorišćenja omogućava da se blokovi sa nižim sadržajem proglase ekonomski isplativim, dok pad iskorišćenja može značajno smanjiti granice optimalnog kopa. Ipak, treba imati u vidu da povećanje iskorišćenja često zahteva intenzivnije procese (sitnije mlevenje, više reagensa), što direktno podiže operativne troškove. Stoga se u procesu optimizacije nastoji pronaći balans između stepena iskorišćenja i troškova prerade kako bi se maksimizovala ukupna ekonomska vrednost projekta [31].

3.1.7. Cena proizvoda

Cena mineralne sirovine predstavlja jedan od najvažnijih ekonomskih parametara u procesu optimizacije površinskih kopova i generalno u strateškom planiranju rudarskih projekata. Vrednost rudnog bloka i ukupna ekonomska vrednost ležišta direktno zavise od tržišne cene proizvoda, odnosno cene mineralne sirovine. Zbog toga cena proizvoda predstavlja osnovni parametar za određivanje prihoda rudarskog projekta i ima značajan uticaj na rezultate optimizacije granica površinskog kopa. Promene tržišne cene proizvoda mogu značajno uticati na optimalnu veličinu kopa, količinu eksploatacionih rezervi i projektovani životni vek rudnika, jer povećanje cene povećava broj ekonomski isplativih blokova, dok pad cene dovodi do smanjenja rezervi i smanjenja optimalne konture kopa [2].

U ekonomskom blok modelu cena proizvoda ima ulogu ključnog parametra koji omogućava transformaciju geološkog modela u ekonomski model ležišta. Dok geološki blok model opisuje prostornu raspodelu sadržaja korisne komponente u ležištu, tek primenom tržišne cene metala sadržaj metala u bloku može se izraziti u novčanoj vrednosti. Na taj način blok koji u geološkom smislu predstavlja samo određenu količinu stene postaje ekonomski definisan kao ruda ili jalovina u zavisnosti od odnosa između prihoda od sadržanog metala i troškova eksploatacije, prerade i prodaje. U tom kontekstu cena proizvoda predstavlja ključni element u formiranju ekonomske vrednosti blokova koji se koristi kao kriterijum u optimizacionim algoritmima za određivanje optimalne konture površinskog kopa. U ekonomskom blok modelu vrednost pojedinačnog bloka najčešće se računa kao razlika između prihoda od sadržanog metala i ukupnih troškova eksploatacije, prerade i prodaje, pri čemu cena proizvoda predstavlja osnovni parametar za konverziju sadržaja metala u novčanu vrednost [4] [141].

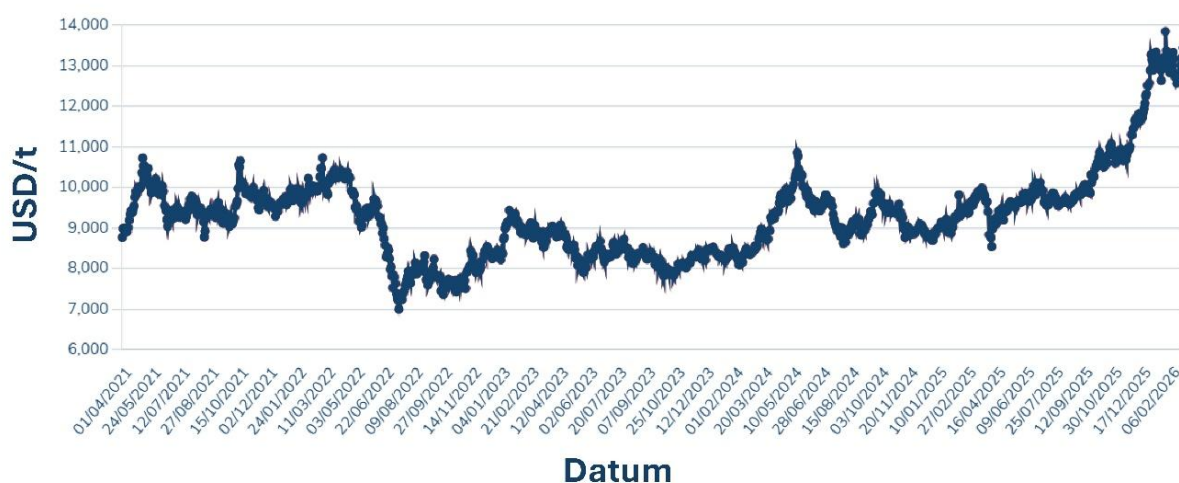
Važan aspekt primene cene u strateškom planiranju rudnika odnosi se i na vremensku vrednost novca. Budući da rudarski projekti često imaju životni vek od nekoliko decenija, cena proizvoda ostvarena u različitim fazama eksploatacije nema isti uticaj na ekonomsku vrednost projekta. Prihodi ostvareni u ranim fazama eksploatacije imaju veći značaj za ukupnu neto sadašnju vrednost projekta (NPV) zbog primene diskontne stope, dok prihodi u kasnijim fazama imaju manji uticaj na ukupnu ekonomsku vrednost rudnika. Zbog toga cena proizvoda indirektno utiče i na dinamiku eksploatacije i redosled otkopavanja rudnih blokova u dugoročnim planovima eksploatacije [10].

Cena proizvoda ima direktan uticaj i na vrednost graničnog sadržaja (cut-off grade), koji predstavlja minimalni sadržaj korisne komponente pri kojem je eksploatacija rude ekonomski opravdana. Između tržišne cene proizvoda i graničnog sadržaja postoji inverzna korelacija: povećanje cene metala dovodi

do smanjenja graničnog sadržaja i povećanja eksploatacionih rezervi, dok pad cene proizvoda dovodi do povećanja graničnog sadržaja i smanjenja količine ekonomski isplative rude. U uslovima visokih cena metala moguće je eksploatisati i siromašnije delove ležišta, čime se povećava ukupna iskorišćenost mineralnih resursa i produžava životni vek rudnika, ali često uz smanjenje prosečne profitabilnosti proizvodnje [31] [141].

U procesu optimizacije granica površinskog kopa cena proizvoda se ne analizira samo kroz jednu vrednost, već se često varira primenom tzv. faktora prihoda (Revenue Factor – RF). U softverima koji su specijalizovani za optimizaciju (kao što je npr. GEOVIA Whittle), ovaj faktor predstavlja koeficijent kojim se množi bazna projektovana cena metala, čime se generiše niz alternativnih kontura kopa koje odgovaraju različitim ekonomskim uslovima. Analiza ovih varijanti omogućava generisanje serije inkrementalnih kontura, koje omogućavaju identifikaciju optimalne konture kopa i izbor strategije razvoja rudnika. Unutrašnje konture obično predstavljaju zone sa najvišom ekonomskom vrednošću i omogućavaju brži povraćaj investicije, dok spoljne konture predstavljaju maksimalni ekonomski obuhvat ležišta u uslovima povoljnijih tržišnih cena [5].

Cena proizvoda u rudarskim projektima zavisi od tipa mineralne sirovine i načina organizacije tržišta na kojem se tim proizvodom trguje. Kod većine baznih metala tržišne cene se formiraju na međunarodnim robnim berzama, među kojima su najznačajnije London Metal Exchange (LME), New York Mercantile Exchange (NYMEX), Commodity Exchange (COMEX) i Shanghai Metal Exchange (SHME). Ove berze predstavljaju ključne referentne tačke za određivanje globalnih cena metala, gde se cena određuje na osnovu globalne ponude i tražnje. Na ovim tržištima metalima se trguje kako na spot tržištima, gde se transakcije realizuju uz trenutnu isporuku, tako i na terminskim (futures) tržištima koja omogućavaju zaštitu od cenovnog rizika kroz finansijske instrumente hedžinga [170]. Kretanja tržišne cene bakra u periodu od aprila 2021. do februara 2026. godine, prikazan je na slici 3.18.



Slika 3.18. Kretanje cene bakra u periodu od 04.2021. do 02.2026. godine (LME) [171]

Pored berzanskih tržišta, mineralne sirovine mogu se prodavati i putem tzv. OTC tržišta (over-the-counter markets), gde se transakcije realizuju direktno između kupca i prodavca bez posredovanja organizovane berze. U takvim slučajevima cena se formira bilateralnim pregovorima između učesnika na tržištu, pri čemu ugovoreni uslovi mogu uključivati specifične zahteve u pogledu kvaliteta proizvoda, količine i dinamike isporuke [170].

Kod pojedinih mineralnih proizvoda cene mogu biti određene i od strane samih proizvođača (producer pricing), naročito u situacijama kada postoji mali broj dominantnih proizvođača na tržištu. U takvim slučajevima proizvođači periodično objavljuju referentne prodajne cene koje se primenjuju na tržištu. Ovakav sistem određivanja cena bio je istorijski prisutan kod pojedinih metala kao što su aluminijum, nikl ili molibden, iako je sa globalizacijom tržišta većina ovih proizvoda prešla na berzanski sistem formiranja cena [170].

Poseban oblik određivanja cena predstavljaju ugovorene cene (negotiated prices), koje se definišu direktnim pregovorima između proizvođača i potrošača mineralnih sirovina, često u okviru dugoročnih ugovora o snabdevanju. Ovakav sistem je čest kod proizvoda koji se ne trguju na robnim berzama ili kod kojih postoji relativno mali broj proizvođača i kupaca. Primer takvog sistema su dugoročni ugovori za isporuku rude gvožđa, gde se cena često definiše kroz pregovore između rudarskih kompanija i velikih čeličana [170].

Kod energetskih sirovina, kao što su ugalj ili prirodni gas, cene se često formiraju kroz kombinaciju tržišnih mehanizama i dugoročnih ugovora o snabdevanju, dok je kod nemetalnih mineralnih sirovina, kao što su građevinski agregati ili industrijski minerali, tržište uglavnom regionalnog karaktera. U tim slučajevima cena proizvoda zavisi prvenstveno od lokalne ponude i tražnje, transportnih troškova i konkurencije na regionalnom tržištu [170] [172].

Pored referentne berzanske cene metala, stvarni prihod rudarskog projekta često zavisi i od dodatnih tržišnih faktora kao što su troškovi topljenja i rafinacije (treatment and refining charges – TC/RC), troškovi transporta i ugovoreni procenat plaćenog metala u koncentratu (payable metal). Ovi faktori dovode do razlike između referentne berzanske cene i efektivne prodajne cene proizvoda koja se koristi u ekonomskim modelima rudarskih projekata [173].

U strateškom planiranju rudnika cena proizvoda predstavlja i jedan od najznačajnijih izvora ekonomske neizvesnosti, jer je podložna fluktuacijama usled promena u globalnoj ponudi i tražnji, ekonomskim ciklusima, investicionim trendovima i geopolitičkim faktorima. Zbog toga se u rudarskim studijama izvodljivosti najčešće koristi dugoročna projektovana cena proizvoda (long-term price), koja predstavlja procenjenu prosečnu cenu metala tokom životnog veka rudnika. Ove cene se najčešće definišu na osnovu dugoročnih tržišnih prognoza, istorijskih trendova i analiza specijalizovanih finansijskih institucija i konsultantskih kompanija koje se bave analizom tržišta mineralnih sirovina. Pored bazne cene često se analiziraju i optimistični i pesimistični scenariji cena koji se koriste u analizama osetljivosti i proceni robusnosti rudarskog projekta [2].

Važno je naglasiti da je najčešći cilj optimizacije maksimizacija ukupne ekonomske vrednosti projekta izražene kroz neto sadašnju vrednost (NPV), pa shodno tome u određenim tržišnim uslovima može biti ekonomski opravdano ostaviti deo rude u ležištu ukoliko bi njena eksploatacija pri datoj ceni proizvoda dovela do smanjenja ukupne profitabilnosti projekta. Zbog toga cena proizvoda predstavlja jedan od ključnih parametara koji usmerava donošenje strateških odluka u planiranju razvoja rudarskih projekata [174].

Iako se u ovom poglavlju cena proizvoda posmatra kao deterministički ulazni parametar ekonomskog modela, u savremenim pristupima strateškom planiranju rudarskih projekata posebna pažnja posvećuje se analizi neizvesnosti tržišnih cena i njenom uticaju na ekonomske rezultate projekta. Detaljnija analiza neizvesnosti cene i njenog uticaja na optimizaciju rudarskih projekata biće razmatrana u narednim poglavljima, u okviru primene stohastičkih modela i metoda kvantifikacije rizika.

3.1.8. Troškovi prodaje

Troškovi prodaje (selling costs) predstavljaju skup troškova koji nastaju nakon završetka proizvodnog procesa, odnosno od trenutka kada rudarski proizvod napusti postrojenje za preradu do njegove isporuke i prodaje krajnjem kupcu. Ovi troškovi obuhvataju različite logističke, metalurške i komercijalne troškove koji se odbijaju od tržišne cene proizvoda kako bi se odredio stvarni prihod rudarskog projekta. U ekonomskim analizama rudarskih projekata troškovi prodaje se najčešće izražavaju po jedinici proizvoda i direktno utiču na neto prodajnu cenu metala ili koncentrata koji se plasira na tržište [145].

U rudnicima baznih metala gde je krajnji proizvod koncentrat metala, troškovi prodaje obično obuhvataju transport koncentrata do topionice, troškove topljenja i rafinacije (treatment and refining charges), troškove osiguranja, kao i različite komercijalne troškove povezane sa plasmanom

proizvoda na tržištu. Ovi troškovi predstavljaju značajnu komponentu u modelu prihoda rudarskog projekta, jer određuju razliku između referentne tržišne cene metala i efektivne prodajne cene koja se koristi u ekonomskim proračunima [2]. Razlika između referentne berzanske cene metala i efektivne prodajne cene proizvoda može se izraziti kroz sledeći odnos [175]:

$$P_{eff} = (P_m \times Payable\ metal) - TC - RC - C_{tr} \quad (3.7)$$

gde su:

- P_{eff} – efektivna prodajna cena metala (USD/t ili USD/lb)
- P_m – referentna tržišna cena metala na berzi (npr. LME cena bakra)
- Payable metal – procenat plaćenog metala u koncentratu (obično 90-95%)
- TC – troškovi topljenja koncentrata (treatment charges)
- RC – troškovi rafinacije metala (refining charges)
- C_{tr} – troškovi transporta i logistike

Troškovi topljenja i rafinacije predstavljaju naknadu koju rudarska kompanija plaća metalurškim postrojenjima za preradu koncentrata u rafinisani metal. Ovi troškovi se najčešće izražavaju kroz dva osnovna parametra [175]:

- Treatment Charge (TC) – trošak topljenja koncentrata, koji se obično izražava u dolarima po toni koncentrata,
- Refining Charge (RC) – trošak rafinacije metala, koji se najčešće izražava u dolarima po jedinici sadržanog metala (npr. USD/lb ili USD/t).

Troškovi topljenja i rafinacije (TC/RC) predstavljaju ključan element komercijalnih ugovora između rudarskih kompanija i topionica, jer direktno utiču na ekonomsku vrednost koncentrata i prihod proizvođača rude. Visina ovih naknada određuje se kroz pregovore između rudarskih kompanija i metalurških postrojenja i u velikoj meri zavisi od odnosa ponude koncentrata i raspoloživih kapaciteta za preradu na tržištu.

Skorašnje analize tržišta bakra pokazuju da promene u globalnoj proizvodnji koncentrata, kao i ograničenja kapaciteta topionica, mogu značajno uticati na nivo TC/RC naknada i profitabilnost različitih segmenata industrije. Na primer, analiza tržišta bakra koju je objavila International Energy Agency ukazuje da povećana konkurencija među topionicama za nabavku koncentrata može dovesti do smanjenja TC/RC vrednosti, čime se povećava prihod rudarskih kompanija, dok u suprotnim tržišnim uslovima dolazi do rasta ovih troškova i smanjenja prihoda proizvođača koncentrata. Zbog toga TC/RC predstavljaju važan indikator ravnoteže između rudarskog i metalurškog sektora u lancu snabdevanja baznim metalima [176].

Pored troškovi topljenja i rafinacije (TC/RC), značajan uticaj u obračunu prihoda ima i procenat plaćenog metala u koncentratu (payable metal). U praksi, kupac koncentrata obično ne plaća celokupnu količinu metala sadržanog u koncentratu, već samo određeni procenat tog sadržaja. Ovaj procenat zavisi od kvaliteta koncentrata, sadržaja štetnih primesa i ugovornih uslova između rudarske kompanije i topionice. Kod bakarnih koncentrata procenat plaćenog metala često iznosi između 95% i 97% sadržanog bakra, dok se kod plemenitih metala kao što su zlato i srebro često primenjuju dodatni pragovi plaćanja (payable thresholds). Ovakva struktura ugovora omogućava topionicama da pokriju tehnološke gubitke koji nastaju tokom procesa metalurške prerade [177].

Troškovi transporta predstavljaju još jednu komponentu troškova prodaje. Oni obuhvataju troškove transporta koncentrata od rudnika do metalurškog postrojenja ili izvozne luke, kao i troškove skladištenja, manipulacije i osiguranja robe tokom transporta. Kod rudarskih projekata koji su udaljeni od metalurških postrojenja ili morskih luka, troškovi transporta mogu predstavljati značajan deo ukupnih troškova prodaje i imati značajan uticaj na ekonomsku održivost projekta [2].

U ekonomskom blok modelu troškovi prodaje predstavljaju važan parametar koji utiče na konačnu ekonomsku vrednost rudnih blokova. Prilikom proračuna vrednosti bloka, referentna tržišna cena metala koriguje se za sve prethodno navedene troškove, čime se dobija efektivna prodajna cena metala koja ulazi u model ekonomskog vrednovanja.

Na taj način troškovi prodaje direktno utiču na procenu prihoda rudarskog projekta, a samim tim i na rezultate optimizacije granica površinskog kopa. Povećanje ovih troškova smanjuje ekonomsku vrednost rudnih blokova i može dovesti do smanjenja eksploatacionih rezervi, dok smanjenje prodajnih troškova povećava profitabilnost projekta i može proširiti optimalne granice eksploatacije.

3.1.9. Granični sadržaj metala u rudi (cut-off grade)

U literaturi koja se bavi konceptom graničnog sadržaja metala (cut-off grade) često se pravi jasna razlika između eksploatacionog (ekonomskog) graničnog sadržaja, koji se koristi u planiranju eksploatacije i optimizaciji rudarskih projekata, i tzv. geološkog graničnog sadržaja, koji se primenjuje prilikom procene i izveštavanja o mineralnim resursima. Iako se u oba slučaja koristi isti termin, njihov konceptualni i numerički značaj je različit.

Geološki granični sadržaj predstavlja osnovni parametar za prostorno ograničavanje mineralizacije tokom izrade blok modela ležišta. U stručnoj literaturi se ovaj parametar često naziva i boundary cut-off, čija je primarna uloga definisanje geometrijskog kontakta između rude i jalovine na osnovu in situ sadržaja. Dok se operativni cut-off menja tokom životnog veka rudnika radi maksimizacije profita, geološki cut-off ostaje stabilan okvir unutar jednog ciklusa izveštavanja. Njegova svrha nije direktna ekonomska optimizacija, već uspostavljanje stabilne granice između jalovine i materijala koji se potencijalno može klasifikovati kao mineralni resurs, utemeljena na konzervativnim dugoročnim pretpostavkama o troškovima i ceni metala [174].

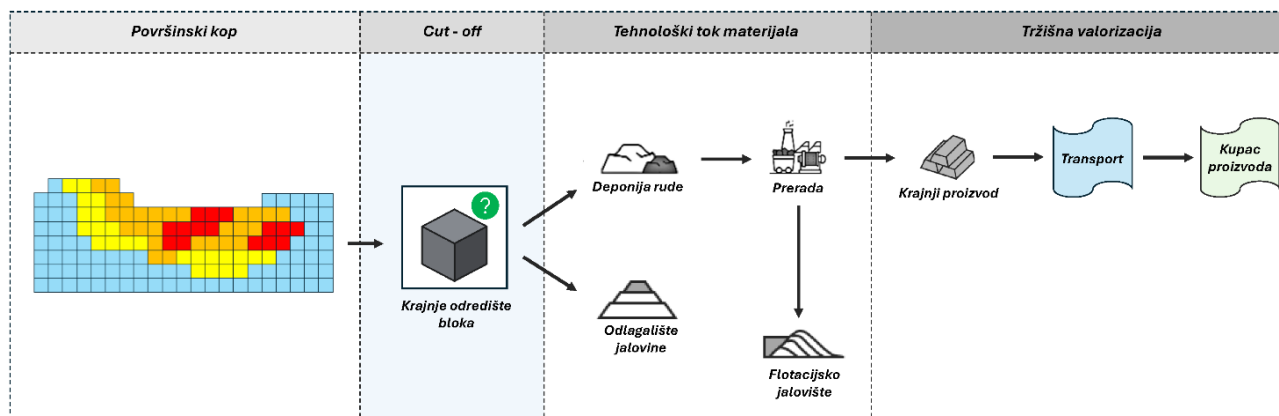
U ovom poglavlju fokus je prvenstveno na eksploatacionom (ekonomskom) graničnom sadržaju, koji se koristi u planiranju rudarske proizvodnje i optimizaciji ekonomskih parametara projekta. Ukoliko nije drugačije naznačeno, termin cut-off grade u daljem tekstu odnosi se upravo na ovaj operativni granični sadržaj, dok se geološki cut-off koristi isključivo u kontekstu procene mineralnih resursa i izrade blok modela ležišta.

Granični sadržaj metala u rudi (cut-off grade) predstavlja jedan od najvažnijih ekonomskih parametara u planiranju eksploatacije mineralnih resursa i strateškom upravljanju rudarskim projektima. Ovaj parametar definiše minimalni sadržaj korisne komponente pri kojem je eksploatacija i prerada rude ekonomski opravdana, odnosno predstavlja granicu između rude i jalovine u ekonomskom smislu. Na osnovu graničnog sadržaja određuju se eksploatacione rezerve, plan proizvodnje i dinamika razvoja rudnika, zbog čega ovaj parametar ima direktan uticaj na ekonomsku održivost rudarskog projekta [145] [31].

Problematika određivanja graničnog sadržaja metala predstavlja jednu od najkompleksnijih oblasti rudarske ekonomike. Tokom poslednjih decenija razvijen je veliki broj teorijskih i praktičnih pristupa optimizaciji cut-off sadržaja, a ovoj temi posvećene su brojne naučne studije i monografije. Među najznačajnijim radovima izdvajaju se studije Lane-a [141], Whittle-a [178] [179], Rendu-a [31], Hall-a [174], koje predstavljaju osnovu savremenih pristupa optimizaciji rudarskih projekata. U novijoj literaturi značajna pažnja posvećena je integraciji cut-off optimizacije sa blok modelima ležišta, geometalurškim modelima i stohastičkim pristupima planiranju rudarske proizvodnje [180] [181] [182].

U ekonomskom blok modelu granični sadržaj predstavlja parametar koji objedinjeno reflektuje uticaj ekonomskih i tehnoloških faktora rudarske proizvodnje. Parametri koji su prethodno analizirani u okviru ovog poglavlja (uključujući tržišnu cenu metala, troškove rudarenja i prerade, troškove prodaje, gubitke i razblaženje tokom eksploatacije, kao i iskorišćenje u preradi i metalurgiji) direktno utiču u procesu određivanja cut-off sadržaja.

Na slici 3.19 prikazana je konceptualna šema toka materijala u rudarskom sistemu, gde politika primene cut-off sadržaja određuje destinaciju pojedinačnih blokova u procesu eksploatacije i prerade. U zavisnosti od sadržaja metala i primenjenog cut-off kriterijuma, materijal može biti upućen direktno u postrojenje za preradu, privremeno deponovan na skladištima rude nižeg sadržaja (stockpiles) ili odložen na jalovišta. Na taj način cut-off politika predstavlja ključni mehanizam kojim se geološki blok model transformiše u operativni plan eksploatacije i tokove materijala u proizvodnom sistemu, direktno formirajući ekonomski model rudarskog projekta.



Slika 3.19. Uticaj graničnog sadržaja (cut-off) na tokove materijala u rudarskom sistemu [183]

U najjednostavnijem obliku, granični sadržaj može se odrediti iz uslova ekonomske rentabilnosti eksploatacije, pri čemu prihod od prodaje metala mora pokriti troškove rudarenja, prerade i prodaje proizvoda. Osnovna forma graničnog sadržaja može se izraziti sledećom relacijom [1]:

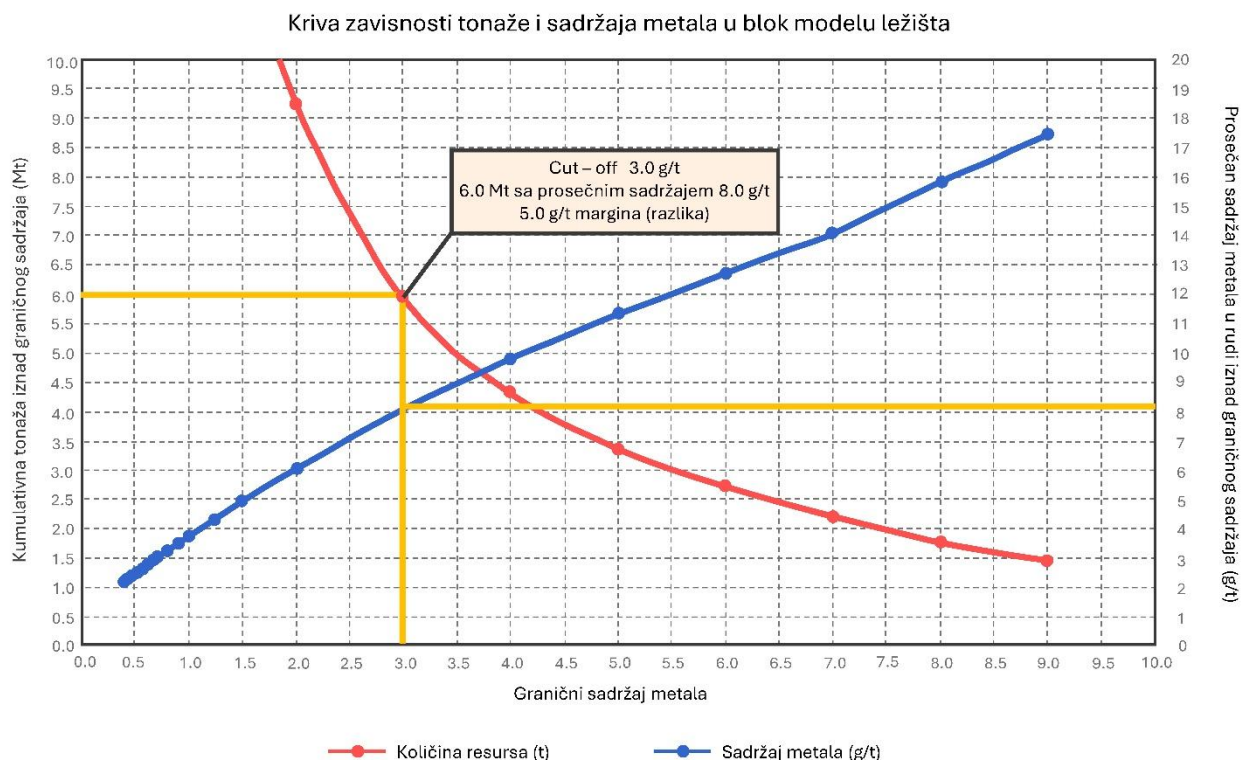
$$g_c = \frac{T_o + T_p}{R \cdot (P - S)} \quad (3.8)$$

gde su:

- g_c – granični sadržaj metala u rudi (% ili g/t)
- T_o – troškovi otkopavanja rude (\$/t)
- T_p – troškovi prerade rude (\$/t)
- R – iskorišćenje metala u procesu prerade (%)
- P – vrednost jedinice proizvoda (\$/%, \$/g ili \$/t metala)
- S – troškovi metalurške prerade, prodaje i ostali troškovi po jedinici metala

Iz ovog izraza može se uočiti da povećanje tržišne cene metala ili iskorišćenja metala dovode do smanjenja graničnog sadržaja, čime veći deo ležišta postaje ekonomski isplativ za eksploataciju. Nasuprot tome, povećanje troškova proizvodnje dovodi do rasta cut-off sadržaja i smanjenja količine ekonomski isplativih rezervi.

Ova zavisnost može se grafički predstaviti kroz odnos između graničnog sadržaja, količine raspoložive rude i njenog prosečnog sadržaja, kao što je prikazano na slici 3.20. Sa povećanjem cut-off vrednosti smanjuje se ukupna količina materijala koja se klasifikuje kao ruda, dok se istovremeno povećava prosečan sadržaj metala u preostaloj rudi. Ovaj odnos predstavlja fundamentalni kompromis između količine i kvaliteta rude i čini osnovu za donošenje strateških odluka u planiranju eksploatacije.



Slika 3.20. Odnos između cut-off sadržaja, količine (tonaže) i prosečnog sadržaja rude

U rudarskoj praksi razlikuje se više tipova graničnih sadržaja koji se koriste u različitim fazama planiranja i eksploatacije rudnika. Jedan od osnovnih tipova je tzv. breakeven cut-off, koji predstavlja sadržaj metala pri kojem prihod od prodaje pokriva ukupne troškove proizvodnje. Za ovaj slučaj granični sadržaj može se izraziti sledećom relacijom [145]:

$$BEC (Cut - off) = 100 \cdot \frac{(T_o + T_p + R_t) \cdot K_R}{R_f(P - S)} \quad (3.9)$$

gde su:

- T_o – operativni troškovi otkopavanja rude i transporta do drobilice
- T_p – troškovi prerade rude
- R_t – taksa za korišćenje mineralnih resursa (royalty)
- K_R – koeficijent rudarskog razblaženja
- R_f – flotacijsko iskorišćenje metala
- P – tržišna cena metala
- S – troškovi metalurške prerade i prodaje.

Pored ovog pristupa, u optimizaciji površinskih kopova često se koristi i marginalni granični sadržaj (marginal cut-off), koji definiše minimalni sadržaj metala pri kojem vrednost rude pokriva troškove prerade, dok su troškovi otkopavanja već neizbežni u okviru procesa eksploatacije. Ovaj pristup polazi od toga da se u okviru granica kopa materijal mora ukloniti bez obzira na njegov sadržaj, zbog čega je za određivanje ekonomičnosti relevantan samo odnos prihoda i troškova prerade [145]:

$$MAR (Cut - off) = 100 \cdot \frac{[T_p + R_t + (T_{or} - T_{oj})] \cdot K_R}{R_f(P - S)} \quad (3.10)$$

gde su:

- T_{or} – troškovi otkopavanja rude i transporta do drobilice
- T_{oj} – troškovi otkopavanja jalovine i transporta do jalovišta.

U određenim analizama koristi se i koncept minimalnog srednjeg sadržaja, koji predstavlja sadržaj potreban da bi se pokrili ukupni troškovi rudnika u datom periodu proizvodnje. Ovaj parametar može se izraziti sledećim odnosom [145]:

$$MSS (Cut - off) = 100 \cdot \frac{(T_{or} + T_p + R_t) \cdot K_R + k_r T_{oj}}{R_f(P - S)} \quad (3.11)$$

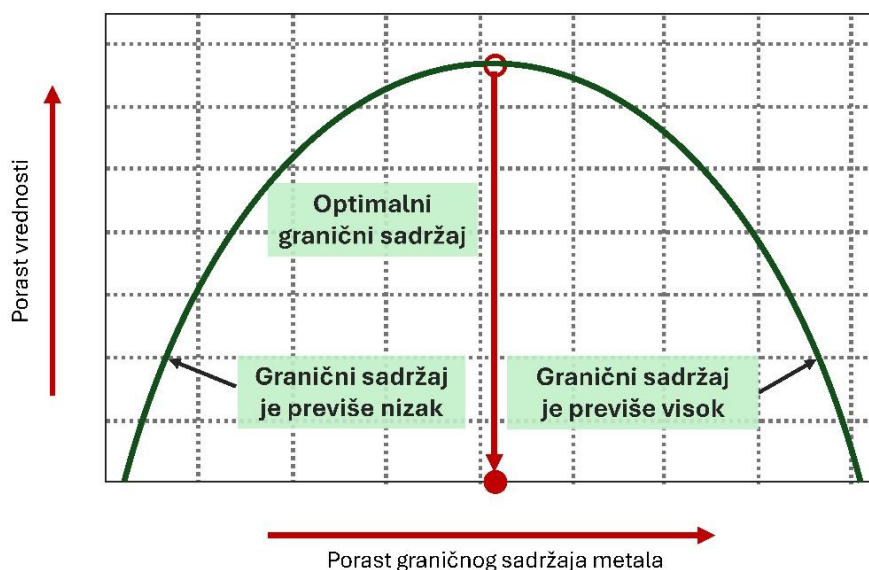
gde je:

- k_r – srednji koeficijent raskrivke u konturi kopa.

Jedan od najznačajnijih pristupa u ovoj oblasti predstavlja Lane-ov model, koji definiše optimalnu strategiju primene graničnog sadržaja sa ciljem maksimizacije neto sadašnje vrednosti rudarskog projekta (NPV). U ovom modelu istovremeno se uzimaju u obzir raspodela sadržaja metala u ležištu, kapaciteti eksploatacije, prerade i metalurške obrade, kao i vremenska vrednost novca. Rezultat primene Lane-ovog modela ukazuju da optimalni cut-off sadržaj ne treba biti konstantan tokom celog životnog veka rudnika, jer ovakva strategija ne dovodi do generisanja maksimalne neto sadašnje vrednosti projekta.

Umesto toga, optimalna strategija podrazumeva promenljiv cut-off sadržaj tokom vremena, pri čemu se u ranim fazama eksploatacije prioritet daje delovima ležišta sa višim sadržajem metala u rudi, čime se ostvaruje brži povraćaj investicije i povećava ukupna neto sadašnja vrednost projekta. U kasnijim fazama eksploatacije, granični sadržaj se postepeno snižava, čime se omogućava ekonomski opravdana prerada i sirovina nižeg sadržaja [184] [185] [141].

Slika 3.21 prikazuje da ekonomska vrednost rudarskog projekta direktno zavisi od izabrane vrednosti cut-off sadržaja. Ukoliko je cut-off prenizak, u eksploatacione rezerve ulazi veća količina materijala niskog sadržaja, što može smanjiti ekonomsku vrednost projekta zbog povećanih troškova prerade. Nasuprot tome, previsok cut-off može dovesti do gubitka ekonomski vredne rude. Između ova dva ekstrema postoji optimalna vrednost graničnog sadržaja pri kojoj se ostvaruje maksimalna neto sadašnja vrednost rudarskog projekta [174].



Slika 3.21. Promena ekonomske vrednosti rudarskog projekta u funkciji cut-off sadržaja [174]

Ovakve promene graničnog sadržaja direktno utiču na geometrijsku optimizaciju površinskog kopa. Budući da se klasifikacija blokova zasniva na poređenju sadržaja metala sa cut-off vrednošću, svaka promena ovog parametra menja odnos jalovine i rude, kao i obuhvat ukupnih eksploatacionih rezervi unutar konture kopa [180]. U savremenim softverskim paketima (npr. Whittle, Deswik ili Datamine), ova zavisnost je osnova za definisanje optimalne konture kopa i dugoročnog plana eksploatacije.

U operativnom planiranju, sprovođenje Lane-ove strategije često se oslanja na privremeno deponovanje rude nižeg sadržaja (low-grade stockpiling). Ovaj pristup omogućava da se materijal, koji je u početnim fazama ispod trenutno visokog cut-off, ne tretira kao jalovina već se deponuje i čuva. Takva sirovina se uključuje u proces prerade tek u kasnijim fazama eksploatacije ili tokom povoljnijih tržišnih ciklusa, čime se direktno povećava ukupna ekonomska vrednost i stepen iskorišćenja ležišta.

Iz prethodno izloženog može se zaključiti da granični sadržaj predstavlja dinamički parametar koji povezuje geološke karakteristike ležišta sa ekonomskim ciljevima rudarskog projekta. Njegovo optimalno određivanje predstavlja jedan od ključnih elemenata strateškog planiranja rudarske proizvodnje, jer direktno utiče na klasifikaciju rude i jalovine, geometriju završne konture kopa, raspored proizvodnje i ukupnu ekonomsku vrednost eksploatacije.

3.2. Ekonomski blok model

Ekonomski blok model predstavlja proširenje geološkog blok modela u kojem se svakom bloku dodeljuje ekonomska vrednost na osnovu procene prihoda i troškova povezanih sa njegovim eventualnim otkopavanjem i preradom. Dok geološki blok model opisuje prostornu raspodelu sadržaja korisne komponente u ležištu, ekonomski blok model omogućava kvantifikaciju ekonomske vrednosti pojedinačnih blokova i predstavlja osnovu za optimizaciju granica površinskog kopa i strateško planiranje eksploatacije mineralnih resursa.

Transformacija geološkog u ekonomski blok model vrši se dodavanjem novih atributa svakom bloku u modelu, koji predstavljaju ekonomske parametre proizvodnje. Na osnovu prethodno definisanih parametara (tržišne cene metala, troškova otkopavanja, troškova prerade, troškova prodaje, iskorišćenja u preradi, kao i faktora razblaženja i gubitaka u eksploataciji) za svaki blok se izračunava njegova očekivana ekonomska vrednost. Na taj način geološki blok model, koji sadrži informacije o sadržaju metala i prostornim karakteristikama ležišta, transformiše se u ekonomski model koji omogućava procenu profitabilnosti eksploatacije pojedinačnih delova ležišta.

U okviru ekonomske evaluacije blokova, ključnu ulogu ima granični sadržaj metala (cut-off grade), koji predstavlja kriterijum za razgraničenje rudnih i jalovinskih blokova. Male promene vrednosti cut-off sadržaja mogu značajno promeniti klasifikaciju blokova u modelu, čime se direktno utiče na količinu eksploatacionih rezervi i ukupnu ekonomsku vrednost projekta. Iz tog razloga, definisanje adekvatne vrednosti cut-off sadržaja predstavlja jedan od ključnih koraka u formiranju ekonomskog blok modela [141].

Centralni parametar u ekonomskom blok modelu predstavlja ekonomska vrednost bloka (EVB – Economic Value of Block), koja se definiše kao razlika između očekivanog prihoda od prodaje metala sadržanog u bloku i ukupnih troškova njegove eksploatacije i prerade. U zavisnosti od vrednosti ovog parametra, u procesu optimizacije postavlja se fundamentalno pitanje [4]:

„Da li je ekonomski isplativije blok poslati u postrojenje za preradu ili ga tretirati kao jalovinu?“

U skladu sa tim, svaki blok u modelu može imati pozitivnu ili negativnu ekonomsku vrednost. Pozitivna vrednost ukazuje da blok generiše prihod veći od troškova proizvodnje, dok negativna vrednost označava da njegovo otkopavanje predstavlja neto trošak.

Za rudne blokove, odnosno za blokove koji ispunjavaju uslov graničnog sadržaja (cut-off grade), ekonomska vrednost se definiše kao [186] [145]:

$$EVB_{rude} = T_o \cdot (g \cdot r \cdot (P - SC) - PC - MC) \quad (3.12)$$

gde su:

- T_o — masa rudnog bloka (t)
- g — sadržaj metala u rudi
- r — iskorišćenje metala u procesu prerade
- P — tržišna cena metala
- SC — troškovi prodaje
- PC — troškovi prerade
- MC — troškovi otkopavanja.

Važno je naglasiti da ekonomski blok model ne koristi direktno in-situ geološki sadržaj, već procenjenju prodajnu vrednost metala koja uzima u obzir eksploataciono razblaženje (dilution), rudarske gubitke (ore loss) i iskorišćenja prerade. Ukoliko se ovi faktori ne uključe u proces evaluacije, ekonomska vrednost blokova može biti značajno precenjena. Zbog toga se u praksi geološki sadržaj metala transformiše u efektivni sadržaj koji realno može biti iskorišćen u proizvodnom procesu. Ova transformacija se direktno reflektuje na parametre u jednačini ekonomske vrednosti, gde se sadržaj i tonaža tretiraju kao eksploatacione, a ne samo in-situ veličine.

Za blokove čiji je sadržaj korisne komponente ispod graničnog (cut-off grade), odnosno koji se tretiraju kao jalovina, ekonomska vrednost bloka je negativna i odgovara trošku njegovog uklanjanja [186] [145]:

$$EVB_{jalovine} = -(T_w \cdot MC) \quad (3.13)$$

gde je:

- T_w — masa jalovinskog materijala u bloku.

U realnim rudarskim uslovima troškovi otkopavanja često nisu konstantni za sve blokove u modelu. Kako eksploatacija napreduje ka većim dubinama, rastu transportne udaljenosti i troškovi prevoza materijala, što utiče na povećanje operativnih troškova po bloku. Zbog toga se u naprednijim ekonomskim blok modelima trošak otkopavanja često koriguje faktorima dubine ili transportne udaljenosti, što se u literaturi naziva inkrementalni trošak otkopavanja (incremental mining cost). Ovaj pristup omogućava realističniju procenu ekonomske vrednosti dubljih delova ležišta [145].

Pored ekonomskih parametara, u procesu optimizacije površinskih kopova značajnu ulogu imaju i geotehnička ograničenja, kao što su stabilnost kosina i dozvoljeni nagibi završnih kosina kopa (slope constraints). Ova ograničenja ne utiču direktno na ekonomsku vrednost pojedinačnih blokova, ali predstavljaju ključne prostorne restrikcije koje definišu međuzavisnost između blokova i određuju redosled njihovog otkopavanja. Detaljnija analiza uticaja geotehničkih ograničenja biće razmatrana u narednim poglavljima posvećenim optimizacionim algoritmima.

Takođe, proizvodni kapaciteti rudnika i postrojenja za preradu ne utiču direktno na ekonomsku vrednost pojedinačnih blokova u modelu, ali imaju značajan uticaj na dinamiku i redosled eksploatacije. Vrednost bloka u strateškom planiranju ne zavisi samo od njegove procenjene ekonomske vrednosti, već i od trenutka kada će biti otkopan, jer vremenska raspodela proizvodnje utiče na diskontovanu vrednost novčanih tokova rudarskog projekta.

Važno je naglasiti da ovako formiran ekonomski blok model predstavlja statički prikaz ekonomske vrednosti ležišta, zasnovan na unapred definisanim i fiksnim ekonomskim pretpostavkama. Kao takav, on predstavlja početnu osnovu za dalje analize i optimizacione procedure. Tek primenom determinističkih algoritama optimizacije i stohastičkih pristupa planiranju rudarske proizvodnje moguće je sagledati ovaj model kroz prizmu vremena, odnosno diskontovane vrednosti novčanih tokova i uticaja neizvesnosti na strateško planiranje eksploatacije.

3.3. Deterministički modeli optimizacije površinskih kopova

Deterministički modeli optimizacije površinskih kopova predstavljaju formalizaciju problema strateškog planiranja kroz matematičke i algoritamske pristupe koji omogućavaju definisanje optimalne eksploatacione strategije na osnovu unapred definisanih ulaznih parametara. U ovom okviru, proces optimizacije zasniva se na ekonomskom blok modelu, u kojem je svakom bloku pridružena jedinstvena ekonomska vrednost, čime se problem svodi na izbor optimalnog skupa blokova i njihovog redosleda eksploatacije.

Osnovna karakteristika determinističkog pristupa jeste pretpostavka da su svi ulazni parametri poznati i konstantni, što omogućava primenu matematičkih modela optimizacije sa jasno definisanom ciljnom funkcijom i skupom ograničenja. U takvom okviru, optimizacioni problem može se formulisati kao problem maksimizacije ukupne ekonomske vrednosti projekta, pri čemu se istovremeno moraju zadovoljiti geometrijska, tehnološka i operativna ograničenja rudarskog sistema [7] [8].

U zavisnosti od nivoa odlučivanja, problemi optimizacije u determinističkom okviru mogu se podeliti na dva osnovna zadatka [7] [1] [8]:

- određivanje optimalne završne konture kopa (ultimate pit limit) i
- definisanje dinamike eksploatacije kroz dugoročno planiranje proizvodnje.

Ova dva zadatka su međusobno uslovljena i čine osnovu savremenih metoda strateškog planiranja u površinskoj eksploataciji. U nastavku poglavlja biće prikazani najznačajniji algoritmi i modeli koji se koriste za rešavanje ovih problema, uključujući metode za optimizaciju granica kopa i pristupe za planiranje proizvodnje.

3.3.1. Algoritmi za optimizaciju završne konture kopa (*Ultimate Pit Limit*)

Određivanje optimalne granice površinskog kopa predstavlja jedan od osnovnih zadataka u projektovanju i strateškom planiranju eksploatacije mineralnih ležišta. Završna kontura kopa definiše trodimenzionalni prostorni obuhvat eksploatacije, odnosno skup blokova koji će biti obuhvaćeni rudarskim radovima tokom celokupnog životnog veka rudnika. Ova kontura određuje količinu eksploatacionih rezervi rude, ukupnu količinu jalovine, odnos otkrivke i rude, kao i očekivanu ekonomsku vrednost projekta. Zbog toga određivanje optimalne konture kopa predstavlja jedan od ključnih koraka u studijama izvodljivosti i dugoročnom planiranju eksploatacije površinskih kopova [187].

Savremeni postupci optimizacije granica kopa zasnivaju se na ekonomskom blok modelu ležišta, koji je detaljno opisan kroz prethodna poglavlja disertacije. Na bazi procenjene vrednosti svakog bloka, moguće je odrediti optimalnu konturu kopa, koja predstavlja skup onih blokova čija eksploatacija maksimizuje ukupnu ekonomsku vrednost projekta, uz strogo poštovanje tehnoloških i geotehničkih ograničenja (maksimalno dozvoljeni uglovi kosina) [188].

U rudarstvu se izbor najpovoljnijeg rešenja vrši na osnovu **Neto Vrednosti (NV)**, koja se može posmatrati statički ili dinamički, zavisno od uvažavanja vremenske dimenzije novca [145]. Shodno tome, primenjuju se dva osnovna kriterijuma:

Statički kriterijum (NV), koji predstavlja sumu dobiti bez diskontovanja i koristi se za preliminarno definisanje granica kopa [145]:

$$NV = \sum_{t=1}^T (R_t - C_t) \rightarrow \max \quad (3.14)$$

Dinamički kriterijum (NPV), koji predstavlja Neto Sadašnju Vrednost, gde se budući novčani tokovi svode na sadašnji trenutak primenom diskontne stope. Ovo je ključni parametar za ocenu stvarne isplativosti projekta [145]:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \left[\frac{CF_t}{(1+r)^t} \right] - I_0 ; \rightarrow \max \quad (3.15)$$

gde su:

- NV (\$) – ukupna neto vrednost bez diskontovanja (Net Value),
- NPV (\$) – ukupna neto sadašnja vrednost proizvodnje (Net Present Value),
- R_t – prihodi u godini t
- C_t – troškovi u godini t
- CF_t (\$) – neto novčani tok u godini t (razlika između prihoda i troškova),
- r (%) – diskontna stopa,
- T – trajanje projekta u godinama
- I_0 – početna investiciona ulaganja

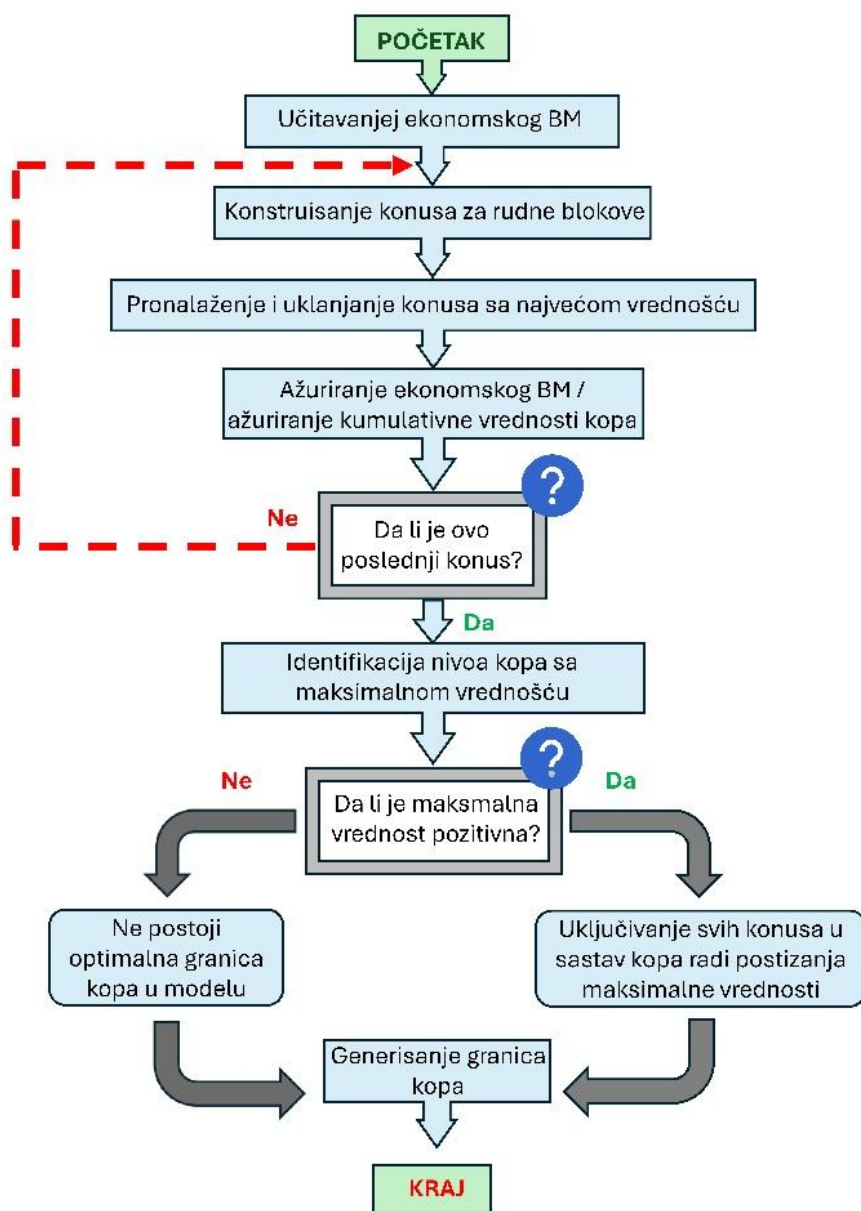
Dok se statička vrednost (NV) primenjuje u fazi algoritamskog definisanja geometrijskih granica kopa, dinamička vrednost (NPV) je presudna za definisanje redosleda otkopavanja i faznog razvoja kopa, jer direktno zavisi od dinamike eksploatacije [187]. O kompleksnim procesima optimizacije redosleda otkopavanja i maksimizacije NPV-a biće više reči u narednim poglavljima rada. U nastavku ovog poglavlja, fokus će biti usmeren na specifične metode i algoritme koji se koriste isključivo za određivanje finalne konture kopa kao osnovnog okvira za svako dalje planiranje.

U ranim fazama razvoja rudarskog planiranja određivanje granice kopa vršeno je manuelnim metodama analizom vertikalnih preseka ležišta. Razvoj računarske tehnologije omogućio je primenu numeričkih algoritama koji omogućavaju sistematsko ispitivanje velikog broja mogućih konfiguracija kopa. Tokom poslednjih nekoliko decenija uspostavljeni su različiti algoritamski pristupi za rešavanje ovog problema, među kojima se izdvajaju heurističke metode zasnovane na konusnom pristupu, kao i egzaktno metode bazirane na teoriji grafova [187].

3.3.1.1. Metoda Plutajućeg konusa (Floating Cone)

Jedan od prvih algoritama koji je korišćen za određivanje optimalne granice kopa jeste metoda „**Plutajućeg konusa (Floating Cone)**“. Ovaj pristup zasniva se na jednostavnom geometrijskom principu prema kojem se iznad svakog bloka sa pozitivnom ekonomskom vrednošću formira virtuelni konus čiji nagib odgovara dozvoljenom nagibu kosina kopa. Konus obuhvata sve blokove koji moraju biti uklonjeni da bi se pristupilo posmatranom bloku.

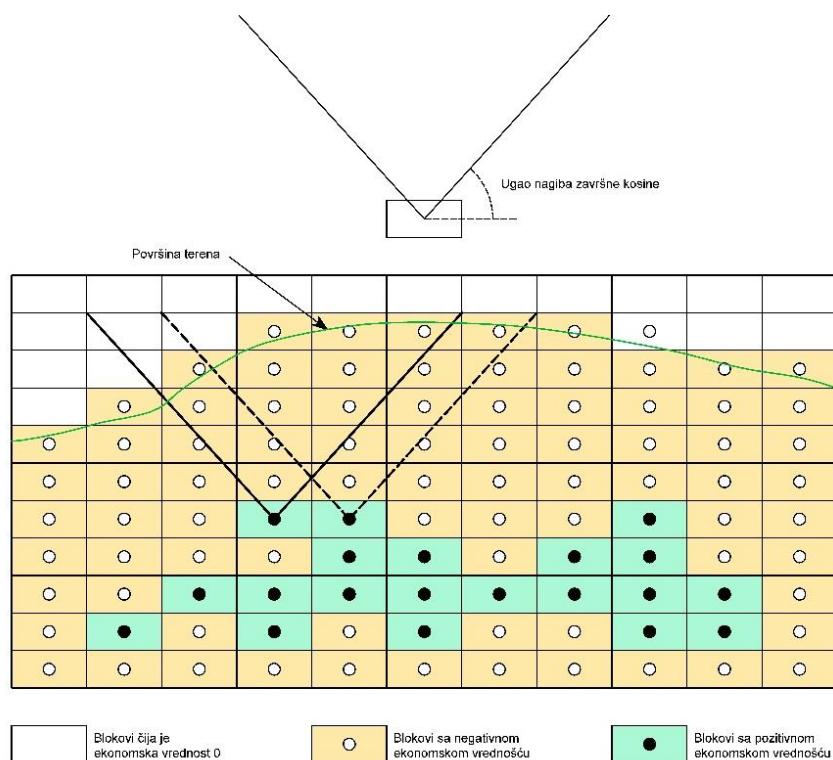
Princip rada ovog algoritma u blok modelu prikazan je na slici 3.22, gde je dat šematski prikaz postupka identifikacije i uklanjanja konusa sa najvećom ekonomskom vrednošću.



Slika 3.22. Šematski prikaz rada algoritma „Plivajućeg konusa“ u blok modelu [189]

Ukoliko zbir ekonomskih vrednosti svih blokova unutar konusa ostaje pozitivan, smatra se da je eksploatacija tog prostora ekonomski opravdana i svi blokovi unutar konusa uključuju se u eksploatacionu konturu.

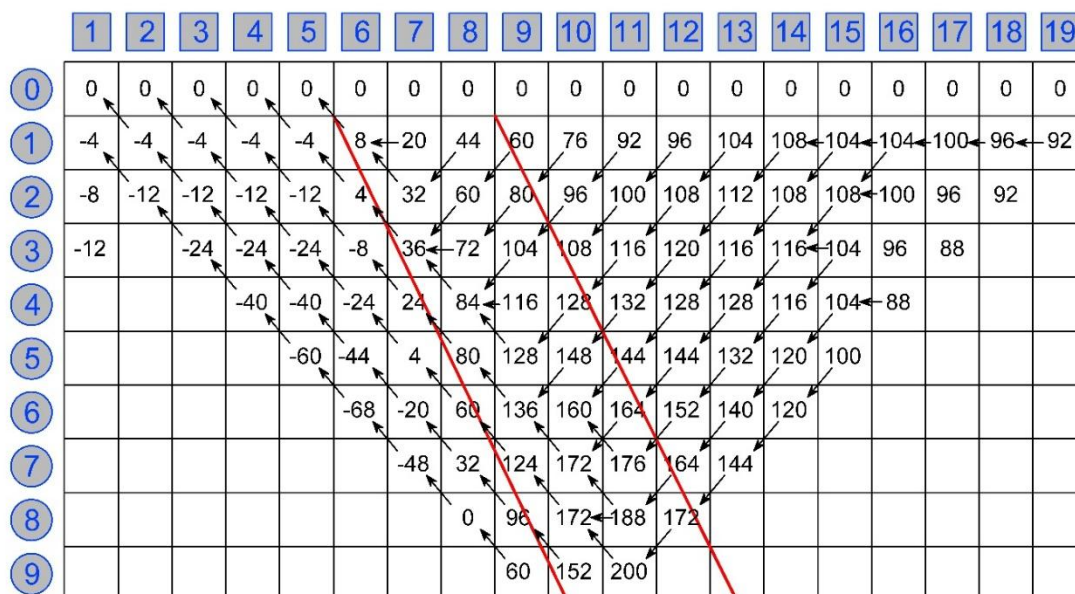
Geometrijska interpretacija ovog postupka u dvodimenzionalnom preseku blok modela prikazana je na slici 3.23, gde je jasno ilustrovan odnos između nagiba kosine i obuhvata blokova unutar konusa. Opisani postupak primenjuje se na sve blokove u modelu, čime se dobija aproksimacija završne konture kopa [190] [191].



Slika 3.23. Princip rada algoritma „Plivajući konus“ u dvodimenzionalnom preseku blok modela [192]

3.3.1.2. Lerchs–Grossmann algoritam

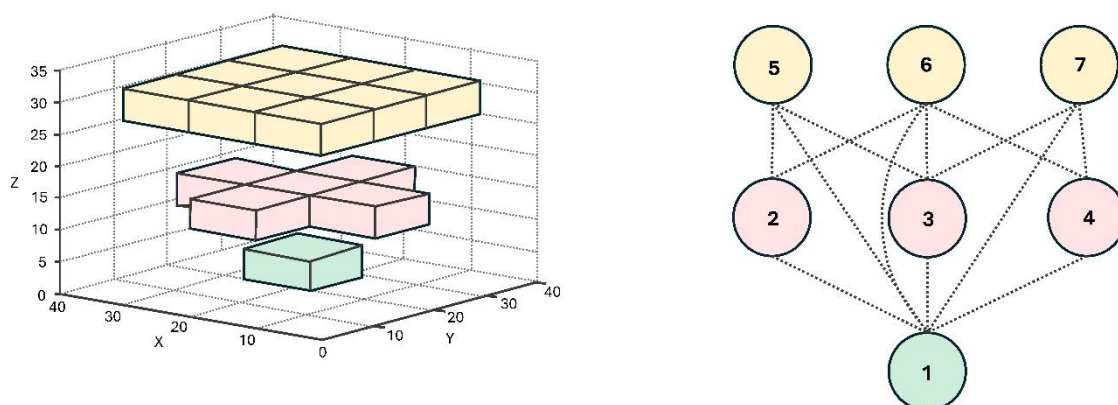
Značajan napredak u optimizaciji površinskih kopova ostvaren je razvojem algoritama zasnovanih na teoriji grafova, među kojima se posebno izdvaja Lerchs–Grossmann algoritam. Pre razvoja potpunih trodimenzionalnih algoritama optimizacije, problem određivanja optimalne granice kopa često je analiziran na dvodimenzionalnim vertikalnim profilima. U tom pristupu, prikazanom na slici 3.24, razmatrane su različite moguće linije konture kopa na preseku blok modela, pri čemu je za svaku liniju izračunavana suma ekonomskih vrednosti blokova kroz koje linija prolazi. Linija sa najvećom sumarnom vrednošću predstavljala je optimalnu granicu kopa na datom profilu. Ovakav pristup predstavljao je ranu grafičku metodu optimizacije koja je omogućavala određivanje optimalne konture kopa na pojedinačnim presečnim profilima [3] [4] [145].



Slika 3.24. Izračunavanje sumiranih vrednosti za moguće konture kopa [3]

Međutim, optimizacija granice površinskog kopa suštinski predstavlja trodimenzionalni problem, jer eksploatacija pojedinačnih blokova mora zadovoljiti geometrijska ograničenja stabilnosti kosina kopa. U dvodimenzionalnim profilima ova ograničenja se mogu relativno jednostavno predstaviti kroz moguće linije konture, ali u realnom trodimenzionalnom blok modelu neophodno je definisati zavisnosti između blokova koje određuju redosled njihovog otkopavanja. U tu svrhu razvijeni su koncepti geometrijske uslovljenosti blokova, pri čemu eksploatacija bloka na nižoj etaži zahteva prethodno uklanjanje određenog broja blokova iznad njega. Ovakva ograničenja predstavljaju osnovu za matematičko modelovanje problema optimizacije površinskog kopa.

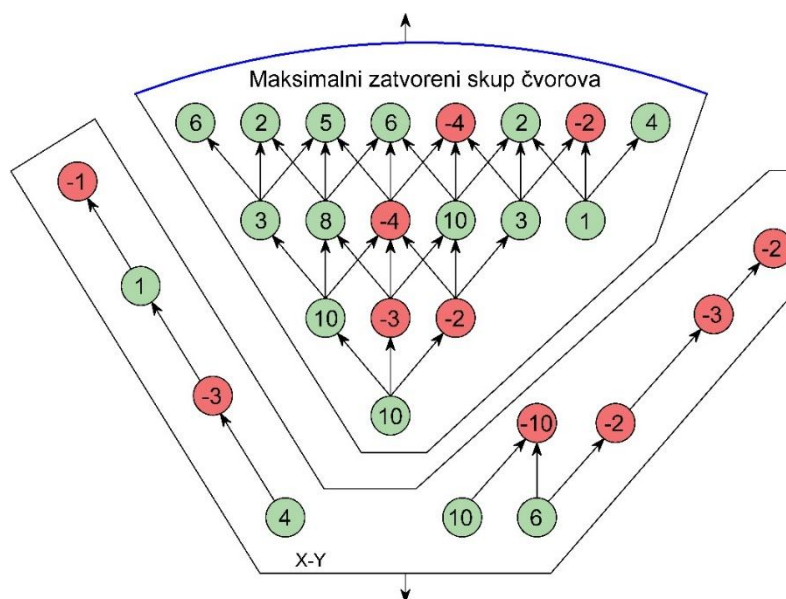
Formalizacija prostornih i tehnoloških zavisnosti između blokova omogućila je definisanje problema optimizacije granica kopa u okviru teorije grafova. Ključni doprinosi u radovima Johnson & Sharp (1971) [193] i Laurent (1977) [194] pokazali su da se geometrijska ograničenja eksploatacije mogu uspešno predstaviti mrežom zavisnosti. U ovom modelu, blokovi su definisani kao čvorovi grafa, dok usmereni lukovi (grane) između njih predstavljaju geotehničke uslovljenosti koje proističu iz stabilnosti kosina. Za standardni ortogonalni blok model definisane su osnovne šeme zavisnosti, od kojih su najzastupljenije mreže 1–9 i 1–5. One definišu da se eksploatacija određenog bloka može izvršiti samo uz prethodno uklanjanje devet, odnosno pet blokova koji se nalaze na nivoima iznad (ukupno 14 blokova), čime se osigurava propisani nagib kosine kopa (slika 3.25). Ovakav matematički prikaz zavisnosti postavio je temelj za razvoj savremenih trodimenzionalnih algoritama za određivanje završne konture površinskog kopa, omogućavajući precizno rešavanje problema maksimalnog zatvorenog podgraфа (maksimalne težine).



Slika 3.25. Šematski prikaz geometrijskih i logičkih ograničenja pri otkopavanju blokova [195]

Na toj osnovi razvijen je **Lerchs–Grossmann algoritam**, predstavljen sredinom šezdesetih godina, koji modeluje blok model ležišta kao usmereni graf u kome svaki blok predstavlja čvor, dok lukovi između čvorova predstavljaju geometrijska ograničenja eksploatacije. Blok može biti uključen u konturu kopa samo ukoliko su svi blokovi koji se nalaze iznad njega takođe uključeni u eksploataciju. Na ovaj način formira se mreža zavisnosti između blokova koja definiše dozvoljene konfiguracije konture kopa [8].

Cilj algoritma je pronalaženje skupa blokova koji maksimizuje ukupnu ekonomsku vrednost kopa, odnosno razliku između ukupnog prihoda od eksploatacije rude i ukupnih troškova eksploatacije rude i jalovine. U graf-teorijskoj formulaciji ovaj problem se svodi na pronalaženje maksimalnog zatvorenog skupa čvorova (*maximum closure problem*) u usmerenom grafu (slika 3.26). Rešenje ovog problema predstavlja optimalnu završnu konturu površinskog kopa koja obezbeđuje maksimalnu ekonomsku vrednost eksploatacije uz poštovanje svih geometrijskih ograničenja [4] [196].



Slika 3.26. Problem maksimalnog zatvorenog grafa za određivanje optimalne konture površinskog kopa [3]

Zahvaljujući svojoj matematičkoj rigoroznosti i sposobnosti da pronade globalno optimalno rešenje za definisani blok model, Lerchs–Grossmann algoritam je tokom više od pet decenija ostao osnovni metod za optimizaciju završne konture površinskih kopova. Danas predstavlja temelj većine savremenih softverskih sistema za optimizaciju površinskih kopova i široko je primenjen u industrijskoj praksi strateškog planiranja površinskih kopova [8].

3.3.1.3. Pseudoflow algoritam

Razvoj računarskih tehnologija i značajno povećanje veličine blok modela doveli su do potrebe za efikasnijim optimizacionim metodama koje mogu da obrade veoma velike skupove podataka. Savremeni blok modeli često sadrže milione, pa čak i desetine miliona blokova, što predstavlja značajan izazov za tradicionalni Lerchs-Grossman (LG) algoritam, što je stvorilo potrebu za efikasnijim rešenjem [8].

Kao odgovor na te izazove, razvijen je Pseudoflow algoritam (HPF), zasnovan na istraživanjima profesorke Dorit Hochbaum [197] [198] [199]. Ovaj algoritam predstavlja najsavremeniju proceduru za rešavanje problema maksimalnog zatvorenog skupa čvorova u grafu, što je suština definisanja granica površinskog kopa.

Za razliku od tradicionalnih algoritama maksimalnog protoka koji striktno poštuju zakon očuvanja toka u svakom koraku, Pseudoflow uvodi koncept „pseudotoka“, odnosno toka koji tokom proračuna ne mora biti u ravnoteži u svakom čvoru. Umesto dugotrajnog balansiranja cele mreže, algoritam dozvoljava privremene viškove (excess) u čvorovima, što mu omogućava da se fokusira isključivo na brzu identifikaciju minimalnog preseka (min-cut). Na taj način, Pseudoflow direktno definiše granicu između profitabilne rude i jalovine (završnu konturu kopa), drastično skraćujući vreme proračuna jer eliminiše nepotrebne kalkulacije u delovima modela koji su očigledno izvan ekonomskog optimuma [197] [200].

Ključne karakteristike koje ga izdvajaju su:

- Matematička ekvivalentnost - Pseudoflow nije aproksimacija, već on garantuje identično optimalno rešenje kao i Lerchs-Grossman algoritam (rudarski inženjeri dobijaju isti rezultat, ali neuporedivo brže) [201] [200].
- Ušteda vremena - Dok su starije implementacije zahtevale sate ili čak dane za obradu miliona blokova, Pseudoflow iste proračune završava u minutima. Ovo omogućava inženjerima da u toku jednog radnog dana testiraju desetine različitih ekonomskih scenarija [201] [200].

- Implementacija u industriji - Zbog svoje robusnosti, Pseudoflow je postao sastavni deo vodećih softverskih rešenja kao što su GEOVIA Whittle i Deswik [200] [202].

Iako Pseudoflow zahteva veće količine radne memorije (RAM) u poređenju sa Lerchs-Grossman algoritmom (zbog čuvanja strukture lukova u grafu), to se u modernom računarstvu smatra prihvatljivim kompromisom za dobijenu brzinu. Njegova primena omogućava preciznu optimizaciju čak i u najsloženijim geološkim uslovima, čineći ga nezaobilaznim alatom u strateškom planiranju i maksimizaciji neto sadašnje vrednosti (NPV) rudarskih projekata [200].

3.3.1.4. Sistematizacija i komparativna analiza algoritama za optimizaciju

U cilju sistematizacije pristupa razvijenih za optimizaciju granica površinskog kopa, u Tabela 3.1 dat je pregled najznačajnijih algoritama koji su obeležili razvoj rudarskog planiranja. Ova sistematizacija pruža uvid u evoluciju metoda, od ranih heurističkih pokušaja do savremenih, matematički rigoroznih rešenja zasnovanih na teoriji grafova.

Tabela 3.1. Uporedne karakteristike algoritama za optimizaciju završne konture kopa

Metoda	Osnovni princip	Ključne prednosti	Ograničenja
Floating Cone	Iterativna analiza ekonomskog efekta blokova unutar virtuelnog konusa definisanog nagibom kosina.	Izuzetno jednostavna implementacija i minimalni zahtevi za hardverskim resursima.	Ne ispituje sve međuzavisnosti blokova, pri čemu često ne pronalazi globalni optimum kod složenih geometrija.
Lerchs–Grossmann (LG)	Rigorozni model zasnovan na teoriji grafova koji identifikuje maksimalno vredan zatvoren skup čvorova (blokova).	Matematički dokazano pronalazi globalni optimum ; decenijama industrijski standard.	Eksponencijalni rast vremena računanja kod modernih modela sa desetinama miliona blokova.
Pseudoflow (HPF)	Napredna implementacija mrežnih tokova (Max-flow/Min-cut) koja koristi „pseudotokove“ za brzu konvergenciju.	Dramatično veća brzina rada (i do 100x brže od LG); zadržava identičan optimalni rezultat kao LG.	Zahteva značajno više radne memorije (RAM) za skladištenje strukture grafa i lukova.

Na osnovu prikazanog pregleda, evidentno je da je optimizacija završne konture kopa prešla put od aproksimativnih ka egzaktnim metodama. Rane heurističke metode, poput **Floating Cone**, predstavljale su prve korake ka automatizaciji, ali su zbog nemogućnosti da uvek pronađu teoretski najprofitabilnije rešenje postepeno potisnute [192].

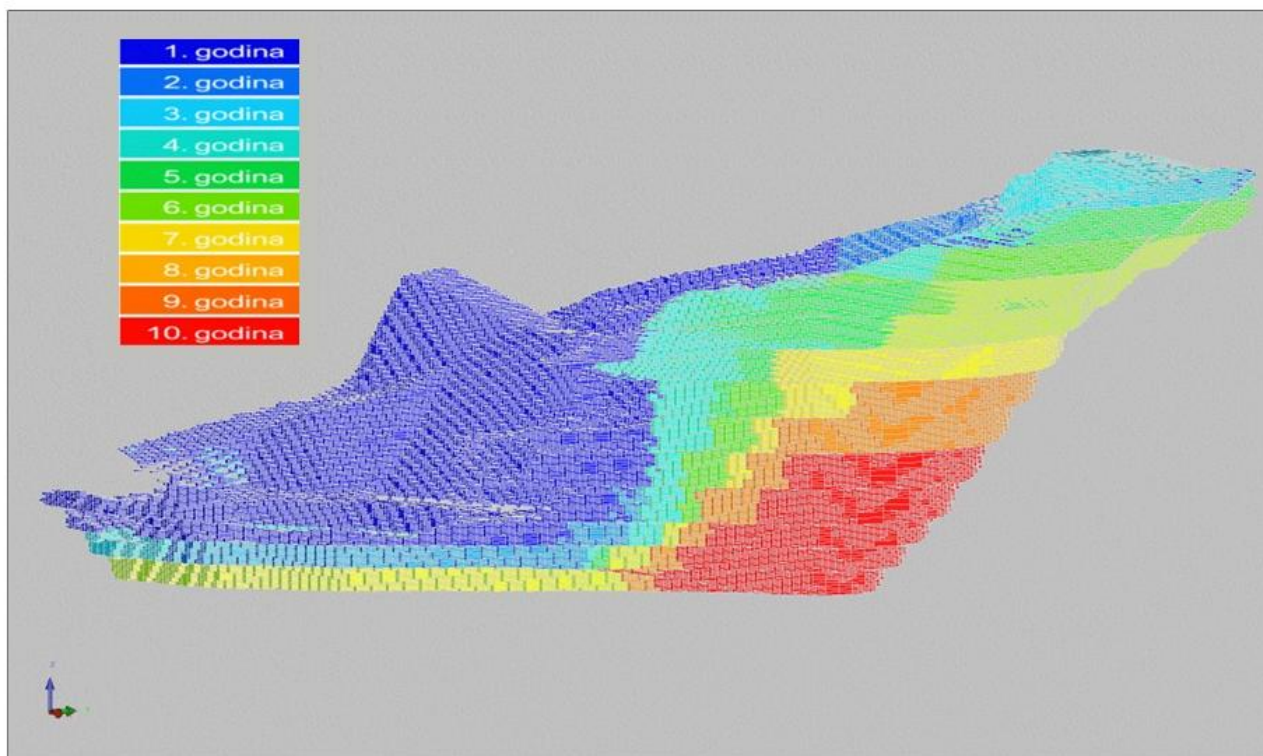
Prekretnicu u rudarskom inženjerstvu označila je pojava **Lerchs–Grossmann** algoritma. On je uveo matematičku strogost u proces projektovanja, omogućivši inženjerima da sa sigurnošću definišu konturu koja maksimizuje ekonomsku vrednost [4]. Ipak, sa pojavom modernih blok-modela koji sadrže desetina miliona blokova, LG algoritam je počeo da pokazuje svoja ograničenja u pogledu brzine procesiranja [200].

Razvoj **Pseudoflow** algoritma predstavlja logičan tehnološki odgovor na potrebe za bržom obradom masovnih podataka. Iako se često pogrešno smatra samo varijacijom LG metode, Pseudoflow je fundamentalno drugačiji matematički pristup rešavanju istog problema. On omogućava inženjerima ne samo brzinu, već i fleksibilnost da u realnom vremenu testiraju desetina različitih ekonomskih scenarija (tzv. „What-if“ analize), što je ranije bilo nezamislivo [197] [200].

Važno je naglasiti da, bez obzira na brzinu i preciznost ovih algoritama, određivanje optimalne konture kopa predstavlja tek polaznu tačku strateškog planiranja. Finalna ekonomska održivost projekta ne zavisi samo od toga *gde se kop završava*, već prvenstveno od toga *kojim redosledom* se blokovi otkopavaju. Zbog toga se u narednom poglavlju detaljno razmatraju metode određivanja faza razvoja kopa (pushback) i definisanje dugoročnog rasporeda eksploatacije, koje integrišu faktor vremena i diskontnu stopu u finalni plan eksploatacije.

3.3.2. Algoritmi za optimizaciju redosleda otkopavanja i planiranje proizvodnje

Nakon definisanja optimalne završne konture površinskog kopa, sledeći ključni korak u strateškom planiranju rudarskih operacija predstavlja određivanje redosleda eksploatacije blokova kroz vreme, odnosno planiranje proizvodnje tokom životnog veka rudnika (Long-term production planning). Ovaj problem, poznat kao problem redosleda otkopavanja blokova ili dugoročnog planiranja proizvodnje, ima za cilj da odredi koji blokovi treba da budu eksploatisani u svakom vremenskom periodu kako bi se maksimizovala neto sadašnja vrednost (NPV) rudarskog projekta, uz poštovanje geometrijskih, tehnoloških i ekonomskih ograničenja (slika 3.27). Takva ograničenja obuhvataju geotehničku stabilnost kosina, kapacitete rudarskih i prerađinskih postrojenja, zahteve za homogenizacijom kvaliteta rude, kao i operativna ograničenja rudarske mehanizacije [7] [203].



Slika 3.27. Primer redosleda otkopavanja blokova po godinama [204]

U literaturi se problem dugoročnog planiranja proizvodnje u površinskim kopovima najčešće posmatra kao kombinacija dva međusobno povezana zadatka:

- određivanje razvojnih faza kopa (pushbacks) i
- optimizacija redosleda otkopavanja blokova kroz vreme.

U okviru ovog poglavlja razmatraju se deterministički pristupi optimizaciji redosleda otkopavanja i planiranja proizvodnje u površinskim kopovima. Ovi modeli polaze od pretpostavke da su geološki i tehno-ekonomski parametri poznati i konstantni tokom procesa optimizacije, te se fokusiraju na određivanje optimalnog rasporeda eksploatacije blokova kroz vremenske periode uz poštovanje geometrijskih, tehnoloških i kapacitetskih ograničenja sistema.

U prethodnom poglavlju razmatrana je optimizacija završne konture površinskog kopa, gde je izbor optimalnog rešenja vršen na osnovu maksimizacije ukupne neto vrednosti eksploatacije (NV), pri čemu se vremenska dimenzija novčanih tokova nije eksplicitno razmatrala. U fazi dugoročnog planiranja proizvodnje vremenski raspored eksploatacije blokova postaje od ključnog značaja, jer vrednost novčanih tokova zavisi od trenutka njihove realizacije. Zbog toga se u ovom delu planiranja kao osnovni kriterijum optimizacije koristi **neto sadašnja vrednost projekta (NPV)**, koja omogućava diskontovanje budućih prihoda i troškova na početni trenutak projekta.

U matematičkoj formulaciji problema dugoročnog planiranja proizvodnje ležište se posmatra kao trodimenzionalni blok model u kome svaki blok ima određenu ekonomsku vrednost. Problem optimizacije sastoji se u određivanju vremenskog perioda u kome će pojedinačni blok biti eksploatisan, uz poštovanje svih geometrijskih i operativnih ograničenja sistema. Funkcija cilja ovog problema najčešće se definiše kao maksimizacija diskontovane vrednosti svih blokova koji se eksploatišu tokom planiranog vremenskog horizonta [203].

Matematički, funkcija cilja može se izraziti u sledećem obliku [203]:

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_{ijkt} \cdot x_{ijkt} \quad (3.16)$$

gde su:

- i, j, k – indeksi koji označavaju prostorni položaj bloka u blok modelu (x, y i z koordinata),
- t – indeks vremenskog perioda u kome se blok eksploatiše,
- T – ukupan broj vremenskih perioda planiranja,
- c_{ijkt} – diskontovana ekonomska vrednost bloka (i, j, k) ukoliko se eksploatiše u periodu t ,
- x_{ijkt} – binarna promenljiva koja ima vrednost 1 ukoliko se blok (i, j, k) eksploatiše u periodu t , a 0 u suprotnom slučaju.

Parametar c_{ijkt} predstavlja ekonomsku vrednost bloka (i, j, k) ukoliko se eksploatiše u vremenskom periodu t . Ova vrednost proizilazi iz razlike između prihoda ostvarenih prodajom metala sadržanog u bloku (koji zavise od sadržaja metala, iskorišćenja u preradi i tržišne cene) i ukupnih troškova njegove eksploatacije i prerade. U modelima dugoročnog planiranja proizvodnje ova vrednost se dodatno diskontuje u zavisnosti od vremena eksploatacije bloka. Na taj način funkcija cilja modela favorizuje raspored eksploatacije koji maksimizuje ukupnu diskontovanu ekonomsku vrednost blokova, odnosno neto sadašnju vrednost (NPV) rudarskog projekta [203].

Iako je maksimizacija NPV najčešće korišćen kriterijum u optimizaciji dugoročnog plana proizvodnje, u određenim slučajevima mogu se razmatrati i alternativni ciljevi, kao što su svođenje troškova proizvodnje na mogući minimum [205] [206]. Ipak, zbog svoje direktne povezanosti sa ekonomskom vrednošću projekta, maksimizacija NPV ostaje dominantan kriterijum u većini modela dugoročnog planiranja proizvodnje [203] [207].

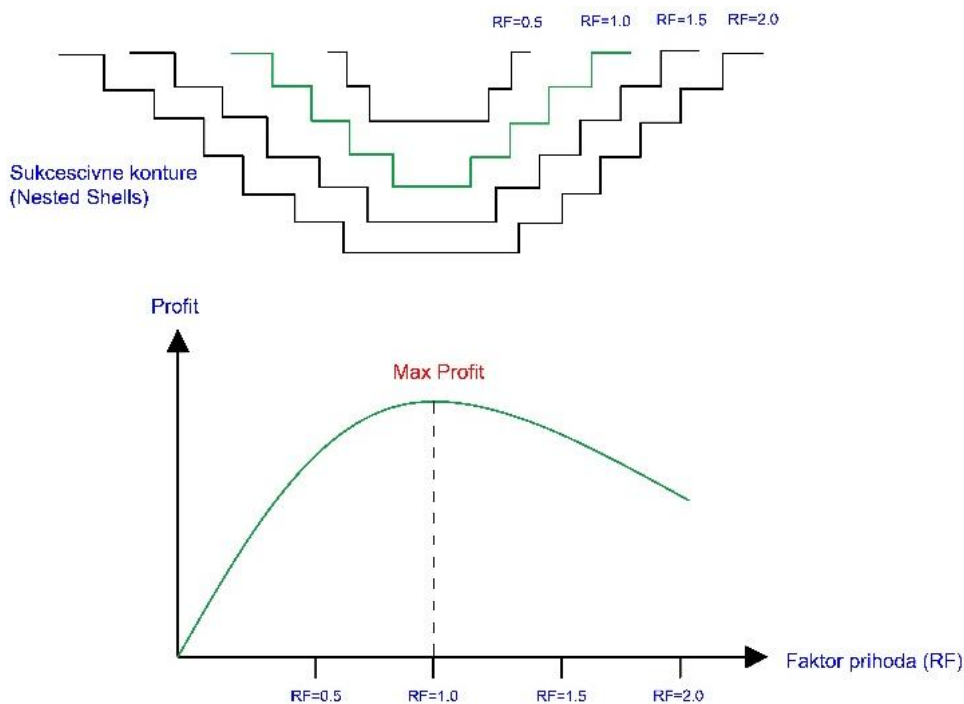
Deterministički pristupi mogu se podeliti na tradicionalne fazne metode zasnovane na ugnježdenim konturama (nested pit shells), matematičke modele zasnovane na linearnom i mešovitom celobrojnom programiranju, kao i savremene integrisane modele koji istovremeno optimizuju prostornu geometriju kopa i vremenski raspored eksploatacije.

3.3.2.1. Tradicionalni Whittle fazni pristup - Nested Pits i Milawa algoritam

Tradicionalni pristup dugoročnom planiranju proizvodnje u površinskim kopovima zasniva se na podeli prostora kopa na niz sukcesivnih eksploatacionih faza razvoja (*pushbacks*), koje omogućavaju postepeno širenje kopa kroz vreme. Ovakav pristup predstavlja industrijski standard u strateškom planiranju rudnika i široko je implementiran u komercijalnim softverskim sistemima za rudarsko planiranje [208].

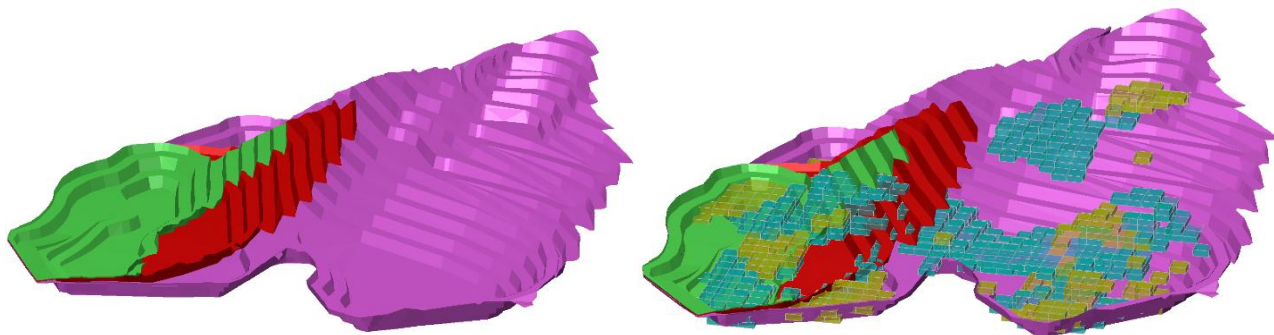
Iako je algoritam Lerchs–Grossmann [4] omogućio određivanje optimalne završne konture površinskog kopa, on ne daje informaciju o redosledu eksploatacije blokova unutar te konture. Drugim rečima, Lerchs–Grossmann algoritam definiše **konačnu geometriju kopa**, ali ne određuje dinamiku njegovog razvoja kroz vreme. Značajan napredak u tom pogledu ostvaren je radom **Whittle-a (1988)**, koji je u radu „*Beyond optimization in open-pit design*“ [208] prvi put formalno predstavio koncept **ugnježdenih kontura (nested pit shells)** kao alat za definisanje faza razvoja površinskog kopa. Whittle je pokazao da se variranjem cene proizvoda, najčešće kroz primenu faktora

prihoda (*Revenue Factor*), može generisati čitava serija kontura različite veličine unutar konačne konture kopa (slika 3.28). Svaka od tih kontura predstavlja optimalno rešenje za različite cene i zajedno formiraju skup ugnježenih kontura koje prikazuju potencijalni razvoj kopa kroz vreme.



Slika 3.28. Generisanje sukcesivnih kontura (*nested pits shells*) primenom faktora prihoda i njihov uticaj na ekonomsku vrednost projekta

Svaka od generisanih kontura predstavlja potencijalnu granicu kopa pri određenim ekonomskim uslovima, dok razlika između dve uzastopne konture definiše potencijalnu eksploatacionu fazu. Na osnovu analize ovih ugnježenih kontura projektant bira skup kontura koje će predstavljati **pushback faze**, odnosno sukcesivne faze razvoja kopa. Pushbacks predstavljaju praktične rudarske jedinice koje obezbeđuju dovoljno radnog prostora za rudarsku mehanizaciju, omogućavaju izgradnju transportnih rampi i osiguravaju stabilan geometrijski razvoj kopa kroz vreme [208] [1]. Njihova pravilna selekcija ima ključnu ulogu u definisanju optimalnog plana eksploatacije i direktno utiče na ekonomsku efikasnost rudarskog projekta [209]. Ilustrovani primer faza razvoja prikazan je na slici 3.29.



Slika 3.29. Faze razvoja površinskog kopa (*pushbacks*)

U tipičnom scenariju eksploatacije, površinski kop se razvija kroz niz sukcesivnih pushback faza. Eksploatacija započinje u okviru inicijalne faze, koja obično je projektovana tako da omogući što raniji pristup zonama ležišta sa većom ekonomskom vrednošću, odnosno blokovima sa višim sadržajem metala i povoljnijim odnosom otkrivke, čime se povećava diskontovana vrednost projekta. Iako se faze razvoja kopa konceptualno definišu kao sukcesivne, u operativnoj praksi često se više pushback faza razvija paralelno, čime se obezbeđuje stabilno snabdevanje postrojenja za preradu i fleksibilnije upravljanje proizvodnjom tokom životnog veka rudnika [208] [141].

Nakon definisanja faza razvoja kopa, sledeći korak predstavlja optimizaciju **redosleda eksploatacije faza kroz vreme**, odnosno definisanje dugoročnog rasporeda proizvodnje (dinamike eksploatacije). U okviru Whittle metodologije ovaj zadatak rešava **Milawa algoritam**, uveden devedesetih godina kao alat za optimizaciju dugoročnog rasporeda eksploatacije unutar definisanih faza [210]. Dok ugnježdene konture određuju gde će se kop razvijati, Milawa algoritam određuje **kada i kojom brzinom će se pojedine faze eksploatisati** tokom životnog veka rudnika [211].

Milawa algoritam predstavlja heuristički algoritam pretrage koji generiše raspored eksploatacije po vremenskim periodima uz poštovanje operativnih ograničenja rudarskog sistema. Heuristički algoritmi predstavljaju postupke rešavanja optimizacionih problema koji koriste praktična pravila i aproksimacije kako bi u razumnom vremenu pronašli kvalitetno rešenje, iako ono ne mora nužno biti globalno optimalno. Takav pristup je posebno pogodan za probleme velikih dimenzija, kao što je planiranje proizvodnje u površinskim kopovima, gde broj mogućih kombinacija eksploatacije blokova može biti izuzetno veliki [1] [211].

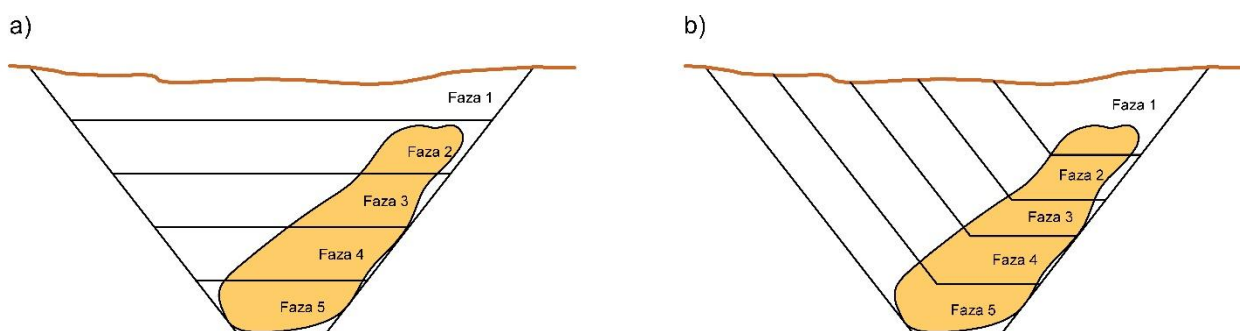
U okviru Milawa algoritma određuje se koje etaže unutar pojedinih pushback faza treba eksploatisati u svakom vremenskom periodu, pri čemu se uzimaju u obzir kapaciteti rudarske mehanizacije, kapaciteti postrojenja za preradu, kao i geometrijska ograničenja razvoja kopa [1].

U procesu određivanja redosleda eksploatacije Milawa algoritam često analizira različite referentne scenarije koji definišu granice između maksimalne ekonomske vrednosti i operativne izvodljivosti plana eksploatacije. U literaturi se najčešće razmatraju tri osnovna scenarija [1] [211]:

- **Best Case (Najbolji scenario),**
- **Worst Case (Najgori scenario), i**
- **Specified Case (Specifičan scenario).**

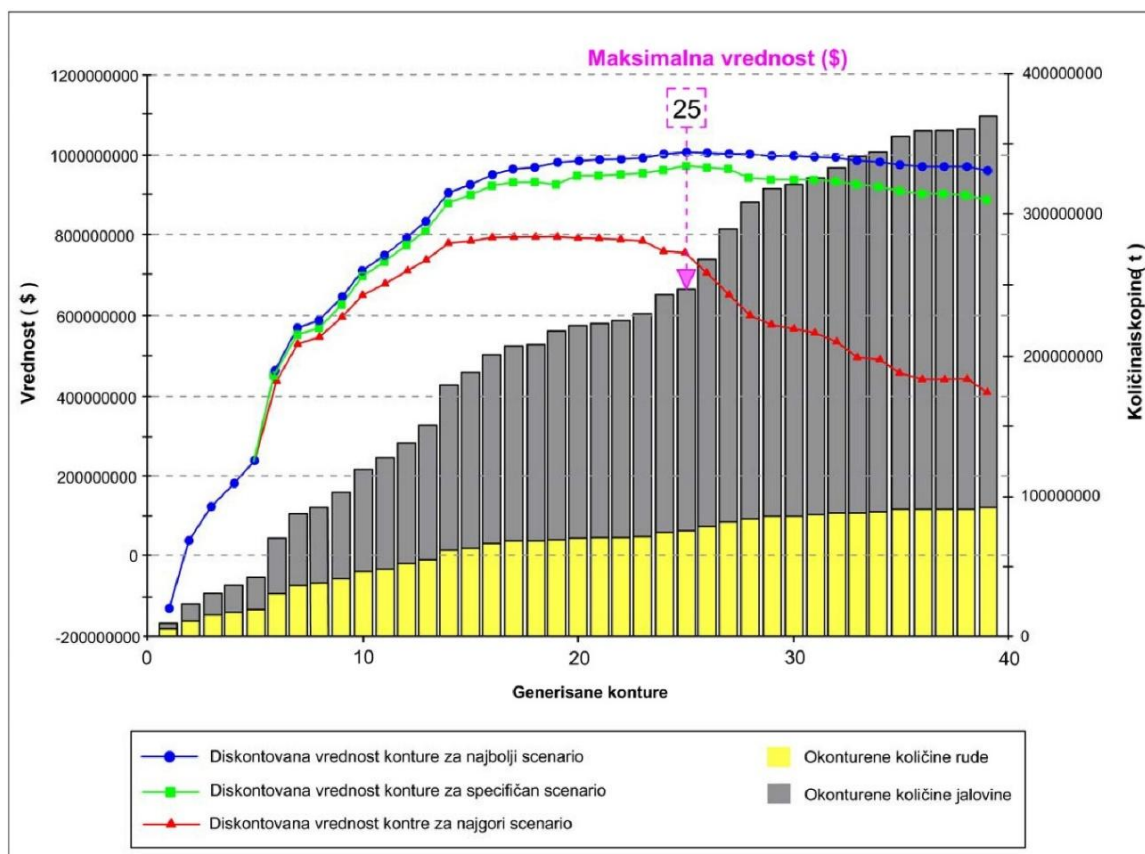
U okviru **Best Case** scenarija eksploatacija se odvija sukcesivno po fazama, odnosno svaka pushback faza se u potpunosti eksploatiše pre prelaska na narednu fazu. Na taj način se najvrednija ruda otkopava što ranije, dok se uklanjanje jalovine odlaže za kasnije periode, čime se ostvaruje maksimalna neto sadašnja vrednost projekta (slika 3.30) [2].

Suprotno tome, **Worst Case** scenario podrazumeva eksploataciju po etažama preko cele konture kopa, pri čemu se svaka etaža u potpunosti otkopava pre prelaska na sledeću. Ovakav način eksploatacije operativno je jednostavniji, ali dovodi do ranijeg uklanjanja velikih količina jalovine i kasnijeg priliva prihoda, što rezultuje nižom neto sadašnjom vrednošću projekta (slika 3.30) [2].



Slika 3.30. Razlika između Worst Case (a) i Best Case (b) scenarija [2]

Između ova dva ekstremna scenarija nalazi se **Specified Case**, koji predstavlja realni operativni plan eksploatacije. U ovom scenariju definišu se ograničenja kao što su broj aktivnih pushback faza ili dozvoljeni zaostatak između faza po etažama (bench lag), nakon čega Milawa algoritam određuje raspored eksploatacije koji predstavlja kompromis između maksimalne ekonomske vrednosti i operativne izvodljivosti plana proizvodnje (slika 3.31).



Slika 3.31. Whittle grafikon optimizacije kopa sa prikazom scenarija vrednosti

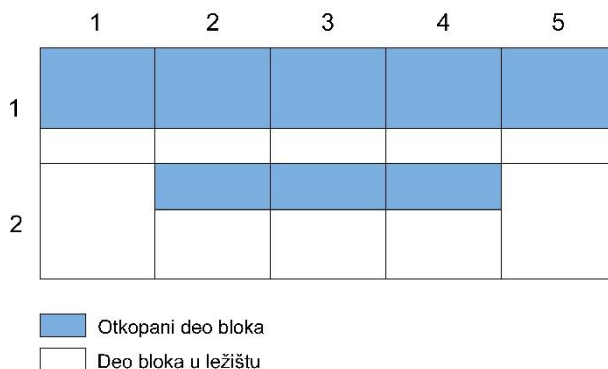
U skladu sa prethodno opisanom procedurom mogu se koristiti i različite varijante optimizacije rasporeda proizvodnje. Na primer, **Milawa NPV** pristup teži maksimizaciji neto sadašnje vrednosti projekta favorizujući raniju eksploataciju blokova sa većom ekonomskom vrednošću, dok **Milawa Balanced** pristup nastoji da obezbedi stabilniji raspored proizvodnje i ravnomernije korišćenje rudarskih i prerađivih kapaciteta kroz vreme. Ovakav balans između ekonomskih ciljeva i operativne stabilnosti predstavlja jednu od ključnih prednosti tradicionalnog faznog pristupa planiranju proizvodnje. [212] [213].

Iako ovaj pristup predstavlja industrijski standard u strateškom planiranju površinskih kopova, on ima određena ograničenja. Najznačajnije ograničenje proizilazi iz činjenice da se optimizacija odvija u dva odvojena koraka: najpre se generišu ugnježdene konture i definišu faze razvoja kopa, a zatim se optimizuje raspored njihove eksploatacije kroz vreme. Ovakav sekvencijalni pristup ne garantuje uvek globalno optimalno rešenje problema planiranja proizvodnje, jer izbor pushback faza može značajno uticati na konačni raspored eksploatacije i ostvarenu ekonomsku vrednost projekta. Upravo zbog ovih ograničenja razvijeni su savremeniji pristupi zasnovani na matematičkom programiranju i direktnoj optimizaciji blokova kroz vreme, koji će biti razmatrani u narednom poglavlju [214].

3.3.2.2. Matematičko programiranje - Linear programming (LP) i MILP (Mixed Integer Linear Programming)

Razvoj metoda matematičkog programiranja predstavlja značajan napredak u optimizaciji dugoročnog planiranja proizvodnje u površinskim kopovima. Za razliku od tradicionalnih pristupa zasnovanih na heurističkim algoritmima i sekvencijalnom definisanju faza eksploatacije, matematički modeli omogućavaju formalnu optimizacionu formulaciju problema rasporeda eksploatacije blokova kroz vreme. U takvim modelima problem planiranja proizvodnje posmatra se kao višeperiodni optimizacioni problem u kome se simultano određuje koji blokovi će biti eksploatisani i u kom vremenskom periodu, uz poštovanje tehnoloških i geometrijskih ograničenja rudarskog sistema [7]. [8].

Prvi pokušaji primene metoda matematičkog programiranja u planiranju eksploatacije površinskih kopova datiraju iz šezdesetih godina prošlog veka. **Johnson (1968)** [215] je predložio jedan od prvih modela dugoročnog planiranja proizvodnje zasnovan na linearnom programiranju (LP), u kome se raspored eksploatacije blokova određuje kroz više vremenskih perioda uz poštovanje ograničenja stabilnosti kosina, kapaciteta rudnika i postrojenja za preradu, kao i zahteva za kvalitetom rude. Međutim, ovakva formulacija koristi kontinualne promenljive koje omogućavaju parcijalnu eksploataciju blokova (*fractional blocks*), što nije fizički izvodljivo u rudarskim operacijama (slika 3.32) [7] [216].



Slika 3.32. Problem parcijalne eksploatacije blokova u Johnson-ovom modelu linearnog programiranja [7]

Kako bi se prevazišlo ovo ograničenje, razvijeni su modeli zasnovani na **mešovitom celobrojnom linearnom programiranju (Mixed Integer Linear Programming – MILP)**. U MILP formulaciji uvode se binarne promenljive koje definišu da li se određeni blok eksploatiše u određenom vremenskom periodu, čime se omogućava realističnije modelovanje rudarskih operacija. Ovakvi modeli omogućavaju simultano rešavanje problema *šta eksploatisati i kada eksploatisati*, pri čemu funkcija cilja obično maksimizuje neto sadašnju vrednost (NPV) rudarskog projekta [217].

Jedan od ključnih elemenata MILP formulacija predstavljaju **precedence constraints**, odnosno ograničenja prethodnosti između blokova. Ova ograničenja osiguravaju da blok na nižoj etaži ne može biti eksploatisan pre uklanjanja blokova koji se nalaze iznad njega, čime se matematički modeluje geometrija kopa i obezbeđuje stabilnost kosina. Na taj način se u optimizacionom modelu uvodi struktura zavisnosti između blokova koja reflektuje realne tehnološke uslove eksploatacije [8] [217].

Dalji razvoj MILP modela doveo je do značajnih unapređenja u formulaciji i metodama rešavanja optimizacionih problema planiranja proizvodnje. **Gershon (1983)** [218] je predložio jednu od prvih MILP formulacija za definisanje rasporeda eksploatacije blokova kroz više vremenskih perioda, dok su kasniji radovi dodatno unapredili ove modele uvođenjem naprednih optimizacionih metoda. Posebno značajan doprinos dali su **Caccetta i Hill (2003)** [216] koji su primenili *branch-and-cut* algoritam za rešavanje velikih problema sekvenciranja blokova. Ovaj algoritam ubrzava pronalaženje rešenja tako što sistematski deli problem na manje podprobleme (grananja), dok istovremeno odbacuje delove pretrage koji ne mogu dovesti do optimalnog rešenja koristeći matematička ograničenja poznata kao rezovi.

Uprkos doprinosima poput metode grananja i rezanja, MILP modeli se i dalje suočavaju sa izazovom računarske složenosti. Broj promenljivih u modelu raste proporcionalno broju blokova i broju vremenskih perioda planiranja, zbog čega realni optimizacioni modeli često sadrže milione binarnih promenljivih i veliki broj ograničenja. Kao posledica toga, rešavanje takvih modela može zahtevati veoma značajne računarske resurse. U literaturi se ovaj problem često klasifikuje kao **NP-težak optimizacioni problem (NP-hard)**, što znači da vreme rešavanja može eksponencijalno rasti sa povećanjem dimenzije problema [219].

Kako bi se ublažila računarska složenost ovih modela, razvijen je niz metoda za redukciju dimenzije optimizacionog problema. Jedan od najčešće korišćenih pristupa predstavlja **agregacija blokova**, pri

čemu se blokovi sličnih geoloških i ekonomskih karakteristika grupišu u veće rudarske jedinice kao što su makro-blokovi, paneli ili tzv. *mining-cuts*. Ovakav pristup značajno smanjuje broj promenljivih u modelu i omogućava efikasnije rešavanje optimizacionog problema [219].

Pored toga, u procesu rešavanja MILP modela često se koristi koncept **relaksacije linearnog programiranja (LP relaxation)** kod problema masovnih razmera. Ovaj pristup koji je primenjen od strane **Bienstock i Zuckerberg (2010)**, koristi specifičnu strukturu rudarskog problema kako bi se binarne promenljive privremeno tretirale kao kontinualne, čime se u rekordno kratkom vremenu dobija **gornja granica vrednosti funkcije cilja**. Ovaj korak je presudan jer omogućava algoritmu da rano identifikuje i odbaci neperspektivne delove prostora rešenja, čime se drastično sužava pretraga ka konačnom optimalnom planu [220].

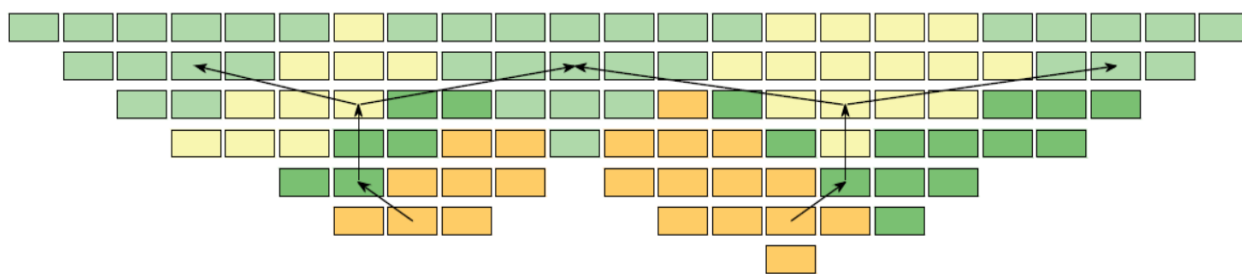
Doprinos **Bienstock-a i Zuckerberg-a (2010)**, danas poznat kao **BZ algoritam** [221], predstavlja osnovu mnogih savremenih komercijalnih softvera u rudarstvu. Njihov pristup je omogućio da se problemi koji su se ranije smatrali računarski nepremostivim (NP-teškim) u praksi rešavaju u razumnom vremenu, čime je direktno premošćen jaz između teorijske optimizacije i operativnog planiranja na velikim površinskim kopovima.

3.3.2.3. *Fundamental Tree Algorithm*

Kao što je prethodno pomenuto, jedan od ključnih problema u primeni MILP modela za dugoročno planiranje proizvodnje jeste izuzetno veliki broj binarnih promenljivih i ograničenja koji nastaje prilikom modelovanja realnih blok modela ležišta. U savremenim rudarskim projektima blok modeli često sadrže milione blokova, što dovodi do optimizacionih problema koji su izuzetno zahtevni za rešavanje. Kako bi se smanjila dimenzija optimizacionog problema, u literaturi su razvijene različite metode agregacije blokova i reformulacije MILP modela. Ramazan i Dimitrakopoulos (2004) [222] analizirali su više alternativnih formulacija za planiranje proizvodnje i pokazali da rešavanje MILP modela u velikim rudarskim sistemima prvenstveno zavisi od broja binarnih promenljivih i strukture ograničenja, što je motivisalo razvoj metoda koje redukuju dimenziju optimizacionog problema kroz agregaciju blokova i modifikaciju matematičkih formulacija.

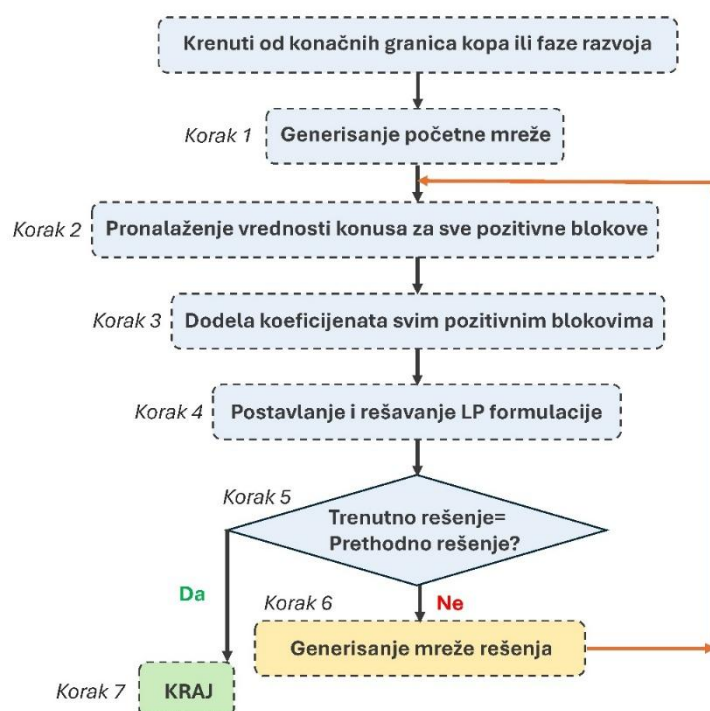
Jedan od najznačajnijih pristupa ove vrste predstavlja **Fundamental Tree Algorithm (FTA)** koji je razvio **Ramazan (2007)** [223]. Osnovna ideja ovog algoritma jeste agregacija blokova u veće rudarske jedinice nazvane *fundamentalna stabla* (fundamental trees), koje se zatim koriste kao osnovne jedinice odlučivanja u MILP modelu planiranja proizvodnje. Na taj način optimizacioni model ne donosi odluke o eksploataciji svakog pojedinačnog bloka, već o eksploataciji grupa blokova koje se mogu profitabilno eksploatisati kao celina.

Fundamentalno stablo predstavlja minimalni skup blokova koji može biti eksploatisan bez narušavanja geometrijskih ograničenja stabilnosti kosina i koji u zbiru ima pozitivnu ekonomsku vrednost. Pri tome nijedan podskup blokova koji čine fundamentalno stablo ne može samostalno zadovoljiti ove uslove. Drugim rečima, fundamentalno stablo predstavlja najmanju grupu blokova koja se može profitabilno eksploatisati kao jedinstvena rudarska celina uz poštovanje svih ograničenja u pogledu redosleda otkopavanja između blokova (slika 3.33) [223].



Slika 3.33. Primer agregacije blokova u fundamentalna stabla u dvodimenzionalnom blok modelu [219]

Na slici 3.34 prikazan je logički redosled koraka *Fundamental Tree algoritma*. Postupak je iterativan i osmišljen tako da transformiše kompleksan blok-model u set optimizovanih rudarskih jedinica.



Slika 3.34. Koraci FTA za identifikaciju fundamentalnih stabala u blok modelu [223]

Detaljan opis faza prikazanih na dijagramu toka je sledeći [223]:

- Preduslovi i ekonomska definicija (Početna tačka)

Algoritam polazi od definisanih krajnjih kontura kopa ili faze eksploatacije (pushbacks). Prema Ramazanu (2007) [223], ključno je da ove konture budu određene egzaktnim metodama (poput LG [4] ili Maxflow algoritma [215]) kako bi LP model bio matematički izvodljiv. Za svaki blok izračunava se ekonomska vrednost, pri čemu rudni blokovi imaju pozitivnu a jalovinski negativnu vrednost.

- Inicijalizacija i proračun vrednosti (Koraci 1–3)

Korak 1: Formira se mreža čvorova (blokova) i lukova koji predstavljaju geometrijsku zavisnost

Korak 2: Za svaki pozitivan blok izračunava se vrednost konusa, koja predstavlja sumu vrednosti svih blokova unutar njegovog konusa (ruda + pripadajuća jalovina).

Korak 3: Na osnovu vrednosti konusa i nivoa na kome se blokovi nalaze (elevacije), blokovima se dodeljuju koeficijenti koji definišu njihov prioritet u optimizaciji (na višim nivoima se nalaze blokovi sa većom vrednošću s obzirom na manji broj pripadajućih blokova jalovine koje je potrebno ukloniti).

- Optimizacija i iterativni krug (Koraci 4–6)

Korak 4: Formuliše se model linearnog programiranja koji se rešava korišćenjem principa maksimalnog protoka (Maximum Flow). Ovde se koristi ista matematička osnova kao kod ranije opisanog Pseudoflow algoritma za identifikaciju zatvorenih skupova blokova.

Korak 5: Algoritam broji formirana „stabla”. Ukoliko je broj stabala isti kao u prethodnoj iteraciji, proces konvergira ka rešenju.

Korak 6: Ako rešenje nije stabilno, algoritam vrši modifikaciju mreže. Lukovi kroz koje nije bilo protoka u LP rešenju se brišu, čime se omogućava finija particija blokova. Postupak se zatim vraća na Korak 2 za novi krug proračuna.

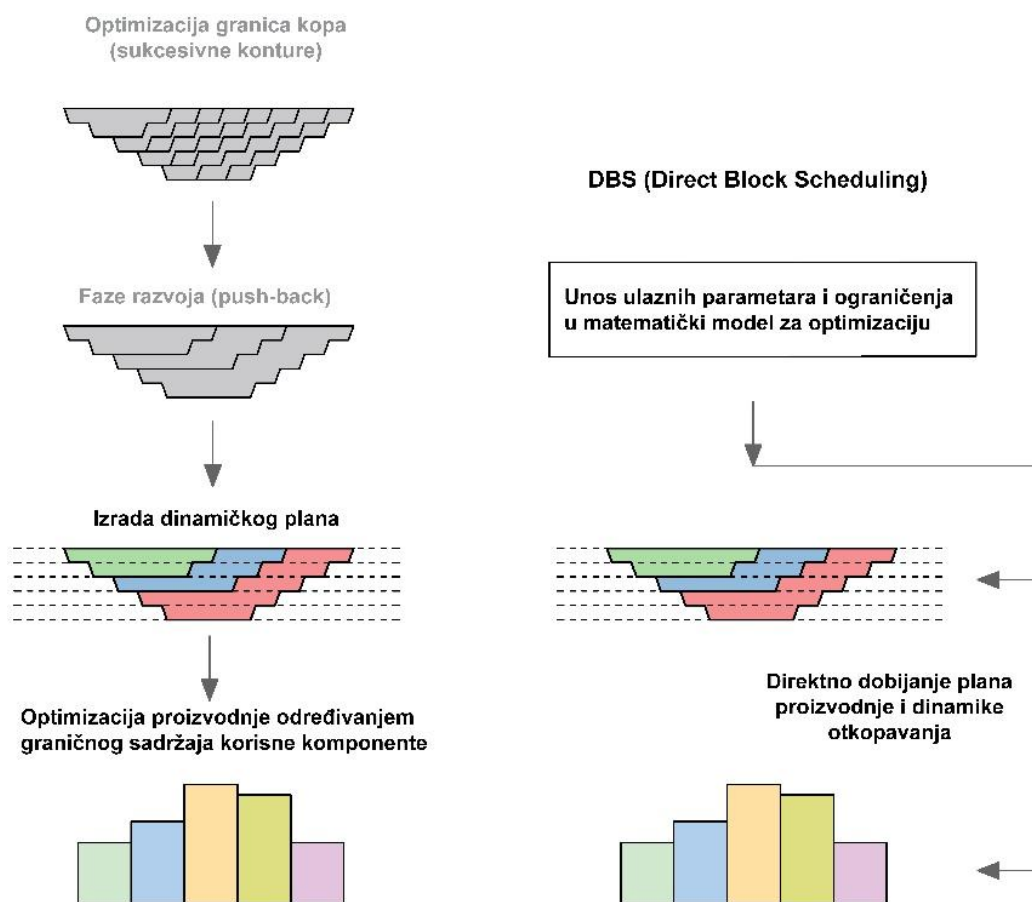
- Finalizacija i integracija (Korak 7)

Proces se završava kada se identifikuje stabilna struktura fundamentalnih stabala. Ova stabla predstavljaju najmanje grupe blokova koje se mogu profitabilno eksploatirati uz poštovanje svih tehničkih ograničenja. U finalnom MILP modelu, svako stablo zamenjuje hiljade pojedinačnih blokova jednom binarnom promenljivom, čime se drastično ubrzava dobijanje optimalnog strateškog plana [223].

Ključna prednost ovog pristupa ogleda se u značajnom smanjenju broja binarnih promenljivih u MILP modelu. Umesto da se binarne promenljive dodeljuju svakom pojedinačnom bloku, one se dodeljuju fundamentalnim stablima (koja se koriste kao osnovne rudarske jedinice), čime se broj binarnih promenljivih može redukovati i za više od 70-80%, u zavisnosti od složenosti ležišta, čime se omogućava nalaženje optimalnog rešenja u znatno kraćem vremenskom intervalu [223].

3.3.2.4. Direct Block Scheduling pristup (DBS)

Kao što je već razmotreno u prethodnim poglavljima, dugoročno planiranje proizvodnje u površinskim kopovima karakteriše snažna međuzavisnost između geometrije kopa, ekonomske vrednosti blokova i redosleda njihove eksploatacije. Zbog ove međuzavisnosti tradicionalni pristupi planiranju istorijski su razvijeni kao sekvencijalni proces koji uključuje optimizaciju završne konture kopa, definisanje faza razvoja (pushbacks) i tek nakon toga planiranje dinamike eksploatacije. Iako ovakav pristup značajno pojednostavljuje rešavanje problema velikih dimenzija, razdvajanje ovih koraka može dovesti do suboptimalnih proizvodnih planova, jer odluke o vremenu eksploatacije blokova nisu optimizovane simultano sa geometrijom kopa. Upravo iz tog razloga u novijoj literaturi razvijen je pristup poznat kao **Direct Block Scheduling (DBS)**, koji nastoji da integriše ove odluke u jedinstveni optimizacioni model planiranja proizvodnje (slika 3.35) [224] [129].



Slika 3.35. Poređenje tradicionalnog pristupa planiranju proizvodnje i DBS metodologije [225]

U matematičkom smislu, DBS se najčešće formuliše kao problem **mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP)**. Za razliku od tradicionalnih metoda, DBS radi na nivou pojedinačnih blokova (*block-level resolution*), simultano određujući **šta** eksploatisati i **kada**, uz strogo poštovanje ograničenja stabilnosti kosina, kapaciteta sistema i zahtevanog kvaliteta rude [224].

Glavna prednost ovog pristupa je eliminacija potrebe za unapred definisanim fazama (pushbacks). Optimalni redosled otkopavanja se generiše direktno iz modela, što omogućava preciznije sagledavanje vremenske vrednosti novca i maksimizaciju neto sadašnje vrednosti (NPV) projekta (slika 3.35).

Ipak, ovakva detaljnost značajno usložnjava proračun. Savremeni blok modeli sa milionima blokova generišu ogroman broj binarnih promenljivih i ograničenja, što dovodi do **eksponencijalnog rasta vremena potrebnog za rešavanje**. Kako bi se ovi modeli primenili u praksi, razvijeni su napredni algoritmi, poput **Bienstock-Zuckerberg (BZ)** algoritma koji je prethodno pomenut. Ovi algoritmi svode računsku složenost na nivo koji je praktično rešiv u razumnom vremenskom roku, čineći proračun izvodljivim u realnom vremenu [225].

Poređenja između tradicionalnog pristupa planiranja proizvodnje i DBS modela pokazuju da DBS može generisati planove eksploatacije sa većom ekonomskom vrednošću, posebno u složenim geološkim uslovima ili u situacijama kada postoji značajna međuzavisnost između prostornih i vremenskih odluka planiranja. Uprkos tome, zbog visoke računarske složenosti i izazova u implementaciji operativnih ograničenja, DBS se u praksi primenjuje u kombinaciji sa drugim optimizacionim metodama ili heurističkim pristupima.

3.3.2.5. Heuristički i metaheuristički pristupi

Kao što je naglašeno u prethodnim poglavljima, problem dugoročnog planiranja proizvodnje u površinskim kopovima, odnosno problem definisanja redosleda eksploatacije blokova u prostoru i kroz vreme, klasifikuje se kao **NP-hard optimizacioni problem**. To znači da se složenost rešavanja značajno povećava sa rastom dimenzije problema, posebno sa povećanjem broja blokova u modelu i broja vremenskih perioda planiranja. U takvim uslovima egzaktni optimizacioni modeli, iako teorijski omogućavaju pronalaženje globalno optimalnog rešenja, često zahtevaju veoma dugo vreme računanja kada se primenjuju na realne blok modele velikih dimenzija [226].

Pored računarske složenosti, generisana rešenja ponekad mogu biti **operativno teško primenljiva**, jer mogu podrazumevati raspršenu eksploataciju blokova na različitim etažama ili udaljenim delovima kopa u istom vremenskom periodu. Takav raspored može dovesti do neefikasnog korišćenja rudarske mehanizacije i povećanja operativnih troškova, a često i do nemogućnosti realizacije plana [227] [228].

Zbog toga su u literaturi razvijeni heuristički i metaheuristički pristupi koji omogućavaju generisanje proizvodnih planova koji su bliži realnim operativnim uslovima rudarskog sistema, uz prihvatljivo vreme računanja i dovoljnu ekonomsku optimalnost.

U literaturi se heurističke metode za planiranje proizvodnje u površinskim kopovima najčešće dele na **konstruktivne heuristike** i **metaheurističke algoritme**.

Konstruktivne heuristike su metode koje plan proizvodnje formiraju sukcesivno, gradeći rešenje korak po korak primenom specifičnih pravila izbora blokova. Ovi algoritmi se oslanjaju na prioritete liste formirane prema ekonomskim parametrima, kao što su sadržaj metala, odnos otkrivke i rude (strip ratio) ili neto ekonomska vrednost bloka.

Jedan od pionira ovog pristupa, Gershon, uveo je metodu rangiranja zasnovanu na *pozicionoj težini* (*positional weight*). Ova vrednost ne obuhvata samo izolovanu ekonomsku vrednost bloka, već i sumu vrednosti svih blokova čija eksploatacija zavisi od njega (blokovi koji se „oslobađaju“ njegovim uklanjanjem). Algoritam u svakom koraku bira blok sa najvećom pozicionom težinom, pod uslovom da su zadovoljena geometrijska i tehnička ograničenja [229].

Slični pristupi često koriste *greedy strategije*, birajući u svakom trenutku lokalno najisplativiji blok uz poštovanje stabilnosti kosina. Iako ove metode ne garantuju globalni optimum, njihova glavna prednost je izuzetna brzina i niska računarska složenost. Zbog toga su nezamenljive u preliminarnim analizama i kao osnova za generisanje početnih rešenja koja se kasnije usavršavaju složenijim metaheurističkim modelima [227].

Metaheuristički algoritmi predstavljaju univerzalne optimizacione strategije koje koriste stohastičku pretragu (zasnovanu na verovatnoći) kako bi pronašle visokokvalitetna rešenja za složene kombinatorne probleme. Za razliku od konstruktivnih heuristika, koje rešenje grade samo jednom, metaheuristike su iterativni procesi koji neprestano modifikuju i poboljšavaju postojeće planove. Njihova ključna prednost su specifični mehanizmi koji omogućavaju izlazak iz lokalnih optimuma, odnosno situacija u kojima algoritam zadržava u dobrom, ali ne i najboljem mogućem rešenju [230].

U optimizaciji dugoročnog planiranja proizvodnje na površinskim kopovima najčešće korišćene metaheurističke metode uključuju **genetske algoritme** (Genetic Algorithms – GA), **simulirano kaljenje** (Simulated Annealing - SA), **Tabu pretragu** (Tabu Search - TS) i **optimizaciju kolonijom mrava** (Ant Colony Optimization - ACO) [231].

Genetski algoritmi (Genetic Algorithms – GA) predstavljaju evolucione optimizacione metode inspirisane principima prirodne selekcije i genetike. U ovim algoritmima potencijalna rešenja problema predstavljaju pojedince u populaciji, dok se proces optimizacije odvija kroz iterativne operacije selekcije, ukrštanja i mutacije. Tokom evolucije populacije favorizuju se rešenja sa boljim vrednostima funkcije cilja, čime se populacija postepeno približava optimalnom ili blisko optimalnom rešenju [230].

U oblasti planiranja proizvodnje na površinskim kopovima, genetski algoritmi (GA) su se pokazali kao izuzetno efikasni zbog sposobnosti da simultano optimizuju složene ciljeve, poput maksimizacije neto sadašnje vrednosti (NPV), uz strogo poštovanje nelinearnih tehno-ekonomskih ograničenja. Za razliku od tradicionalnih metoda, GA omogućavaju integraciju operativnih parametara poput kapaciteta opreme i geometrijske stabilnosti kosina direktno u proces pretrage. Savremena istraživanja fokusiraju se na hibridne i paralelne genetske algoritme koji drastično skraćuju vreme proračuna kod velikih ležišta, omogućavajući generisanje optimalnih faza eksploatacije i dugoročnih planova koji su praktično primenljivi u realnim rudarskim sistemima [228] [232].

Simulirano kaljenje (Simulated Annealing - SA) predstavlja optimizacionu metodu inspirisanu procesom termodinamičkog hlađenja materijala. Algoritam koristi parametar temperature koji kontroliše verovatnoću prihvatanja lošijih rešenja tokom procesa optimizacije. Pri višim temperaturama algoritam dozvoljava prelazak na lošija rešenja kako bi se izbeglo zaglavljivanje u lokalnim optimumima, dok se sa smanjenjem temperature proces pretrage fokusira na lokalnu optimizaciju oko najboljih pronađenih rešenja. Ovaj pristup omogućava efikasno istraživanje prostora rešenja i pokazao se veoma efikasnim u problemima sekvenciranja blokova i planiranja proizvodnje u rudnicima [230].

Istraživanje Sarija i saradnika (2021) primenjuje simulirano kaljenje (SA) za optimizaciju dugoročnog planiranja proizvodnje u rudnicima gvožđa, pri čemu se dokazuje da SA generiše visokokvalitetne planove eksploatacije uz znatno manji računarski napor u odnosu na klasične metode celobrojnog programiranja, istovremeno maksimizujući neto sadašnju vrednost (NPV) i zadovoljavajući operativna ograničenja [233].

Tabu pretraga (Tabu Search - TS) je metaheuristička metoda koja nadograđuje lokalnu pretragu upotrebom inteligentnih mehanizama memorije. Ključna karakteristika ovog algoritma je korišćenje tzv. tabu lista, koje skladište istoriju prethodnih poteza i privremeno ih zabranjuju. Ova strategija sprečava algoritam da se ciklično vraća na već istražena rešenja i, što je najvažnije, primorava ga da prihvati i poteze koji privremeno pogoršavaju vrednost funkcije cilja kako bi prevazišao barijere lokalnih optimuma i nastavio pretragu u neistraženim zonama prostora rešenja [230].

Primena Tabu Search algoritama u planiranju proizvodnje u površinskim kopovima pokazala je da ova metoda može generisati kvalitetna rešenja čak i za veoma velike optimizacione probleme. Lamghari i Dimitrakopoulos razvili su diversifikovani Tabu Search algoritam za planiranje proizvodnje koji omogućava efikasno rešavanje velikih problema sekvenciranja blokova uz prisustvo geološke neizvesnosti [234].

Optimizacija kolonijom mrava (Ant Colony Optimization - ACO) je metaheuristička metoda inspirisana kolektivnom inteligencijom mrava u prirodi i njihovim procesom pronalaženja najkraćeg puta do hrane pomoću feromona. U rudarskom planiranju algoritmi zasnovani na ACO primenjuju se za optimizaciju redosleda otkopavanja blokova i planiranje proizvodnje kroz iterativno pretraživanje prostora mogućih rasporeda eksploatacije. U ovom pristupu veštački agenti („mravi“) konstruišu potencijalna rešenja kretanjem kroz graf koji predstavlja zavisnosti između blokova, pri čemu se kvalitet pronađenih rešenja pamti kroz mehanizam feromonskih tragova koji usmerava dalju pretragu ka povoljnijim sekvencama eksploatacije. Na taj način algoritam postepeno konvergira ka rasporedima proizvodnje sa većom ekonomskom vrednošću. Istraživanja su pokazala da ACO pristup omogućava rešavanje problema dugoročnog planiranja proizvodnje velikih dimenzija, uz mogućnost uključivanja složenih tehničkih ograničenja i generisanje planova eksploatacije čija je ekonomska vrednost bliska optimalnim rešenjima dobijenim egzaktnim metodama, ali uz značajno kraće vreme proračuna [230] [235].

Razlike između egzaktnih optimizacionih metoda i heurističkih pristupa mogu se jasnije sagledati kroz poređenje njihovih osnovnih karakteristika, što je i prikazano u tabeli 3.2. Dok egzaktna metoda garantuje pronalaženje globalnog optimuma, njihova primena u velikim rudarskim sistemima često je ograničena velikom računarskom složenošću. Sa druge strane, heuristički i metaheuristički algoritmi omogućavaju pronalaženje kvalitetnih približnih rešenja uz znatno kraće vreme proračuna, uz mogućnost lakše integracije operativnih ograničenja rudarskog sistema. Pored toga, ovi algoritmi omogućavaju brzo testiranje različitih scenarija i prilagođavanje promenljivim tržišnim ili geološkim parametrima, što ih čini nezaobilaznom osnovom za razvoj robusnih hibridnih sistema koji kombinuju brzinu heuristike sa preciznošću egzaktnih metoda [231].

Tabela 3.2. Poređenje egzaktnih optimizacionih metoda i metaheurističkih pristupa u planiranju proizvodnje

Karakteristika	MILP (egzaktna metoda)	Metaheuristike (GA, SA, TS, ACO)
Optimalnost	Garantuje pronalaženje globalnog optimuma za definisani model.	Daje približno optimalno (near-optimal) rešenje bez garancije globalnog optimuma.
Vreme proračuna	Raste eksponencijalno sa povećanjem broja blokova i vremenskih perioda.	Obično raste umerenije i omogućava znatno brže pronalaženje rešenja.
Operativna ograničenja	Teško se modeliraju zbog potrebe za linearnim formulacijama i velikim brojem ograničenja.	Lakše se integrišu kroz heuristička pravila ili kaznene funkcije u funkciji cilja.
Fleksibilnost modela	Relativno rigidna struktura matematičkog modela.	Visoka fleksibilnost i mogućnost prilagođavanja različitim scenarijima eksploatacije.
Glavni nedostatak	Velika memorijska zahtevnost i dugo vreme konvergencije kod velikih blok modela.	Mogućnost zaglavljivanja u lokalnim optimumima i odsustvo garancije globalnog optimuma.

3.4. Stohastički modeli optimizacije površinskih kopova

Stohastički modeli optimizacije površinskih kopova predstavljaju napredni metodološki okvir u kojem se neizvesnost eksplicitno integriše u proces strateškog planiranja eksploatacije. Za razliku od determinističkih pristupa, koji optimizacioni problem rešavaju za jedinstveni skup ulaznih parametara, stohastički modeli zasnivaju se na generisanju i analizi većeg broja mogućih realizacija rudarskog sistema [117].

U ovim modelima ulazni parametri, kao što su sadržaj korisne komponente, geometrija rudnog tela, tržišne cene, operativni troškovi i tehnološki faktori, predstavljeni su kroz raspodele verovatnoće ili skup scenarija. Na osnovu toga formira se skup mogućih geološko-ekonomskih modela, nad kojima se sprovodi optimizacija, čime se umesto jednog determinističkog rešenja dobija distribucija mogućih ishoda [236] [237].

Ovakav pristup omogućava istovremenu analizu očekivanih vrednosti i varijabilnosti rezultata, kao i kvantifikaciju rizika povezanog sa različitim scenarijima razvoja rudarskog projekta. Time se optimizacioni problem proširuje sa klasične formulacije maksimizacije ekonomske vrednosti na višekriterijumski okvir koji uključuje i upravljanje rizikom [236] [237].

U okviru savremenih istraživanja razvijen je čitav niz pristupa koji se razlikuju prema načinu modelovanja neizvesnosti i integraciji optimizacije, a koji će biti detaljnije razmotreni u nastavku ovog poglavlja.

3.4.1. Metodološki pristupi za modelovanje neizvesnosti u stohastičkim modelima

U prethodnim poglavljima prikazani su deterministički matematički modeli koji se koriste za optimizaciju završnih kontura kopa i planiranje proizvodnje u površinskim kopovima. Stohastički modeli optimizacije nastaju proširenjem determinističkih matematičkih formulacija uključivanjem neizvesnosti u optimizacioni proces. U tom smislu, osnovna struktura matematičkog modela ostaje ista (npr. MILP, LP ili drugi optimizacioni algoritmi), ali se ulazni parametri više ne predstavljaju jednim skupom vrednosti, već skupom mogućih realizacija ili raspodelama verovatnoće. Time se optimizacioni problem rešava nad više scenarija koji reprezentuju različite moguće realizacije geoloških, ekonomskih i operativnih uslova [1].

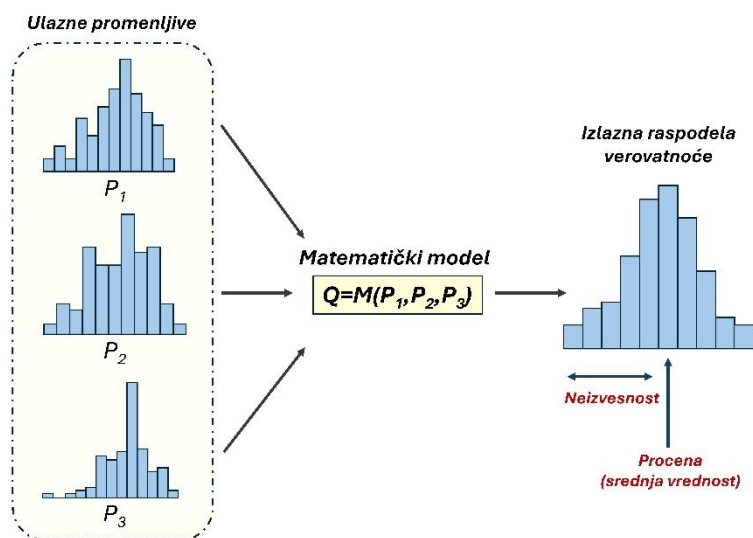
Modelovanje neizvesnosti u stohastičkim optimizacionim modelima najčešće se sprovodi primenom različitih metodoloških pristupa, među kojima se posebno izdvajaju Monte Carlo simulacije, geostatističke simulacije, robusna optimizacija i algoritmi mašinskog učenja. Ovi pristupi omogućavaju generisanje scenarija ili adaptivno učenje obrazaca iz podataka, čime se optimizacioni modeli mogu proširiti tako da uzimaju u obzir varijabilnost ključnih parametara rudarskog sistema [231].

3.4.1.1. Monte Carlo simulacije

Monte Carlo simulacije predstavljaju jedan od najšire korišćenih pristupa za kvantifikaciju neizvesnosti u rudarskom planiranju. Suština ove metode jeste da se neizvesni ulazni parametri (kao što su sadržaj korisne komponente, cene metala, troškovi, iskorišćenje ili proizvodni kapaciteti) opišu odgovarajućim raspodelama verovatnoće, nakon čega se višestrukim nasumičnim uzorkovanjem generiše veliki broj mogućih ishoda sistema. Na taj način Monte Carlo pristup ne daje jednu tačkastu procenu rezultata, već raspodelu mogućih ekonomskih i proizvodnih pokazatelja, što omogućava procenu verovatnoće ostvarenja određenog cilja ili nivoa rizika. U literaturi se Monte Carlo simulacije posebno ističu kao efikasan alat za procenu finansijske izloženosti projekta i analizu osetljivosti ključnih ekonomskih pokazatelja, ali se same po sebi najčešće koriste kao podrška optimizaciji, a ne kao zamena za optimizacioni model [117] [231].

Metodološki gledano, Monte Carlo pristup obično obuhvata tri osnovna koraka: definisanje odgovarajućih raspodela verovatnoće ulaznih promenljivih, višestruko nasumično uzorkovanje iz tih

raspodela i statističku analizu dobijenih rezultata. Prednost ove metode leži u relativno jednostavnoj implementaciji i mogućnosti da obuhvati veliki broj neizvesnih faktora istovremeno, čime se dobija raspodela mogućih ekonomskih i proizvodnih ishoda projekta. Na taj način Monte Carlo simulacije omogućavaju procenu verovatnoće ostvarivanja određenih pokazatelja, kao i analizu potencijalnog rizika i varijabilnosti rezultata (slika 3.36) [117] [231].



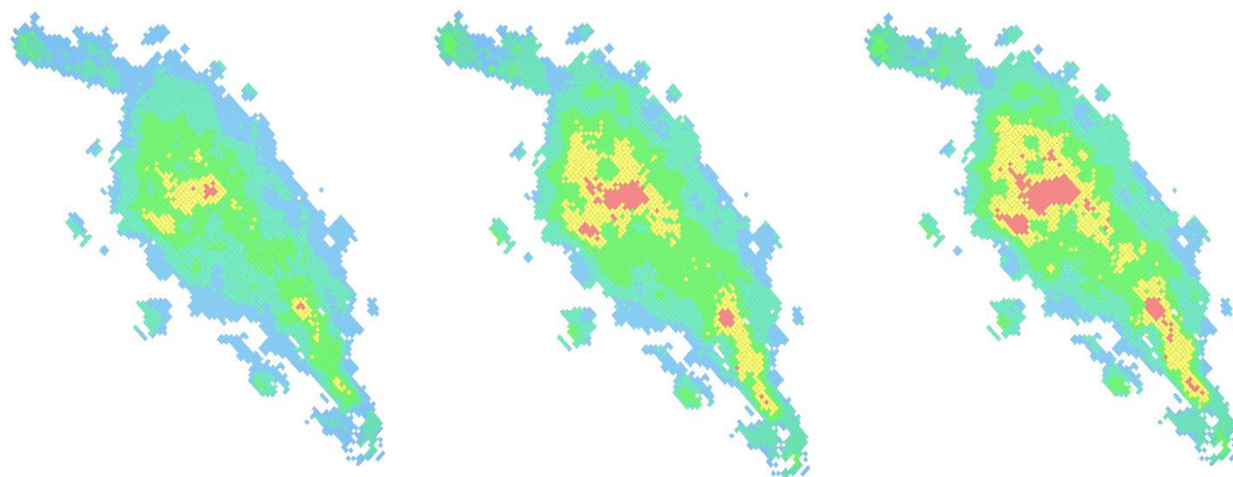
Slika 3.36. Metodološki okvir Monte Carlo simulacije

Međutim, važno je naglasiti da Monte Carlo simulacija sama po sebi ne rešava optimizacioni problem planiranja eksploatacije. Ona prvenstveno služi za kvantifikaciju raspodele mogućih ishoda za zadate pretpostavke ili planove, ali ne određuje optimalni raspored eksploatacije ili sekvencu otkopavanja. Pored toga, rezultati simulacije u velikoj meri zavise od tačnosti pretpostavljenih raspodela verovatnoće ulaznih parametara, koje u praksi često mogu biti zasnovane na ograničenim podacima. Zbog toga se Monte Carlo simulacije u savremenim rudarskim modelima najčešće kombinuju sa optimizacionim algoritmima i metodama stohastičkog planiranja, čime se omogućava istovremeno kvantifikovanje rizika i određivanje optimalnih strategija eksploatacije [117] [231].

U kontekstu upravljanja rizikom u rudarskim projektima, Monte Carlo simulacije predstavljaju jednu od najznačajnijih kvantitativnih metoda za procenu neizvesnosti i analizu raspodele mogućih ishoda. Ovaj pristup je već razmatran u poglavlju 2.3.6.2 *Kvantitativne metode upravljanja rizikom*, gde je naglašena njegova uloga u proceni verovatnoće ostvarenja ključnih ekonomskih pokazatelja i kvantifikaciji finansijskog rizika projekta. U okviru ove disertacije Monte Carlo simulacije imaju dodatnu metodološku ulogu, jer predstavljaju osnovni alat za modelovanje neizvesnosti tehnno-ekonomskih parametara u razvijenom hibridnom modelu upravljanja rizikom. Zbog toga će detaljna implementacija ove metodologije i njena integracija sa optimizacionim modelima biti prikazana u poglavlju koje se odnosi na razvoj i primenu predloženog modela.

3.4.1.2. Geostatističke simulacije

Geostatističke simulacije predstavljaju jedan od ključnih metodoloških pristupa za modelovanje **geološke neizvesnosti**, koja se u literaturi prepoznaje kao dominantan izvor rizika u strateškom planiranju površinskih kopova. Za razliku od determinističkih procena zasnovanih na metodama interpolacije poput kriginga, geostatističke simulacije generišu veći broj **jednako verovatnih realizacija ležišta**, pri čemu svaka realizacija reprodukuje statističke karakteristike podataka i prostornu strukturu promenljivih definisanu variogramom (slika 3.37). Na taj način moguće je očuvati lokalnu varijabilnost sadržaja korisne komponente i geometrije rudnog tela, čime se izbegava statističko ublažavanje varijabilnosti (engl. smoothing effect), koje kod klasičnih procena dovodi do toga da visoki sadržaji budu potcenjeni, a niski precenjeni [238] [239].



Slika 3.37. Generisanje jednako verovatnih realizacija ležišta primenom geostatističkih simulacija

Koncept geostatističke simulacije razvijen je u okviru teorije regionalizovanih promenljivih (koja opisuju pojave čije su vrednosti prostorno povezane i zavisne od njihove lokacije u ležištu) koju je uveo Matheron [240], a kasnije su ga značajno unapredili autori poput Journela [241] i Deutsch-a [239] kroz razvoj metoda **uslovne simulacije (conditional simulation)** i praktičnih softverskih alata za njihovu implementaciju. Za razliku od procene jedne optimalne vrednosti u svakoj tački prostora, simulacija generiše skup realizacija koje reprodukuju histogram podataka, strukturu variograma i prostorne odnose između promenljivih. Time se omogućava sagledavanje celokupnog spektra mogućih geoloških scenarija, što predstavlja osnovu za kvantifikaciju neizvesnosti u proceni resursa i planiranju eksploatacije [242].

U praksi se najčešće primenjuju metode poput **Sequential Gaussian Simulation (SGS)**, zatim **Sequential Indicator Simulation (SIS)**, kao i različite varijante **Multiple-Point Geostatistics (MPS)**, koje omogućavaju generisanje velikog broja realizacija blok modela ležišta uz očuvanje prostornog kontinuiteta strukture podataka. Savremeni geostatistički softverski paketi, zasnovani na temeljnoj biblioteci algoritama **GSLIB** (skraćeno od **Geostatistical Software Library** - skup izvornih kodova napisanih u jeziku Fortran), omogućili su široku primenu ovih metoda u industrijskoj praksi modelovanja ležišta i analize geološke neizvesnosti [241] [239].

Poseban značaj geostatističkih simulacija dolazi do izražaja u kontekstu stohastičkog planiranja površinskih kopova. U radovima Dimitrakopoulou i saradnika [243] [244] stohastičko planiranje rudnika zasniva se upravo na integraciji više simuliranih modela ležišta u optimizacioni proces. Na taj način optimizacioni model ne koristi jednu determinističku procenu ležišta, već skup realizacija koje predstavljaju različite moguće geološke scenarije. Time se omogućava procena osetljivosti proizvodnog plana na geološku neizvesnost i izbor strategija eksploatacije koje maksimizuju očekivanu ekonomsku vrednost projekta uz kontrolu tehničkog rizika.

U okviru ovakvog pristupa stohastičke realizacije blok modela koriste se kao ulazni scenariji u optimizacionim modelima rudarskog planiranja, najčešće formulisanima kroz stohastičko matematičko programiranje. Time se omogućava simultano razmatranje više mogućih raspodela kvaliteta rude i prostorne geometrije ležišta, što dovodi do robusnijih planova eksploatacije i realističnije procene ekonomskih performansi rudarskog projekta. Rezultati brojnih studija pokazuju da integracija geostatističkih simulacija u proces optimizacije može dovesti do povećanja očekivanog NPV-a, kao i smanjenja rizika odstupanja od proizvodnih ciljeva u poređenju sa konvencionalnim determinističkim pristupima [245].

3.4.1.3. Robusna optimizacija

Robusna optimizacija predstavlja važan metodološki pristup u rešavanju optimizacionih problema u uslovima neizvesnosti. Za razliku od klasičnih stohastičkih modela koji neizvesnost predstavljaju putem raspodela verovatnoće ili skupa scenarija, robusna optimizacija nastoji da pronađe rešenje koje ostaje izvodljivo i dovoljno kvalitetno za čitav skup mogućih realizacija neizvesnih parametara. U tom smislu, robusna optimizacija se zasniva na konceptu donošenja odluka koje su **otporne na nepovoljne promene ulaznih parametara**, čime se obezbeđuje stabilnost rešenja i smanjuje rizik od velikih odstupanja u performansama sistema [231] [246].

U okviru matematičkog programiranja robusna optimizacija se najčešće formuliše tako da optimizacioni model mora zadovoljiti ograničenja za sve moguće realizacije parametara unutar unapred definisanog skupa neizvesnosti. Takav pristup omogućava transformaciju problema sa neizvesnim parametrima u tzv. **robust counterpart**, odnosno deterministički ekvivalent optimizacionog modela koji garantuje izvodljivost rešenja u celom prostoru razmatranih scenarija. Na taj način robusna optimizacija predstavlja alternativu probabilističkim metodama, jer ne zahteva nužno poznavanje tačnih raspodela verovatnoće ulaznih parametara, što je često teško obezbediti u realnim rudarskim projektima [231] [247].

U rudarskoj industriji robusna optimizacija se primenjuje u širokom opsegu problema planiranja i upravljanja rudarskim operacijama, od strateških odluka dugoročnog planiranja eksploatacije [248] do operativnog upravljanja proizvodnim procesima i logističkim tokovima materijala [249] [250].

Jedan od ranijih radova koji uvodi pristup robusne optimizacije u proces planiranje površinskih kopova jeste rad Kumral-a [248], u kojem je razvijen robusni stohastički model za određivanje redosleda eksploatacije blokova. U tom pristupu optimizacioni model nastoji da pronađe raspored otkopavanja koji maksimizuje neto sadašnju vrednost rudarskog projekta, ali istovremeno minimizuje osetljivost rešenja na promene ulaznih parametara. Rezultati pokazuju da robusni pristupi omogućavaju pronalaženje kompromisa između maksimalne ekonomske vrednosti i stabilnosti proizvodnog plana u uslovima neizvesnosti.

Pored problema definisanja dinamike eksploatacije, robusna optimizacija nalazi primenu i u planiranju rudarskih lanaca snabdevanja, gde je potrebno koordinisati aktivnosti eksploatacije, prerade, skladištenja i transporta rude. U takvim sistemima neizvesnost može poticati od promena kvaliteta rude, varijacija u proizvodnim kapacitetima ili fluktuacija tržišnih uslova. Istraživanja pokazuju da robusni optimizacioni modeli mogu stabilizovati planiranje proizvodnje i logistike, obezbeđujući da sistem ostane operativno izvodljiv i ekonomski prihvatljiv čak i u uslovima poremećaja ključnih parametara [249] [250].

Savremena istraživanja ukazuju da robusna optimizacija omogućava generisanje planova eksploatacije koji su manje osetljivi na nepovoljne realizacije ključnih parametara. U takvim modelima naglasak nije isključivo na postizanju maksimalne vrednosti ciljne funkcije u nominalnim uslovima, već na očuvanju izvodljivosti i stabilnosti plana u širem opsegu mogućih scenarija razvoja sistema. Kao posledica toga često se javlja kompromis između očekivane ekonomske vrednosti i stabilnosti rešenja, pri čemu robusni planovi mogu ostvariti nešto niži očekivani profit u odnosu na rešenja dobijena klasičnim optimizacionim pristupima, ali uz znatno manju varijabilnost rezultata i smanjen rizik od nepovoljnih ekonomskih ishoda. Takav pristup je naročito značajan za rudarske kompanije koje posluju u uslovima izražene tržišne i geološke neizvesnosti, jer omogućava donošenje konzervativnijih, ali stabilnijih strateških odluka u planiranju eksploatacije. Iako je primena robusne optimizacije u rudarskoj praksi još uvek manje zastupljena u odnosu na stohastičke modele, ovaj pristup značajno proširuje skup analitičkih alata za planiranje rudarskih operacija u uslovima visokog nivoa neizvesnosti [117].

3.4.1.4. Machine learning algoritmi

U poslednjih nekoliko godina algoritmi mašinskog učenja postaju sve značajniji alat u analizi i optimizaciji rudarskih sistema, posebno u kontekstu digitalizacije i povećane dostupnosti operativnih podataka iz rudarskih procesa. Za razliku od klasičnih optimizacionih pristupa koji se oslanjaju na unapred definisane matematičke modele, metode mašinskog učenja koriste istorijske i operativne podatke kako bi identifikovale obrasce u sistemu i unapredile proces donošenja odluka. Pregledi savremene literature pokazuju da se primena ovih metoda u površinskom rudarstvu može klasifikovati prema fazama rudarskog ciklusa, uključujući istraživanje ležišta i planiranje rudnika (exploration), definisanje redosleda otkopavanja blokova i planiranje eksploatacije (exploitation), operativne procese proizvodnje kao što su bušenje, miniranje, transport i prerada (production), kao i upravljanje otpadom i rekultivaciju rudarskog prostora (reclamation). U okviru ovih oblasti mašinsko učenje se najčešće koristi za predikciju proizvodnje, optimizaciju transportnih sistema, procenu kvaliteta rude i unapređenje operativnog upravljanja rudarskim procesima [251] [252].

Posebno značajan pravac razvoja predstavljaju algoritmi **dubokog pojačano učenja (Reinforcement Learning – RL)**, u kojima softverski „agent“ (inteligentni modul za donošenje odluka) kroz iterativno učenje razvija strategiju donošenja odluka na osnovu povratnih informacija iz sistema. U kontekstu planiranja rudnika, RL pristupi se najčešće koriste za rešavanje problema koji se odnose na definisanje dinamike proizvodnje i upravljanja transportnim sistemima u površinskim kopovima. Ovi algoritmi omogućavaju modelima da adaptivno reaguju na promene operativnih uslova i neizvesnost parametara sistema, što predstavlja značajnu prednost u odnosu na statične heurističke ili determinističke metode [253] [254].

Savremena istraživanja pokazuju da kombinovanje mašinskog učenja sa simulacionim i optimizacionim metodama može značajno unaprediti planiranje rudarskih operacija. Na primer, integracija „reinforcement learning“ algoritama sa stohastičkim optimizacionim modelima omogućava adaptivno prilagođavanje kratkoročnih planova proizvodnje u rudarskim kompleksima na osnovu novih informacija koje nastaju tokom eksploatacije. Takvi pristupi omogućavaju simultano optimizovanje više operativnih odluka, kao što su redosled eksploatacije, destinacija otkopanog materijala i iskorišćenje procesnih kapaciteta, čime se postiže veća fleksibilnost i efikasnost proizvodnih sistema [255].

Uprkos značajnom napretku u ovoj oblasti, primena algoritama mašinskog učenja u strateškom planiranju rudnika još uvek je u ranoj fazi razvoja. Većina postojećih istraživanja fokusirana je na operativne probleme, kao što su raspoređivanje transportnih vozila ili kratkoročno planiranje proizvodnje, dok je integracija ovih metoda sa dugoročnim optimizacionim modelima planiranja eksploatacije i dalje predmet intenzivnih istraživanja [251].

3.4.2. Izvori neizvesnosti u stohastičkoj optimizaciji površinskih kopova

Optimizacija površinskih kopova zasniva se na velikom broju ulaznih parametara koji definišu geološke, tehnološke i ekonomske karakteristike rudarskog sistema. Ovi parametri su već razmatrani u prethodnim poglavljima, posebno u okviru poglavlja 3.1 *Ulazni podaci (parametri) optimizacije* i 3.2 *Ekonomski blok model*, gde su predstavljene ključne varijable koje određuju ekonomsku vrednost blokova i ograničenja optimizacionih modela. U determinističkim pristupima ovi parametri se posmatraju kao fiksne vrednosti, dok se u stohastičkim modelima oni tretiraju kao promenljive čije vrednosti mogu varirati u okviru određenih raspodela verovatnoće ili scenarija. Na taj način isti skup ulaznih podataka koji definiše optimizacioni model ujedno predstavlja i glavne izvore neizvesnosti u planiranju površinskih kopova.

Planiranje rudarskih operacija pod uticajem neizvesnosti predstavlja jedan od ključnih izazova savremenog strateškog planiranja rudnika. Promene u geološkim karakteristikama ležišta, tržišnim uslovima i operativnim parametrima mogu značajno uticati na ekonomske performanse rudarskih projekata i dovesti do odstupanja između planiranih i stvarnih proizvodnih rezultata. Stoga je

identifikacija i kvantifikacija izvora neizvesnosti od suštinskog značaja za razvoj robusnih i pouzdanih optimizacionih modela u rudarstvu [256].

U literaturi o optimizaciji površinskih kopova najčešće se izdvajaju tri osnovne kategorije neizvesnosti [231]: **geološka neizvesnost, tehnička (operativna) neizvesnost i ekonomska neizvesnost.**

Ove kategorije obuhvataju većinu parametara koji ulaze u optimizacione modele planiranja rudarskih operacija i direktno utiču na ekonomske i tehničke rezultate rudarskog projekta.

Geološka neizvesnost predstavlja jedan od najvažnijih i najčešće analiziranih izvora neizvesnosti u optimizaciji rudarskih projekata. Ona proizlazi iz ograničenog broja istražnih podataka i prirodne varijabilnosti mineralnih ležišta, što dovodi do neizvesnosti u proceni sadržaja korisne komponente, količina i prostorne raspodele rude unutar blok modela. Budući da je blok model osnovni izvor podataka za optimizaciju završnih kontura kopa i planiranje proizvodnje, svaka greška u proceni ovih parametara može značajno uticati na ekonomske i tehničke rezultate rudarskog projekta .

U savremenim pristupima geološka neizvesnost se najčešće modeluje primenom prethodno opisanih geostatističkih simulacija koje generišu više jednako verovatnih realizacija ležišta. Ovi modeli omogućavaju procenu varijabilnosti sadržaja rude i kvantifikaciju rizika u planiranju eksploatacije, čime se optimizacioni proces može prilagoditi različitim mogućim scenarijima razvoja rudarskog sistema.

Tehnička ili operativna neizvesnost odnosi se na varijacije u performansama rudarskih operacija i tehničkih sistema koji učestvuju u procesu eksploatacije. Ova kategorija obuhvata parametre kao što su raspoloživost i produktivnost rudarske mehanizacije, kapacitet transportnih sistema, metalurško iskorišćenje, kao i poremećaji u proizvodnom procesu.

U velikim površinskim kopovima proizvodni sistem predstavlja kompleksnu interakciju između eksploatacije, transporta i prerade rude, pa varijacije u performansama pojedinih komponenti mogu dovesti do odstupanja između planiranih i ostvarenih proizvodnih rezultata. Takve neizvesnosti mogu značajno uticati na dinamiku proizvodnje, iskorišćenje kapaciteta i stabilnost operativnih planova.

Ekonomska neizvesnost odnosi se na promene u finansijskim parametrima koji određuju profitabilnost rudarskog projekta. Najvažniji faktori u ovoj kategoriji uključuju fluktuacije cena metala (proizvoda), promene operativnih troškova, troškove prerade, investicione troškove i promene deviznih kurseva.

Ovi parametri direktno utiču na ekonomsku vrednost blokova u blok modelu i mogu značajno promeniti optimalne granice kopa i dinamiku eksploatacije. Promene cena metala ili operativnih troškova mogu značajno uticati na procenu neto sadašnje vrednosti projekta, zbog čega savremeni modeli planiranja rudnika sve češće uključuju scenarijsku ili probablističku analizu ekonomskih parametara.

Pregled literature o stohastičkoj optimizaciji u planiranju rudnika obuhvata veliki broj radova koji se bave različitim izvorima neizvesnosti i metodama njihovog modelovanja. Zbog obimnosti dostupne literature, u ovoj analizi izdvojeni su reprezentativni radovi koji su značajno doprineli razvoju stohastičkih modela optimizacije u rudarstvu. Izbor radova zasniva se na sledećim kriterijumima:

- visoka citiranost i prepoznat uticaj u naučnoj zajednici, posebno radovi koji su postavili temelje stohastičkog planiranja rudnika;
- metodološka reprezentativnost, odnosno radovi koji uvode ili razvijaju ključne pristupe poput stohastičkog programiranja, simulacione optimizacije, metaheurističkih algoritama i metoda zasnovanih na mašinskom učenju;
- relevantnost za različite izvore neizvesnosti u rudarskim sistemima, uključujući geološku, operativnu i ekonomsku neizvesnost.

Na osnovu ovih kriterijuma formirana je pregledna tabela 3.3, koja obuhvata najznačajnije i najčešće citirane radove iz oblasti stohastičke optimizacije u planiranju rudnika. Tabela 3.3 prikazuje osnovne karakteristike istraživanja, uključujući primenjeni metod, razmatrani problem optimizacije i ključne rezultate istraživanja.

Tabela 3.3. Pregled najznačajnijih radova iz oblasti stohastičke optimizacije u planiranju rudnika

Autor	Godina	Neizvesnost	Metod	Problem	Glavni rezultat
Dimitrakopoulos et al. [236]	2002	geološka	conditional simulation	strateško planiranje	dokazano da deterministički modeli precenjuju NPV.
Godoy & Dimitrakopoulos [257]	2004	geološka	simulated annealing	strateško planiranje	prvi robustan metod za smanjenje rizika usled neispunjenja plana.
Ramazan & Dimitrakopoulos [258]	2004	geološka	MIP (Mixed Integer Programming)	planiranje proizvodnje	formalizacija SIP modela (Stochastic Integer Programming) za dugoročno planiranje.
Leite & Dimitrakopoulos [259]	2007	geološka	simulated annealing	strateško planiranje	povećanje NPV-a za oko 26% i smanjenje rizika od neispunjenja planova.
Kumral [248]	2010	geološka/ ekonomska	robust stochastic optimization	planiranje proizvodnje	povećana stabilnost proizvodnog plana
Dimitrakopoulos [128]	2011	geološka	stochastic simulation + optimization	strateško planiranje	Povećanje rezervi i NPV-a od 10%, na bazi više studija slučaja
Leite & Dimitrakopoulos [260]	2014	geološka	stochastic integer programming	planiranje proizvodnje	smanjenje odstupanja od proizvodnih ciljeva i povećanje NPV-a za 29%
Kizilkale & Dimitrakopoulos [261]	2014	ekonomska	stochastic dynamic programming	planiranje proizvodnje	adaptivni plan eksploatacije prema cenama
Montiel & Dimitrakopoulos [262]	2015	geološka	simulated annealing	optimizacija rudarskog kompleksa	povećanje NPV-a i smanjenje rizika
Baek et al. [186]	2016	ekonomska	monte carlo simulation + floating cone optimization	optimizacija granica kopa	procena verovatnoće optimalne konture
Goodfellow & Dimitrakopoulos [263]	2016	geološka/ tehnička	simulated annealing/ particle swarm/differential evolution optimization	optimizacija rudarskog kompleksa	smanjenje odstupanja od proizvodnih ciljeva i povećanje NPV-a
Montiel & Dimitrakopoulos [264]	2017	geološka	heuristic optimization	optimizacija proizvodnje	simultana optimizacija procesa proizvodnje i prerade rude uz povećanje NPV-a od 30%
Moreno et al. [265]	2017	geološka	two-stage stochastic programming	optimizacija proizvodnje	veći NPV i robusniji plan proizvodnje
Rimélé et al. [266]	2018	geološka	two-stage stochastic integer programming	dugoročno planiranje proizvodnje	model za upravljanje sadržajem metala i odlaganja otpada unutar kopa (in-pit disposal) koji smanjuje troškove
Saliba & Dimitrakopoulos [267]	2019	geološka/ ekonomska	simulated annealing/ particle swarm/differential evolution optimization	optimizacija rudarskog kompleksa	Upravljanje rizikom, povećanje proizvodnje metala i NPV-a
Kumar & Dimitrakopoulos [268]	2019	geološka / tehnička	geostatistical simulations, stochastic integer programming	simultana optimizacija rudarskog kompleksa	ispunjavanje različitih proizvodnih ciljeva, značajno povećanje proizvodnje metala i povećanje NPV-a od 19,3%
Quigley & Dimitrakopoulos [269]	2020	geološka/ tehnička	stochastic integer programming	optimizacija proizvodnje i produktivnosti opreme	definisane primenljivih planova proizvodnje i smanjenje operativnog rizika
Sepúlveda et al. [270]	2020	geološka/ ekonomska	metaheuristics + monte carlo simulation	optimizacija proizvodnje	smanjenje rizika i maksimizacija NPV-a
Rimélé et al. [271]	2020	geološka/ ekonomska	stochastic dynamic programming	dugoročno planiranje proizvodnje	model za prilagođavanja proizvodnje u skladu sa promenama na tržištu

Maleki et al. [245]	2020	geološka	geostatistical simulation /mixed stochastic integer programming (SIP)	dugoročno planiranje proizvodnje	povećan NPV-a za 6% i količina rude za 16%
Gilani et al. [272]	2020	geološka	particle swarm optimization/stochastic integer programming (SIP)	dugoročno planiranje proizvodnje	povećan NPV, kontrola rizika i skraćeno vreme rešavanja optimizacionog problema
Guo et. al. [273]	2021	ekonomska	artificial neural network (ANN), random forest (RF), support vector machine (SVM), and classification and regression tree (CART)	procena kapitalnih troškova	poboljšana tačnost procene kapitalnih troškova i smanjenje rizika
Fattahi et. al. [274]	2021	ekonomska/ tehnička	MILP optimization	optimizacija rudarskog kompleksa	Održivo planiranje (postizanje ekonomskih ciljeva, smanjenje ekoloških troškova, uticaja na društvenu zajednicu i integracija obnovljivih izvora energije)
Kumar & Dimitrakopoulos [253]	2021	geološka/ tehnička	AI + Monte Carlo tree search	kratkoročno planiranje proizvodnje	robusnije planiranje proizvodnje uz povećanje NPV-a, smanjenje rizika i stabilnijeg snabdevanja postrojenja
Yaakoubi & Dimitrakopoulos [254]	2022	geološka	Multi-neighborhood Simulated Annealing + reinforcement learning + Nonlinear stochastic programming	optimizacija proizvodnje	model koji je dokazao da se upotrebom veštačke inteligencije (RL) vreme planiranja rudnika može skratiti za 80%, uz istovremeno dobijanje mnogo kvalitetnijih i profitabilnijih planova proizvodnje.
Alipour et al. [275]	2022	ekonomska	stochastic differential equations + genetic algorithm	optimizacija proizvodnje	model za inkorporiranje fluktuacije cena metala u optimizaciju proizvodnje
Levinson & Dimitrakopoulos [255]	2023	geološka/ tehnička	stochastic optimization + reinforcement learning + metaheuristics	dugoročno i kratkoročno planiranje proizvodnje	sinhronizacija planova (uspešno povezivanje kratkoročnog i dugoročnog plana bez gubitka ekonomske vrednosti), povećanje NPV-a i smanjenje rizika
Carvalho & Dimitrakopoulos [276]	2023	geološka/ tehnička	actor-critic reinforcement learning	optimizacija proizvodnje i produktivnosti opreme	model adaptivne proizvodnje uz 47% povećanje NPV-a
Xu et al. [277]	2023	tehnička/ ekonomska	enumeration optimization	dugoročno planiranje proizvodnje	rad uvodi metodu koja omogućava da se planiranje rudnika obavi stotinama puta brže, uz postizanje stabilnije proizvodnje i značajno veće ukupne zarade (NPV-a)
Morales & Dimitrakopoulos [278]	2024	geološka	high-order geostatistical simulation (HOS)	dugoročno planiranje granica kopa i proizvodnje	rad je dokazao da napuštanje fiksnih „wireframe“ modela u korist stohastičkih simulacija visokog reda povećava profit rudnika za 20% i značajno smanjuje nepotrebno iskopavanje jalovine.
Findlay & Dimitrakopoulos [279]	2024	geološka/ tehnička	stochastic integer programming, simulated annealing	optimizacija rudarskog kompleksa	optimizacija IPCC transportnog sistema (uštede na transportu i smanje emisiju štetnih gasova)
Noriega & Pourrahimian [280]	2024	tehnička	deep reinforcement learning, deep q-learning, discrete-event simulation	kratkoročno planiranje proizvodnje	stabilna isporuka rude drobilici uprkos stalnim zastojsima i promenama u radu mašina
Icarte-Ahumada & Herzog [281]	2025	tehnička	multi-agent reinforcement learning	kratkoročno planiranje proizvodnje	poboljšana efikasnost proizvodnje i transportnih sistema

3.5. Zaključna razmatranja i polazne osnove za razvoj modela

Na osnovu pregleda dosadašnjih istraživanja iz oblasti razvoja rudarskih projekata i upravljanja rizikom (poglavlje 2), kao i analize metodoloških pristupa optimizaciji površinskih kopova (poglavlje 3), može se uočiti značajan razvoj modela za optimizaciju rudarskog planiranja u uslovima neizvesnosti tokom poslednjih dvadeset godina. Počevši od radova Dimitrakopoulou i saradnika početkom 2000-ih godina, stohastički pristupi su evoluirali od modela zasnovanih na geostatističkim simulacijama i heurističkim metodama do naprednih matematičkih formulacija koje integrišu stohastičko programiranje, metaheurističke algoritme i savremene metode mašinskog učenja. Ovi pristupi omogućili su eksplicitno modelovanje geološke neizvesnosti i pokazali da deterministički planovi eksploatacije često precenjuju ekonomsku vrednost rudarskih projekata, posebno u pogledu očekivanog neto sadašnjeg prihoda (NPV). Slični rezultati potvrđeni su u brojnim studijama koje pokazuju da uvođenje stohastičkog modelovanja u planiranje proizvodnje omogućava bolje upravljanje geološkim rizikom i smanjenje odstupanja od planiranih proizvodnih ciljeva.

Pregled reprezentativnih istraživanja koja se bave modelovanjem neizvesnosti u optimizaciji rudarskih projekata prikazan je u tabeli 3.3. U tabeli su prikazani najznačajniji i najčešće citirani radovi koji obuhvataju različite izvore neizvesnosti (geološke, ekonomske i tehničke) kao i različite metodološke pristupe, uključujući stohastičko programiranje, metaheurističke algoritme, simulacione metode i savremene pristupe zasnovane na veštačkoj inteligenciji. Analiza ovih radova pokazuje da su stohastički modeli optimizacije postali dominantan pristup u istraživanjima strateškog planiranja površinskih kopova, jer omogućavaju eksplicitno uključivanje neizvesnosti u optimizacioni proces i generisanje robusnijih planova eksploatacije.

Međutim, uprkos značajnom napretku u razvoju stohastičkih modela optimizacije, analiza postojeće literature ukazuje na nekoliko važnih ograničenja. Pre svega, većina postojećih istraživanja fokusira se prvenstveno na analizu i kvantifikaciju neizvesnosti, dok je tretman rizika kao sastavni deo procesa upravljanja rizikom znatno ređe razmatran. U velikom broju radova stohastički modeli koriste se za procenu distribucije ekonomskih ishoda ili za generisanje robusnijih planova eksploatacije, ali rezultati tih analiza često nisu direktno povezani sa donošenjem strateških odluka o upravljanju rizikom i izboru odgovarajućih mera za njegovo ublažavanje.

Dodatno ograničenje odnosi se na fazu razvoja rudarskog projekta u kojoj se primenjuju modeli optimizacije. Većina postojećih istraživanja razvijena je za relativno detaljne faze planiranja rudarskih operacija, dok su modeli prilagođeni ranim fazama razvoja projekta, kao što su preliminarne ekonomske procene (PEA – Preliminary Economic Assessment), znatno ređe zastupljeni u literaturi. Upravo u tim fazama razvoja projekta nivo neizvesnosti je najveći, jer su ulazni podaci o geološkim, tehničkim i ekonomskim parametrima često zasnovani na ograničenom broju istražnih podataka i preliminarним procenama. Istovremeno, odluke koje se donose u ovoj fazi imaju značajne posledice na dalji razvoj projekta, uključujući odluku o prelasku u naredne faze studija izvodljivosti i povećanje kapitalne izloženosti investitora.

Još jedno važno ograničenje postojećih pristupa odnosi se na činjenicu da se rudarski projekti u praksi razvijaju kroz iterativni proces planiranja, u kome se ulazni podaci, geološki modeli i ekonomski parametri kontinuirano ažuriraju kako projekat napreduje kroz različite faze razvoja. U takvim uslovima neizvesnosti se postepeno smanjuju, ali istovremeno dolazi do promene odnosa između različitih faktora rizika. Međunarodni standardi upravljanja rizikom (poput ISO 31000), naglašavaju da upravljanje rizikom predstavlja dinamičan i iterativan proces koji obuhvata identifikaciju, analizu, evaluaciju i tretman rizika, uz kontinuirani monitoring i preispitivanje rezultata. Međutim, u većini modela optimizacije rudarskog planiranja ovaj ciklični karakter procesa upravljanja rizikom nije u potpunosti integrisan u proces strateškog planiranja.

Pored toga, savremeni rudarski projekti predstavljaju kompleksne proizvodne sisteme u kojima su geološki, tehnički i ekonomski parametri međusobno snažno povezani. Proces optimizacije obuhvata donošenje odluka o eksploataciji blokova, dinamici proizvodnje, transportu materijala i preradi rude.

Tradicionalni modeli često optimizuju pojedinačne komponente sistema sekvencijalno, dok se međusobne interakcije između različitih podsistema razmatraju samo parcijalno. Takav pristup može dovesti do suboptimalnih rešenja, jer potencijalne sinergije između različitih komponenti rudarskog sistema nisu u potpunosti iskorišćene.

Uzimajući u obzir navedena ograničenja, javlja se potreba za razvojem integrisanog metodološkog pristupa koji omogućava istovremeno modelovanje neizvesnosti, optimizaciju proizvodnih planova i sistematsku analizu rizika u procesu donošenja strateških odluka. Posebno je značajno razviti model koji je prilagođen ranim fazama procene rudarskih projekata, kada su neizvesnosti najveće, a posledice pogrešnih odluka mogu imati značajan uticaj na dalji razvoj projekta.

Polazeći od ovih činjenica, u okviru ove disertacije razvija se hibridni model za upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova, koji integriše determinističke modele optimizacije, stohastičke simulacione metode i principe međunarodnog standarda ISO 31000. Predloženi model omogućava kvantifikaciju ključnih izvora neizvesnosti, procenu njihovog uticaja na ekonomske i tehničke performanse rudarskog projekta i definisanje odgovarajućih strategija tretmana rizika u okviru iterativnog procesa planiranja. Na taj način model predstavlja metodološki okvir koji povezuje optimizaciju rudarskog planiranja sa sistematskim upravljanjem rizikom i podržava donošenje informisanih strateških odluka u ranim fazama razvoja rudarskih projekata.

4. RAZVOJ HIBRIDNOG MODELA ZA UPRAVLJANJE RIZIKOM

U ovom poglavlju prikazan je proces razvoja i primene hibridnog modela upravljanja rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova. Za razliku od prethodnih poglavlja, u kojima je dat pregled relevantnih teorijskih pristupa i metoda, ovde je fokus na integraciji i praktičnoj implementaciji izabраниh metoda u jedinstven analitički okvir.

Razvoj modela zasniva se na povezivanju determinističkih optimizacionih tehnika i stohastičkih simulacionih pristupa, uz doslednu primenu principa međunarodnog standarda ISO 31000. Cilj je formiranje integrisanog modela koji omogućava kvantifikaciju neizvesnosti i procenu rizika u svim ključnim fazama strateškog planiranja, od definisanja granica kopa do evaluacije ekonomskih performansi projekta [256].

Predloženi model obuhvata više međusobno povezanih komponenti, uključujući geostatističke simulacije ležišta u cilju kvantifikacije geološke neizvesnosti, optimizaciju granica kopa, stohastičke simulacije ekonomskih i tehničkih ulaznih parametara, kao i kvantitativnu analizu rizika kroz pokazatelje kao što su verovatnoća negativnog neto sadašnjeg prihoda, vrednosti pod rizikom (Value-at-Risk – VaR) i uslovne vrednosti pod rizikom (Conditional Value-at-Risk – CVaR). Integracijom ovih komponenti omogućeno je donošenje odluka na osnovu verovatnoće različitih ishoda, čime se prevazilaze ograničenja tradicionalnih determinističkih pristupa [256].

Struktura poglavlja prati logiku razvoja modela i njegovu usklađenost sa fazama upravljanja rizikom definisanim standardom ISO 31000 [56], pri čemu je poseban akcenat stavljen na način na koji se pojedinačne metode integrišu u jedinstven sistem za podršku odlučivanju.

4.1. Konceptualni okvir hibridnog modela upravljanja rizikom

Razvijeni **hibridni model** predstavlja metodološki iskorak u odnosu na konvencionalne pristupe strateškom planiranju površinskih kopova. Dok se tradicionalni deterministički modeli oslanjaju na fiksne vrednosti ulaznih parametara, a parcijalni stohastički pristupi često tretiraju izolovane izvore neizvesnosti [231], razvijeni model uvodi integrisani pristup u kome se neizvesnost posmatra kao međusobno povezan sistem geoloških, ekonomskih i tehničkih faktora koji zajedno određuju konačne performanse projekta [256].

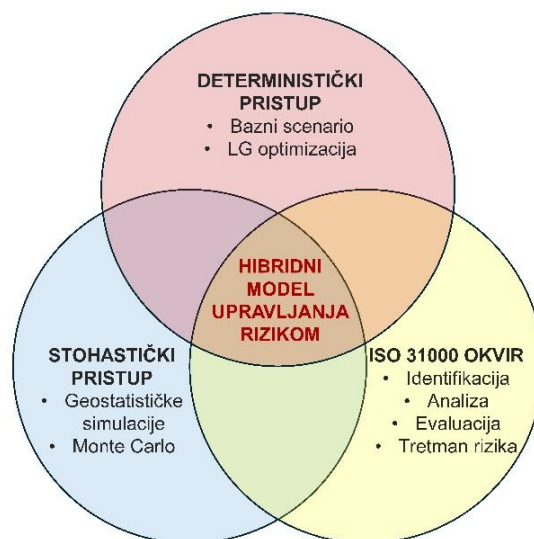
Ključna inovacija modela ogleda se u integraciji determinističkog pristupa (bazni scenario i optimizacija), stohastičkog modelovanja (geostatističke simulacije i Monte Carlo pristup) i formalnog okvira upravljanja rizikom zasnovanog na standardu ISO 31000, čime se omogućava direktno povezivanje kvantifikovane neizvesnosti sa procesom donošenja strateških odluka [256].

U tom smislu, razvijeni model zasniva se na tri osnovne komponente [256]:

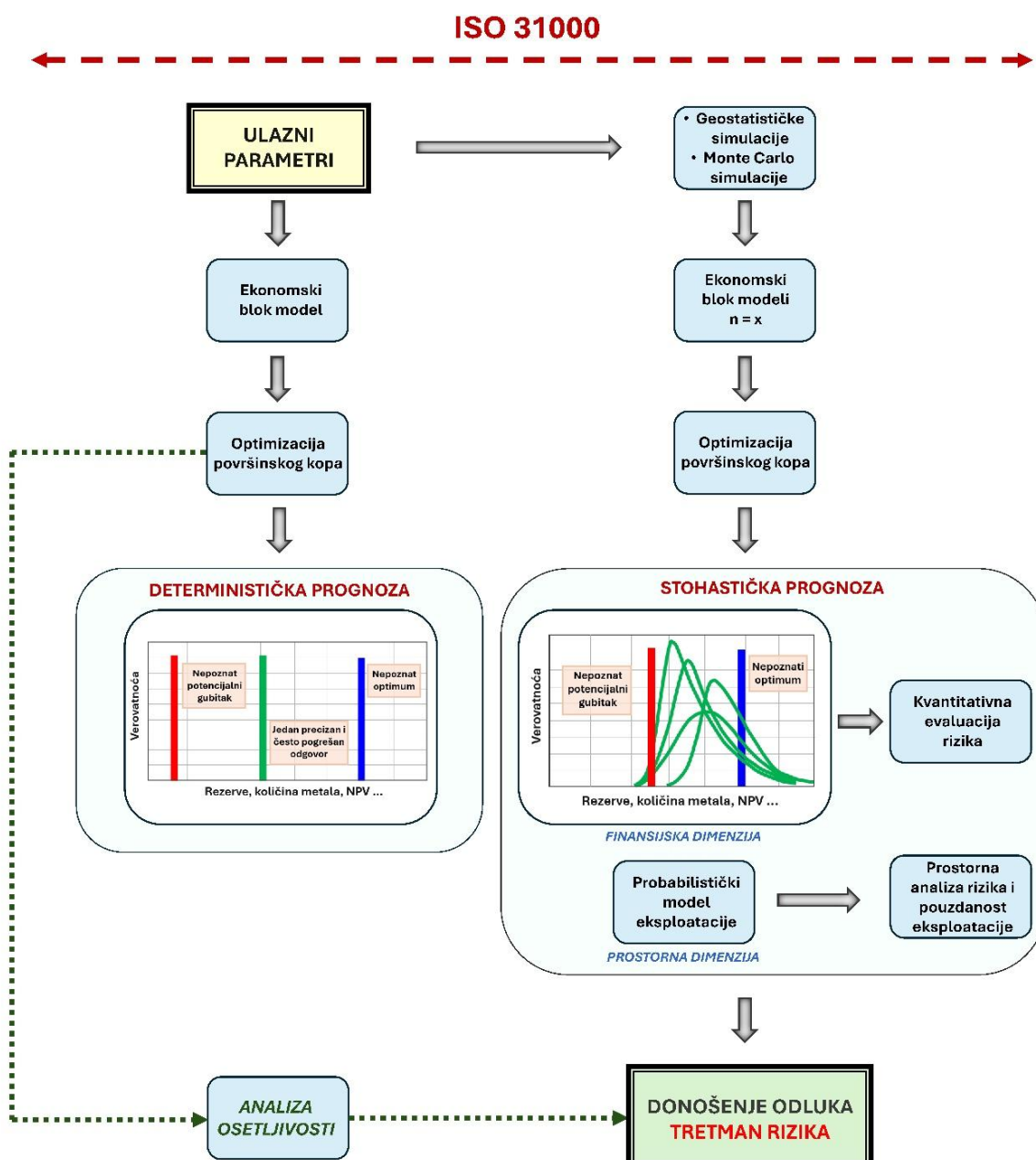
- **determinističkom pristupu** (bazni scenario i optimizacija granica kopa),
- **stohastičkom pristupu** (geostatističke simulacije i Monte Carlo modelovanje),
- **okviru upravljanja rizikom ISO 31000.**

Konceptualni prikaz integracije ovih komponentata i njihova međusobna povezanost ilustrovani su na slici 4.1.

Razvijeni model funkcioniše kao integrisani analitički tok koji povezuje modelovanje neizvesnosti, optimizaciju rudarskog sistema i evaluaciju rizika u jedinstven proces odlučivanja. Ovaj proces je prikazan na slici 4.2, gde je naglašena interakcija između determinističkog i stohastičkog pristupa, kao i njihova integracija u okviru upravljanja rizikom [256].



Slika 4.1. Konceptualni prikaz hibridnog modela upravljanja rizikom



Slika 4.2. Integrirani tok hibridnog modela upravljanja rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova

Slika 4.2 jasno prikazuje da je model strukturiran unutar okvira ISO 31000 i organizovan kroz dve komplementarne analitičke grane (determinističku i stohastičku), čija sinergija omogućava donošenje odluka zasnovanih na riziku.

Deterministički deo modela zasniva se na definisanju baznog scenarija i optimizaciji površinskog kopa primenom Lerchs–Grossmann algoritma. Rezultat ovog pristupa predstavlja jedinstvena deterministička procena tehno-ekonomskih pokazatelja projekta.

U okviru determinističkog pristupa sprovodi se i analiza osetljivosti, kojom se identifikuju ključni parametri koji imaju najveći uticaj na ekonomsku vrednost projekta. Ova analiza ne predstavlja kvantifikaciju rizika, već identifikaciju njegovih dominantnih uzroka, i kao takva direktno se koristi kao podrška u procesu donošenja odluka i definisanja strategija tretmana rizika.

Paralelno sa tim, stohastički deo modela obuhvata kvantifikaciju neizvesnosti kroz dve komplementarne komponente. Geološka neizvesnost modelira se primenom geostatističkih simulacija, čime se generiše skup podjednako verovatnih realizacija ležišta, dok se ekonomski i operativni parametri modeliraju definisanjem odgovarajućih raspodela verovatnoće i njihovim uzorkovanjem primenom Monte Carlo simulacije [256].

Kombinovanjem ovih pristupa formira se veći broj realizacija ekonomskog blok modela, pri čemu svaka realizacija predstavlja jedinstven scenario razvoja projekta. Za svaku realizaciju vrši se optimizacija površinskog kopa, čime se dobija skup alternativnih rešenja definisanih odgovarajućim tehno-ekonomskim pokazateljima [256].

Rezultati stohastičkog modela imaju dvostruku prirodu [256]:

- finansijsku dimenziju, izraženu kroz raspodele ekonomskih pokazatelja (NPV, IRR, PBP), koje omogućavaju kvantitativnu evaluaciju rizika primenom pokazatelja kao što su $P(NPV < 0)$, VaR i CVaR,
- prostornu dimenziju, izraženu kroz probabilistički model eksploatacije, koji omogućava određivanje verovatnoće eksploatacije svakog pojedinačnog bloka.

Dok raspodele ekonomskih pokazatelja omogućavaju kvantifikaciju finansijskog rizika projekta, probabilistički model eksploatacije obezbeđuje njegovu prostornu interpretaciju, omogućavajući identifikaciju zona različitog nivoa pouzdanosti unutar ležišta.

Na ovaj način, rezultati determinističkog pristupa (analiza osetljivosti) i stohastičkog pristupa (finansijska i prostorna analiza rizika) objedinjuju se u fazi donošenja odluka, koja se realizuje u skladu sa principima standarda ISO 31000.

Model je strukturno usklađen sa ključnim fazama upravljanja rizikom, uključujući identifikaciju, analizu, evaluaciju i tretman rizika, čime se obezbeđuje da kvantitativni rezultati modela imaju direktnu primenu u procesu strateškog planiranja [256].

Integracijom svih relevantnih izvora neizvesnosti, razvijeni model omogućava prelazak sa determinističkog pristupa zasnovanog na jednoj proceni ka probabilističkom okviru koji obuhvata celokupan spektar mogućih ishoda, čime se značajno unapređuje pouzdanost i robusnost donetih odluka [256].

4.2. Uspostavljanje konteksta

U početnoj fazi analize rizika ključno je uspostaviti jasan okvir za ocenu rizika i donošenje odluka u strateškom planiranju površinskih kopova. S obzirom na kompleksnu prirodu rudarskih projekata, koji podrazumevaju geološke, ekonomske, tehničke (operativne), ekološke i socijalne neizvesnosti, važno je već u startu definisati ciljeve analize i kriterijume prihvatljivosti rizika [256].

U ovom istraživanju, proces uspostavljanja konteksta zasnovan je na smernicama standarda ISO 31000:2018 [56], koji podrazumeva strukturiran pristup identifikaciji, analizi i tretmanu rizika. Dok

se mnoge analize zaustavljaju na prezentaciji osnovnih statističkih mera, u ovom modelu rezultati dobijaju značenje tek kada se interpretiraju zajedno sa ciljevima projekta i granicama prihvatljivog rizika [256].

U okviru uspostavljanja konteksta definišu se ključni elementi koji su u nastavku detaljno razmatrani.

4.2.1. Ekonomski pokazatelji kao osnovne mere vrednosti

U rudarskoj praksi, nakon faze geoloških istraživanja i prikupljanja podataka o ležištu, prvi korak u ekonomskoj evaluaciji projekta predstavlja Preliminary Economic Assessment (PEA, srp. Preliminarna ekonomska procena), u skladu sa međunarodnim standardima kao što su NI 43-101 [27], JORC [36], PERC [37]. Ova faza predstavlja inicijalnu procenu ekonomske opravdanosti projekta i ključni „Go/No-Go“ korak u procesu donošenja strateških odluka, pre razmatranja detaljnijih aspekata kao što su uticaj na životnu sredinu, društveni faktori i napredne strategije upravljanja rizikom [27].

Koncept i uloga preliminarne ekonomske procene u okviru životnog ciklusa rudarskog projekta detaljnije su razmatrani u poglavljima 2.2.1 i 2.2.4.

Većina rudarskih kompanija koristi više pokazatelja za procenu isplativosti projekta [282] [283], a najčešći među njima je neto sadašnja vrednost (NPV), koja se koristi kao osnovni kriterijum u optimizaciji i određivanju optimalnih granica površinskog kopa [284]. Pored NPV-a, u razvijenom modelu razmatrani su i dodatni pokazatelji poput interne stope rentabilnosti (IRR) i perioda povrata investicije (PBP), kako bi se obuhvatile različite dimenzije finansijske održivosti i projektne privlačnosti [285].

Fokus na ovim indikatorima u ranim fazama planiranja proizilazi iz njihove ključne uloge u donošenju investicionih odluka, pri čemu ekonomska opravdanost predstavlja osnovni preduslov za dalji razvoj projekta. U tom smislu, analiza ekonomske vrednosti čini temeljnu komponentu strateškog planiranja, dok se pitanja šire održivosti razmatraju u kasnijim fazama razvoja projekta [286] [287].

U okviru razvijenog modela, ovi pokazatelji se dalje analiziraju kroz stohastički pristup, pri čemu se njihove vrednosti posmatraju kao slučajne promenljive, a ne kao determinističke veličine.

NPV je izračunavan po standardnoj formuli [288]:

$$NPV = C_0 + \frac{C_1}{(1+r)^1} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4.1)$$

gde su:

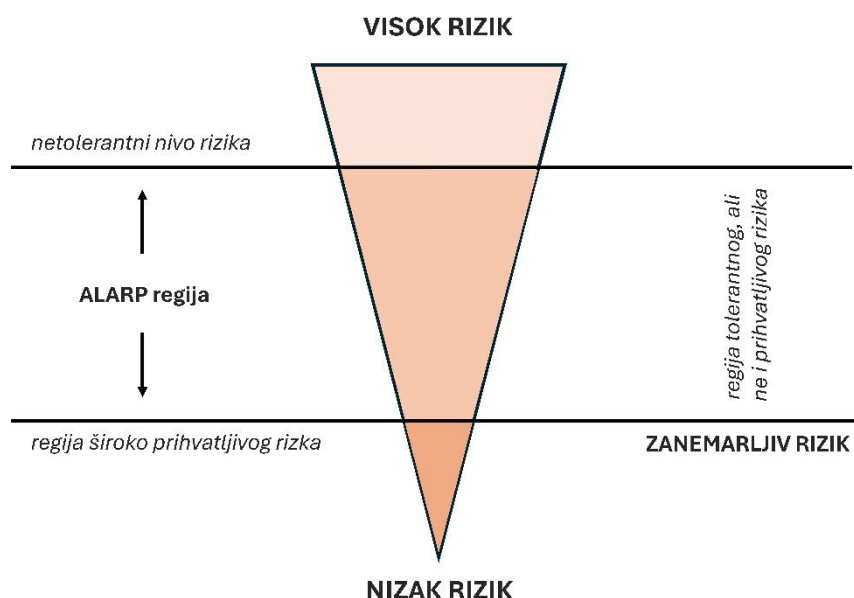
- C_0 – inicijalna investicija,
- $C_1, C_2, \dots, C_t$ – novčani tokovi po vremenskim intervalima,
- r – diskontna stopa,
- t – broj vremenskih intervala (broj godina)

4.2.2. Kriterijumi prihvatljivosti rizika

U procesu upravljanja rizikom, posebno kod strateških investicionih projekata, nivo tolerancije na rizik nije univerzalan, već zavisi od strateških prioriteta i profila zainteresovanih strana (stakeholders), uključujući kompanije, investitore i regulatorne institucije. U investicionoj analizi, rizik se često kvantifikuje kroz verovatnoću nepovoljnih finansijskih ishoda, kao što je ostvarivanje negativne neto sadašnje vrednosti projekta, pri čemu se odgovarajući pragovi koriste za definisanje kriterijuma prihvatljivosti u skladu sa ciljevima projekta [289] [290].

Iako specifični numerički pragovi nisu formalno standardizovani, koncept definisanja kvantitativnih kriterijuma prihvatljivosti rizika prepoznat je u literaturi kao efikasan alat za objektivizaciju investicionog odlučivanja. U okviru pristupa kao što je *Risk Acceptance Criteria (RAC)*, definišu se nivoi rizika koji se mogu smatrati prihvatljivim u datom kontekstu, pri čemu ti nivoi zavise od karakteristika projekta, investicionog okvira i tolerancije aktera [290] [291].

Koncept prihvatljivosti rizika često se prikazuje i kroz tzv. ALARP princip (eng. As Low As Reasonably Practicable), kojim se definišu zone neprihvatljivog, tolerisanog i prihvatljivog rizika (slika 4.3) [290].



Slika 4.3. Koncept prihvatljivosti rizika prema ALARP principu [113]

U ovom istraživanju, prihvatljiv nivo rizika definisan je kao verovatnoća da neto sadašnja vrednost projekta (NPV) bude manja od nule, pri čemu je usvojen kriterijum [256]:

$$P(NPV < 0) < 0,10$$

U okviru ovog istraživanja, definisani kvantitativni kriterijum može se interpretirati kao granica između prihvatljive i tolerisane zone rizika u okviru ALARP koncepta, čime se omogućava direktno povezivanje teorijskog okvira prihvatljivosti rizika sa kvantitativnim rezultatima stohastičke analize.

Prisustvo određene verovatnoće negativnog ekonomskog ishoda ne znači da je projekat neprihvatljiv, već predstavlja inherentnu karakteristiku investicionih odluka u uslovima neizvesnosti. Stoga se odluka ne zasniva na eliminaciji rizika, već na njegovoj kvantifikaciji i ograničavanju na prihvatljiv nivo.

U tom smislu, kriterijum $P(NPV < 0) < 0,10$ ne implicira odsustvo rizika, već definiše granicu njegove prihvatljivosti, čime se omogućava balans između maksimizacije vrednosti i kontrole potencijalnih gubitaka [256].

Usvojeni prag predstavlja konzervativan, ali realističan kriterijum za strateško odlučivanje u rudarskim projektima, jer omogućava kontrolu verovatnoće negativnog ekonomskog ishoda uz očuvanje investicione atraktivnosti projekta. Istovremeno, naglašava se da izbor praga prihvatljivosti zavisi od specifičnog konteksta projekta i može varirati u zavisnosti od strategije investitora, regulatornih zahteva i nivoa tolerancije na rizik [292].

4.2.3. *Izvori podataka i obuhvat analize*

Da bi se omogućila kvantifikacija geoloških, ekonomskih, tehničkih (operativnih) neizvesnosti u strateškom planiranju površinskih kopova, neophodno je koristiti više međusobno povezanih izvora podataka koji zajedno obezbeđuju sveobuhvatan prikaz kompleksnosti rudarskog sistema. U okviru ovog istraživanja, ulazni podaci modela obuhvataju geološke, operativne, tržišne i regulatorne informacije, koje su u nastavku sistematizovane prema njihovoj funkcionalnoj ulozi u modelu [256]:

- Geološki modeli ležišta

Geološki modeli ležišta predstavljaju osnovni ulaz u analizu, jer definišu geometriju ležišta, količine resursa i raspodelu sadržaja korisne komponente, kao i druge ključne parametre poput zapreminske mase. Na osnovu geološkog modela formira se ekonomski blok model, koji integriše ekonomske parametre, uključujući cenu metala, troškove eksploatacije i prerade, kao i tehnološke koeficijente iskorišćenja, čime se omogućava procena ekonomske vrednosti svakog bloka [8].

U okviru razvijenog modela, geološki podaci se dodatno koriste za generisanje geostatističkih realizacija ležišta (simulacija), čime se omogućava kvantifikacija prostorne varijabilnosti i geološke neizvesnosti. Ekonomski blok model, zasnovan na ovim ulazima, predstavlja osnovu za optimizaciju granica kopa i analizu ekonomskih performansi projekta [8].

- Istorijski i empirijski podaci iz postojećih rudarskih sistema

Istorijski i empirijski podaci iz postojećih rudarskih sistema predstavljaju ključnu osnovu za kalibraciju i validaciju ulaznih parametara modela, kao i za smanjenje neizvesnosti u njihovoj proceni. U praksi se podaci o troškovima proizvodnje, stepenu iskorišćenja opreme, performansama procesa i drugim operativnim parametrima iz aktivnih kopova, posebno onih sa sličnim geološkim, tehničkim i ekonomskim karakteristikama, koriste kao referentni osnov za definisanje ulaznih parametara optimizacije [3] [141] [47] [10].

Primena ovih podataka omogućava usklađivanje troškovnih i tehnoloških parametara sa realnim uslovima eksploatacije, čime se obezbeđuje pouzdanija procena ekonomskih performansi projekta. Istovremeno, empirijski podaci se koriste za definisanje i kalibraciju distribucija verovatnoće ulaznih parametara u stohastičkom delu modela.

Na ovaj način se obezbeđuje da rezultati optimizacije i analize rizika budu zasnovani na realnim operativnim podacima, a ne isključivo na teorijskim pretpostavkama, čime se povećava njihova primenljivost u donošenju investicionih odluka. Time se smanjuje subjektivnost u definisanju ulaznih parametara i povećava robusnost modela.

- Tržišni pokazatelji i makroekonomski ulazi

U strateškom planiranju rudarskih projekata, tržišna neizvesnost predstavlja jedan od ključnih faktora rizika, jer direktno utiče na očekivane prihode, novčane tokove i ukupnu vrednost projekta izraženu kroz finansijske pokazatelje, kao što je neto sadašnja vrednost (NPV). Promene istorijskih i prognoziranih cena metala na globalnim tržištima, kao i fluktuacije valutnih kurseva, imaju značajan uticaj na finansijske performanse rudarskih projekata, s obzirom na to da se većinom mineralnih sirovina trguje na međunarodnim robnim berzama u stranim valutama [293].

Osetljivost rudarskih projekata na tržišne parametre posebno je izražena kod metaličnih sirovina, gde i relativno male promene cena mogu dovesti do značajnih varijacija u diskontovanim novčanim tokovima i konačnoj proceni ekonomske opravdanosti projekta. Iz tog razloga, tržišni faktori se u literaturi prepoznaju kao jedna od ključnih komponenti rizika, te njihovo uključivanje predstavlja neophodan element modela upravljanja rizikom [294] [295] [296] [231].

U okviru ovog istraživanja, za potrebe kvantifikacije tržišne neizvesnosti koriste se istorijski i aktuelni podaci o cenama metala sa međunarodnih robnih berzi (npr. LME – London Metal Exchange) [171], kao i podaci o kretanju valutnih kurseva.

Pored toga, u analizu su uključene i relevantne tržišne studije i prognoze vodećih međunarodnih institucija i finansijskih organizacija (npr. World Bank, IMF, Goldman Sachs, J.P. Morgan), koje omogućavaju sagledavanje očekivanih trendova i raspona budućih kretanja cena metala [297] [298] [299] [300].

Ovi podaci se koriste za definisanje distribucija verovatnoće tržišnih parametara, čime se omogućava njihova integracija u stohastički deo modela i analiza uticaja tržišnih fluktuacija na ekonomske pokazatelje projekta.

- Tehničko-ekonomska dokumentacija projekta

Tehničko-ekonomska dokumentacija u rudarskim projektima obuhvata skup stručnih, tehničkih i finansijskih izvora koji se koriste za procenu troškova (CAPEX i OPEX), obima radova i logističkih zahteva. Ovi podaci predstavljaju osnovu za formiranje ulaznih parametara ekonomskog modela i procenu finansijskih performansi projekta.

Kod brownfield projekata, dokumentacija se primarno oslanja na interne operativne baze podataka i prethodne analize, što omogućava direktnu primenu parametara zasnovanih na realnim performansama sistema [36] [175] [301]. Nasuprot tome, greenfield projekti u ranim fazama razvoja (Scoping/PEA nivo) koriste podatke iz analognih projekata sa sličnim geološkim, tehnološkim i geografsko-ekonomskim karakteristikama [2] [301].

Ovakvi eksterni podaci, koji uključuju istorijske troškove opreme, građevinske normative i logističke parametre, omogućavaju formiranje realističnih ulaznih parametara za modeliranje troškova i kvantifikaciju neizvesnosti pre izrade detaljne projektne dokumentacije [301] [302] [303].

Na osnovu ovih podataka izrađuju se progresivno detaljnije studije (Scoping/PEA, Pre-feasibility i Feasibility), koje obuhvataju procene kapitalnih i operativnih troškova, uključujući troškove infrastrukture, nabavke i instalacije opreme, kao i pripremnih radova, čime se formira osnova za izračunavanje ključnih ekonomskih pokazatelja (NPV, IRR i PBP) [301].

U okviru razvijenog modela, ovi parametri se dalje koriste za definisanje determinističkih ulaza i kalibraciju distribucija verovatnoće troškova i investicija, čime se omogućava njihova integracija u stohastičku analizu i procenu ekonomskog rizika.

Time se obezbeđuje konzistentna veza između tehničko-ekonomskih pretpostavki i kvantitativne analize rizika u okviru razvijenog modela.

- Regulatorni i industrijski standardi

U razvoju rudarskih projekata značajnu ulogu imaju međunarodni i nacionalni standardi koji definišu pravila, kriterijume i procedure za izveštavanje o mineralnim resursima i rezervama, kao i za procenu tehnno-ekonomskih parametara projekta. Najznačajniji međunarodni okviri za izveštavanje uključuju:

- National Instrument 43-101 (NI 43-101) [27],
- Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC Code) [36],
- PERC Reporting Standard (za Evropu) [37],
- SME Guide (američki vodič za izveštavanje) [304],

Ovi standardi su usklađeni kroz *CRIRSCO International Reporting Template*, koji predstavlja referentni okvir za harmonizaciju nacionalnih i regionalnih sistema izveštavanja. U okviru ovog

sistema definišu se ključni elementi procene, uključujući klasifikaciju resursa i rezervi, uključivanje ekonomskih faktora u procenu i zahteve za profesionalnu odgovornost kvalifikovanih stručnjaka [44].

Pored međunarodnih standarda, rudarski projekti su podložni i nacionalnim zakonima i regulativima koje definišu tehničke, pravne i administrativne uslove za istraživanje i eksploataciju mineralnih sirovina. Iako lokalno specifični, ovi okviri su u većini slučajeva usklađeni sa CRIRSCO standardima, čime se obezbeđuje transparentnost, uporedivost i međunarodna prihvatljivost podataka, što je od posebnog značaja u kontekstu investicionog odlučivanja i pristupa kapitalu.

U okviru razvijenog modela, regulatorni i industrijski standardi predstavljaju osnovu za definisanje validnih ulaznih parametara i ograničenja modela, čime se obezbeđuje usklađenost rezultata sa relevantnim tehničkim i ekonomskim kriterijumima.

Na ovaj način uspostavlja se konzistentna osnova za narednu fazu identifikacije rizika, u kojoj se definišu ključni izvori neizvesnosti i njihov uticaj na performanse projekta.

4.3. Identifikacija rizika

U fazi identifikacije rizika fokus je na prepoznavanju ključnih geoloških, ekonomskih, tehničkih (operativnih) parametara koji imaju dominantan uticaj na finansijsku i tehničku izvodljivost rudarskog projekta. U strateškom planiranju površinskih kopova, ovaj korak predstavlja osnovu za sve naredne faze upravljanja rizikom, jer definiše koje varijable treba modelirati, kvantifikovati i uključiti u analizu.

Optimizacija granica površinskog kopa predstavlja centralni problem strateškog planiranja, jer direktno određuje količinu eksploatacionih rezervi, odnos rude i jalovine, troškove eksploatacije i ukupnu ekonomsku vrednost projekta. U tom smislu, proces optimizacije definiše prostorni i ekonomski okvir unutar kojeg se identifikuju i analiziraju ključni izvori neizvesnosti [1].

Ekonomska vrednost bloka (EVB - Economic value of the block), detaljno definisana u poglavlju 3.2. *Ekonomski blok model*, predstavlja osnovni kriterijum za donošenje odluka o eksploataciji pojedinačnih blokova. U kontekstu identifikacije rizika, EVB se posmatra kao funkcija više ulaznih parametara (cena metala, troškovi, sadržaj metala, stepen iskorišćenja i dr.), čija varijabilnost direktno utiče na konačne tehno-ekonomske performanse projekta.

Ekonomska vrednost bloka (EVB) formalno se definiše u zavisnosti od njegove klasifikacije, koja je primarno određena graničnim sadržajem korisne komponente (cut-off grade) [141]. U procesu optimizacije, algoritam postavlja suštinsko pitanje:

„Da li je ovaj blok isplativije poslati u postrojenje na preradu ili na odlagalište jalovine?“ [4]

U skladu sa tim, EVB se može konceptualno izraziti kao funkcija ključnih ulaznih parametara koji definišu odnos prihoda i troškova eksploatacije, pa tako svaki blok u modelu može imati pozitivnu ili negativnu vrednost, što se matematički izražava na sledeći način [186] [4]:

- **Za rudni blok (EVB_{rude})** – ekonomska vrednost rudnog bloka dobija se kada uzme u obzir prihod od prodaje metala i umanjenje za sve relevantne troškove (uključujući troškove otkopavanja, prerade, troškove prodaje i dr.):

$$EVB_{\text{rude}} = T_o \times (g \times r \times (RF \times P - SC) - PC - MC) \quad (4.2)$$

- **Za jalovinski blok (EVB_{jalovine})** – vrednost je negativna i jednaka je isključivo trošku njegovog otkopavanja i odlaganja:

$$EVB_{\text{jalovine}} = -(T_w \times MC) \quad (4.3)$$

Gde oznake imaju sledeće značenje:

- T_o — masa rudnog bloka izražena u tonama
- g — sadržaj metala u rudi (npr. g/t)
- r — stepen iskorišćenja u procesu prerade
- RF — faktor prihoda (engl. *revenue factor*)
- P — cena metala na tržištu (\$/tona)
- SC — troškovi prodaje (\$/tona)
- PC — troškovi prerade (\$/tona)
- MC — troškovi otkopavanja (\$/tona)
- T_w — masa jalovinskog materijala u tonama

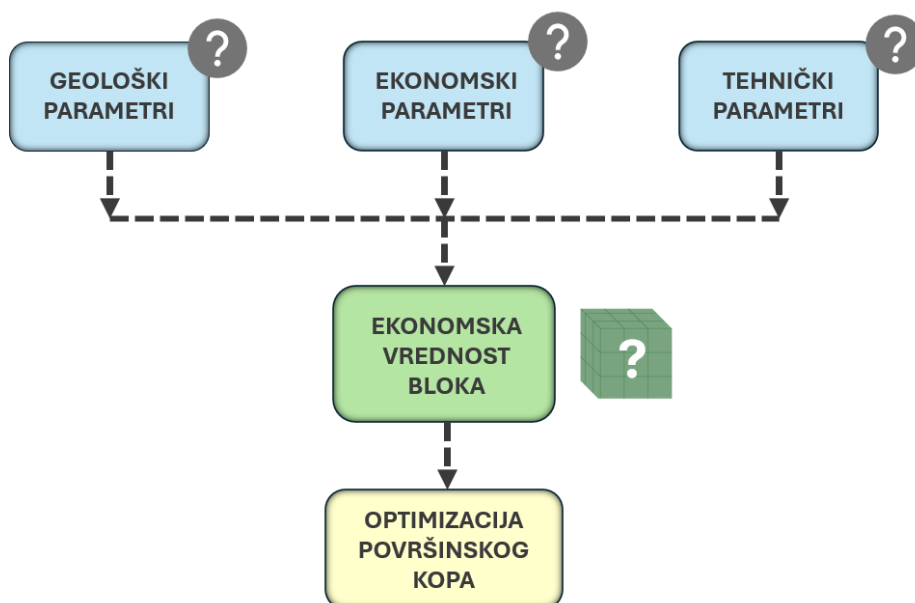
U realnim uslovima, većina ovih parametara ne može se posmatrati kao fiksna, deterministička veličina, već kao promenljiva i neizvesna kategorija. Njihova varijabilnost direktno utiče na ekonomsku vrednost blokova, a samim tim i na granice optimalnog kopa i ukupnu vrednost projekta [256].

U tom smislu, identifikacija rizika svodi se na prepoznavanje onih ulaznih parametara čija varijabilnost ima najveći uticaj na vrednost EVB-a i konačne ekonomske pokazatelje projekta. Ovi parametri predstavljaju osnovu za dalju kvantitativnu analizu rizika i modelovanje neizvesnosti [256].

Identifikovane neizvesnosti mogu se grupisati u nekoliko ključnih kategorija, prikazanih u tabeli 4.1. Način na koji ovi parametri (geološki, ekonomski i tehnički) konvergiraju ka proračunu ekonomske vrednosti bloka i daljoj optimizaciji površinskog kopa, šematski je ilustrovan na slici 4.4.

Tabela 4.1. Najvažniji izvori neizvesnosti koji utiču na ekonomsku vrednost bloka [256] [305]

Geološka neizvesnost	Ekonomska neizvesnost	Tehnička (operativna) neizvesnost
Geometrija ležišta	Cena proizvoda	Iskorišćenje u eksploataciji
Sadržaj metala	Kursna razlika	Razblaženje rude
Zapreminska masa	Troškovi otkopavanja	Iskorišćenje u preradi (processing recovery)
	Troškovi prerade	Iskorišćenje u metalurgiji (metallurgical recovery)
	Troškovi prodaje	



Slika 4.4. Konceptualni model formiranja ekonomske vrednosti bloka (EVB) u uslovima neizvesnosti

Ovakva klasifikacija omogućava direktno povezivanje izvora neizvesnosti sa parametrima EVB funkcije, čime se obezbeđuje konzistentna osnova za kvantitativno modelovanje rizika.

Geološka neizvesnost odnosi se na parametre koji potiču iz geoloških modela ležišta i koji direktno utiču na količinu i kvalitet resursa u bloku, odnosno [47] [306]:

- *Geometrija ležišta* određuje prostorni raspored rudnih blokova, i ukupnu zapreminu rude koja je dostupna za eksploataciju
- *Sadržaj metala (metal grade)* određuje kvalitet korisne mineralne sirovine, i direktno utiče na prihod jer veći sadržaj znači i veću ekonomsku vrednost.
- *Zapreminska masa* omogućava preciznu konverziju zapremine bloka u masu, što utiče na ukupne eksploatacione rezerve.

Ekonomska neizvesnost obuhvata spoljne faktore koji određuju komponentu prihoda projekta i na koje rudarska kompanija nema direktan uticaj [307] [186], kao i neizvesnost u proceni operativnih troškova (OPEX) koji direktno modifikuju troškovnu komponentu ekonomske vrednosti bloka (EVB) [159], odnosno:

- *Promene cena proizvoda* (npr. cena metala na berzi) imaju direktan efekat na očekivani prihod koji svaki blok ostvaruje.
- *Kursne razlike* utiču na konverziju prihoda u domaću valutu, što je posebno značajno kod projekata orijentisanih ka izvozu.
- *Troškovi otkopavanja* predstavljaju direktne operativne izdatke potrebne za fizičko uklanjanje materijala (rude i jalovine) iz ležišta, uključujući bušenje, miniranje, utovar i transport do postrojenja ili odlagališta.
- *Troškovi prerade* obuhvataju troškove tehnoloških procesa pripreme i koncentracije rude (usitnjavanje, klasiranje, separacija), koji imaju za cilj dobijanje koncentrata odgovarajućeg kvaliteta.
- *Troškovi prodaje* uključuju sve izdatke koji se generišu nakon procesa prerade, poput transporta do krajnjeg kupca, logistiku, osiguranje, troškove tretmana i rafinacije (TC/RC), kao i administrativne troškove plasmana proizvoda na tržište.

Tehnička (operativna) neizvesnost odnosi se na odstupanja između projektovanih i stvarnih performansi rudarsko-prerađivačkog sistema, što direktno utiče na količinu metala koja se može ekonomski izdvojiti iz rude [130] [308], odnosno:

- *Iskorišćenje u eksploataciji* definiše odnos između količine rude koja je stvarno otkopana i otpremljena na prerađu u odnosu na ukupne rezerve u bloku, uzimajući u obzir rudarske gubitke
- *Razblaženje (dilution)* podrazumeva mešanje rude sa jalovinom tokom eksploatacije, što dovodi do smanjenja srednjeg sadržaja metala i direktno utiče na ekonomsku vrednost blokova.
- *Iskorišćenje u preradi* određuje procenat korisne komponente (metala) koji je uspešno izdvojen iz rude u finalni koncentrat tokom tehnoloških procesa u pogonu, direktno zaviseći od mineraloškog sastava i efikasnosti postrojenja.
- *Iskorišćenje u metalurgiji* predstavlja efikasnost izdvajanja metala u završnim procesima i zavisi od karakteristika sirovine i tehnologije obrade.

Nakon razmatranja parametara koji direktno utiču na ekonomsku vrednost bloka (EVB), važno je istaći da postoji i dodatni skup parametara koji, iako nisu obuhvaćeni u Tabeli 4.1, imaju značajan uticaj na ukupne performanse projekta.

Jedan od ključnih parametara ove vrste jeste nivo investicionih ulaganja (CAPEX). Za razliku od prethodno analiziranih parametara, CAPEX ne utiče direktno na vrednost pojedinačnih blokova, već na ukupne ekonomske pokazatelje projekta (NPV, IRR, PBP).

Neizvesnost CAPEX-a odnosi se na varijabilnost kapitalnih troškova neophodnih za razvoj rudarskog projekta, uključujući izgradnju infrastrukture, nabavku i instalaciju opreme, kao i pripreme radova. Ova varijabilnost može biti posledica promena cena opreme i materijala, odstupanja u proceni obima radova, geotehničkih uslova na terenu, kao i makroekonomskih faktora [95].

Ove kategorije neizvesnosti igraju ključnu ulogu u oblikovanju finansijskih i operativnih rizika povezanih sa razvojem rudarskog projekta, jer direktno utiču na ulazne parametre koji određuju očekivane prihode, strukturu troškova i tehničku izvodljivost dugoročnog plana eksploatacije. Ukoliko se neizvesnosti ne identifikuju i ne modeliraju sistematski, rezultati planiranja mogu biti preterano optimistični ili konzervativni i ne odražavati realan raspon mogućih ishoda [256].

Pravilna identifikacija ovih parametara omogućava strukturiranu i doslednu analizu rizika u narednim fazama modela, uključujući kvantitativnu procenu i evaluaciju rizika. Umesto da se ulazni parametri tretiraju kao fiksne determinističke vrednosti, svaki identifikovani izvor neizvesnosti modelira se putem odgovarajućih raspodela verovatnoće koje opisuju očekivanu varijabilnost parametara. Ove raspodele obuhvataju ne samo očekivane (srednje) vrednosti, već i stepen disperzije i verovatnoću ekstremnih odstupanja, što je ključno za adekvatno sagledavanje rizika [256].

4.4. Analiza rizika

U cilju sveobuhvatnog sagledavanja neizvesnosti identifikovanih u prethodnoj fazi, u okviru ovog poglavlja sprovodi se kvantitativna analiza rizika primenom odgovarajućih stohastičkih metoda. Cilj ove faze je da se uticaj ključnih parametara na ekonomske i tehničke performanse projekta kvantifikuje kroz generisanje velikog broja mogućih scenarija razvoja projekta [256].

U tom kontekstu, analiza rizika obuhvata kako geološke varijacije, modelirane primenom geostatističkih simulacija, tako i ekonomske i operativne parametre, modelirane Monte Carlo pristupom. Na ovaj način omogućava se integrisano sagledavanje uticaja različitih izvora neizvesnosti na pokazatelje projekta.

Kombinacijom ovih pristupa generišu se alternativne realizacije ekonomskog blok modela, koje se dalje koriste u procesu optimizacije granica površinskog kopa i evaluacije ekonomskih performansi projekta.

4.4.1. Geostatističke simulacije ležišta

Geološka neizvesnost predstavlja jedan od najznačajnijih izvora rizika u strateškom planiranju površinskih kopova, jer direktno utiče na procenu količine i kvaliteta mineralnih resursa, a samim tim i na ekonomsku vrednost projekta. U prethodnim fazama modela identifikovani su ključni geološki parametri čija varijabilnost generiše neizvesnost, dok je u ovom koraku fokus na njenoj kvantifikaciji kroz geostatističke simulacije.

Za razliku od determinističkog pristupa, koji se zasniva na jedinstvenom blok modelu ležišta, geostatističke simulacije omogućavaju generisanje većeg broja podjednako verovatnih realizacija. Svaka realizacija predstavlja mogući geološki scenario koji je u skladu sa raspoloživim podacima i definisanom strukturom variograma, čime se omogućava očuvanje prostorne varijabilnosti ležišta.

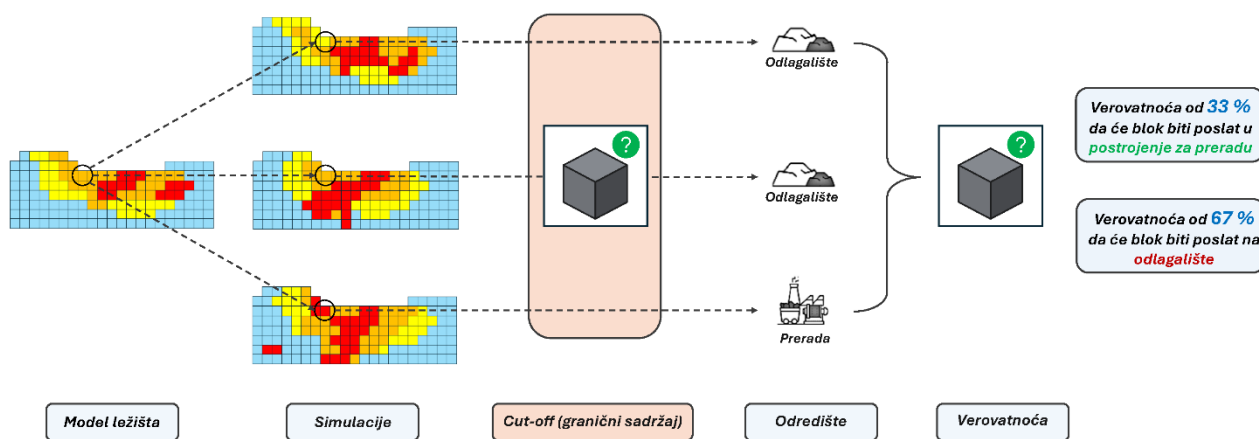
U okviru ovog istraživanja, simulacije su zasnovane na postojećem geološkom blok modelu, pri čemu su kao ulaz korišćeni podaci iz baze istražnih bušotina, kompozitovani uzorci i prethodno definisani variogramski modeli. Variografska analiza sprovedena je po geološkim domenima, čime je obezbeđeno da simulacije reflektuju specifične prostorne karakteristike različitih delova ležišta. Detaljni parametri variograma i njihova interpretacija prikazani su u okviru studije slučaja (poglavlje 5), dok se u ovom delu fokus stavlja na njihovu ulogu u procesu simulacija.

Za generisanje realizacija primenjena je **metoda sekvencijalne Gausove simulacije (Sequential Gaussian Simulation – SGS)**, koja omogućava uslovno modeliranje vrednosti u blokovima uz očuvanje statističkih i prostornih karakteristika ulaznih podataka. Kao osnov za simulacije korišćen je variogramski model definisan u okviru geološkog blok modela, čime je obezbeđena konzistentnost između determinističkog i stohastičkog pristupa modelovanju ležišta [241] [239].

Proces simulacije obuhvata transformaciju podataka u standardni normalni prostor (normal score transformacija), nakon čega se primenjuje variogramski model u tom transformisanom prostoru za sekvencijalno generisanje vrednosti duž definisane putanje. Generisane vrednosti su uslovljene raspoloživim podacima iz bušotina, čime se obezbeđuje njihova geološka reprezentativnost. U završnoj fazi vrši se povratna transformacija u originalni prostor, čime se dobija raspodela koja odgovara realnim vrednostima sadržaja [241] [239].

Na ovaj način variogramski model, koji definiše prostorni kontinuitet sadržaja ležišta, koristi se kao ključni parametar i u procesu simulacija, ali sa drugačijom ulogom u odnosu na interpolacione metode. Kriging koristi variogram da izračuna najverovatniji prosek, što dovodi do „efekta zaglađivanja (smoothing effect)“, gde model prikazuje manju varijabilnost nego što ona realno postoji u ležištu. Nasuprot tome, simulacija koristi variogram da preslika stvarnu varijabilnost ležišta, kreirajući niz različitih, ali podjednako mogućih scenarija koji čuvaju prirodne visoke i niske vrednosti sadržaja [241] [239].

Rezultat ove faze nije jedan model ležišta, već skup stohastičkih realizacija koje se dalje koriste kao ulaz u naredne faze modela. U okviru ovog istraživanja **generisano je 100 realizacija**, čime je formiran reprezentativan skup mogućih geoloških scenarija koji obuhvataju varijabilnost ležišta. Svaka realizacija predstavlja osnovu za formiranje ekonomskog blok modela i sprovođenje optimizacije granica kopa, čime se geološka neizvesnost direktno prenosi u tehničke i ekonomske pokazatelje projekta. Izbor broja realizacija izvršen je kao kompromis između statističke stabilnosti rezultata i računarske efikasnosti simulacionog procesa. Ovakav pristup omogućava da se za svaki blok definiše verovatnoća njegove klasifikacije kao rude ili jalovine, što je ilustrativno prikazano na slika 4.5.



Slika 4.5. Ilustracija uticaja geološke neizvesnosti na verovatnoću klasifikacije blokova kroz geostatističke simulacije

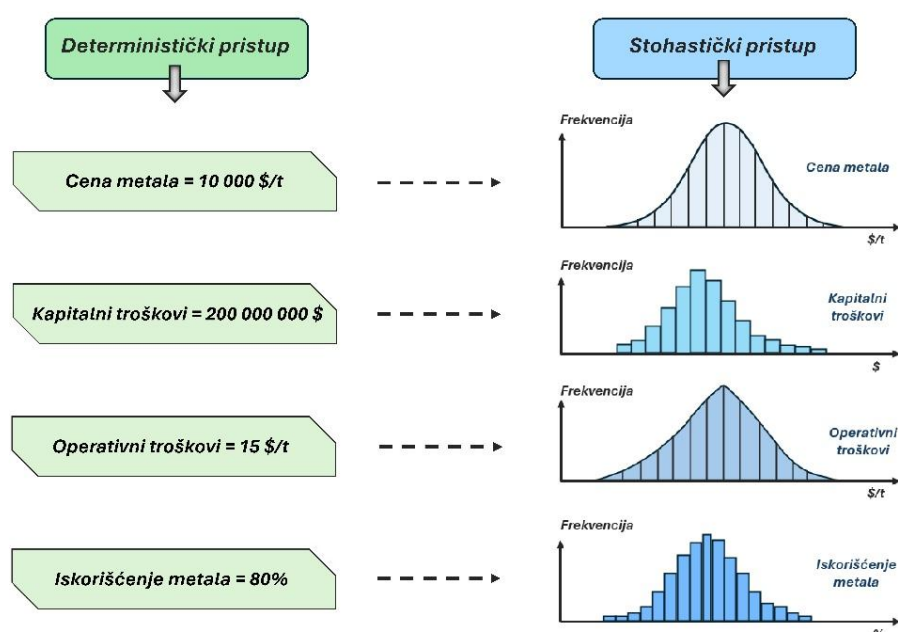
Slika 4.5 ilustruje kako se, usled geološke neizvesnosti, isti blok može različito klasifikovati u različitim realizacijama modela, u zavisnosti od lokalne varijabilnosti sadržaja i primenjenog graničnog sadržaja (cut-off). Na osnovu toga moguće je definisati verovatnoću klasifikacije bloka, pri čemu geološka neizvesnost dovodi do promene njegove uloge u ekonomskom blok modelu (ruda ili jalovina).

Na ovaj način geostatističke simulacije predstavljaju početni korak u integrisanom modelu analize rizika, jer omogućavaju kvantifikaciju geološke komponente neizvesnosti, koja se u narednoj fazi dodatno proširuje kroz Monte Carlo simulacije ekonomskih i tehničkih (operativnih) parametara.

4.4.2. Monte Carlo simulacija

Monte Carlo simulacija u okviru razvijenog modela koristi se kao mehanizam za integraciju ekonomske i tehničke (operativne) neizvesnosti u proces strateškog planiranja. Za razliku od geološke neizvesnosti, koja se modelira kroz geostatističke simulacije, ekonomski i tehnički parametri tretiraju se kao slučajne promenljive definisane odgovarajućim raspodelama verovatnoće [256].

Za svaki identifikovani neizvesni parametar definiše se odgovarajuća funkcija raspodele (slika 4.6), na osnovu istorijskih podataka, tržišnih analiza, tehničke dokumentacije i ekspertne procene. U zavisnosti od prirode parametra, mogu se koristiti različiti tipovi raspodela (normalna, log-normalna, trougaona, pert, beta i dr.), pri čemu su granice i parametri raspodele definisani tako da odražavaju realne uslove projekta [256].



Slika 4.6. Modelovanje neizvesnih tehno-ekonomskih parametara u cilju primene Monte Carlo simulacija

U ovom istraživanju, Monte Carlo simulacija ne predstavlja izolovan analitički korak, već komponentu integrisanog modela u kome se za svaki scenario generiše jedinstvena kombinacija ekonomskih i tehničkih (operativnih) uslova. Ovi scenariji se zatim povezuju sa odgovarajućim realizacijama geološkog modela, čime se obezbeđuje simultano razmatranje različitih izvora neizvesnosti [256].

Važno je napomenuti da broj iteracija nije teorijski ograničen, već zavisi od raspoloživih računarskih resursa i zahtevanog nivoa pouzdanosti rezultata. Povećanjem broja simulacija smanjuje se statistička greška procene i stabilizuju se raspodele izlaznih parametara [309] [310]. U ovom istraživanju korišćen je softver @Risk (verzija 8.2.2) za generisanje slučajnih vrednosti i upravljanje simulacijama [311] [256].

Efekat Monte Carlo simulacije ne manifestuje se direktno kroz raspodelu konačnih finansijskih pokazatelja, već pre svega kroz promenu ekonomske vrednosti blokova (EVB), koja predstavlja osnovu za optimizaciju granica kopa.

Na taj način Monte Carlo simulacija omogućava da se neizvesnost ulaznih parametara prenese na nivo blok modela, čime se obezbeđuje da optimizacioni proces ne zavisi od jedne determinističke procene, već od skupa mogućih scenarija razvoja projekta.

4.4.3. Generisanje realizacija ekonomskog blok modela

U cilju integracije geološke, ekonomske i tehničke neizvesnosti, u okviru razvijenog modela vrši se generisanje više realizacija ekonomskog blok modela (EBM), koje predstavljaju osnovu za dalju optimizaciju granica površinskog kopa.

Za razliku od determinističkog pristupa, u kome se ekonomska vrednost blokova definiše na osnovu jedinstvenog skupa ulaznih parametara, u ovom modelu ekonomska vrednost bloka (EVB) posmatra se kao promenljiva veličina koja zavisi od konkretne kombinacije geoloških, tržišnih i tehničkih uslova. Time se EVB ne tretira kao fiksna vrednost, već kao rezultat integrisane neizvesnosti prisutne u svim ključnim komponentama modela.

Geološka komponenta neizvesnosti obuhvaćena je kroz više realizacija ležišta dobijenih primenom geostatističkih simulacija, pri čemu svaka realizacija predstavlja mogući prostorni raspored sadržaja korisne komponente. Paralelno sa tim, ekonomski i tehnički parametri modeliraju se kao slučajne promenljive definisane odgovarajućim raspodelama verovatnoće, čije se vrednosti generišu primenom Monte Carlo simulacije.

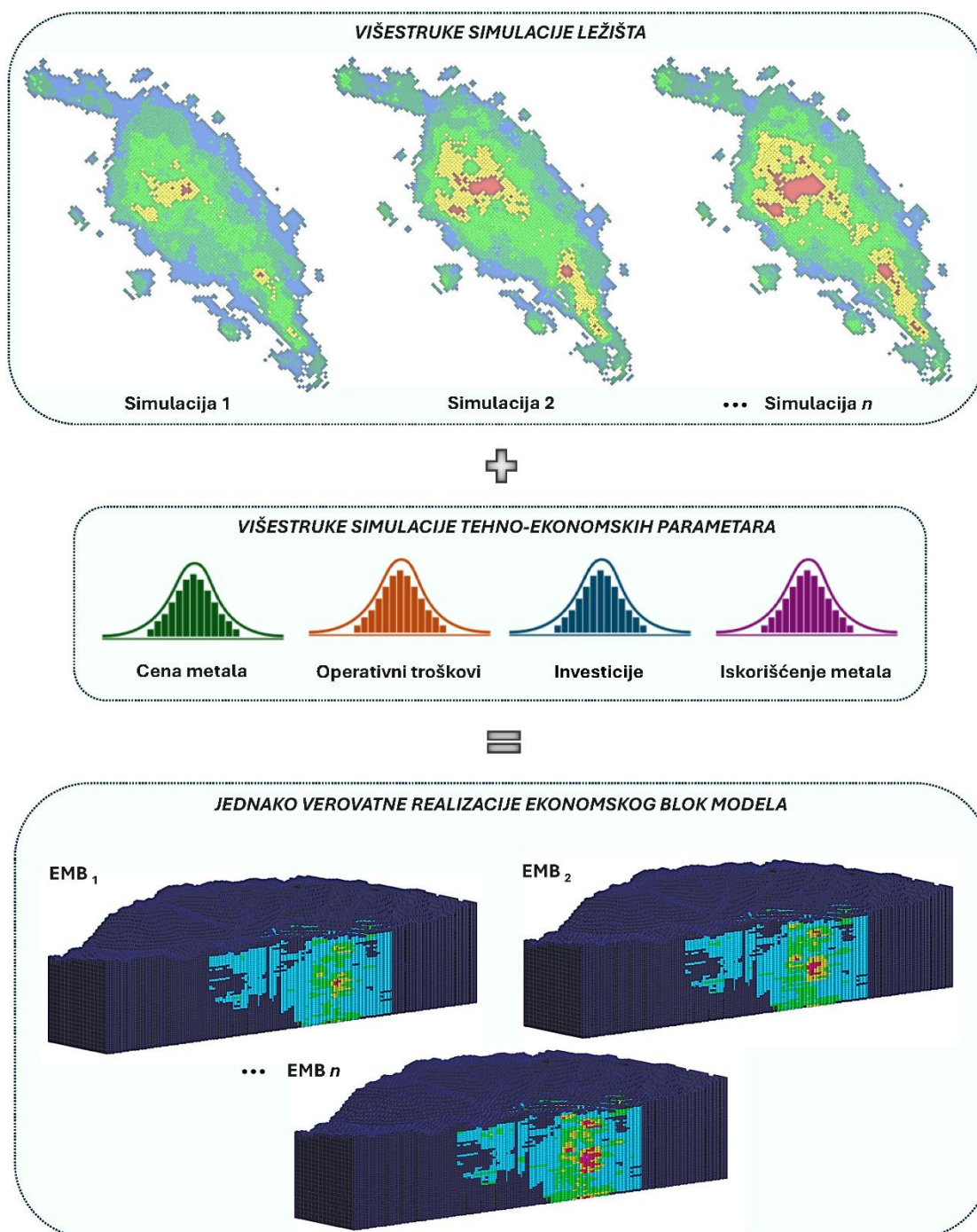
Kombinovanjem geostatističkih realizacija ležišta sa stohastičkim vrednostima ekonomskih i tehničkih parametara formira se skup podjednako verovatnih realizacija ekonomskog blok modela, pri čemu svaka realizacija predstavlja jedinstven scenario razvoja projekta. Ovaj proces je ilustrovan na slici 4.7.

U svakom od generisanih modela, svakom bloku dodeljuje se ekonomska vrednost u skladu sa konkretnim uslovima realizacije. Na taj način ekonomska vrednost bloka (EVB) postaje funkcija neizvesnosti, a ne deterministička vrednost.

Time se uloga blokova u optimizacionom procesu menja, jer njihova uključenost u optimalnu konturu kopa zavisi od konkretne realizacije modela. Na taj način, pripadnost bloka optimalnoj konturi kopa više nije unapred određena, već varira između realizacija, čime se direktno formira osnova za određivanje verovatnoće njegove eksploatacije.

Generisanjem većeg broja realizacija ekonomskog blok modela obezbeđuje se formiranje skupa podjednako verovatnih scenarija, koji zajedno definišu opseg mogućih ishoda projekta. Ovakav pristup omogućava prelazak sa jedne determinističke interpretacije ležišta na probabilistički okvir analize, u kome se uzima u obzir celokupan spektar mogućih geoloških i tehno-ekonomskih uslova.

Dobijeni skup ekonomskih blok modela predstavlja direktan ulaz za fazu optimizacije granica površinskog kopa, u okviru koje se za svaku realizaciju određuje optimalna geometrija kopa i pripadajući tehnički i ekonomski pokazatelji. Na taj način se omogućava dalja kvantifikacija rizika kroz analizu raspodele rezultata i procenu verovatnoće različitih scenarija razvoja projekta.



Slika 4.7. Generisanje višestrukih realizacija ekonomskog blok modela kombinovanjem geostatističkih simulacija ležišta i Monte Carlo simulacija tehno-ekonomskih parametara

4.4.4. Optimizacija površinskog kopa i analiza osetljivosti

Nakon generisanja realizacija ekonomskog blok modela, sledeći korak u okviru metodološkog okvira odnosi se na optimizaciju granica površinskog kopa i dinamike eksploatacije za svaku pojedinačnu realizaciju. Na ovaj način se omogućava kvantifikacija uticaja identifikovanih geoloških, ekonomskih i tehničkih (operativnih) neizvesnosti na konačne tehničke i finansijske performanse projekta.

Za razliku od determinističkog pristupa, u kome se optimizacija vrši nad jednim referentnim modelom, u ovom istraživanju optimizacija se sprovodi nad većim brojem podjednako verovatnih realizacija ekonomskog blok modela. Svaka realizacija predstavlja jedinstven scenario razvoja projekta, definisan kombinacijom geoloških karakteristika ležišta i odgovarajućih ekonomskih i operativnih uslova.

U fazi definisanja optimalnih granica površinskog kopa primenjen je Lerchs–Grossmann (LG) algoritam [4], zasnovan na teoriji grafova, koji predstavlja industrijski standard za matematičku optimizaciju granica eksploatacije. Optimizacija je sprovedena u softverskom paketu GEOVIA Whittle (verzija 4.7.3) [312], čime je omogućeno generisanje rezultata u vidu prostornih i ekonomskih parametara kopa za svaku pojedinačnu realizaciju.

Algoritam iterativno analizira ekonomsku vrednost blokova u modelu (EVB) i identifikuje onaj skup blokova koji maksimizuje ukupnu neto sadašnju vrednost (NPV), uz striktno poštovanje tehničkih ograničenja sistema, kao što su nagibi kosina, geometrijska zavisnost blokova i operativni uslovi eksploatacije [4].

Nakon definisanja optimalnih granica površinskog kopa za svaku realizaciju, vrši se i preliminarno određivanje dinamike eksploatacije primenom Milawa Balanced algoritma u okviru softvera GEOVIA Whittle [211]. Preliminarna dinamika definiše redosled eksploatacije blokova u prostoru i vremenu, i predstavlja osnovu za izračunavanje vremenski zavisnih ekonomskih pokazatelja projekta.

Kao rezultat ovog procesa dobija se skup optimizovanih rešenja, pri čemu svako rešenje odgovara jednoj realizaciji ekonomskog blok modela. Svako od tih rešenja definisano je nizom ključnih tehnoloških indikatora, uključujući:

- neto sadašnju vrednost (NPV),
- dinamiku novčanih tokova (Cash Flow),
- internu stopu rentabilnosti (IRR),
- period povraćaja investicije (PBP),
- količine zahvaćene rude i jalovine i koeficijent otkrivke,
- kvalitet mineralne sirovine.

Za razliku od determinističkog pristupa, gde se dobija jedna optimalna kontura, jedan scenario redosleda otkopavanja i jedna vrednost tehnoloških pokazatelja, ovde se formira raspodela mogućih ishoda projekta. Na taj način se omogućava statistička analiza rezultata, uključujući procenu očekivanih vrednosti, disperzije i ekstremnih scenarija. Poseban značaj ima analiza „repova“ distribucije, koja omogućava identifikaciju potencijalnih nepovoljnih scenarija sa niskom verovatnoćom, ali značajnim uticajem na projekat [256].

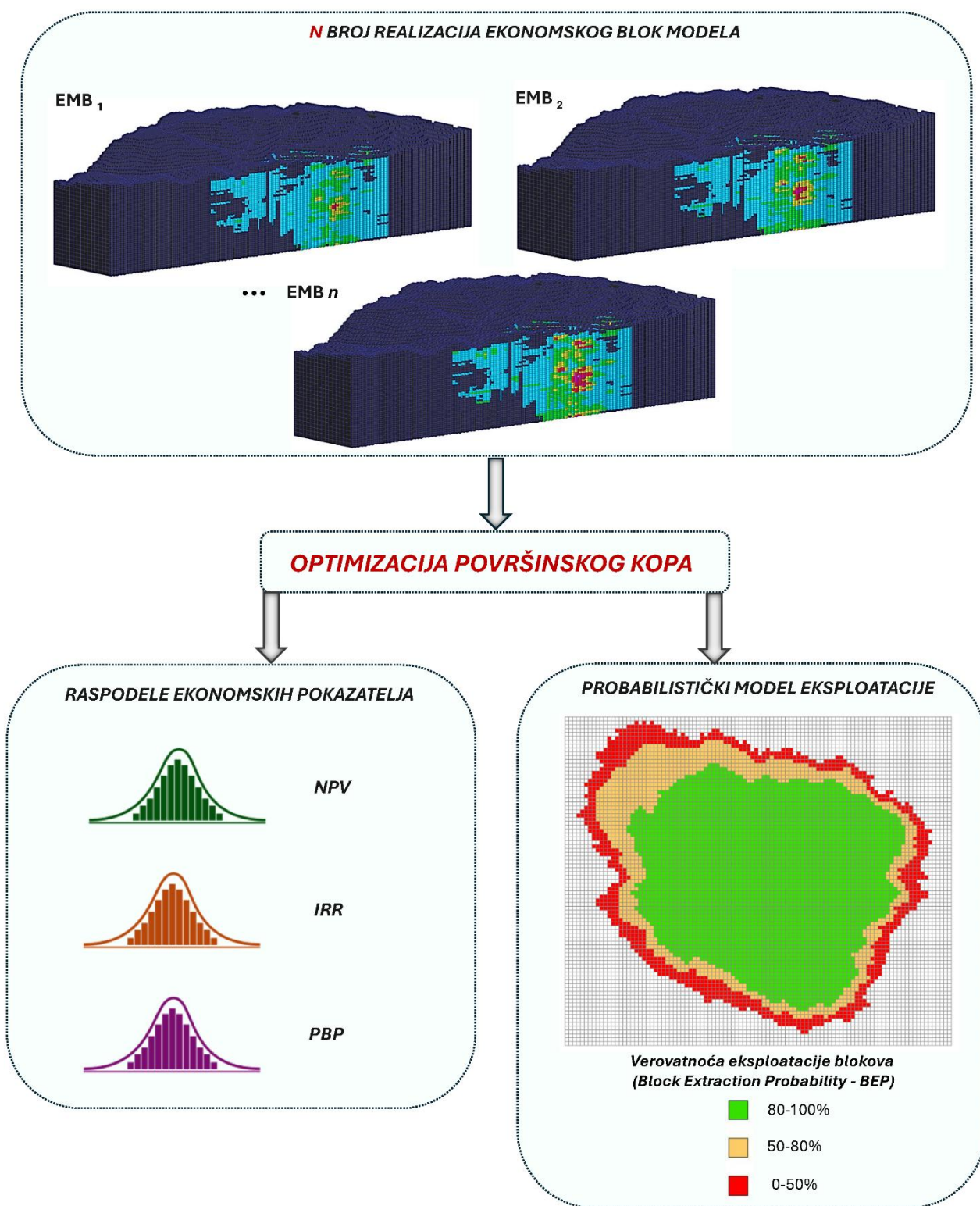
Rezultati optimizacije imaju dvostruku interpretaciju:

- **finansijsku i**
- **prostornu.**

Finansijska dimenzija obuhvata **raspodele ekonomskih pokazatelja (NPV, IRR, PBP)**, koje omogućavaju kvantifikaciju rizika kroz analizu verovatnoće različitih scenarija, dok prostorna dimenzija proizilazi iz **probabilističkog modela eksploatacije**, kojim se određuje verovatnoća eksploatacije svakog pojedinačnog bloka (**eng. Block Extraction Probability – BEP**).

Na osnovu preklapanja optimalnih kontura dobijenih za različite realizacije formira se probabilistički model eksploatacije, koji omogućava identifikaciju zona sa visokom i niskom verovatnoćom eksploatacije, odnosno zona različitog nivoa tehnološke pouzdanosti unutar ležišta.

Na ovaj način omogućava se **istovremeno sagledavanje ekonomskih i tehničkih aspekata rizika**. Dok raspodele ekonomskih pokazatelja pružaju uvid u finansijsku održivost projekta, probabilistički model eksploatacije daje prostornu dimenziju rizika i omogućava detaljnu analizu pouzdanosti eksploatacije pojedinih delova ležišta. Ovaj proces je ilustrovan na slici 4.8.



Slika 4.8. Rezultati optimizacije površinskog kopa na osnovu više realizacija ekonomskog blok modela: raspodele ekonomskih pokazatelja i probabilistički model eksploatacije

U cilju identifikacije dominantnih uzroka varijabilnosti rezultata, u okviru determinističkog pristupa sprovodi se i analiza osetljivosti optimalne konture kopa. Za razliku od stohastičkog pristupa, u okviru ove analize pojedinačni parametri variraju se u unapred definisanim opsezima, dok se ostali parametri zadržavaju na referentnim vrednostima [119].

Na ovaj način omogućava se izolovano sagledavanje uticaja pojedinačnih parametara na vrednost projekta, čime se identifikuju oni parametri čije promene dovode do najvećih odstupanja ekonomskih pokazatelja [119].

Analiza osetljivosti ne predstavlja kvantifikaciju rizika, već identifikaciju njegovih dominantnih uzroka, čime dopunjuje rezultate stohastičke analize u procesu donošenja odluka i definisanja strategija tretmana rizika.

Integracijom rezultata optimizacije kroz više realizacija modela obezbeđuje se prelazak sa determinističkog na probabilistički okvir analize, u kome se odluke donose na osnovu celokupnog spektra mogućih ishoda projekta.

Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za narednu fazu modela, u kojoj se vrši kvantitativna evaluacija rizika i definisanje kriterijuma prihvatljivosti projekta.

4.5. Evaluacija rizika

Faza evaluacije rizika predstavlja ključnu tačku u razvijenom hibridnom modelu, jer se u ovoj fazi prelazi sa kvantifikacije neizvesnosti na procenu prihvatljivosti rizika i donošenje strateških odluka u planiranju rudarskog projekta. Dok je u fazi analize rizika generisan veliki broj mogućih scenarija kroz kombinaciju geostatističkih simulacija, Monte Carlo pristupa i optimizacije granica kopa, evaluacija rizika omogućava njihovu interpretaciju u kontekstu finansijske održivosti i tolerancije na rizik [256].

Osnovu za evaluaciju čine raspodele ekonomskih pokazatelja (NPV, IRR i PBP), kao i rezultati probabilističkog modela eksploatacije, čime se istovremeno sagledavaju finansijski i tehnički aspekti rizika [256].

U skladu sa principima standarda ISO 31000 [56], evaluacija rizika podrazumeva poređenje kvantifikovanih rizika sa unapred definisanim kriterijumima prihvatljivosti. U okviru ovog istraživanja, osnovni kriterijum prihvatljivosti definisan je kroz verovatnoću negativne neto sadašnje vrednosti, pri čemu je uslov [256]:

$$P(NPV < 0) < 0,10$$

Ovakav kriterijum implicira da projekat mora imati najmanje 90% verovatnoće pozitivnog ekonomskog ishoda. Važno je naglasiti da ovaj pristup ne eliminiše rizik u potpunosti, već ga kvantifikuje i stavlja u kontekst prihvatljive izloženosti, što je u skladu sa realnim uslovima donošenja investicionih odluka u rudarstvu.

Pored verovatnoće negativnog NPV-a, evaluacija rizika zasniva se i na naprednim statističkim merama koje omogućavaju detaljniju analizu distribucije ishoda, posebno u domenu nepovoljnih scenarija.

Model precizno kvantifikuje prihvatljivost rizika integracijom standardnih statističkih metoda za merenje finansijskog rizika, poput *Value at Risk* (VaR) [84] i *Conditional Value at Risk* (CVaR) [85]. Iako su ovi pokazatelji primarno razvijeni za finansijsku analizu (bankarstvo i berzu), njihova primena u strateškom planiranju površinskih kopova omogućava pouzdanu procenu neizvesnosti kod kapitalnih investicija dugog ciklusa kao što su rudarski.

Value at Risk (VaR) predstavlja kvantitativni prag rizika koji definiše maksimalni očekivani gubitak u okviru određenog intervala poverenja. U strateškom planiranju rudarskih projekata, VaR služi kao mera donjeg rizika (downside risk), odnosno on precizira iznos koji potencijalni gubici neće premašiti u, na primer, 90% analiziranih scenarija [84] [313].

U okviru razvijenog modela, proces izračunavanja VaR indikatora sprovodi se kroz četiri ključne faze [314] [84] [313]:

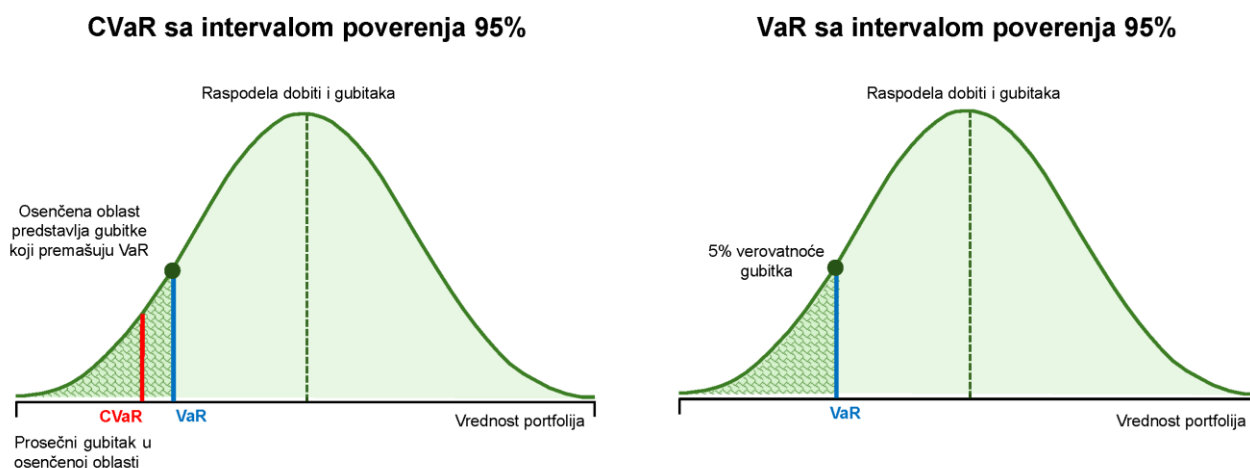
1. Definisanje vremenskog intervala, odnosno određuje se period za koji se vrši procena rizika. U specifičnom kontekstu rudarskih projekata, ovaj interval obuhvata celokupan životni ciklus investicije (*Life of Mine*), uključujući faze izgradnje, eksploatacije i konačnog zatvaranja kopa.

2. Odabir intervala poverenja (Confidence Level), gde se VaR izračunava uz definisani stepen statističke sigurnosti, obično u opsegu od 90% do 99%. Na primer, interval poveranja od 95% implicira da u 95% analiziranih scenarija gubitak neće premašiti projektovanu VaR vrednost. Viši nivoi poverenja (poput 97% ili 99%) primenjuju se kada je fokus na analizi ekstremnih, ali manje verovatnih negativnih ishoda.
3. Modelovanje distribucije rezultata, gde se putem simulacija (o ovom slučaju geostatističke i Monte Karlo simulacije) i optimizacionih metoda, generiše raspodela verovatnoće ključnih ekonomskih pokazatelja, (primarno Neto sadašnje vrednosti - NPV). Ova distribucija služi kao statistička osnova za kvantifikaciju neizvesnosti projekta.
4. Kvantifikacija VaR vrednosti, gde se na osnovu formirane raspodele identifikuje VaR vrednost kao tačka preseka koja razdvaja prihvatljive ishode od onih najnepovoljnijih. Konkretno, pri nivou poverenja od 95%, VaR predstavlja kritičnu vrednost NPV-a ispod koje se nalazi onih 5% najlošijih rezultata.

Međutim, sam VaR ima poznata ograničenja, koja se pre svega odnose na to što VaR ne opisuje veličinu gubitaka izvan definisanog praga, niti uzima u obzir ekstreme repova distribucije. Zato se uvodi *Conditional Value at Risk (CVaR)*, koncept koji su razvili Rockafellar i Uryasev [85] kako bi rešili ove nedostatke.

Conditional Value at Risk (CVaR) predstavlja prosečni gubitak u slučaju kada dođe do nepovoljnog ishoda iznad VaR praga. Drugim rečima, CVaR meri koliko loši ishodi mogu biti u ekstremnim situacijama. Ovaj pokazatelj daje precizniju procenu potencijalnih negativnih uticaja i predstavlja bolji indikator ekstremnih rizika nego VaR sam po sebi [85].

Kao što je prikazano na slici 4.9, dok VaR predstavlja samo graničnu tačku maksimalnog očekivanog gubitka (npr. sa 95% intervalom poverenja), CVaR se fokusira na čitavu osenčenu oblast levo od te tačke. On predstavlja prosečnu vrednost svih gubitaka u tom kritičnom delu distribucije.



Slika 4.9. VaR i CVaR za interval poverenja od 95%.

4.5.1. Struktura evaluacije rizika

Evaluacija rizika se u ovom modelu sprovodi u nekoliko međusobno povezanih koraka, koji zajedno omogućavaju sistematsko i transparentno donošenje odluka [256]:

1. Formiranje raspodele ključnih ekonomskih pokazatelja

Na osnovu rezultata simulacija ulazih parametara i optimizacija površinskog kopa, za svaki ekonomski indikator, odnosno za neto sadašnju vrednost (NPV), internu stopu povraćaja (IRR) i periode povraćaja investicije (PBP), generišu se raspodele mogućih vrednosti.

2. Računanje pokazatelja rizika

Iz generisanih raspodela izvode se konkretne kvantitativne mere rizika, pre svega Value at Risk (VaR) i Conditional Value at Risk (CVaR), na nekoliko nivoa pouzdanosti (npr. 90 %, 95 % i 97 %). Ovi pokazatelji kvantifikuju verovatnoću i ozbiljnost nepovoljnih ekonomskih ishoda:

- VaR definiše prag vrednosti ispod kojeg se nalazi određeni procenat najnepovoljnijih scenarija,
- dok CVaR pruža prosečnu vrednost gubitaka u tim najnepovoljnijim slučajevima.

3. Tumačenje pragova rizika u kontekstu finansijske stabilnosti

Dobijeni rezultati se zatim interpretiraju prema unapred definisanim pragovima prihvatljivosti rizika. To znači poređenje indikatora kao što su $P(NPV < 0)$, VaR i CVaR sa pragovima tolerancije rizika kako bi se utvrdilo da li projekat ispunjava kriterijume finansijske održivosti ili je izložen nepovoljnim rizicima koji zahtevaju intervenciju.

4. Formulisanje scenarija rizika i preporuka za tretman

Na osnovu tumačenja pragova rizika identifikuju se scenariji koji odgovaraju različitim nivoima rizika, od onih nisko rizičnih do onih koji zahtevaju hitne korektivne mere. Ove klasifikacije služe kao osnova za preporuke u fazi tretmana rizika i za inovacije u planiranju i operativnom upravljanju projektom.

Da bi se lakše razumelo šta dobijeni rezultati znače u praksi, mogu se izdvojiti tri nivoa rizika:

- Nisko rizičan scenario (interval poverenja od 97% ili više) — projekat se smatra finansijski stabilnim, sa vrlo niskom verovatnoćom negativnih finansijskih ishoda, te u ovom slučaju nije potrebna neposredna intervencija.
- Umereno rizičan scenario (interval poverenja od 95%) — standardni industrijski prag koji identifikuje umerenu izloženost riziku. Mogu se zahtevati manja prilagođavanja projekta.
- Visoko rizičan scenario (interval poverenja od 90% ili niže) — ukazuje na značajniju verovatnoću nepovoljnih ekonomskih rezultata, što može zahtevati hitnu reviziju dugoročnog plana eksploatacije.

Posebna vrednost razvijenog pristupa ogleda se u integraciji finansijske i tehničke dimenzije rizika. Dok raspodele ekonomskih pokazatelja kvantifikuju finansijsku neizvesnost, probabilistički model eksploatacije omogućava prostornu analizu tehničkog rizika. Na osnovu preklapanja optimalnih kontura kopa iz svih simulacija određuje se verovatnoća eksploatacije svakog bloka, čime se identifikuju zone sa visokom i niskom pouzdanošću eksploatacije. Ovaj rezultat omogućava dodatnu validaciju ekonomskih odluka kroz prostornu analizu rizika [256].

4.5.2. Kriterijumi donošenja odluka

Na osnovu kvantifikovanih pokazatelja rizika i definisanih pragova prihvatljivosti, u okviru razvijenog modela uvode se kriterijumi donošenja odluka koji omogućavaju klasifikaciju projektnih scenarija i izbor odgovarajuće strategije daljeg razvoja.

U tom smislu, odluke se zasnivaju na kombinaciji ekonomskih pokazatelja (raspodela NPV, VaR, CVaR) i rezultata probabilističkog modela eksploatacije, čime se istovremeno uzimaju u obzir finansijski i tehnički aspekti rizika.

Na osnovu toga, mogu se izdvojiti tri osnovne kategorije:

- Prihvatljiv scenario (GO) – projekat zadovoljava kriterijume prihvatljivosti (npr. $P(NPV < 0) < 10\%$), uz stabilne raspodele rezultata i visoku pouzdanost eksploatacije.

- Uslovno prihvatljiv scenario (REDESIGN) – projekat pokazuje povećanu varijabilnost rezultata ili granične vrednosti rizika, te zahteva dodatnu optimizaciju i modifikaciju ključnih parametara.
- Neprihvatljiv scenario (NO-GO) – projekat ne zadovoljava kriterijume prihvatljivosti, uz izražene negativne ishode i visoku neizvesnost, te se preporučuje odlaganje ili redefinisane projekta.

Ovakva klasifikacija omogućava direktno povezivanje kvantitativne evaluacije rizika sa procesom donošenja odluka, čime se obezbeđuje sistematičan prelaz ka fazi tretmana rizika.

4.6. Tretman rizika

Tretman rizika predstavlja završnu fazu u procesu upravljanja rizicima. Na osnovu prethodno sprovedene evaluacije, u ovoj fazi se biraju i primenjuju konkretne strategije kako bi se nivo rizika zadržao u okvirima tolerancije projekta. Prema standardu ISO 31000:2018, ovaj proces podrazumeva selekciju optimalnih mera za modifikaciju rizika, čime se osigurava usklađenost sa strateškim ciljevima organizacije i uspostavljenim kriterijumima prihvatljivosti [56].

U okviru razvijenog modela, izbor strategije tretmana direktno je uslovljen klasifikacijom scenarija definisanom kroz kriterijume donošenja odluka (GO, REDESIGN, NO-GO), čime se uspostavlja jasna veza između kvantitativne evaluacije rizika i operativnih mera za njegovo ublažavanje. Na taj način tretman rizika ne predstavlja izolovanu aktivnost, već logičan nastavak analize i evaluacije, u kojem se identifikovani rizici prevode u konkretne akcije.

Posebno važnu ulogu u procesu tretmana rizika ima analiza osetljivosti, koja omogućava identifikaciju parametara sa najvećim uticajem na ekonomske pokazatelje projekta. Na osnovu variranja pojedinačnih ulaznih parametara u definisanim opsezima, moguće je utvrditi koji faktori najviše doprinose varijabilnosti neto sadašnje vrednosti (NPV), interne stope rentabilnosti (IRR) i drugih indikatora. Na taj način, analiza osetljivosti predstavlja ključni alat za prioritizaciju mera tretmana, jer omogućava da se pažnja usmeri na parametre čije promene imaju najveći uticaj na finansijsku održivost projekta, poput cene metala, troškova eksploatacije, stepena iskorišćenja i investicionih ulaganja. Time tretman rizika postaje zasnovan na objektivno identifikovanim uzrocima varijabilnosti, a ne na opštim pretpostavkama.

U zavisnosti od nivoa rizika i prirode identifikovanih neizvesnosti, u modelu se primenjuju različite strategije tretmana koje su opisane u nastavku teksta [256].

Izbegavanje rizika (risk avoidance) podrazumeva potpunu eliminaciju aktivnosti ili scenarija koji generišu neprihvatljiv nivo neizvesnosti. U kontekstu rudarskog planiranja, ovo se primarno odnosi na isključivanje pojedinih delova ležišta, odnosno skupova blokova sa visokom verovatnoćom negativnog finansijskog ishoda, iz procesa optimizacije granica kopa, kao i na strateško odlaganje kapitalnih investicija do postizanja povoljnijih tržišnih uslova [315] [316] [317].

Strategija smanjenja rizika (risk reduction / mitigation) zasniva se na modifikaciji ključnih ulaznih parametara u cilju smanjenja njihove varijabilnosti i uticaja na konačne rezultate. Posebna vrednost razvijenog modela ogleda se u tome što se efekti ovih mera mogu direktno kvantifikovati kroz ponovnu primenu stohastičkog modela. Na primer, unapređenje pouzdanosti geološkog blok modela ležišta kroz dodatna istraživanja [318] [319], preciznije modelovanje troškova [175], detaljnija analiza tržišnih trendova kako bi se bolje predvidele varijacije cena i troškova [320] [294], može se naknadno analizirati kroz promenu raspodele ekonomskih pokazatelja i smanjenje verovatnoće negativnog NPV-a. Na taj način tretman rizika postaje iterativan i merljiv proces, u kojem se efekti svake intervencije mogu jasno sagledati.

Prenos ili deljenje rizika (risk Transfer / sharing) predstavlja dodatni mehanizam kojim se deo neizvesnosti prenosi na druge učesnike u projektu. U rudarskoj praksi to se ostvaruje kroz hedžing aranžmane za stabilizaciju cena proizvoda [87], angažovanje specijalizovanih izvođača za

visokorizične operacije ili formiranje strateških partnerstava (Joint Ventures) radi podele investicionog opterećenja [321] [322]. Ove strategije su posebno značajne u uslovima izražene tržišne volatilnosti, gde direktna kontrola nad pojedinim izvorima rizika nije u potpunosti moguća.

Prihvatanje rizika (risk Acceptance / retention) primenjuje se u situacijama kada se utvrdi da je nivo rizika unutar definisanih granica tolerancije. U okviru ovog istraživanja, to se odnosi na scenarije kod kojih je verovatnoća negativne neto sadašnje vrednosti ispod definisanog praga ($P(NPV < 0) < 0,10$). Međutim, čak i u ovom slučaju, prihvatanje rizika ne podrazumeva pasivan pristup, već kontinuirani monitoring ključnih parametara i pripremu odgovarajućih planova reagovanja [323].

Važan aspekt tretmana rizika u razvijenom modelu jeste njegova **prioritizacija**. Na osnovu rezultata evaluacije i klasifikacije scenarija, rizici se rangiraju prema njihovom uticaju na projekat. Time se osigurava da se ograničeni resursi (kapital, vreme, ljudstvo) primarno usmere na modifikaciju onih rizika koji imaju najveći potencijal ugrožavanja strateških ciljeva [256].

U tom smislu, proces tretmana se dinamički prilagođava kroz tri nivoa hitnosti [256]:

- **Visokoprioritetni rizici** - zahtevaju momentalnu primenu strategija izbegavanja ili prenosa (npr. usled visoke tržišne fluktuacije ili regulatorne nesigurnosti), jer direktno ugrožavaju održivost projekta.
- **Srednjoprioritetni rizici** - tretiraju se merama *smanjenja* (mitigation strategies) kroz unapred definisane alternativne planove i kontinuirano tehničko-tehnološko unapređenje procesa.
- **Niskoprioritetni rizici** - prihvataju se uz rutinsko praćenje, jer bi troškovi njihovog dodatnog smanjenja prevazišli potencijalnu korist.

Za razliku od tradicionalnih pristupa, tretman rizika u ovom modelu ima izražen iterativni karakter. Nakon implementacije izabranih mera, vrši se ponovno sprovođenje simulacija i optimizacije kako bi se procenio efekat primenjenih strategija na raspodelu ekonomskih pokazatelja i stabilnost eksploatacije. Ukoliko rezultati pokažu da nivo preostalog rizika i dalje prelazi granice prihvatljivosti, model predviđa dodatnu reviziju parametara i ponavljanje ciklusa analize [256].

Na taj način se formira zatvoren krug upravljanja rizikom, u kojem se procesi simulacije, optimizacije, evaluacije i tretmana kontinuirano nadovezuju. Ovakav pristup omogućava da se strateško planiranje rudarskih projekata zasniva na dinamičkom modelu koji aktivno reaguje na promene u geološkom, tehničkom i tržišnom okruženju, čime se značajno povećava otpornost projekta na neizvesnosti [256].

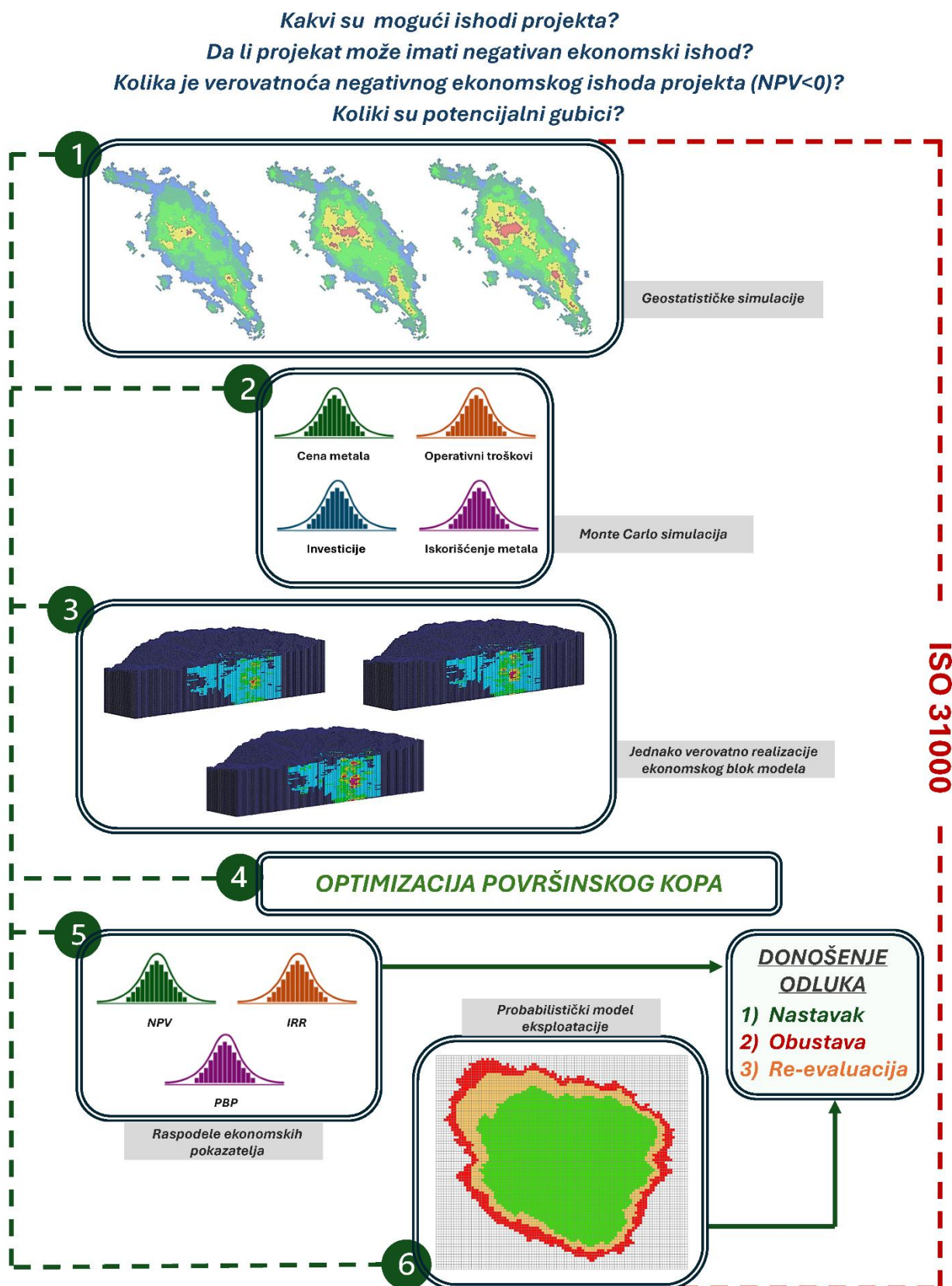
4.7. Sinteza razvijenog hibridnog modela

Sveobuhvatna struktura opisanog procesa, od uspostavljanja konteksta i identifikacije ključnih izvora neizvesnosti, preko njihove kvantifikacije primenom geostatističkih i Monte Carlo simulacija, pa sve do evaluacije i tretmana rizika, integrisana je u jedinstveni hibridni model upravljanja rizikom. Ovaj model obezbeđuje logički i metodološki konzistentan sled koraka neophodnih za donošenje pouzdanih investicionih odluka u uslovima izražene geološke, tehničko-tehnološke i tržišne varijabilnosti.

Posebna vrednost razvijenog pristupa ogleda se u integraciji determinističkih i stohastičkih metoda, čime se omogućava prelaz sa jedne procene na raspodelu mogućih ishoda, kao i uvođenje probabilističkog modela eksploatacije koji daje prostornu dimenziju rizika. Na taj način se ne sagledava samo finansijska održivost projekta, već i pouzdanost eksploatacije pojedinih delova ležišta.

Pored toga, model omogućava direktno povezivanje kvantifikovanih rezultata sa procesom donošenja odluka kroz definisane kriterijume prihvatljivosti i klasifikaciju scenarija (GO, REDESIGN, NO-GO), kao i njihovu implementaciju kroz odgovarajuće strategije tretmana rizika. Time se obezbeđuje prelaz sa analize rizika ka aktivnom upravljanju projektom.

Detaljan prikaz faza, njihovih međusobnih interakcija, kao i ključnih ulaznih i izlaznih parametara razvijenog modela za upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova prikazan je na slici 4.10.



Slika 4.10. Sinteza hibridnog modela upravljanja rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova

5. IMPLEMETACIJA HIBRIDNOG MODELA NA METALIČNOM LEŽIŠTU

Primena razvijenog hibridnog modela na konkretnom rudnom ležištu predstavlja ključni korak u njegovoj verifikaciji, jer omogućava sagledavanje njegove funkcionalnosti i primenljivosti u realnim uslovima rudarskog sistema. U ovom poglavlju model se implementira na reprezentativnom metaličnom ležištu, pri čemu se svi koraci prethodno definisanog metodološkog okvira primenjuju na konkretan skup geoloških, tehničkih i ekonomskih podataka.

Za razliku od prethodnog poglavlja, u kome je fokus bio na razvoju i formalizaciji modela, ovde je akcenat na njegovoj operativnoj primeni, uključujući pripremu ulaznih podataka, definisanje parametara, sprovođenje simulacija i optimizacije, kao i formiranje odgovarajućih izlaznih skupova podataka.

U okviru ovog poglavlja prikazan je celokupan simulaciono-optimizacioni postupak, počev od modelovanja geološke varijabilnosti, preko definisanja ekonomskih i operativnih parametara, pa do generisanja realizacija ekonomskog blok modela i optimizacije površinskog kopa za svaki scenario.

Detaljna analiza i interpretacija dobijenih rezultata, uključujući kvantitativnu evaluaciju rizika i diskusiju njihovih implikacija, biće predmet narednog poglavlja.

U tom smislu, poglavlje obuhvata sledeće ključne celine:

- opis geoloških i rudarsko-tehnoloških karakteristika analiziranog ležišta,
- definisanje determinističkog modela i baznog scenarija,
- analizu osetljivosti ključnih parametara,
- implementaciju stohastičkog simulaciono-optimizacionog modela.

Struktura poglavlja organizovana je tako da se u delu 5.1 prikažu osnovne karakteristike analiziranog ležišta i rezultati geološkog modeliranja, zatim se u delu 5.2 definišu ulazni parametri determinističkog modela, dok se u delu 5.3 analizira njihov uticaj kroz analizu osetljivosti. U delu 5.4 prikazana je implementacija stohastičkog modela, uključujući geostatističke simulacije i definisanje raspodela verovatnoće parametara, čime se formira osnova za simulaciono-optimizacioni proces.

Na ovaj način, poglavlje obezbeđuje konzistentan prelaz sa metodološkog okvira razvijenog u prethodnom delu rada na njegovu konkretnu primenu, dok se interpretacija rezultata i njihova evaluacija u kontekstu upravljanja rizikom razmatraju u narednom poglavlju.

5.1. Opis lokaliteta i karakteristike ležišta

U cilju verifikacije razvijenog hibridnog modela upravljanja rizikom, njegova implementacija izvršena je na realnom metaličnom ležištu porfirskog tipa, smeštenom u okviru jednog od najznačajnijih rudnih rejonu u istočnoj Srbiji. Zbog poverljivosti podataka i zaštite komercijalnih informacija, tačan naziv lokaliteta i pojedini podaci nisu javno prikazani u ovom istraživanju. Međutim, sve geološke, istražne i rudarsko-tehnološke karakteristike koje su od značaja za primenu modela detaljno su predstavljene u nastavku.

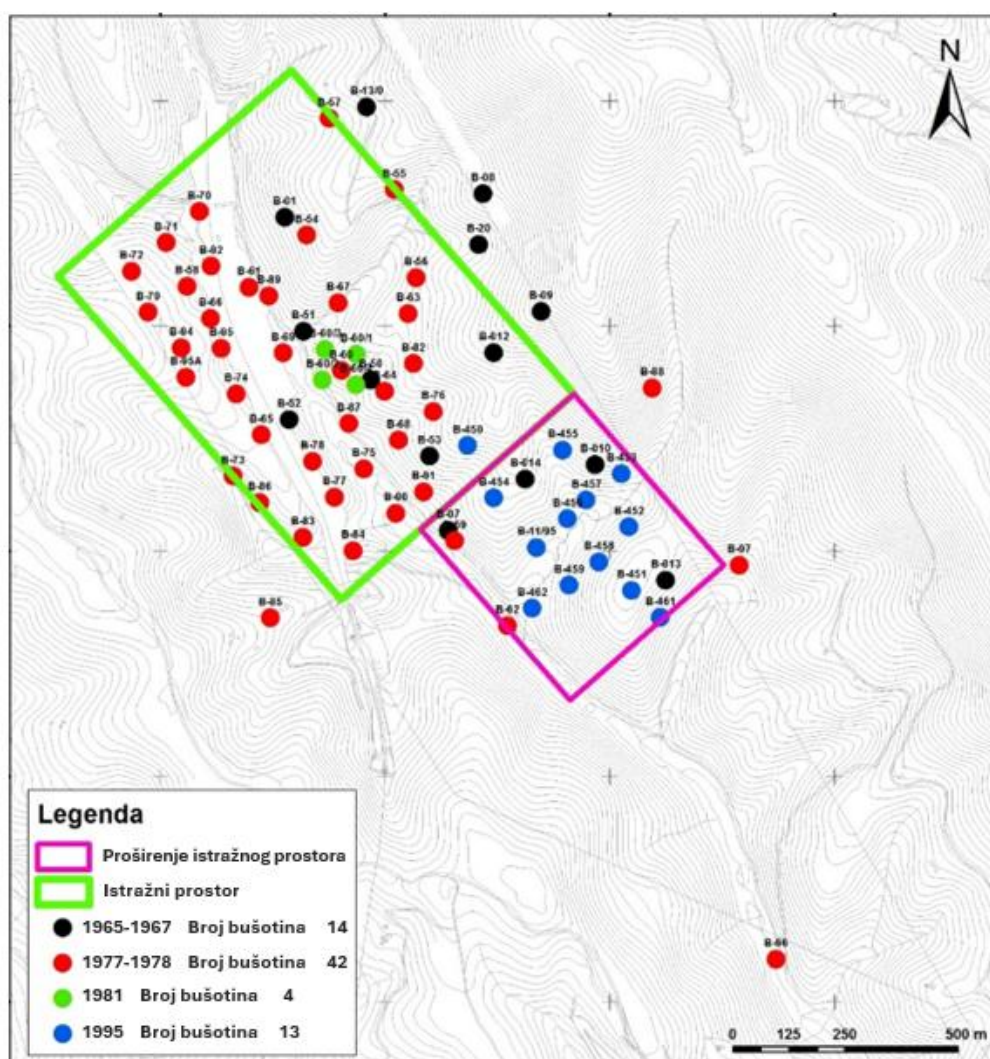
Ležište koje je korišćeno za empirijsku primenu razvijenog hibridnog modela pripada grupi porfirskih ležišta velikih dimenzija. Mineralizacija bakra razvijena je u zoni izgrađenoj pretežno od hidrotermalno izmenjenih andezita, dužine približno 1,5 km i maksimalne širine oko 600 m, dok se prosečna širina kreće u rasponu od 400 do 500 m. Zona mineralizacije pruža se u pravcu istok–severoistok. U horizontalnoj projekciji ležište ima približno ovalan oblik, izdužen u pravcu SSZ–JJJ, dok u vertikalnoj projekciji pokazuje nepravilnu geometriju i zaleže ispod kote –100 m.

5.1.1. Istražni radovi na prostoru ležišta

Na području analiziranog ležišta bakra, istražno bušenje rađeno je u 4 vremenski različite etape (faze):

- Prva etapa obuhvata bušotine bušene u periodu od 1965. do 1967. godine;
- Druga etapa obuhvata bušotine izbušene u periodu 1977. do kraja 1978. godine;
- Treća etapa obuhvata bušotine bušene sa površine, 1981. godine;
- Četvrta etapa obuhvata bušotine sa površine, bušene u toku 1995. godine.

Tokom ovog perioda od tri decenije, izbušene su ukupno 73 vertikalne bušotine sa površine terena, sa ukupnom dužinom bušenja od 34.669,30 m. Raspored bušotina menjao se kroz faze, od relativno retke mreže u prvoj fazi do znatno gušće mreže tokom druge faze (1977–1978), kada su izbušene 42 bušotine u cilju definisanja geometrije i prostiranja mineralizacije. Bušotine su distribuirane u nepravilnu mrežu koja varira od približno 50×50 m do 150×100 m, uzimajući u obzir topografiju terena i geološku kompleksnost. Položaj istražnih bušotina po fazama istraživanja prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1. Položaj istražnih bušotina na istražnom prostoru analiziranog ležišta

Sve bušotine su vertikalne i uporedo sa geološkim kartiranjem jezgra bušotine, uzimane su pojedinačne probe po čitavoj dužini bušotina, osim intervala za koje je kartiranjem utvrđeno da nisu mineralizovani. Dužinski intervali oprobavanja jezgra iz bušotina bili su: 2 m, 5 m i 10 m. Svaka pojedinačna proba analizirana je na Cu, dok su sjedinjavanjem pojedinačnih proba sa dužinskih intervala od 10 m, 15 m i 20 m, formirane kompozitne probe koje su analizirane na Au, Ag.

Podaci prikupljeni iz bušotina obuhvataju:

- analitičke rezultate sadržaja korisnih elemenata (Cu, Au, Ag),
- prirodu i svojstva stena,
- litološke intervale,
- prostorne koordinate i vertikalne profile.

Ovi podaci korišćeni za kreiranje prostorne baze podataka, uz standardizovanu kontrolu kvaliteta uzoraka (QA/QC), i predstavljali su osnovu za dalju geostatističku obradu i modeliranje.

5.1.2. Geološki blok model ležišta i procena resursa

Na osnovu prostorne baze podataka iz istražnih bušotina izrađen je **3D blok model ležišta**, korišćenjem softverskog paketa GEOVIA SURPAC™ [324].

Model je projektovan sa miniblokovima dimenzija $15 \times 15 \times 15$ m. Visina miniblokova je usklađena sa projektovanom vertikalnom podelom površinskog otkopavanja na etaže, odgovarajućim rudarsko-tehničkim parametrima i eksploatacionom tehnologijom predviđenom za ovaj tip kopa. S obzirom da se radi o površinskom otkopavanju (open-pit), dimenzije mini blokova odabrane su tako da omoguće dovoljnu prostornu rezoluciju za geostatističku procenu sadržaja metala, a istovremeno da ne generišu preterano veliki broj blokova koji bi smanjili statističku pouzdanost procene i otežali praktičnu integraciju u planiranje površinskog otkopavanja. Odabrana veličina odgovara tipičnoj visini planirane etaže i operativnim parametrima eksploatacione opreme koja je predviđena (bageri i kamioni) [325].

U blok modelu postoji šest (6) varijabli, odnosno atributa koji su prikazani u tabeli 5.1.

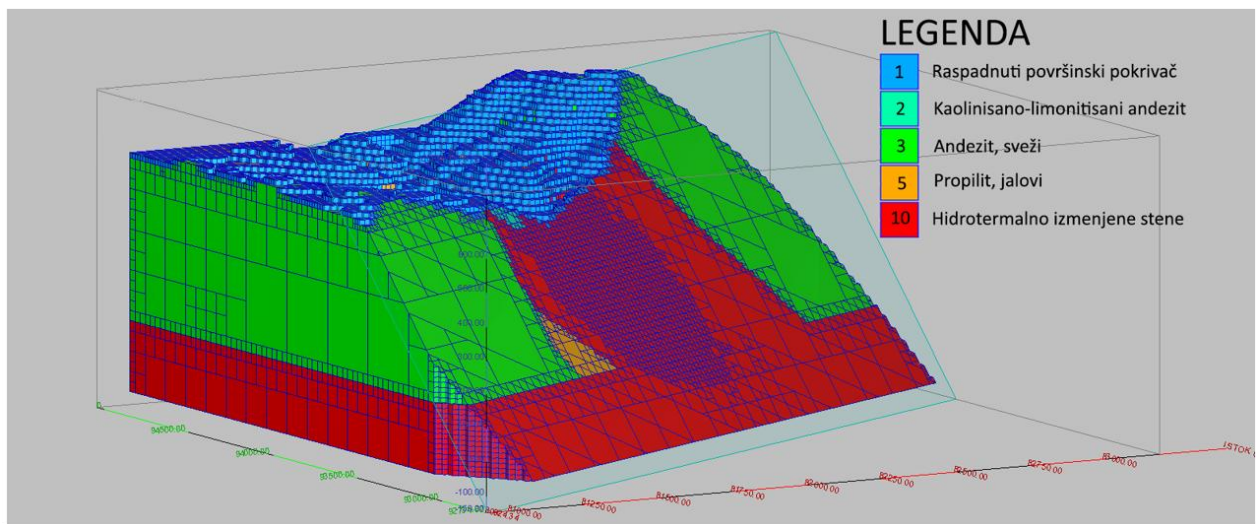
Tabela 5.1. Atributi u blok modelu ležišta

Ime atributa	Tip promenljive	Broj decimala	Pozadinska vrednost
standard_ag	Float	3	0
standard_au	Float	3	0
standard_cu	Float	3	0
standard_cu_ox	Float	2	0
standard_density	Float	3	0
standard_rock_type	Integer	-	0

Varijable standard_ag, standard_au, standard_cu i standard_cu_ox s, nose vrednosti interpoliranog sadržaja srebra, zlata, bakra, oksidnog bakra i sumpora. Variabla standard_density nosi vrednosti zapreminske mase, a standard_rock_type tip stene koji je interpoliran unutar odgovarajućih geoloških domena. U tabeli 5.2 su dati kodovi geoloških domena unutar blok modela, i prikazani su na slici 5.2.

Tabela 5.2. Izdvojeni tipovi geoloških domena u ležištu

Stena	Opis stene	Kod stene u blok modelu	γ (t/m ³)	Opis
AIR	Vazduh	0	0	Vazduh
N	Raspadnuti površinski pokrivač	1	2	Jalovina
KL	Kaolinisano-limonitisani andezit	2	2.5	Jalovina
AN	Andezit, sveži	3	2.5	Jalovina
HIP	Propilit, jalovi	5	2.5	Jalovina
HIS	Hidrotermalno izmenjene stene	10	2.5	Ruda



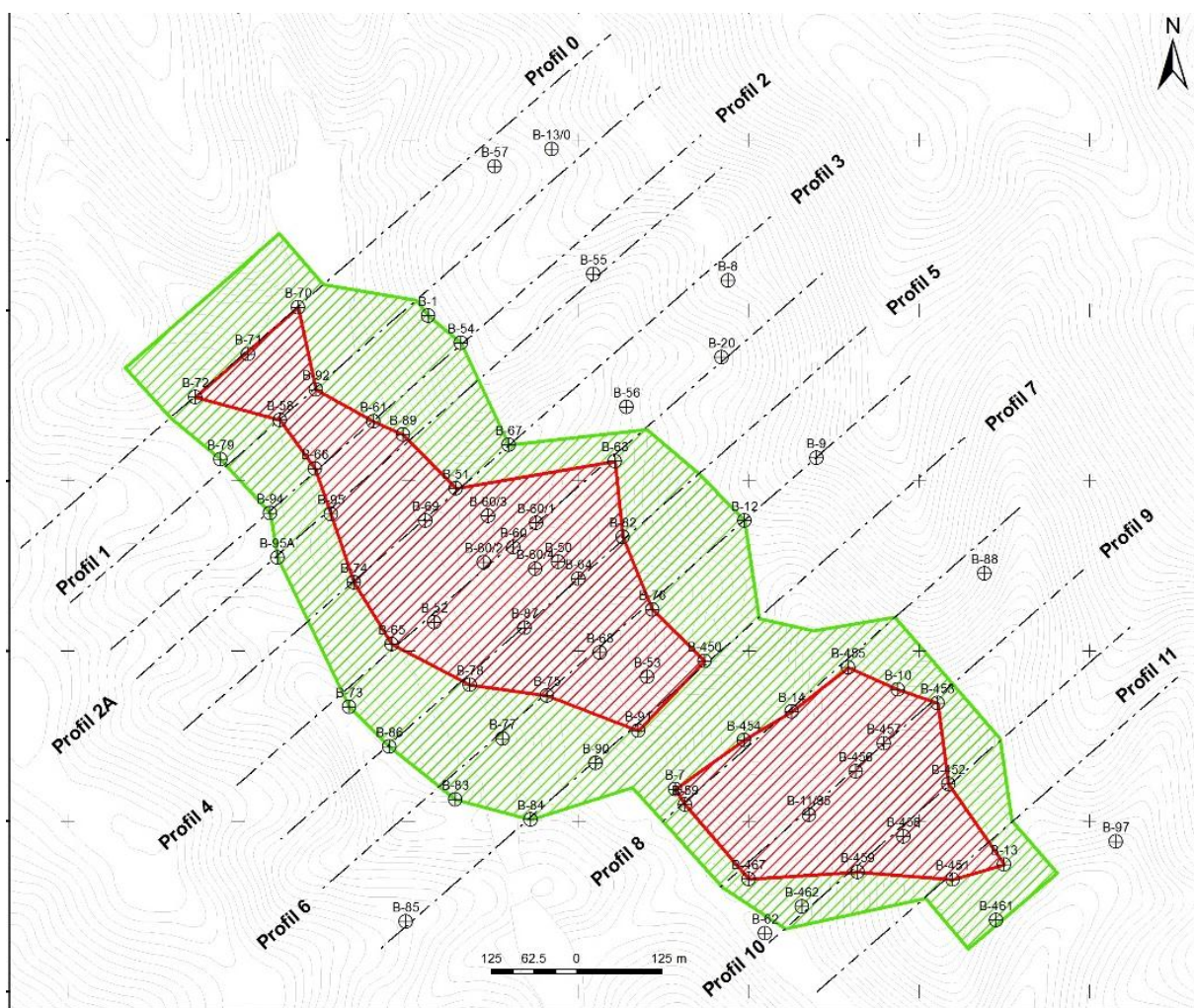
Slika 5.2. Presek kroz geološki blok model ležišta sa litološkim kodovima

Za potrebe procene mineralnih resursa i definisanja rudno-ekonomskih parametara, ležište je podeljeno na dva geološka domena analizom varijacija u distribuciji bakra, zlata i srebra: „Domen 1“ i „Domen 2“. Ovakva podela na domene omogućava preciznije procene kvaliteta i prostiranja mineralizacije unutar različitih strukturnih segmenata ležišta.

Pri izradi procene resursa usvojena je klasifikacija koja je široko primenjena u savremenim standardima (poput JORC [36] ili NI 43-101 [27]), koja razlikuje:

- Measured (Izmereni) resursi — sa visokim stepenom geološke i kvantitativne pouzdanosti,
- Indicated (Indicirani) resursi — sa ograničenim stepenom pouzdanosti uz veći stepen statističke varijabilnosti,
- Inferred (Mogući) resursi — gde postojeći podaci ukazuju na prisutnost mineralizacije, ali prostorna pokrivenost i geološka kontrola nisu dovoljni da se ostvari verodostojna kvantitativna procena.

U okviru predmetnog ležišta, definisani su **Indicated** i **Inferred resursi**, u zavisnosti od stepena prostorne pokrivenosti istražnim radovima i nivoa geološke pouzdanosti procene. Zone sa gušćom mrežom bušotina i boljom prostornom kontrolom klasifikovane su kao Indicated resursi, dok su delovi ležišta sa ređom istražnom mrežom i većim stepenom geološke neizvesnosti svrstani u kategoriju Inferred resursa. Kategorizacija resursa je prikazana na slici 5.3.



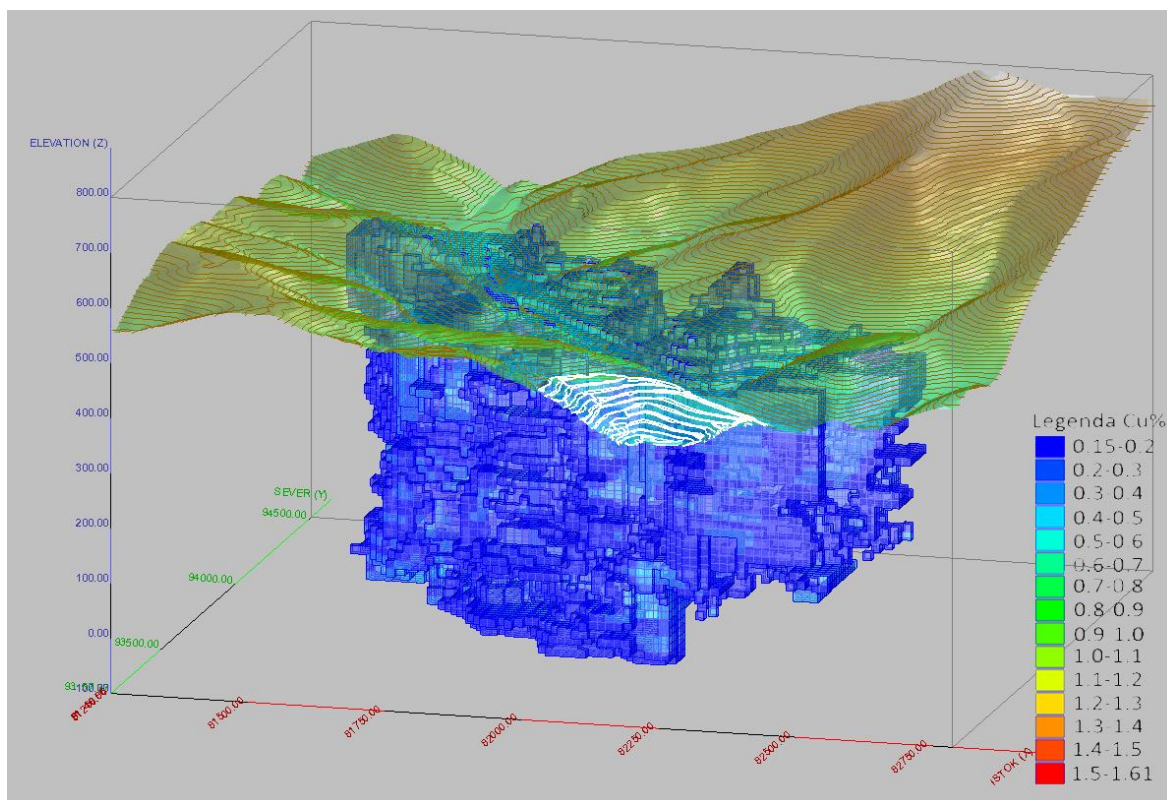
Slika 5.3. Karta kategorizacije resursa na Indicated (zeleni poligon) i Inferred (crveni poligon)

Sadržaji korisnih mineralnih komponenti u blok modelu su procenjeni metodom običnog kriginga. Ukupni geološki resursi su računati u konturi graničnog sadržaja za Cu od 0,15% (cut off), i dati su u tabeli 5.3 prema odgovarajućoj kategoriji. Prosečna zapreminska masa u modelu je 2,5 tona/m³, a prosečan sadržaj bakra iznosi 0,268% (% Cu).

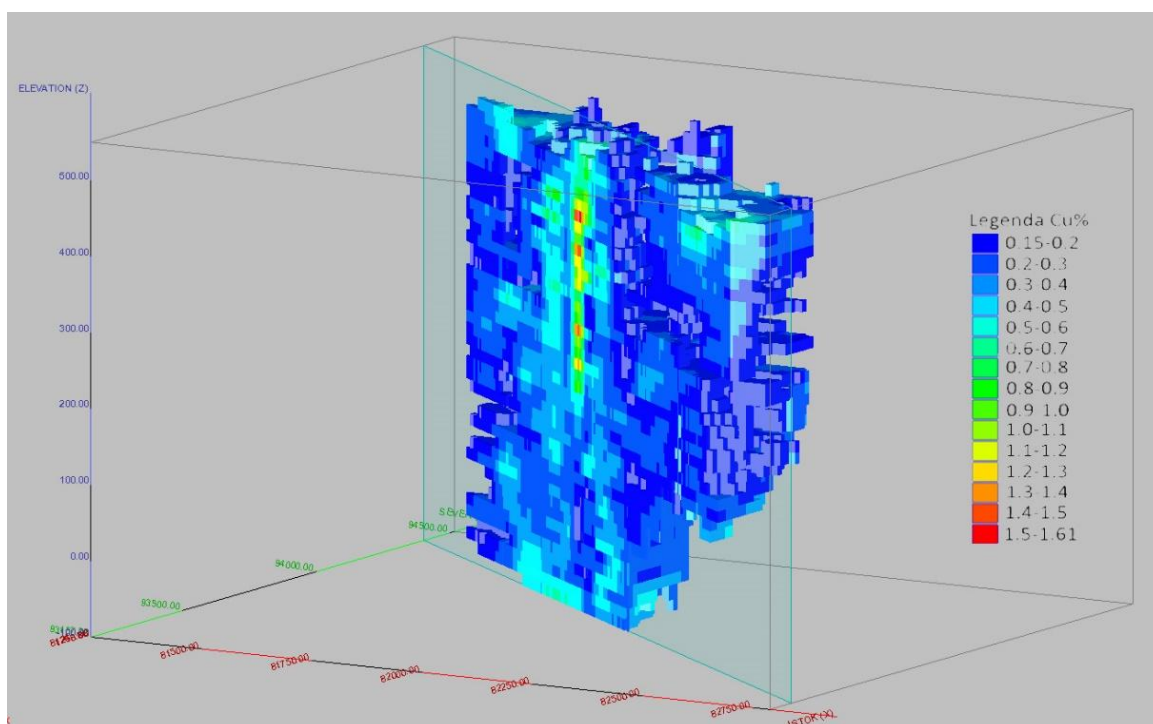
Tabela 5.3. Geološki resursi analiziranog ležišta bakra (Cut off = 0,15% Cu)

Kategorija	Ruda (t)	Bakar (%)	Zlato (g/t)	Srebro (g/t)
Indicated (Indikovani) resursi	273.105.000	0,287	0,141	0,973
Inferred (Mogući) resursi	190.370.000	0,241	0,101	0,675
Indicated + Inferred	463.475.000	0,268	0,125	0,851

Prikaz prostornog položaja analiziranog ležišta sa izdvojenim rudnim blokovima dat je na slici 5.4 i slici 5.5.



Slika 5.4. Prostorni položaj blok modela sa sadržajem Cu% > 0.15%



Slika 5.5. Zahvaćeni blokovi sa sadržajem Cu% > 0.15%, presek po dubini ležišta

Poglavlje 5.1 daje sveobuhvatan opis analiziranog ležišta, sa naglaskom na elemente istražnih radova, klasifikaciju resursa prema međunarodnim standardima i razvoj 3D blok modela, koji predstavlja osnovu za dalju simulaciono-optimizacionu analizu. Izbor ovakvog tipa ležišta za studiju slučaja nije slučajna, jer porfirna ležišta velikih razmera, sa relativno niskim sadržajem metala i izraženom prostornom varijabilnošću, predstavljaju tipičan primer rudarskih sistema kod kojih neizvesnost ima ključan uticaj na ekonomske performanse i donošenje robusnih strateških odluka.

5.2. Deterministički model – formiranje baznog scenarija i definisanje ulaznih parametara optimizacije

U okviru primene razvijenog hibridnog modela upravljanja rizikom, deterministički pristup predstavlja bazni analitički okvir na osnovu kojeg se vrši početna optimizacija granica površinskog kopa, procena eksploatacionih rudnih rezervi, definisanje preliminarne dinamike eksploatacije i vrednovanje ekonomskih performansi projekta, bez eksplicitnog razmatranja neizvesnosti ulaznih parametara. Ovakav pristup zasniva se na prethodno definisanom geološko blok modelu ležišta i skupu fiksnih tehno-ekonomskih parametara, koji omogućavaju kvantifikaciju projektovane vrednosti kroz standardne diskontovane finansijske indikatore, kao što su neto sadašnja vrednost (NPV), interna stopa rentabilnosti (IRR), period povraćaja investicije (PBP) i diskontovani tokovi novca (cash flow) [256].

Deterministički model omogućava sagledavanje osnovne ekonomske isplativosti projekta uz pretpostavku odsustva neizvesnosti u ulaznim parametrima, pri čemu se ulazne promenljive tretiraju kao poznate i nepromenljive veličine. Na taj način moguće je identifikovati relativni uticaj pojedinačnih tehničko-ekonomskih parametara na projektovane ishode optimizacije i definisati referentni scenario razvoja rudarskog projekta. Dobijeni rezultati predstavljaju polaznu osnovu za dalju kvantifikaciju rizika u okviru stohastičkog pristupa, u kojem se varijabilnost ključnih ulaznih faktora eksplicitno modeluje kroz geostatističke simulacije i odgovarajuće distribucije verovatnoće

Optimizacija i procena rezervi su realizovane korišćenjem Geovia Whittle softvera (Dassault Systems) [312], koji u savremenom rudarstvu predstavlja industrijski standard za strateško planiranje površinskih kopova. Na osnovu zadatih parametara softver određuje optimalne konture kopova za procenjene prodajne cene metala na tržištu po kriterijumu maksimalnog profita. U tabeli 5.4 predstavljeni su **osnovne vrednosti tehno-ekonomskih parametara koji se koriste u determinističkom pristupu optimizacije**, zajedno sa objašnjenjem njihove uloge i načina određivanja.

Tabela 5.4. Osnovne vrednosti tehno-ekonomskih parametara optimizacije

Parametar	Vrednost
1) Godišnji kapacitet na eksploataciji rude	10.000.000 t/god
2) Godišnji kapacitet na jalovini	min za 10.000.000 t/rude
3) Generalni uglovi završnih kosina na kopu	37°
4) Koeficijent iskorišćenja ležišta	95%
▪ Eksploatacioni gubici	5%
▪ Razblaženje	5%
5) Proizvodni troškovi	
▪ Troškovi otkopavanja	2,5 USD/t
▪ Troškovi flotacijske prerade rude	5,5 USD/t
6) Metalurški troškovi	
▪ Bakar (Cu)	630 USD/t
▪ Zlato (Au)	160 USD/kg
▪ Srebro (Ag)	15 USD/kg
7) Iskorišćenje metala	
▪ Ukupno iskorišćenje za Bakar (Cu)	
Iskorišćenje u flotacijskoj preradi (84%) x metalurško iskorišćenje (97%):	81,5%
▪ Ukupno iskorišćenje za Zlato (Au)	
Iskorišćenje u flotacijskoj preradi (50%) x metalurško iskorišćenje (93%):	46,5%
▪ Ukupno iskorišćenje za Srebro (Ag)	
Iskorišćenje u flotacijskoj preradi (20%) x metalurško iskorišćenje (93%):	18,6%
8) Prodajna cena metala	
▪ Bakar (Cu katoda)	7.083 USD/t
▪ Zlato (Au)	51.831 USD/kg
▪ Srebro (Ag)	648 USD/kg
9) Diskontna stopa	10%
10) Granični sadržaj Cu u rudi (cut-off)	0,15%
11) Početni investicioni troškovi (CAPEX)	400.000.000 USD

5.2.1. Geometrijski i rudarski parametri

Geometrijski i rudarsko-tehnološki parametri, kao što su ugao završnih kosina, kapacitet proizvodnje koeficijenti iskorišćenja i razblaženja, definisani su na osnovu kombinacije geomehaničkih ispitivanja, analize postojećih tehničkih rešenja na sličnim ležištima i inženjerskih razmatranja optimalne eksploatacije.

U cilju određivanja stabilnih geometrijskih parametara kopa, korišćeni su rezultati geomehaničkih laboratorijskih ispitivanja stena analiziranog ležišta, koji obuhvataju fizičke parametre (zapreminska masa, specifična masa i poroznost), kao i mehaničke karakteristike (jednoosna čvrstoća na pritisak, otpornost na zatezanje, kohezija i ugao unutrašnjeg trenja). Na osnovu ovih parametara, kao i iskustava sa aktivnih površinskih kopova u neposrednom okruženju sa sličnim geološko-geomehaničkim uslovima, usvojen je generalni ugao završne kosine od 37° , koji predstavlja kompromis između stabilnosti kosina i maksimalnog zahvata rude [256].

Kapacitet proizvodnje definisan je na osnovu razmatranja optimalnog veka eksploatacije i principa ekonomije obima, pri čemu je kao referentna vrednost usvojen kapacitet prerade od 10 miliona tona rude godišnje. Ova vrednost predstavlja tehničko-tehnološko ograničenje definisano kapacitetom planiranog postrojenja za preradu i ujedno gornju granicu proizvodnje u determinističkom modelu. Kapacitet otkopavanja jalovine nije unapred fiksiran, već se određuje kroz proces optimizacije, sa ciljem da se obezbedi potrebna godišnja proizvodnja rude uz minimalan obim otkrivke i racionalno dimenzionisanje rudarske opreme [256].

Koeficijent iskorišćenja ležišta i razblaženje definisani su u skladu sa planiranom tehnologijom eksploatacije, koja obuhvata bušenje i miniranje, utovar i transport materijala do postrojenja za preradu ili na odlagalište jalovine. Ovi parametri su međusobno zavisni i određeni su na osnovu iskustava sa sličnih rudarskih operacija, pri čemu usvojene vrednosti odražavaju realne operativne uslove i očekivani nivo gubitaka i razblaženja tokom eksploatacije [256].

5.2.2. Troškovi proizvodnje i prerade

Troškovi proizvodnje i prerade definisani su na osnovu analize realnih operativnih podataka sa aktivnih površinskih kopova i flotacijskih postrojenja sličnog kapaciteta, koji posluju u istom regionalnom okruženju. Kao primarna podloga korišćeni su izveštaji o proizvodnji i troškovima iz prethodnih godina, koji omogućavaju pouzdanu procenu jediničnih troškova po toni iskopanog i prerađenog materijala [256].

Analizom strukture troškova identifikovane su ključne komponente koje utiču na ukupne troškove proizvodnje, uključujući troškove materijala, rada, održavanja opreme, energenata i pomoćnih usluga. Na osnovu sveobuhvatnih podataka izvršeno je svođenje troškova na jedinične vrednosti izražene u USD/t, koje su dalje korišćene kao ulazni parametri u determinističkom modelu.

Posebna pažnja posvećena je razdvajanju troškova eksploatacije i troškova prerade, čime je omogućeno preciznije modelovanje ekonomske vrednosti blokova u optimizacionom procesu. Ovakav pristup obezbeđuje da ulazni troškovi reflektuju realne operativne uslove i predstavljaju pouzdanu osnovu za dalju analizu osetljivosti i stohastičko modelovanje.

Na osnovu sprovedene analize usvojene su reprezentativne vrednosti jediničnih troškova, pri čemu trošak otkopavanja iznosi 2,5 USD/t, dok trošak flotacijske prerade rude iznosi 5,5 USD/t [256].

5.2.3. Iskorišćenja u preradi i metalurgiji

Iskorišćenje metala predstavlja jedan od ključnih parametara koji direktno utiče na ekonomsku vrednost rudnog ležišta, jer određuje količinu metala koja se može izdvojiti iz rude tokom procesa prerade i metalurgije. U determinističkom modelu, ukupno iskorišćenje definisano je kao proizvod iskorišćenja u flotacijskoj preradi i metalurškog iskorišćenja.

Usvojene vrednosti ukupnog iskorišćenja iznose [256]:

- Ukupno iskorišćenje za Bakar (Cu) = Iskorišćenje u flotacijskoj preradi (84%) $\times$ metalurško iskorišćenje (97%) : **81,5%**
- Ukupno iskorišćenje za Zlato (Au) = Iskorišćenje u flotacijskoj preradi (50%) $\times$ metalurško iskorišćenje (93%): **46,5%**
- Ukupno iskorišćenje za Srebro (Ag) = Iskorišćenje u flotacijskoj preradi (20%) $\times$ metalurško iskorišćenje (93%): **18,6%**

Ove vrednosti definisane su na osnovu tipičnih tehnoloških performansi za porfirna ležišta, kao i u skladu sa projektovanom šemom prerade u kojoj je primarni cilj maksimalna koncentracija bakra kao glavnog nosioca ekonomske vrednosti projekta.

Visoko iskorišćenje bakra rezultat je činjenice da se bakarni minerali efikasno izdvajaju flotacijom, uz optimizovane parametre procesa kao što su granulacija mlevenja, izbor reagenasa i pH vrednost pulpe. Nasuprot tome, zlato i srebro se u ovom sistemu javljaju kao prateći elementi, čije je iskorišćenje značajno niže usled njihove mineraloške asocijacije i ograničenog stepena oslobađanja.

Deo plemenitih metala ostaje vezan u jalovini ili je prisutan u formama koje nisu podložne flotaciji u okviru primarnog procesa, dok se dodatni gubici javljaju u metalurškoj fazi, iako je metalurško iskorišćenje relativno visoko (93–97%). Iz tog razloga, ukupna iskorišćenja zlata i srebra ostaju značajno niža u odnosu na bakar.

Usvojene vrednosti iskorišćenja reflektuju realne tehnološke uslove i kompromis između maksimalizacije prihoda od bakra i ograničenja u ekstrakciji pratećih metala, te predstavljaju pouzdanu osnovu za determinističku optimizaciju. U stohastičkom modelu, ovi parametri su predmet dodatne analize kroz varijabilnost tehnoloških performansi.

5.2.4. Prodajna cena metala

Prodajne cene metala predstavljaju jedan od ključnih ekonomskih parametara u procesu optimizacije, jer direktno utiču na vrednost rudnih blokova i konačne granice površinskog kopa. U determinističkom modelu, cene metala usvojene su kao konstantne vrednosti, definisane na osnovu analize istorijskog kretanja tržišnih cena.

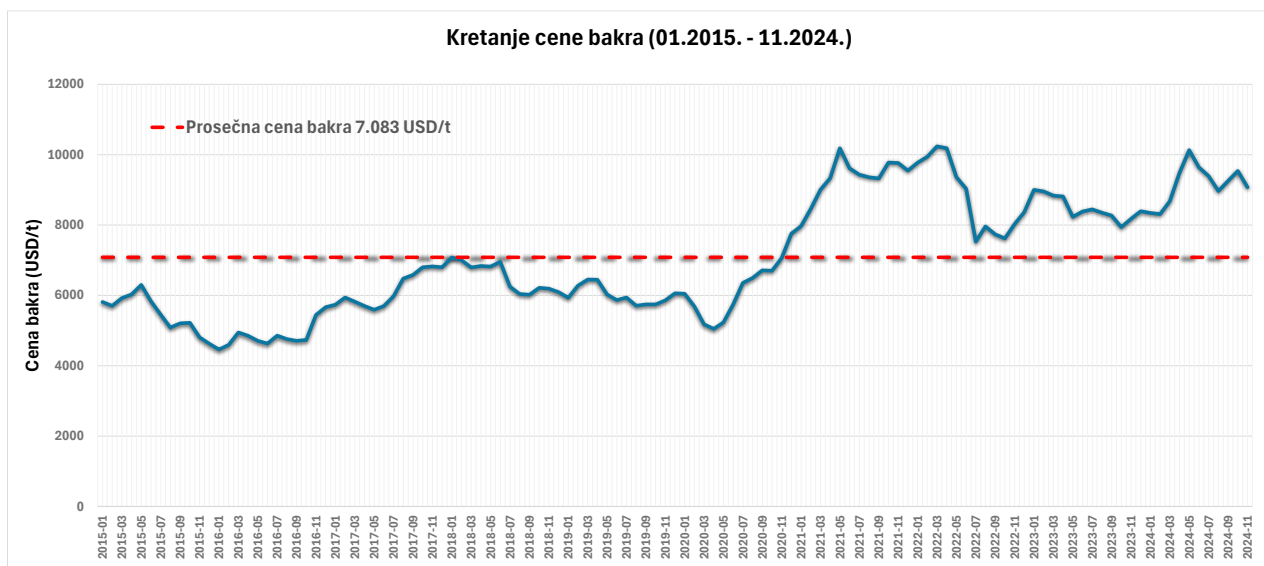
U cilju dobijanja reprezentativnih vrednosti, izvršena je analiza kretanja cena bakra, zlata i srebra u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine, čime je obuhvaćen desetogodišnji vremenski interval koji uključuje različite tržišne cikluse (rast, pad i stabilizaciju cena). Na osnovu ove analize, usvojene su prosečne vrednosti cena koje reflektuju dugoročni tržišni trend i umanjuju uticaj kratkoročnih oscilacija [256].

Usvojene prodajne cene metala u determinističkom modelu iznose [256]:

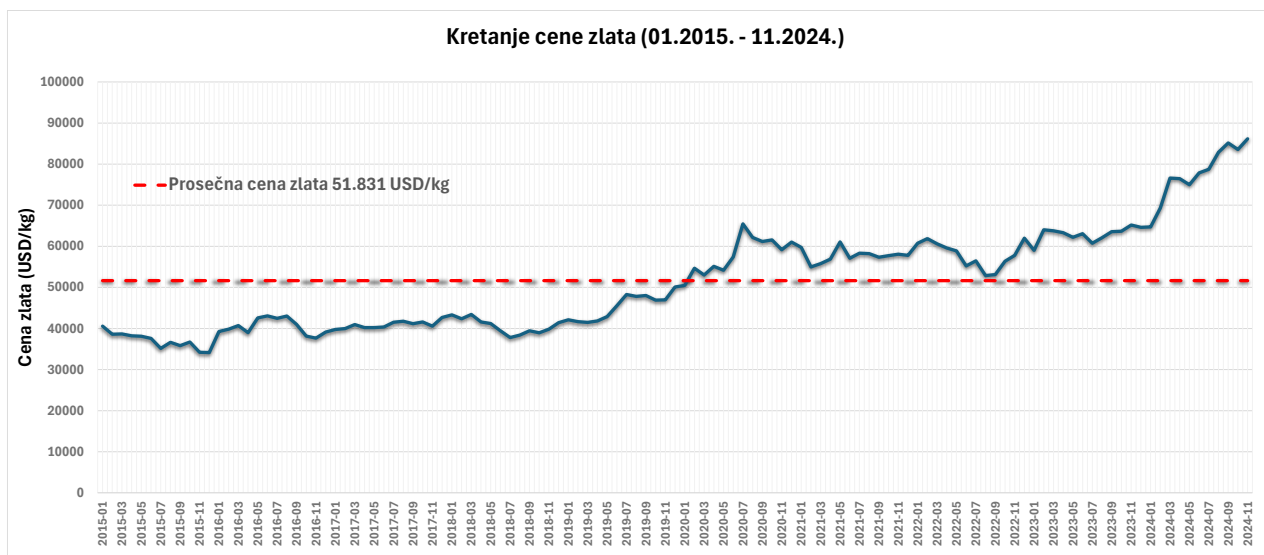
- Bakar (Cu): 7.083 USD/t
- Zlato (Au): 51.831 USD/kg
- Srebro (Ag): 648 USD/kg

Grafički prikaz istorijskog kretanja cena metala dat je na slikama od 5.6 do 5.8, na osnovu kojih se može uočiti značajna fluktuacija tržišta, naročito u slučaju bakra i srebra, dok zlato pokazuje stabilniji dugoročni trend uz izražene ciklične promene.

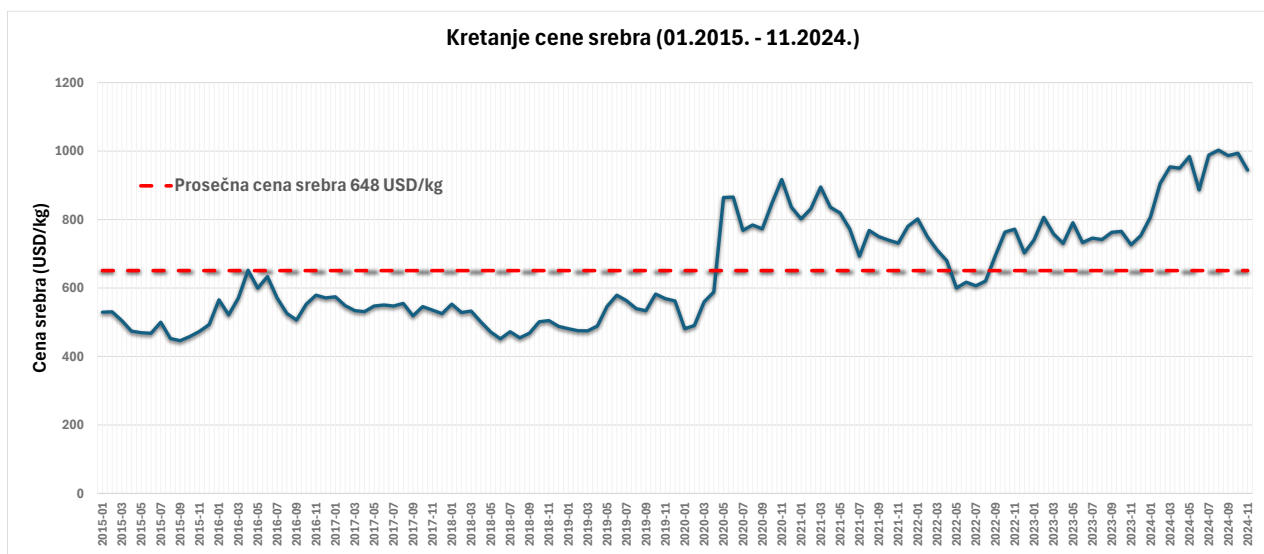
Usvajanje prosečnih vrednosti u determinističkom pristupu omogućava definisanje referentnog ekonomskog scenarija, koji služi kao osnova za optimizaciju granica kopa i procenu isplativosti projekta. Međutim, s obzirom na izraženu varijabilnost tržišnih cena, u okviru stohastičkog modela biće sprovedena dodatna analiza njihove neizvesnosti, kroz modelovanje budućih kretanja cena i generisanje odgovarajućih distribucija verovatnoće.



Slika 5.6. Kretanje cene bakra (USD/t) u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine



Slika 5.7. Kretanje cene zlata (USD/kg) u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine



Slika 5.8. Kretanje cene srebra (USD/kg) u periodu od januara 2015. do novembra 2024. godine

5.2.5. Granični sadržaj bakra u rudi (cut-off grade)

Granični sadržaj bakra u rudi (cut-off grade) predstavlja jedan od ključnih tehno-ekonomskih parametara u determinističkom modelu, jer definiše granicu između materijala koji se tretira kao ruda i materijala koji se klasifikuje kao jalovina u procesu optimizacije površinskog kopa. U okviru ove studije slučaja usvojen je cut-off od 0,15% Cu, koji je prethodno korišćen i pri proceni resursa, a zadržan je i u fazi determinističke optimizacije kao referentna operativna vrednost [256].

Iako je u teoriji optimizacije rudarskih projekata poznato da promena cut-off politike može predstavljati važan instrument za maksimizaciju neto sadašnje vrednosti projekta, u analiziranom slučaju prostor za takvu optimizaciju je ograničen. Razlog za to leži prvenstveno u prirodi ležišta i tehnološkim ograničenjima prerade. Ležište karakteriše relativno nizak prosečan sadržaj bakra (0,276% Cu), što samo po sebi sužava interval ekonomski održivih cut-off vrednosti i smanjuje fleksibilnost u odvajanju rude različitog kvaliteta kroz duži vremenski period [256].

Dodatno ograničenje predstavlja činjenica da se u ovom slučaju ne primenjuje dugoročno deponovanje rude nižeg sadržaja (stockpiling) radi naknadne prerade ili optimizacije kvaliteta sirovine. Za sulfidne rude bakra, dugotrajno odlaganje na deponiji može dovesti do oksidacije površine minerala, što negativno utiče na proces flotacije i smanjuje iskorišćenje bakra. U studiji Tavares i saradnika [326], za niskosadržajnu sulfidnu rudu bakra pokazano je da su površinska oksidacija i stepen oslobađanja glavna dva faktora koji negativno utiču na iskorišćenje bakra, dok su procenjena iskorišćenja za deponovanu rudu bila niža nego za svežu rudu. Takođe, u literaturi je pokazano da dugotrajno stockpiling može dovesti do značajnog pada iskorišćenja usled oksidacije sulfidnih minerala [326].

U konkretnom slučaju, dodatni razlog za izbegavanje stockpiling strategije predstavlja prisustvo oksidne rude bakra, kao i sklonost sulfidne rude ka oksidaciji tokom stajanja, što može pogoršati selektivnost flotacije, povećati potrošnju reagensa i umanjiti ukupne metalurške performanse. Srodna istraživanja potvrđuju da oksidacija usporava kinetiku flotacije i dovodi do gubitka selektivnosti, pri čemu deo korisnih minerala prelazi u neflotabilnu frakciju (jalovinu) [327].

Iz navedenih razloga, u ovom radu cut-off nije tretiran kao dinamička promenljiva niti kao predmet posebne optimizacije kroz vreme, već kao fiksni operativni kriterijum. Strategija maksimizacije NPV-a zato se ne zasniva na dugoročnom stockpiling-u rude nižeg sadržaja, već pre svega na optimizaciji granica kopa i dinamici eksploatacije, pri čemu se u ranim fazama eksploatacije prioritet daje delovima ležišta sa višim sadržajem bakra radi bržeg povraćaja investicije i povećanja ekonomske vrednosti projekta.

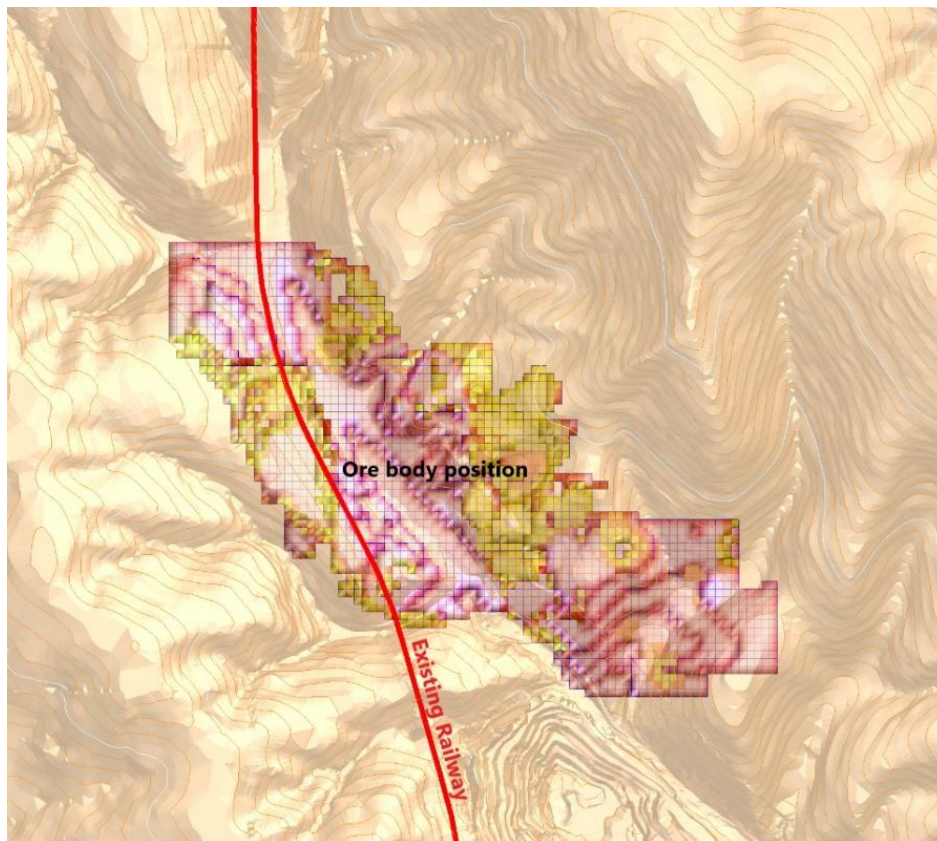
U skladu sa tim je usvojen granični sadržaj od 0,15% Cu i kao takav predstavlja stabilnu osnovu za determinističku optimizaciju, dok se stohastički deo modela fokusira na varijabilnost geoloških i tehno-ekonomskih parametara, a ne na promenu same cut-off politike [256].

5.2.6. Početni investicioni troškovi (CAPEX) i diskontna stopa

Početni investicioni troškovi (CAPEX) u determinističkom modelu usvojeni su u iznosu od 400 miliona USD. Ova vrednost definisana je na osnovu raspoložive tehničke i projektne dokumentacije za analizirano ležište, uz dopunsko oslanjanje na dokumentaciju i iskustvene pokazatelje sa obližnjih ležišta bakra, sličnog kapaciteta i uporedive tehnološke šeme eksploatacije i prerade [256]. Prilikom definisanja CAPEX-a uzete su u obzir ključne grupe ulaganja:

- infrastrukturni radovi,
- rudarska oprema,
- mašinska radionica sa opremom,
- postrojenje za flotacijsku preradu i
- nematerijalna ulaganja.

Posebno značajan faktor u strukturi početnih ulaganja predstavlja potreba za izmeštanjem postojeće železničke pruge, koja se nalazi u neposrednoj zoni buduće eksploatacije i predstavlja jedno od glavnih prostorno-infrastrukturnih ograničenja razvoja projekta. Položaj postojeće železničke pruge (existing railway) u odnosu na analizirano rudno telo (ore body) prikazan je na slici 5.9. Upravo zbog toga, infrastrukturna ulaganja u ovom slučaju imaju izražen udeo u ukupnom CAPEX-u, zbog čega procena mora biti zasnovana na konkretnoj projektnoj dokumentaciji i analognim projektima, a ne na opštim troškovnim pokazateljima [256].



Slika 5.9. Položaj postojeće železničke pruge (existing railway) u odnosu na rudno telo (ore body) [256]

Struktura početnih investicionih ulaganja prikazana je u tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Struktura početnih investicionih ulaganja [256]

Investiciona kategorija	Vrednost USD \$
Infrastrukturni radovi	155.000.000
▪ Otkup zemljišta i odštete	20.000.000
▪ Izmeštanje reke kroz tunel, 1400 m	2.000.000
▪ Betonski kolektora za reku, 1400 m	1.000.000
▪ Izmeštanje pruge, 3850m	120.000.000
▪ Izmeštanje dalekovoda	3.000.000
▪ Trafo podstanica za Rudnik	2.000.000
▪ Trafo podstanica za PMS	2.000.000
▪ Priprema terena za odlagalište i regulisanje vodotokova	2.000.000
▪ Postrojenje za prečišćavanje rudničkih voda	3.000.000
Rudarska oprema	135.000.000
Mašinska radionica sa opremom	10.000.000
Postrojenje za flotacijsku preradu	80.000.000
Nematerijalna ulaganja	20.000.000
Ukupno	400.000.000

Usvojena vrednost CAPEX-a zato ne predstavlja uprošćen globalni benchmark, već rezultat lokalno uslovljene procene zasnovane na konkretnim tehničkim rešenjima i analognim projektima iz istog rudarskog regiona. Takav pristup je metodološki opravdaniji od primene univerzalnih svetskih pokazatelja, jer bolje odražava realne investicione zahteve analiziranog projekta. Sličan pristup korišćenja istorijskih, empirijskih i analognih podataka za definisanje ključnih ekonomskih ulaza već je primenjen i u prethodnim analizama površinskih kopova bakra uporedive veličine i tehnologije [256] [328].

Diskontna stopa u determinističkom modelu usvojena je u iznosu od 10%. Izbor diskontne stope od 10% zasniva se na uobičajenoj praksi vrednovanja rudarskih projekata, gde se diskontne stope najčešće kreću u rasponu od 8% do 12%, u zavisnosti od faze razvoja projekta, nivoa geološke i tržišne neizvesnosti, kao i dužine eksploatacionog veka [256] [328] [329].

U okviru ovog istraživanja usvojena je srednja vrednost navedenog raspona (10%), koja predstavlja kompromis između troška kapitala i projektno specifičnog rizika. Ova stopa u pravilu obuhvata ponderisani trošak kapitala (WACC) uvećan za premiju rizika karakterističnu za rudarske projekte [329].

Dodatno, imajući u vidu dug vremenski horizont eksploatacije, primena znatno viših diskontnih stopa mogla bi dovesti do potcenjivanja ekonomske vrednosti projekta usled prekomernog diskontovanja novčanih tokova u kasnijim fazama eksploatacije, što je posebno izraženo kod rudarskih projekata sa dugim vekom eksploatacije [330]. Sa druge strane, niže diskontne stope ne bi adekvatno reflektovale nivo investicionog rizika karakterističan za rudarsku industriju, koja se odlikuje visokom kapitalnom intenzivnošću i dugim periodom povraćaja investicije [330].

Usvojena vrednost od 10% stoga predstavlja realnu i konzervativno utemeljenu osnovu za determinističku procenu ekonomske opravdanosti projekta, uz obezbeđivanje uporedivosti sa drugim rudarskim projektima analiziranim u okviru studija izvodljivosti [256].

U okviru razvijenog hibridnog modela, diskontna stopa se tretira kao deterministički parametar i nije predmet stohastičkog modelovanja. Ovakav pristup je usvojen imajući u vidu da diskontna stopa predstavlja sveobuhvatni pokazatelj troška kapitala i nivoa rizika projekta, koji se u praksi definiše na osnovu tržišnih uslova, finansijske strukture i investicionih kriterijuma, a ne kao rezultat slučajne varijabilnosti. Stoga se njena promena u okviru modela ne razmatra kroz raspodele verovatnoće [256].

5.3. Analiza osetljivosti ključnih parametara

U cilju identifikacije ključnih ulaznih parametara koji imaju dominantan uticaj na ekonomsku vrednost projekta, u okviru determinističkog modela sprovedena je analiza osetljivosti. Ova analiza omogućava kvantifikaciju uticaja pojedinačnih promenljivih na osnovne ekonomske pokazatelje (NPV, IRR i period povraćaja investicije), kao i rangiranje parametara prema njihovom značaju.

Analiza osetljivosti sprovedena je variranjem pojedinačnih ulaznih parametara u definisanom opsegu, dok su ostali parametri zadržani na referentnim (baznim) vrednostima. Za potrebe ove analize razmatran je interval promene od -20% do +20% u odnosu na bazni scenario, čime su obuhvaćene moguće varijacije u ključnim tehničko-ekonomskim pretpostavkama projekta.

U okviru analize razmatrane su sledeće grupe parametara:

- Početni investicioni troškovi (CAPEX)
- Prodajna cena bakra, kao dominantnog nosioca prihoda projekta
- Prosečan sadržaj metala u rudi, pri čemu je varijacija definisana kroz odstupanja u proceni sadržaja u blok modelu (npr. $\pm 10\%$), čime se indirektno simulira efekat geološke neizvesnosti
- Operativni troškovi, definisani kao zbir troškova otkopavanja i troškova prerade rude
- Ukupno iskorišćenje metala, koje obuhvata kombinovani efekat iskorišćenja u flotacijskoj preradi i metalurškom procesu

Variranje prosečnog sadržaja metala predstavlja poseban aspekt analize, jer omogućava sagledavanje uticaja potencijalnih grešaka u proceni kvaliteta ležišta na ekonomsku vrednost projekta, što je od posebnog značaja u ranim fazama razvoja rudarskih projekata.

Sa druge strane, pojedini parametri, kao što su koeficijent iskorišćenja ležišta, razblaženje rude i troškovi prodaje, nisu uključeni u analizu osetljivosti, jer je preliminarnom analizom utvrđeno da njihov uticaj na ekonomske pokazatelje nije dominantan u odnosu na prethodno navedene faktore.

Rezultati analize osetljivosti biće prikazani i interpretirani u okviru *poglavlja 6.2*, zajedno sa rezultatima determinističkog i stohastičkog modela, kako bi se omogućilo njihovo direktno poređenje i identifikacija ključnih izvora rizika u projektu.

Na osnovu dobijenih rezultata identifikuju se parametri sa dominantnim uticajem na ekonomsku vrednost projekta, koji predstavljaju ključne nosioce rizika. Ovi parametri imaju značajnu ulogu u definisanju mera tretmana rizika, kao i u eventualnom unapređenju modela kroz iterativni proces, u kojem se nakon primene odgovarajućih kontrolnih mera vrši ponovno vrednovanje projekta.

5.4. Stohastički simulaciono-optimizacioni model

Deterministički pristup, primenjen u prethodnim fazama analize, omogućava definisanje referentnog scenarija razvoja rudarskog projekta, ali ne obuhvata varijabilnost ključnih ulaznih parametara koji su u realnim uslovima podložni značajnoj neizvesnosti.

U okviru sprovedene analize osetljivosti identifikovani su parametri sa dominantnim uticajem na ekonomsku vrednost projekta, čime su definisani prioriteti za njihovo uključivanje u stohastički model. Takođe, rezultati analize osetljivosti služe kao podrška u donošenju krajnjih odluka.

Iz tog razloga, u nastavku istraživanja uvodi se stohastički pristup, kojim se varijabilnost ključnih ulaznih parametara eksplicitno modeluje kroz odgovarajuće raspodele verovatnoće, čime se omogućava generisanje većeg broja mogućih scenarija razvoja projekta [256].

Za razliku od determinističkog modela, koji daje jedinstveno optimalno rešenje, stohastički pristup podrazumeva generisanje skupa alternativnih realizacija modela, pri čemu svaka realizacija predstavlja kombinaciju geoloških i tehno-ekonomskih uslova definisanih kroz odgovarajuće ulazne parametre.

U okviru ovog istraživanja razvijen je stohastički simulaciono-optimizacioni model koji integriše [256]:

- geološku neizvesnost, modelovanu primenom geostatističkih simulacija,
- tehno-ekonomsku neizvesnost, modelovanu primenom Monte Carlo simulacije.

Na taj način formira se skup realizacija ekonomskog blok modela, koji predstavljaju ulaz za optimizaciju površinskog kopa, čime se obezbeđuje konzistentna primena modela u uslovima varijabilnih ulaznih parametara [256].

Dobijeni skup realizacija i pripadajućih optimizacionih rešenja predstavlja osnovu za dalju analizu i kvantifikaciju rizika, koja je predmet narednog poglavlja [256].

5.4.1. Identifikacija i izbor stohastičkih parametara

Identifikacija parametara uključenih u stohastičko modelovanje zasniva se na njihovom direktnom uticaju na ekonomsku vrednost blokova i ukupne performanse projekta. U tom smislu, izbor parametara izvršen je na osnovu njihove uloge u formiranju ekonomskog rezultata, pri čemu su obuhvaćene promenljive koje imaju dominantan uticaj na vrednost projekta i koje su u realnim uslovima podložne značajnoj varijabilnosti.

Polazeći od strukture ekonomskog blok modela, izdvojeni parametri grupisani su u tri osnovne kategorije [256]:

- **geološki parametri**, koji definišu kvalitet i prostornu raspodelu mineralizacije,
- **tehnološki parametri**, koji se odnose na efikasnost eksploatacije i prerade,
- **ekonomski parametri**, koji obuhvataju tržišne i troškovne uslove poslovanja.

Geološka komponenta neizvesnosti uključena je u model kroz prethodno generisane realizacije sadržaja metala, čime je obezbeđeno da se prostorna varijabilnost ležišta implicitno prenese u dalji tok analize.

U okviru tehno-ekonomskih parametara, kao stohastičke promenljive definisani su oni parametri koji direktno utiču na vrednost projekta i čije promene mogu dovesti do značajnih odstupanja ekonomskih pokazatelja.

U tu grupu spadaju [247]:

- prodajne cene metala (Cu, Au, Ag),
- operativni troškovi (troškovi otkopavanja i prerade),
- iskorišćenje u ležištu (mining recovery),
- iskorišćenje metala u preradi i metalurgiji (za Cu, Au i Ag),
- troškovi prodaje metala (za Cu, Au i Ag),
- početni investicioni troškovi (CAPEX).

Na ovaj način obuhvaćen je kompletan lanac transformacije mineralnog resursa u tržišni proizvod, čime je obezbeđeno da stohastički model obuhvati sve ključne izvore varijabilnosti koji utiču na ekonomski ishod projekta.

5.4.2. Geostatističke simulacije analiziranog ležišta bakra

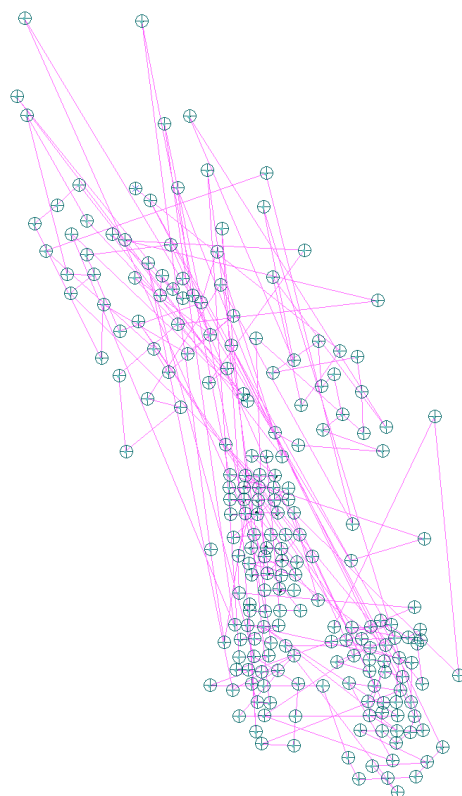
Deterministička procena ležišta, sprovedena primenom metode krigovanja, rezultira jedinstvenim blok modelom koji predstavlja optimalnu procenu u smislu minimalne varijanse greške, zasnovanu na raspoloživim podacima i definisanoj prostornoj korelaciji. Mana ovog pristupa je to što veštački ujednačava vrednosti, pa model izgleda stabilnije i pravilnije nego što je to u stvarnosti. Samim tim se ne omogućava eksplicitno sagledavanje geološke neizvesnosti.

U cilju prevazilaženja ovog ograničenja, u okviru razvijenog hibridnog modela primenjene su geostatističke simulacije, koje omogućavaju generisanje većeg broja podjednako verovatnih realizacija ležišta. Svaka realizacija predstavlja mogući geološki scenario koji je konzistentan sa raspoloživim podacima i prirodnim zakonitostima po kojima se sadržaj rude menja u prostoru. Na taj način, umesto jedinstvene procene, dobija se skup modela koji kvantifikuju neizvesnost u raspodeli sadržaja mineralnih komponenti.

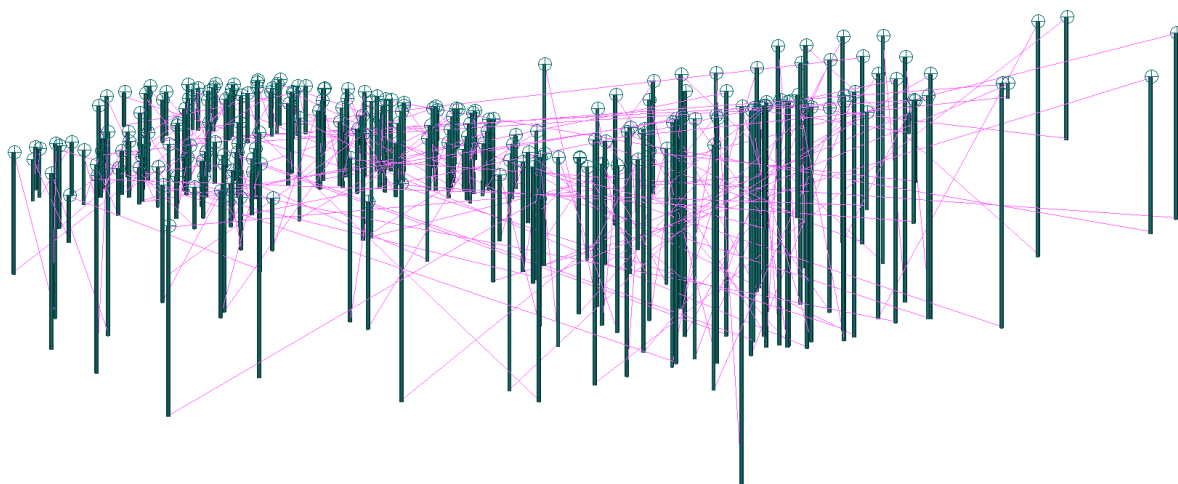
U okviru ovog istraživanja, geostatističke simulacije predstavljaju početni korak u razvoju stohastičkog modela, na koji se dalje nadovezuje modelovanje tehno-ekonomskih parametara i generisanje većeg broja mogućih scenarija, koji čine osnovu za optimizaciju i analizu rizika u strateškom planiranju površinskih kopova.

5.4.2.1. Metodologija geostatističkih simulacija

Ulazni podaci za simulaciju predstavljeni su kompozitnim uzorcima bakra (Cu) dužine 5 m, definisanim u prethodnim fazama modeliranja ležišta. Kompozitovanje podataka izvršeno je sa ciljem homogenizacije uzoraka i obezbeđenja konzistentnosti u prostornoj analizi. Podaci o kompozitima su organizovani u obliku objedinjenog 3D niza (stringa) koji služi kao primarni izvor informacija za procenu. Ovaj stirng je prikazan na slici 5.10 u planu i na 5.11 u 3D prostoru.



Slika 5.10. Prikaz string fajla kao nosilaca podataka o kompozitima unutar ležišta (prikaz u planu)

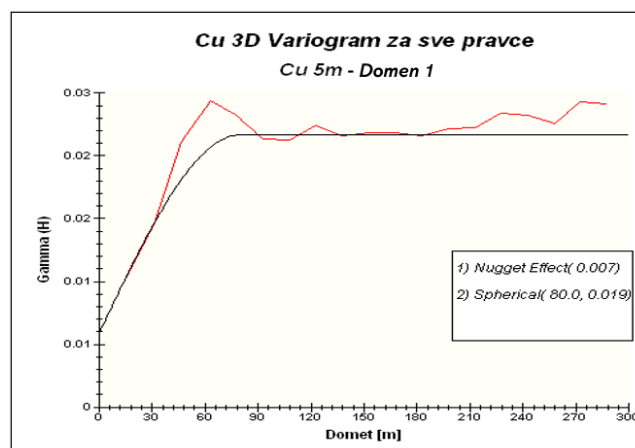


Slika 5.11. Prikaz string fajla kao nosilaca podataka o kompozitima unutar ležišta (3D prikaz)

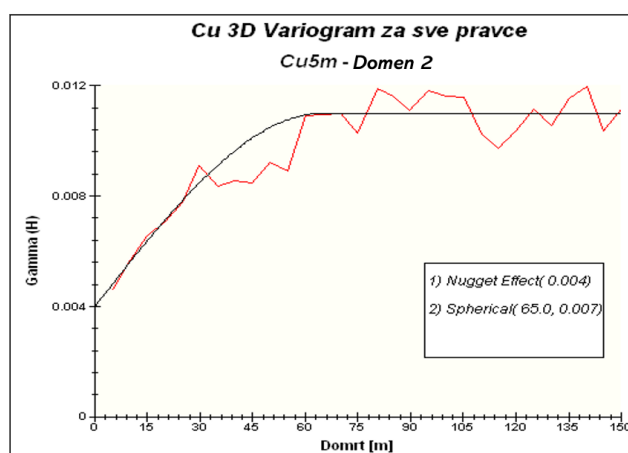
Prostorna raspodela kompozitnih uzoraka ukazuje na neujednačenu gustinu istražnih radova, sa većom koncentracijom podataka u centralnim delovima ležišta i redom mrežom u perifernim zonama, što ima direktan uticaj na nivo procenjene neizvesnosti u simulacionom modelu.

Simulacije su sprovedene primenom metode *Sekvencijalne Gaussove simulacije (Sequential Gaussian Simulation – SGS)*. Pre sprovođenja simulacija, ulazni podaci su transformisani u normalni raspored, čime je omogućena primena Gaussovog modela simulacije. Ova transformacija eliminiše uticaj asimetrije i omogućava očuvanje prostornog kontinuiteta mineralizacije tokom procesa simulacije.

Variogramski model korišćen u simulacijama zasnovan je na prethodno definisanim variogramima iz determinističke procene ležišta, koji su prikazani na slici 5.12 i slici 5.13.



Slika 5.12. Eksperimentalni i teorijski variogram za bakar (Cu) – Domen 1



Slika 5.13. Eksperimentalni i teorijski variogram za bakar (Cu) – Domen 2

U procesu simulacije, variogram je prilagođen prostoru normalizovanih podataka, pri čemu su očuvane osnovne karakteristike prostorne korelacije, uključujući tip modela (sferični), domete i odnos između nugget efekta i strukturisanog dela varijanse. U normalnom prostoru ukupna varijansa iznosi 1, odnosno ukupni prag (sill) variograma jednak je jedinici, pri čemu predstavlja zbir nugget efekta i svih variogramskih komponenti koje opisuju prostornu korelaciju.

Primenjena metoda *Sekvencijalne Gaussove simulacije (SGS)* predstavlja tip uslovne simulacije, što podrazumeva da su sve realizacije modela striktno vezane za ulazne podatke iz bušotina. Na mestima uzorkovanja, simulirane vrednosti su identične izmerenim vrednostima, dok se u neistraženom prostoru između bušotina generiše niz statistički verovatnih scenarija koji odražavaju prostornu neizvesnost ležišta [241] [239].

U procesu simulacije korišćeni su sledeći ključni parametri:

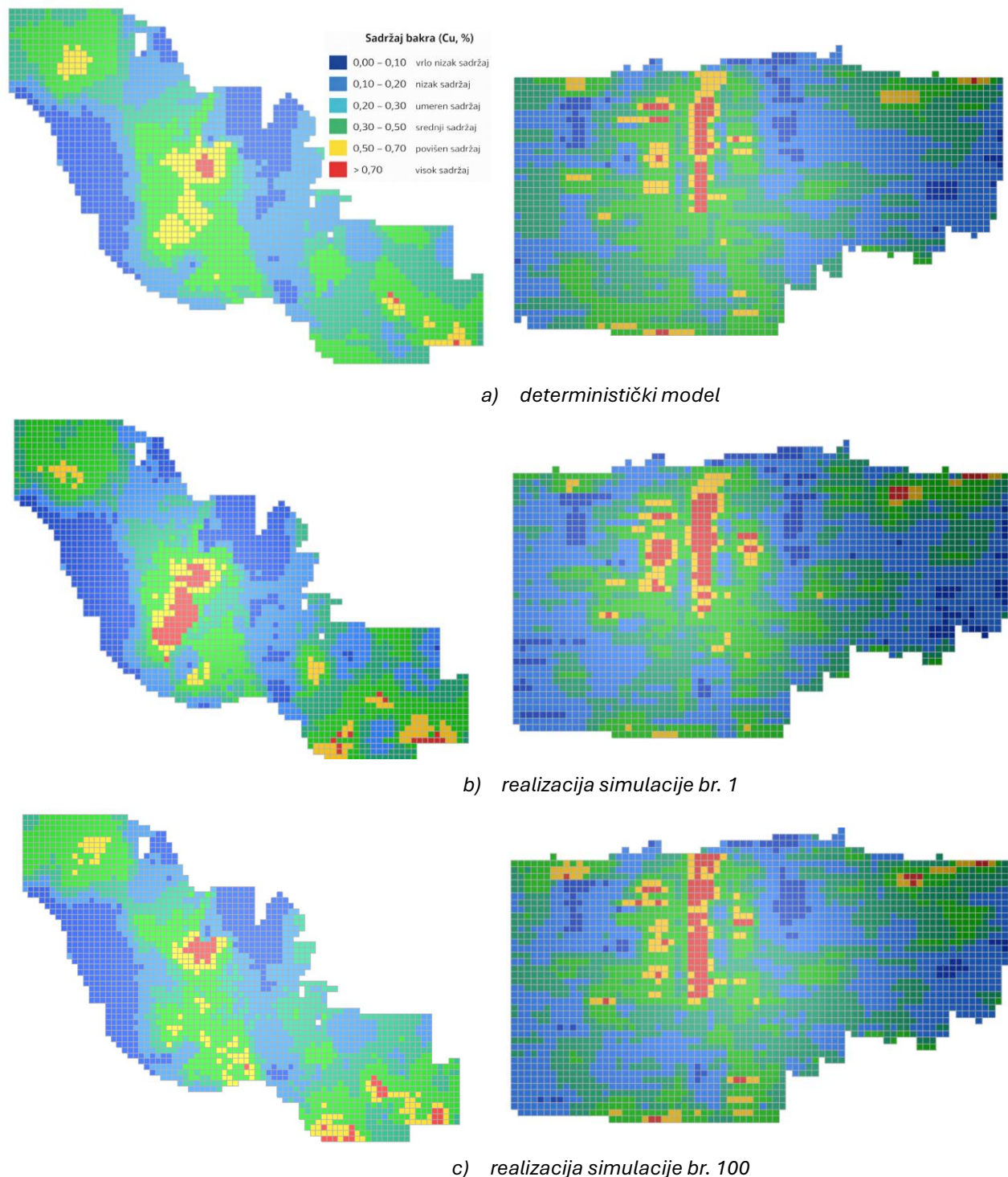
- tip krigovanja: jednostavno krigovanje (Simple Kriging),
- maksimalan broj uzoraka uključenih u procenu: 10,
- minimalan broj uzoraka po bloku: 3,
- radijus pretrage: 160 m,
- strategija pretrage: multi-grid pristup,
- broj realizacija: 100.

Nakon sprovedene simulacije, dobijene vrednosti su transformisane nazad u originalni prostor sadržaja bakra primenom inverzne transformacije, čime su generisani blok modeli koji zadržavaju statističke karakteristike i prostornu strukturu originalnih podataka.

5.4.2.2. Generisanje realizacija ležišta

Primenom *Sekvencijalne Gaussove simulacije (SGS)* generisan je skup od 100 realizacija blok modela, pri čemu svaka realizacija predstavlja jedan mogući scenario raspodele sadržaja bakra, zlata i srebra u ležištu. Sve realizacije su međusobno jednako verovatne i konzistentne sa raspoloživim podacima i definisanim variogramskim modelom.

Na slici 5.14 prikazan je uporedni prikaz pojedinačnih realizacija i baznog, determinističkog modela, čime se omogućava vizuelna analiza razlika između determinističkog pristupa i varijabilnosti dobijene primenom geostatističkih simulacija.



Slika 5.14. Uporedni prikaz determinističkog modela i realizacija geostatističkih simulacija u planu i vertikalnom preseku

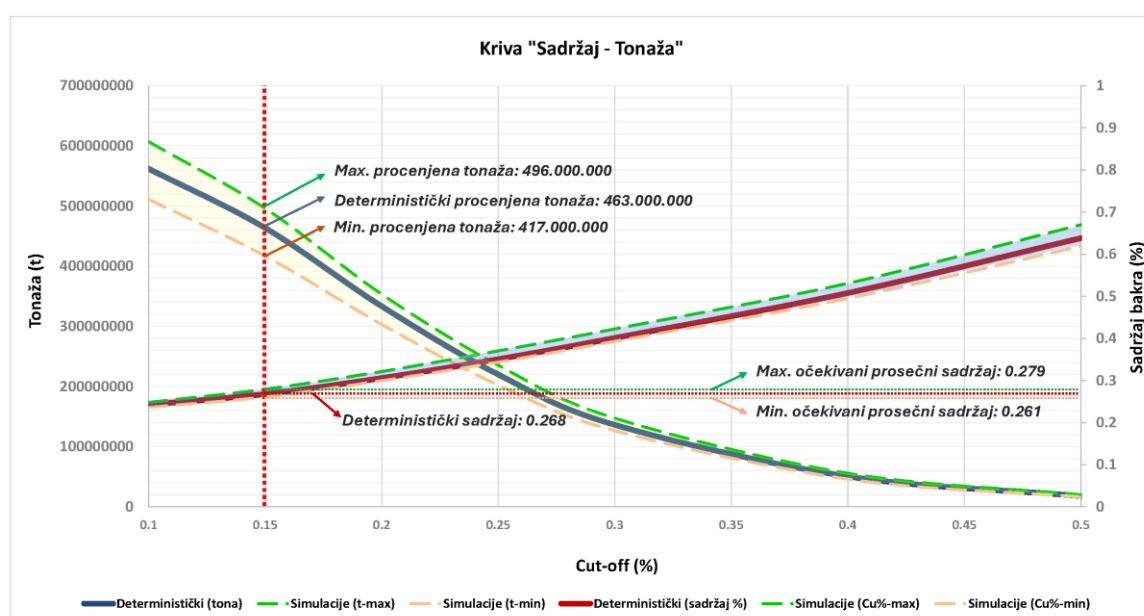
Uporedna analiza determinističkog modela i rezultata 100 realizacija uslovne simulacije potvrđuje pouzdanost procene resursa i preciznije definiše geološki rizik ležišta. Statistički parametri ukazuju na visoku usklađenost modela. Globalna srednja vrednost sadržaja bakra u simulacijama (0,078%) neznatno odstupa od determinističkog modela (0,073%), što potvrđuje globalnu nepristrasnost i odsustvo sistematskih grešaka u proceni.

Ključna razlika uočava se u standardnoj devijaciji, koja je očekivano viša kod simulacija (0,133) u odnosu na deterministički model (0,126). Ovo povećanje varijabilnosti dokazuje da simulacije uspešno neutrališu efekat ujednačavanja vrednosti (smoothing effect) koji je karakterističan za kriging. Takođe, maksimalne vrednosti sadržaja u simulacijama dostižu 1,93% (naspram 1,61% u determinističkom modelu), čime se realističnije reprezentuju zone visoke mineralizacije koje bi u standardnoj proceni ostale potcenjene. Ovaj fenomen je prisutan i u suprotnom smeru, gde simulacije dostižu niže minimalne vrednosti u odnosu na deterministički model, čime se izbegava veštačko „povećanje“ kvaliteta u zonama koje su zapravo jalovinske.

Pri graničnom sadržaju (cut-off) od 0,15% Cu, simulacije ukazuju na značajne promene u strukturi rudnog tela:

- Tonaža i broj blokova – Prosečan broj rudnih blokova u simulacijama iznosi 52.390, što je manje u odnosu na determinističkih 54.930. Ova razlika ukazuje na to da deterministički model, usled efekta kriging-a, teži da proceni tonažu uključivanjem blokova čiji sadržaj, u uslovima izražene lokalne varijabilnosti, ne zadovoljava kriterijum graničnog sadržaja.
- Kvalitet rude – Smanjenje tonaže direktno je praćeno povećanjem prosečnog sadržaja sa 0,268% na približno 0,276% Cu. Ovaj trend potvrđuje preciznije razdvajanje rude i jalovine, pri čemu simulacije identifikuju i eliminišu „veštačku rudu“ nastalu efektom izgladivanja, ostavljajući manji broj blokova, ali sa višim prosečnim kvalitetom.

Proračun tonaže ukazuje na prosečan pad sa 463,5 Mt na 442,1 Mt, što predstavlja smanjenje od približno 21,4 miliona tona u odnosu na determinističku procenu. Međutim, analizom svih 100 realizacija definisan je širok opseg varijabilnosti tonaže (od približno 417 Mt do 496 Mt), koji predstavlja direktnu meru geološke neizvesnosti projekta. Istovremeno, uočen je i opseg varijabilnosti prosečnog sadržaja, koji za posmatrani cut-off pokazuje odstupanja u odnosu na determinističku vrednost, potvrđujući postojanje neizvesnosti kako u kvantitetu tako i u kvalitetu resursa. Na slici 5.15 ovaj opseg prikazan je kroz zonu između donje i gornje granice simuliranih kriva tonaže i sadržaja.



Slika 5.15. Krive „Sadržaj – Tonaža“ sa prikazom determinističkog modela i opsega varijabilnosti dobijenog geostatističkim simulacijama

Rezultati simulacija koji su prikazani na slici 5.15 kroz krive „Sadržaj – Tonaža“, omogućavaju jasnu vizualizaciju opsega geološke neizvesnosti. Dok deterministički model implicira homogeniju raspodelu i jedinstvenu vrednost resursa, skup simuliranih kriva definiše interval mogućih scenarija eksploatacije. Pri tome, krive sadržaja sistematski pokazuju više vrednosti u odnosu na deterministički model, što potvrđuje eliminaciju efekta kriging-a i preciznije izdvajanje rude od jalovine. Sa druge strane, krive tonaže pokazuju karakteristično lepezasto širenje oko determinističke vrednosti, čime se kvantifikuje raspon potencijalnih odstupanja u količini eksploatacionog materijala.

Ovakav pristup omogućava da se geološka neizvesnost sagleda kroz realan raspon mogućih rezultata, umesto kroz jednu fiksnu vrednost, čime se obezbeđuje pouzdanija osnova za dalje faze rudarskog planiranja i smanjuje rizik od preoptimističnih procena karakterističnih za deterministički pristup. Istovremeno, dobijeni rezultati jasno ukazuju da varijabilnost geoloških parametara ima direktan uticaj na ekonomski status blokova, posebno u zonama bliskim graničnim vrednostima, gde dolazi do promena klasifikacije između rude i jalovine.

5.4.2.3. Kvantifikacija geološke neizvesnosti

U cilju kvantifikacije geološke neizvesnosti, na osnovu skupa generisanih realizacija blok modela izračunat je koeficijent varijacije (CV) za svaki blok. Koeficijent varijacije predstavlja meru relativne varijabilnosti sadržaja mineralne komponente i definiše se kao odnos standardne devijacije i srednje vrednosti simuliranih rezultata [331]:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.1)$$

gde je:

- σ – standardna devijacija vrednosti kroz skup realizacija,
- μ – srednja vrednost sadržaja u posmatranom bloku.

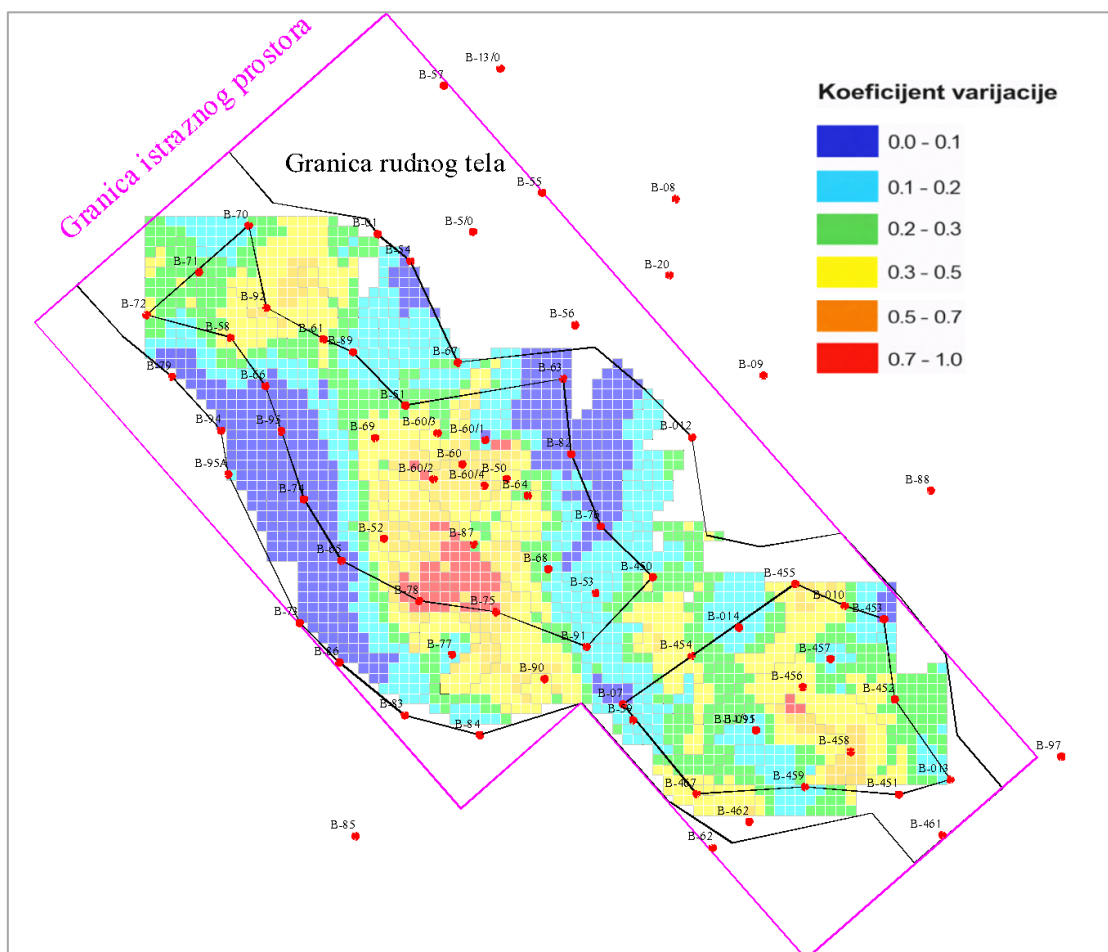
Vrednosti standardne devijacije i srednje vrednosti određene su na osnovu skupa od 100 realizacija generisanih primenom geostatističkih simulacija, čime je za svaki blok definisan niz mogućih vrednosti sadržaja koji odražava geološku neizvesnost.

Koeficijent varijacije omogućava kvantitativnu procenu stepena varijabilnosti sadržaja i predstavlja pogodan indikator za identifikaciju zona sa povećanom geološkom neizvesnošću u modelu. Za razliku od determinističkog pristupa, koji svakom bloku dodeljuje jedinstvenu vrednost sadržaja, primena ovog parametra omogućava sagledavanje raspona mogućih vrednosti i njihove disperzije kroz skup realizacija.

Analiza prostorne raspodele koeficijenta varijacije ukazuje na izraženu heterogenost ležišta, pri čemu se izdvajaju zone sa različitim nivoima neizvesnosti (slika 5.16). Povišene vrednosti CV dominantno su prisutne u centralnim i delimično rubnim delovima rudnog tela, gde se uočava izražena promenljivost sadržaja, što je posledica kompleksne geološke građe i lokalnih varijacija mineralizacije. Ove zone predstavljaju delove modela sa povećanim rizikom, jer su karakterisane većom nesigurnošću u proceni sadržaja.

Sa druge strane, zone sa niskim vrednostima koeficijenta varijacije nisu kontinuirano raspoređene duž perifernih delova ležišta, već se javljaju kao lokalizovane oblasti unutar modela (slika 5.16). Njihovo prostorno poklapanje sa delovima ležišta gde je gustina istražnih radova veća i gde je raspodela sadržaja ujednačenija ukazuje na veću pouzdanost procene u tim zonama. Međutim, njihov ograničen prostorni obuhvat potvrđuje da stabilnost modela nije uniformna, već zavisi od lokalnih geoloških uslova i kvaliteta podataka.

Posebno su značajne prelazne zone između oblasti sa visokim i niskim sadržajem, koje karakterišu srednje do povišene vrednosti koeficijenta varijacije. U ovim delovima dolazi do najizraženijih promena sadržaja, zbog čega su najosetljiviji na promene klasifikacije između rude i jalovine u različitim realizacijama. Upravo ove zone predstavljaju ključne tačke geološke neizvesnosti, sa direktnim implikacijama na rezultate optimizacije i definisanje granica kopa.



Slika 5.16. Prostorna raspodela koeficijenta varijacije (CV) sadržaja Cu kao mera geološke neizvesnosti u blok modelu ležišta

Dobijeni rezultati ukazuju da geološka neizvesnost ne zavisi isključivo od gustine istražnih radova, već u značajnoj meri odražava inherentnu varijabilnost ležišta. Iako veća gustina podataka može doprineti stabilnijoj proceni, povišene vrednosti koeficijenta varijacije mogu biti prisutne i u relativno dobro istraženim zonama, što je posledica kompleksne geološke građe i promenljive mineralizacije.

Takva prostorna raspodela neizvesnosti ima direktne implikacije na naredne faze modela, jer varijabilnost sadržaja utiče na stabilnost ekonomske vrednosti blokova, naročito u zonama bliskim graničnim vrednostima. U tim uslovima, pojedinačni blokovi mogu menjati svoju klasifikaciju kroz različite realizacije, što se direktno odražava na rezultate optimizacije i definisanje granica kopa.

Na ovaj način, geološka neizvesnost kvantifikovana kroz koeficijent varijacije predstavlja značajnu podlogu za razvoj stohastičkog modela i identifikaciju zona povećanog rizika. Time se obezbeđuje osnova za integraciju geoloških i tehno-ekonomskih parametara u jedinstven analitički okvir, koji omogućava realističniju procenu performansi rudarskog projekta i podržava donošenje robusnijih strateških odluka u uslovima neizvesnosti.

5.4.2.4. Ograničenja i pretpostavke

Interpretacija dobijenih rezultata uslovljena je metodološkim okvirima primenjene geostatističke simulacije, kao i kvalitetom i reprezentativnošću ulaznih podataka. Ključna ograničenja i pretpostavke mogu se sistematizovati kroz sledeće aspekte:

- Preciznost simulacije direktno zavisi od kvaliteta ulaznih podataka, pre svega reprezentativnosti kompozita i adekvatnosti modela variograma. Geostatistička simulacija ne eliminiše inherentnu neizvesnost ležišta, već omogućava njenu kvantifikaciju i interpretaciju kroz skup mogućih realizacija. Shodno tome, eventualne greške u fazi uzorkovanja ili neadekvatna interpretacija prostornog kontinuiteta reflektuju se kroz sve generisane realizacije.
- Primenjeni SGS (Sequential Gaussian Simulation) algoritam zasniva se na pretpostavci normalne raspodele podataka u transformisanom prostoru. Proces povratne transformacije (back-transformation) iz Gausovog u realni prostor osetljiv je na ponašanje ekstremnih vrednosti u repovima raspodele. U slučajevima kada pretpostavka ujednačenosti statističkih karakteristika unutar definisanih domena nije u potpunosti ispunjena, odnosno kada postoje lokalne promene u raspodeli sadržaja, mogu se javiti anomalije u simuliranim vrednostima koje zahtevaju dodatnu geološku interpretaciju.
- Parametri konfiguracije pretrage (radijus elipsoida, broj uzoraka i geometrija susedstva) imaju značajan uticaj na nivo reprodukovane varijabilnosti. Preširoka pretraga može dovesti do delimičnog izgladivanja rezultata, dok previše restriktivni uslovi mogu generisati diskontinuitete koji nisu u potpunosti geološki opravdani. Stoga je izbor ovih parametara rezultat kompromisa između očuvanja varijabilnosti i geološke konzistentnosti modela.

Ključno ograničenje odnosi se na interpretaciju dobijenih rezultata. Dok deterministički model zasnovan na kriging-u predstavlja „najbolju procenu“ u smislu minimalne varijanse greške, on istovremeno dovodi do efekta ujednačavanja vrednosti, pri čemu se ekstremne vrednosti sadržaja ublažavaju, a prostorna varijabilnost ležišta smanjuje. U tom kontekstu, nijedna pojedinačna realizacija ne predstavlja jedinstvenu sliku stvarnog stanja ležišta, već sve realizacije imaju status statistički ekvivalentnih modela koji omogućavaju analizu robusnosti planiranja.

Analiza je sprovedena uz pretpostavku fiksnih geoloških granica, čime je fokus istraživanja usmeren na kvantifikaciju unutrašnje varijabilnosti sadržaja, uz zanemarivanje geometrijske neizvesnosti rudnog tela. Ovakav pristup omogućava jasnije sagledavanje rizika povezanog sa pojavom unutrašnje jalovine i varijabilnosti kvaliteta, što ima direktan značaj za pouzdanost ekonomske evaluacije projekta.

5.4.3. Definisanje raspodela verovatnoće tehno-ekonomskih parametara

Nakon identifikacije stohastičkih promenljivih koje učestvuju u određivanju ekonomske vrednosti blokova, sledeći korak u razvoju modela odnosi se na definisanje njihovih raspodela verovatnoće.

Za razliku od determinističkog pristupa, u kojem su svi ulazni parametri definisani kao fiksne vrednosti, stohastički model podrazumeva njihovo predstavljanje kroz odgovarajuće raspodele verovatnoće, čime se omogućava kvantifikacija njihove varijabilnosti i neizvesnosti u realnim uslovima eksploatacije i tržišta.

Polazne (bazne) vrednosti parametara usvojene u determinističkom modelu predstavljaju referentne vrednosti oko kojih se definiše opseg varijacija i oblik raspodela. Ove vrednosti su prethodno određene na osnovu analize tehničke dokumentacije, istorijskih podataka, iskustava sa sličnih rudarskih sistema, analize tržišta, i predstavljaju najverovatnije scenarije razvoja projekta.

Definisanje raspodela izvršeno je individualno za svaki parametar, uzimajući u obzir njegovu prirodu, dostupnost podataka i očekivano ponašanje u realnim uslovima. Pri tome je korišćen kombinovani pristup koji obuhvata [256]:

- analizu istorijskih trendova i budućih predikcija (za tržišne parametre kao što su cene metala),
- analizu operativnih podataka i industrijske prakse (za troškove i tehnološke parametre),
- ekspertske procene i inženjerska razmatranja (za parametre sa ograničenom dostupnošću podataka).

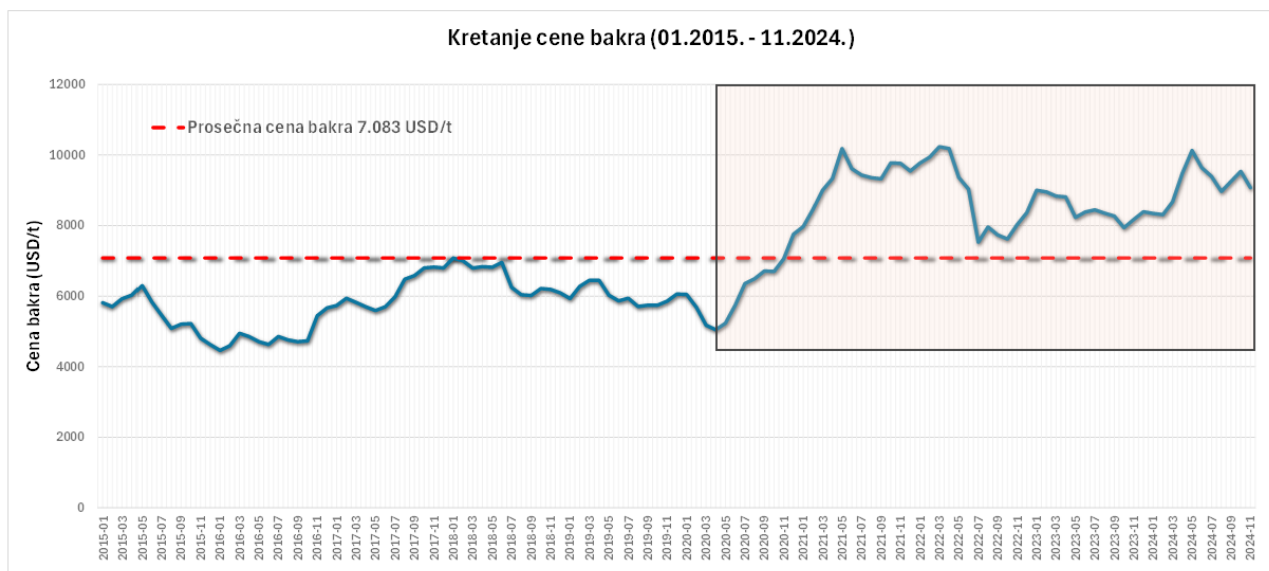
Posebna pažnja posvećena je izboru tipa raspodele, tako da ona adekvatno reflektuje realno očekivano ponašanje parametra. U tom smislu, korišćene su Beta, Pert i normalna raspodela, u zavisnosti od toga da li je parametar ograničen intervalom, asimetričan ili varira oko srednje vrednosti bez izražene pristrasnosti [256].

U nastavku poglavlja detaljno su opisane usvojene raspodele za svaki pojedinačni parametar, uz obrazloženje njihovog oblika, opsega varijacije i odnosa u odnosu na referentne vrednosti definisane u determinističkom modelu.

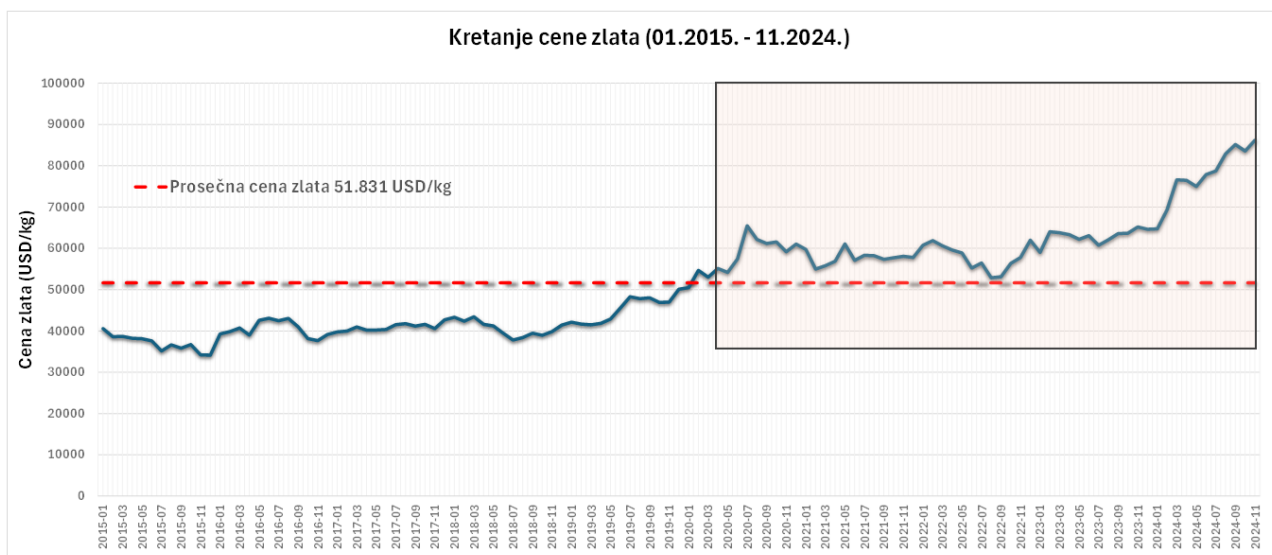
5.4.3.1. Raspodele cena metala (Cu, Au, Ag)

Prodajne cene metala predstavljaju jedan od najznačajnijih izvora neizvesnosti u ekonomskom vrednovanju rudarskih projekata, jer direktno utiču na vrednost rudnih blokova, optimizaciju granica kopa i konačne finansijske rezultate projekta. Za razliku od determinističkog pristupa, gde su cene definisane kao konstantne prosečne vrednosti, u stohastičkom modelu one su predstavljene kroz raspodele verovatnoće koje reflektuju njihovu istorijsku varijabilnost i očekivane buduće trendove [256].

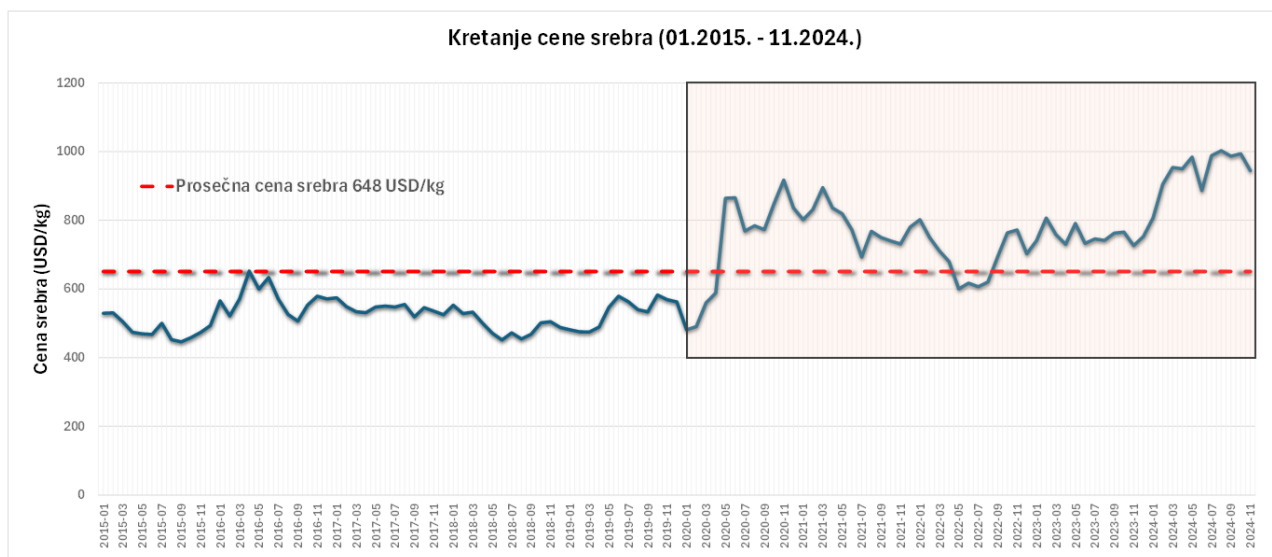
Polaznu osnovu za definisanje raspodela činila je analiza kretanja cena bakra, zlata i srebra u periodu od 2015. do 2024. godine (slika 5.17, 5.18 i 5.19). Na osnovu ovih podataka može se uočiti izražen trend rasta cena nakon 2020. godine, posebno kod bakra i zlata, dok srebro pokazuje sličnu, ali nešto varijabilniju dinamiku [256].



Slika 5.17. Dinamika kretanja cene bakra sa istaknutim trendom rasta nakon 2020. godine



Slika 5.18. Dinamika kretanja cene zlata sa istaknutim trendom rasta nakon 2020. godine



Slika 5.19. Dinamika kretanja cene srebra sa istaknutim trendom rasta nakon 2020. godine

Nagli rast cena metala nakon 2020. godine može se objasniti kombinacijom nekoliko ključnih globalnih faktora. Tokom početne faze pandemije COVID-19 došlo je do poremećaja u lancima snabdevanja i pada proizvodnje, nakon čega je usledio brz oporavak industrijske aktivnosti, naročito u Kini, što je dovelo do naglog rasta tražnje za metalima [332].

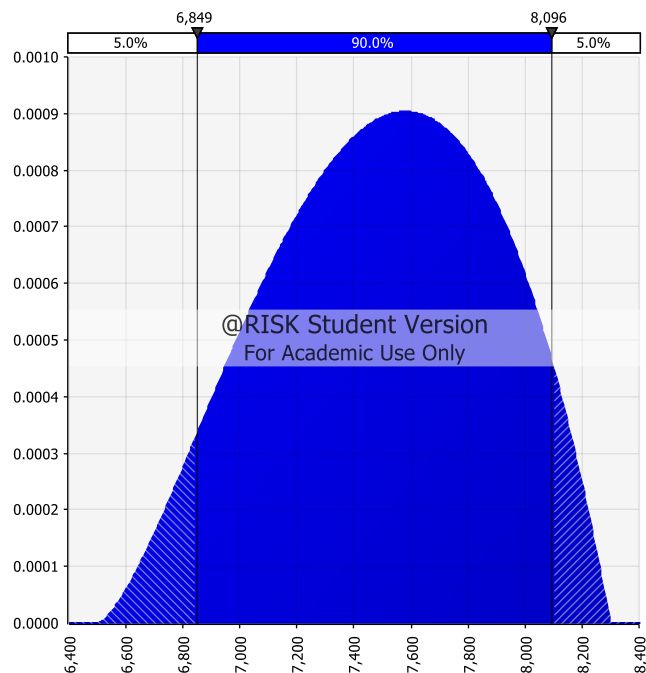
Istovremeno, dugoročni trend rasta potražnje za bakrom dodatno je pojačan procesima energetske tranzicije, elektrifikacije i razvoja digitalne infrastrukture, zbog čega se bakar danas smatra jednim od ključnih strateških metala globalne ekonomije [333].

Pored rasta tražnje, značajnu ulogu imaju i ograničenja na strani ponude, uključujući spor razvoj novih rudnika, smanjenje sadržaja u postojećim ležištima i geopolitičke faktore, što dovodi do dugoročnog disbalansa između ponude i tražnje i dodatnog pritiska na rast cena. Savremene analize ukazuju da se ovaj trend može nastaviti i u budućnosti, pri čemu se očekuje rast ili stabilizacija cena na relativno visokom nivou [333] [334] [335].

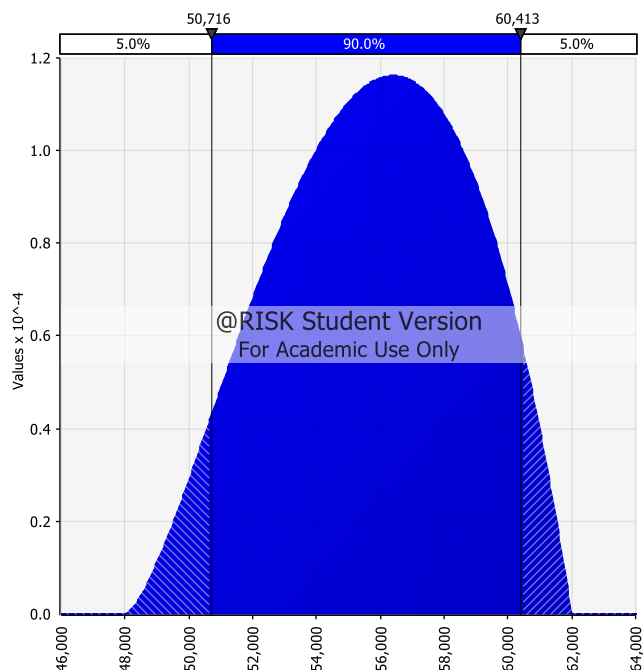
Na osnovu navedenih činjenica, raspodele cena metala definisane su kao asimetrične raspodele (Beta raspodela) sa izraženijom verovatnoćom ka višim vrednostima u odnosu na deterministički usvojenu srednju vrednost. Ovakav izbor raspodele reflektuje sledeće pretpostavke:

- istorijski trend rasta cena u poslednjih nekoliko godina,
- veća verovatnoća zadržavanja ili rasta cena u odnosu na njihov pad,
- postojanje realističnog opsega varijacije cena definisanog na osnovu istorijskih minimuma i maksimuma,
- dugoročne strukturne faktore koji podržavaju rast cena (energetska tranzicija, digitalizacija i rast tražnje za kritičnim mineralima).

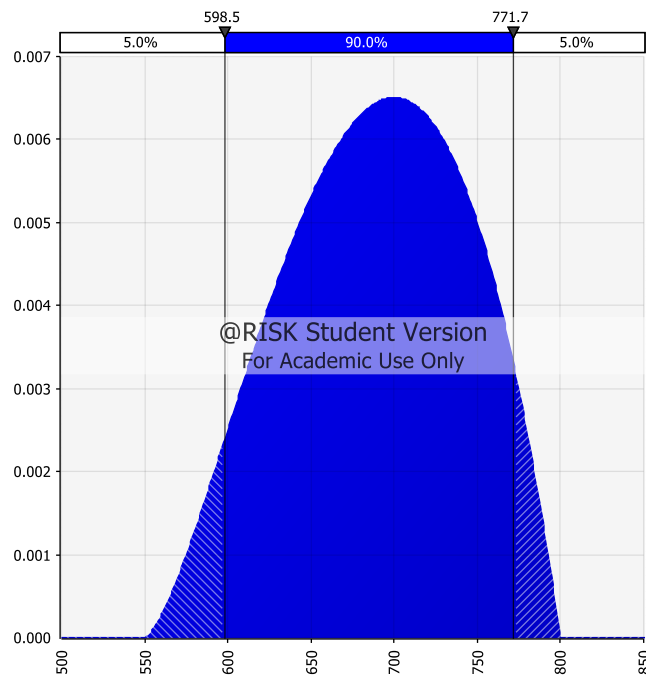
U skladu sa tim, za sve tri komponente (Cu, Au i Ag) usvojena je *Beta raspodela* ograničena minimalnim i maksimalnim vrednostima definisanim na osnovu istorijskog kretanja cena, pri čemu referentne vrednosti odgovaraju deterministički usvojenim cenama iz osnovnog modela. Usvojene raspodele prikazane su na slikama 5.20, 5.21 i 5.22 [256].



Slika 5.20. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za cenu bakra (USD/t) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.21. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za cenu zlata (USD/kg) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.22. Usvojene Beta raspodela verovatnoće za cenu srebra (USD/kg) u stohastičkom modelu [256]

Za bakar, raspon varijacije definisan je u intervalu od približno 6.500 do 8.300 USD/t, sa referentnom vrednošću od 7.083 USD/t. Za zlato, interval varijacije iznosi od oko 48.000 do 62.000 USD/kg, uz referentnu vrednost od 51.831 USD/kg, dok se za srebro raspon kreće od približno 550 do 800 USD/kg, sa referentnom vrednošću od 648 USD/kg [256].

Ove referentne vrednosti predstavljaju bazni (deterministički) scenario modela, dok je stvarna raspodela verovatnoće definisana parametrima Beta raspodele, čiji oblik omogućava modelovanje asimetrije u korist viših vrednosti. Srednja vrednost raspodele nije nužno jednaka determinističkoj vrednosti, već zavisi od odnosa parametara raspodele, čime se omogućava dodatna fleksibilnost u modelovanju tržišnih uslova [256].

Ovakva parametrizacija omogućava da se najveća verovatnoća nalazi u blizini deterministički usvojenih vrednosti, uz blagu asimetriju ka višim vrednostima, čime se reflektuje savremena tržišna dinamika i očekivani pravac kretanja cena. Istovremeno, ograničenje raspodele definisanim intervalom omogućava izbegavanje nerealnih ekstremnih vrednosti, što je karakteristično za neograničene raspodele (npr. normalnu), i obezbeđuje konzistentnost modela sa ekonomskim i tržišnim ograničenjima. Beta raspodela je posebno pogodna za modelovanje promenljivih ograničenih konačnim intervalom, pri čemu njeni parametri direktno određuju položaj i oblik raspodele.

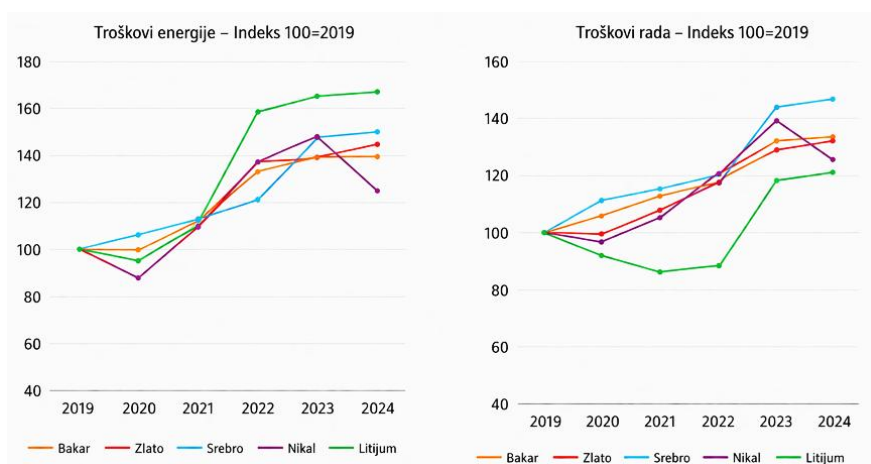
Važno je naglasiti da izbor raspodela nije zasnovan isključivo na istorijskim podacima, već i na savremenim analizama i projekcijama relevantnih međunarodnih institucija (World Bank [334], IMF [298], UNCTAD [333]) i finansijskih institucija (JP Morgan [300], S&P Global [335].), koje ukazuju na nastavak relativno visokih cena metala u srednjoročnom i dugoročnom periodu, usled strukturnog rasta tražnje i ograničenja u ponudi.

Na ovaj način, modelovanje cena metala u stohastičkom okviru omogućava realističnije sagledavanje ekonomskog rizika projekta, uz istovremeno uvažavanje istorijskih oscilacija i očekivanih budućih tržišnih kretanja, čime se obezbeđuje pouzdanija osnova za donošenje strateških odluka.

5.4.3.2. Raspodele operativnih troškova (otkopavanje i prerada)

Operativni troškovi predstavljaju jednu od ključnih komponenti ekonomske vrednosti rudarskog projekta, jer direktno utiču na profitabilnost eksploatacije i granične uslove ekonomičnosti. U determinističkom modelu, troškovi otkopavanja i prerade definisani su kao fiksne vrednosti na osnovu analize operativnih podataka i iskustava sa sličnih rudarskih sistema.

Međutim, u realnim uslovima eksploatacije operativni troškovi su podložni značajnoj varijabilnosti, uslovljenoj promenama cena energenata, troškova rada, materijala i logistike. Savremene analize ukazuju da je rudarska industrija nakon 2020. godine ušla u period izraženih troškovnih pritisaka, prvenstveno kao posledica rasta cena energije, poremećaja u lancima snabdevanja i opštih inflatornih kretanja. Prema izveštajima EY [336] i S&P Global [337], ovi faktori doveli su do povećanja operativne složenosti i kontinuiranog rasta troškova proizvodnje, pri čemu energija i radna snaga ostaju dominantne komponente troškovne strukture, a njihovi nivoi su i dalje povišeni u odnosu na period pre pandemije korona virusa (slika 5.23). Istovremeno, rast troškova dodatno je pojačan strukturnim faktorima, kao što su pad sadržaja metala u ležištima, eksploatacija dubljih i geološki složenijih rudnih tela, kao i povećani zahtevi u pogledu održivosti i regulative, što zajedno doprinosi formiranju novog, višeg troškovnog nivoa u rudarskoj industriji [338].



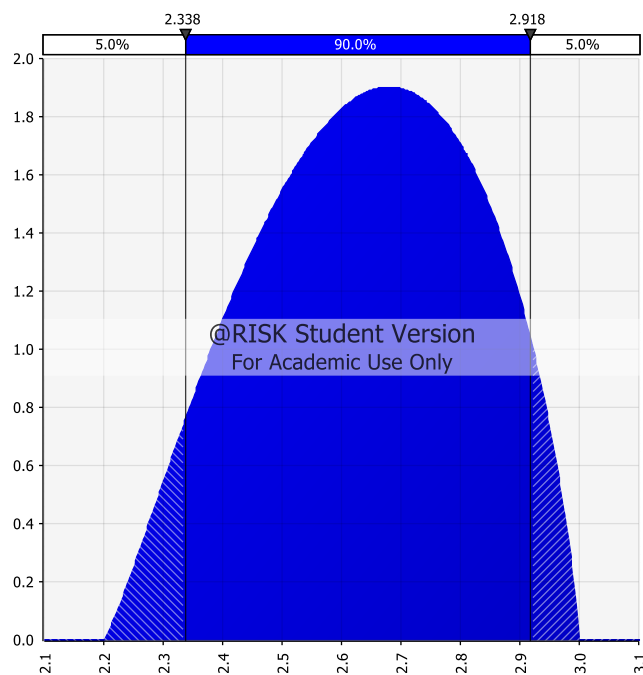
Slika 5.23. Promena troškova energije i rada u periodu 2019–2024 (indeks 2019 = 100) [338]

U skladu sa navedenim, raspodele operativnih troškova definisane su kao asimetrične raspodele, sa većom verovatnoćom ka višim vrednostima u odnosu na deterministički usvojene vrednosti. Ovakav oblik raspodele reflektuje savremene trendove u rudarskoj industriji, gde se nakon 2020. godine beleži generalan rast troškova usled inflacije, povećanja cena energenata i rasta troškova rada, uz istovremeno ograničene mogućnosti njihovog smanjenja [337] [338].

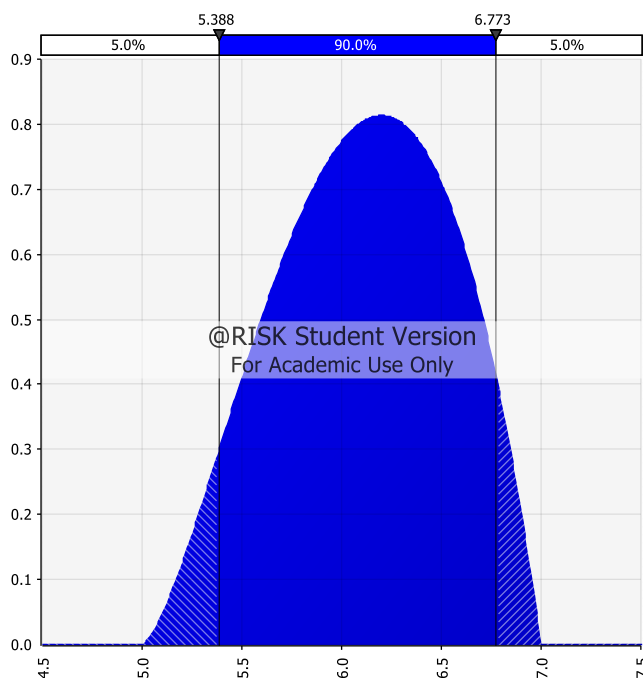
U tom kontekstu, izbor asimetrične raspodele zasniva se na sledećim pretpostavkama:

- izražen trend rasta troškova u periodu nakon 2020. godine,
- dominantan uticaj cena energenata i inflacije,
- veća verovatnoća povećanja troškova u odnosu na njihovo smanjenje,
- operativna neizvesnost uslovljena promenama u produktivnosti, organizaciji rada i kvalitetu sirovine.

Za troškove otkopavanja i prerade usvojene su raspodele definisane u odnosu na referentne vrednosti iz determinističkog modela (2,5 USD/t za otkopavanje i 5,5 USD/t za preradu), pri čemu su granice raspodele određene tako da obuhvataju realističan opseg varijacija u zavisnosti od operativnih i tržišnih uslova. Na osnovu sprovedene analize, definisan je interval varijacije od približno 2,2–3,0 USD/t za troškove otkopavanja i 5,0–7,0 USD/t za troškove prerade, što je u skladu sa prikazanim raspodelama na slikama 5.24 i 5.25 [256].



Slika 5.24. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za troškove otkopavanja (USD/t) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.25. Usvojena Beta raspodela verovatnoće za troškove prerade (USD/t) u stohastičkom modelu [256]

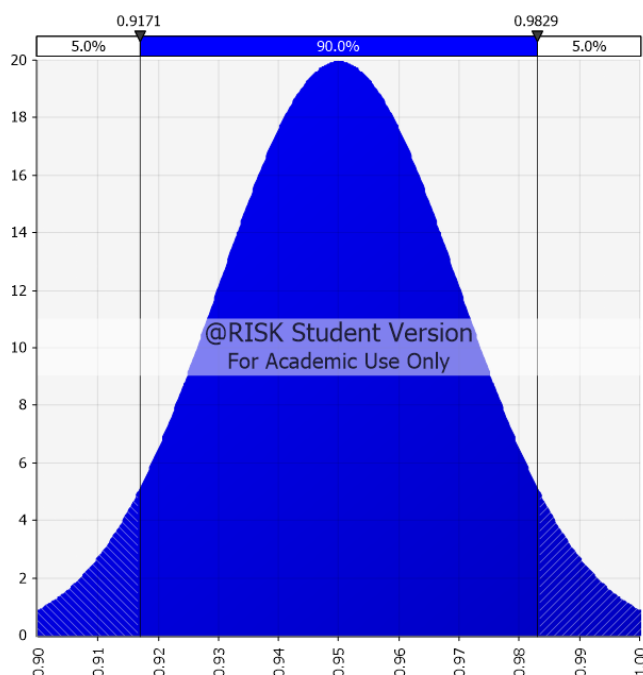
5.4.3.3. Raspodela iskorišćenja u ležištu (gubitaka rude)

Iskorišćenje u ležištu predstavlja parametar kojim se opisuje odnos između količine rude koja se stvarno eksploatiše i ukupne količine rude definisane u blok modelu, pri čemu razlika odgovara gubicima rude tokom eksploatacije. U determinističkom modelu ovaj parametar je usvojen kao konstantna vrednost od 95%, što odgovara gubicima od približno 5% [256].

U realnim uslovima eksploatacije, gubici rude i razblaženje predstavljaju neizbežne pojave uslovljene ograničenjima rudarske mehanizacije, selektivnosti otkopavanja, geometrije rudnih tela i preciznosti definisanja granice rude i jalovine. Ovi efekti su inherentni rudarskom procesu i značajno variraju u zavisnosti od geoloških i tehnoloških uslova eksploatacije [161].

U praksi površinske eksploatacije metalnih ležišta, gubici rude se najčešće kreću na nivou od nekoliko procenata, dok razblaženje može imati znatno širi opseg varijacije, u zavisnosti od nivoa selektivnosti i složenosti ležišta [339].

S obzirom na generalno mali opseg varijacije, varijabilnost iskorišćenja u ležištu modelovana je jednostavnom normalnom raspodelom oko determinističke vrednosti (slika 5.26) [256].



Slika 5.26. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje u ležištu u stohastičkom modelu [256]

5.4.3.4. Raspodela iskorišćenja metala

Iskorišćenje metala predstavlja jedan od ključnih parametara koji direktno utiče na ekonomsku vrednost rudarskog projekta, jer određuje količinu metala koja se može izdvojiti iz rude tokom procesa prerade i metalurgije. Za razliku od determinističkog pristupa, u kojem su iskorišćenja definisana kao konstantne vrednosti, u stohastičkom modelu ovaj parametar se tretira kao slučajna promenljiva, čime se omogućava kvantifikacija tehnološke neizvesnosti procesa prerade.

Varijabilnost iskorišćenja metala uslovljena je kombinovanim uticajem geometalurških karakteristika rude i operativnih parametara procesa prerade. Mineraloški sastav, stepen oksidacije, granulometrijski sastav i stepen oslobađanja korisnih minerala direktno određuju ponašanje rude u flotaciji, dok operativni faktori (kao što su granulacija mlevenja, doziranje reagensa i hidrodinamički uslovi u flotacionim ćelijama) dodatno utiču na konačno iskorišćenje kroz njihovu međuzavisnu i kompleksnu interakciju [212] [340] [341].

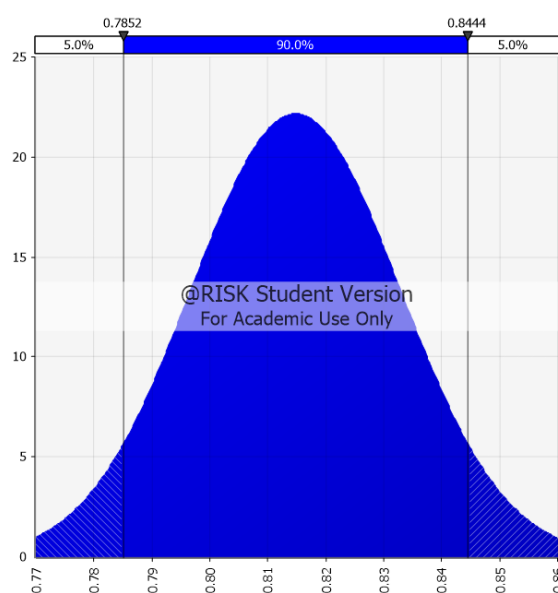
U analiziranom slučaju, ključni izvor neizvesnosti predstavlja prisustvo oksidne rude bakra, koja značajno pogoršava efikasnost flotacije u odnosu na sulfidne minerale. Za razliku od sulfidnih minerala, koji se relativno efikasno izdvajaju flotacijom, oksidne forme bakra karakterišu hidrofobno nepovoljne površinske osobine, zbog čega je njihovo izdvajanje otežano i zahteva dodatne tehnološke postupke (poput sulfidizacije), pri čemu se ostvaruje značajno niže iskorišćenje [342].

Ova zavisnost jasno je potvrđena i analizom realnih eksploatacionih podataka prikazanih u okviru doktorske disertacije Kržanović D. (poglavlje 6.4, 2016. godina) [212], gde je utvrđena direktna korelacija između povećanja učešća oksidnog bakra i smanjenja flotacijskog iskorišćenja. Istovremeno, dodatna analiza pokazuje međuzavisnost između sadržaja bakra u ulaznoj rudi, sadržaja u koncentratu i ostvarenog iskorišćenja, čime se potvrđuje kompleksna priroda procesa i uticaj promenljivog mineralnog sastava na performanse flotacije.

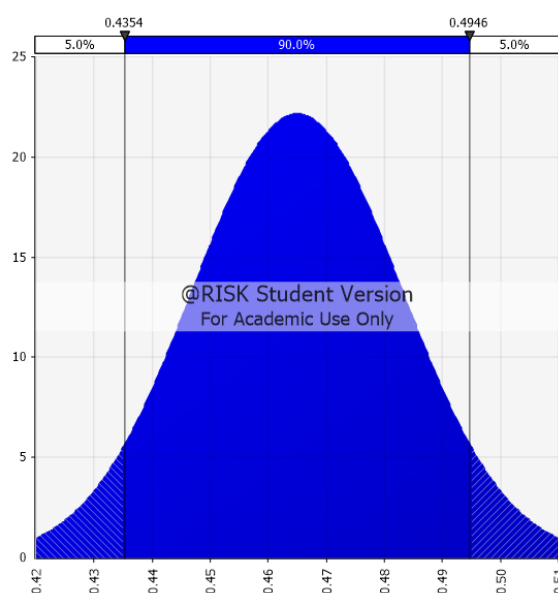
Rezultati istraživanja ukazuju da se ovaj problem može značajno ublažiti primenom selektivne eksploatacije i optimizacijom graničnog sadržaja, pri čemu razdvajanje rude prema udelu oksidnog bakra i prilagođavanje režima prerade dovodi do značajnog povećanja ekonomske efikasnosti sistema, uključujući rast neto sadašnje vrednosti projekta za preko 30% [212].

U skladu sa navedenim, varijabilnost iskorišćenja u ovom radu primarno se vezuje za prostornu i vremensku varijabilnost geometalurških karakteristika rude, pre svega za promene u udelu oksidnih i sulfidnih minerala, kao i za ograničenja u stabilnosti flotacijskog procesa, što zajedno predstavlja jedan od dominantnih izvora tehnološke neizvesnosti u modelu.

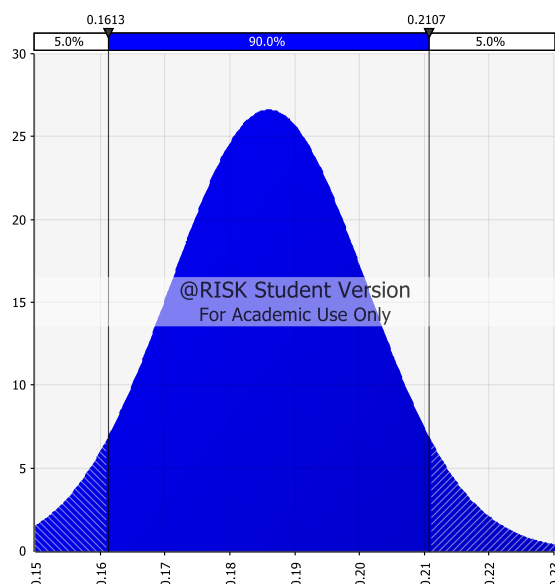
Na osnovu toga su raspodele ukupnog iskorišćenja metala (Cu, Au i Ag) definisane kao normalne raspodele oko determinističkih vrednosti, pri čemu su standardne devijacije određene tako da obuhvate realističan opseg varijacija u tehnološkim performansama sistema. Ovakvo modelovanje omogućava da se najveća verovatnoća nalazi u blizini referentnih vrednosti, uz kontrolisano odstupanje koje reflektuje operativnu i geometaluršku neizvesnost [256]. Grafički prikaz raspodela dat je na slikama 5.27, 5.28 i 5.29.



Slika 5.27. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje bakra (%) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.28. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje zlata (%) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.29. Usvojena Normalna raspodela verovatnoće za iskorišćenje srebra (%) u stohastičkom modelu [256]

5.4.3.5. Raspodela troškova prodaje metala

Troškovi prodaje metala obuhvataju troškove metalurške prerade (treatment and refining charges – TC/RC), transporta, osiguranja i ostalih komercijalnih troškova koji nastaju u procesu plasmana proizvoda na tržište.

U slučaju bakra, troškovi prerade i rafinacije (TC/RC) predstavljaju ključnu komponentu troškova prodaje i određuju se na osnovu tržišnih uslova između rudarskih kompanija i topionica. Ovi troškovi predstavljaju naknadu koju proizvođači koncentrata plaćaju topionicama za preradu koncentrata u finalni metal i direktno zavise od odnosa ponude koncentrata i raspoloživih kapaciteta prerade [176].

Njihova vrednost može značajno varirati u zavisnosti od tržišnih uslova, pri čemu su u pojedinim periodima zabeležene izražene oscilacije, uključujući i pad na izuzetno niske, pa čak i negativne vrednosti. Negativni TC/RC ukazuju na situaciju u kojoj topionice, usled nedostatka koncentrata i povećane konkurencije za sirovinu, praktično plaćaju proizvođačima za preradu koncentrata, što predstavlja ekstreman poremećaj tržišnog balansa između ponude i tražnje [176].

Međutim, struktura troškova prodaje značajno zavisi i od organizacije proizvodnog sistema. U slučaju prodaje koncentrata eksternim topionicama, TC/RC predstavljaju tržišno definisanu i promenljivu komponentu troškova. Nasuprot tome, kod vertikalno integrisanih sistema, u kojima investitor raspolaže sopstvenim rudnicima i topionicom, koncentrat se prerađuje unutar istog proizvodnog kompleksa, pri čemu troškovi prerade imaju internu prirodu i znatno manju varijabilnost.

U okviru ovog istraživanja pretpostavljen je integrisani model prerade, što implicira relativno stabilnije troškove prodaje u odnosu na tržišno formirane TC/RC vrednosti, ali uz zadržavanje određene varijabilnosti koja odražava promene operativnih i tržišnih uslova.

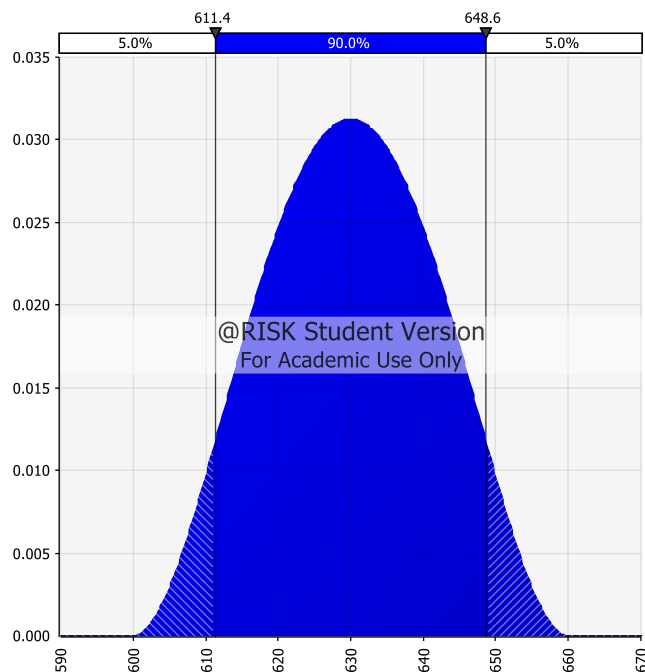
Za plemenite metale (Au i Ag), troškovi prodaje uključuju rafinaciju i komercijalne troškove, pri čemu su oni manje promenljivi u odnosu na bazne metale, budući da se tržište rafinacije ovih metala odlikuje višim stepenom standardizacije i likvidnosti.

U skladu sa navedenim, u stohastičkom modelu troškovi prodaje modelovani su korišćenjem PERT raspodela, postavljenih kao simetrične funkcije oko deterministički usvojenih vrednosti. Granice su definisane tako da obuhvate realističan opseg varijacija u zavisnosti od tržišnih uslova i strukture ugovornih odnosa [256].

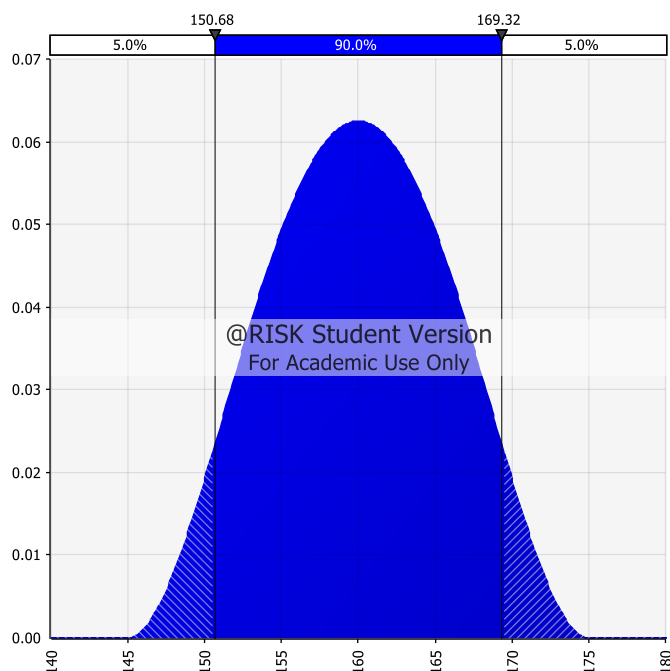
Na osnovu sprovedene analize, definisani su sledeći intervali varijacije troškova prodaje [256]:

- bakar (Cu): približno 600–660 USD/t,
- zlato (Au): približno 145–175 USD/kg,
- srebro (Ag): približno 10–20 USD/kg.

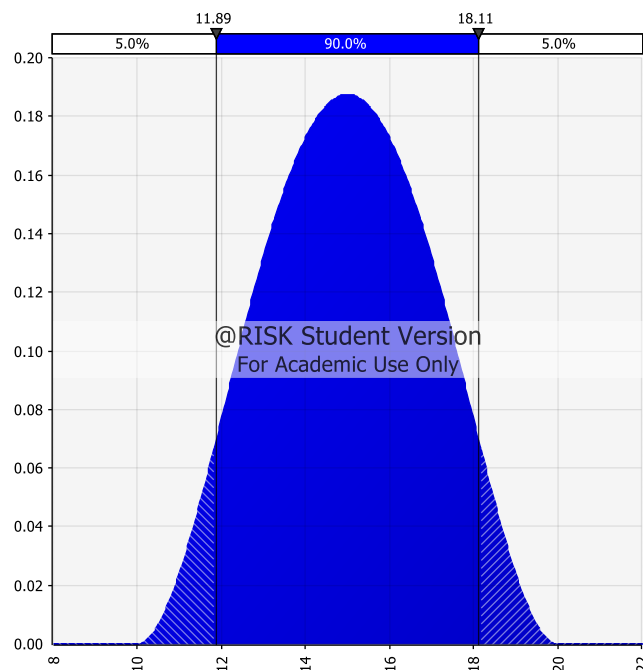
Raspodele koje se odnose na troškove prodaje bakra, zlata i srebra, prikazane su na slikama 5.30, 5.31 i 5.32.



Slika 5.30. Usvojena Pert raspodela za troškove prodaje bakra (USD/t) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.31. Usvojena Pert raspodela za troškove prodaje zlata (USD/kg) u stohastičkom modelu [256]



Slika 5.32. Usvojena Pert raspodela za troškove prodaje srebra (USD/kg) u stohastičkom modelu [256]

Ovakvo modelovanje omogućava da se najveća verovatnoća nalazi u blizini determinističkih vrednosti, uz uvažavanje ograničene, ali realne varijabilnosti ovog parametra. Izbor simetrične raspodele odražava činjenicu da, uprkos povremenim tržišnim oscilacijama, ne postoji izražen dugoročni trend sistematskog rasta ili pada troškova prodaje, već se oni kreću oko relativno stabilnih srednjih vrednosti definisanih tržišnim i ugovornim uslovima [256].

Na ovaj način, troškovi prodaje uključeni su u stohastički model kao sekundarni izvor neizvesnosti, čiji je uticaj na ukupnu ekonomsku vrednost projekta manji u poređenju sa cenama metala, operativnim troškovima i iskorišćenjem, ali je i dalje relevantan za potpunu kvantifikaciju ekonomskog rizika [256].

5.4.3.6. Raspodela investicionih troškova (CAPEX)

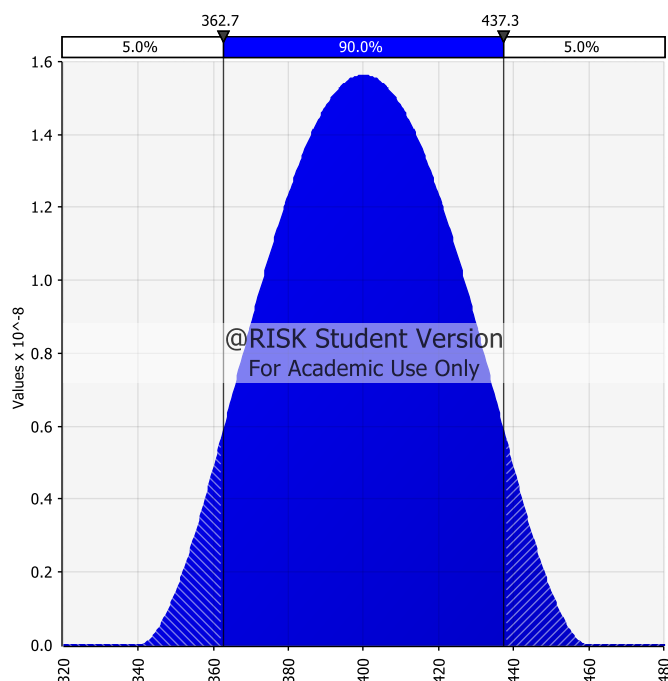
Početni investicioni troškovi (CAPEX) predstavljaju jednu od najznačajnijih komponenti ekonomskog modela rudarskog projekta, s obzirom na to da direktno utiču na početni novčani tok i ukupnu ekonomsku isplativost projekta. Za razliku od operativnih parametara, CAPEX se realizuje u ranoj fazi razvoja projekta i karakteriše ga visok nivo neizvesnosti, naročito u fazama pre izgradnje i puštanja u rad.

U determinističkom modelu, CAPEX je definisan kao jedinstvena vrednost od 400 miliona USD, na osnovu raspoložive projektne dokumentacije i analognog poređenja sa sličnim rudarskim projektima u regionu. Međutim, brojna istraživanja pokazuju da su investicioni troškovi u rudarskoj industriji podložni značajnim odstupanjima u odnosu na planirane vrednosti. Analize velikog broja projekata ukazuju da preko 80% rudarskih projekata beleži prekoračenja CAPEX-a, pri čemu su prosečna odstupanja često veća od 40% u odnosu na inicijalne procene [343] [344]. Ovakva odstupanja rezultat su kombinovanog uticaja tehničkih, geoloških, tržišnih i organizacionih faktora, promene u obimu radova, kao i rast cena materijala i opreme.

Dodatna specifičnost rudarskih projekata ogleda se i u činjenici da značajan deo investicija otpada na infrastrukturne radove, koji su često jedinstveni za svaki projekat i zavise od lokalnih uslova. U analiziranom slučaju, posebno značajan faktor predstavlja potreba za izmeštanjem postojeće železničke pruge, što dodatno povećava neizvesnost procene i čini strukturu CAPEX-a izrazito zavisnom od konkretnih tehničkih rešenja i prostorno-infrastrukturnih ograničenja [256]

U skladu sa navedenim, u stohastičkom modelu CAPEX je modelovan kao asimetrična raspodela tipa PERT (slika 5.33), definisana minimalnom, najverovatnijom i maksimalnom vrednošću. Usvojeni interval varijacije iznosi [256]:

- minimalna vrednost: 340 miliona USD,
- najverovatnija vrednost: 400 miliona USD,
- maksimalna vrednost: 460 miliona USD.



Slika 5.33. Usvojena Pert raspodela za investicione troškove (USD) u stohastičkom modelu [256]

Slika 5.33 ilustruje usvojenu raspodelu investicionih troškova, sa jasno izraženom koncentracijom verovatnoće oko najverovatnije vrednosti od 400 miliona USD, ali i značajnim rasponom mogućih odstupanja [256].

Iako je centralna vrednost definisana na osnovu raspoloživih projektnih podataka, širina intervala ukazuje na to da CAPEX u ranim fazama razvoja projekta predstavlja izrazito neizvestan parametar. Ovaj opseg ne odražava pouzdanost procene, već kvantifikuje potencijalna odstupanja koja mogu nastati usled tehničkih, geoloških i tržišnih faktora.

U okviru stohastičkog modela, CAPEX je tretiran kao jedan od ključnih izvora finansijske neizvesnosti, čiji uticaj je najizraženiji u početnim fazama novčanih tokova. S obzirom na to da inicijalna investicija predstavlja dominantan negativni tok, varijabilnost ovog parametra ima direktan i disproporcionalno veliki uticaj na neto sadašnju vrednost (NPV) projekta.

Na ovaj način omogućeno je da se kroz simulacioni pristup sagleda ne samo očekivana vrednost investicije, već i njen potencijalni raspon, čime se obezbeđuje realističnija osnova za procenu investicionog rizika u okviru ekonomskog modela.

6. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

Razvijeni metodološki okvir primenjen je na slučaju porfirskog ležišta bakra, pri čemu je geološki blok model transformisan u ekonomski blok model dodeljivanjem ekonomske vrednosti svakom bloku na osnovu unapred definisanih tehno-ekonomskih parametara. Na taj način obezbeđena je direktna veza između geoloških karakteristika ležišta i ekonomskih performansi projekta, što predstavlja osnovu za optimizaciju i analizu rizika.

Rezultati predstavljaju ključnu fazu validacije i interpretacije razvijenog hibridnog modela za upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova. U ovom poglavlju integrisano su prikazani rezultati determinističke optimizacije, analize osetljivosti i stohastičke optimizacije, sa ciljem sagledavanja uticaja neizvesnosti na tehničko-ekonomske performanse rudarskog projekta.

U skladu sa metodološkim okvirom definisanim u prethodnim poglavljima, analiza započinje determinističkim pristupom, koji predstavlja referentnu osnovu za dalju evaluaciju. Ovaj pristup podrazumeva optimizaciju površinskog kopa i procenu ekonomskih i tehničkih pokazatelja na osnovu jedinstvenog skupa ulaznih parametara, čime se dobija jedna optimalna kontura i odgovarajuće vrednosti ekonomskih pokazatelja kroz preliminarnu dinamiku eksploatacije (NPV, IRR, PBP) [256].

Međutim, kako deterministički model ne uzima u obzir varijabilnost ključnih geoloških i ekonomskih parametara, njegova interpretacija je ograničena u kontekstu donošenja odluka pod neizvesnošću. Iz tog razloga, u narednom koraku primenjena je analiza osetljivosti, kojom su identifikovani dominantni parametri koji imaju najveći uticaj na ekonomske rezultate projekta. Ova analiza predstavlja važnu podršku u definisanju stohastičkog modela, ali i u kasnijim fazama upravljanja rizikom koje uključuju evaluaciju i tretman rizika.

Kvantifikacija neizvesnosti izvršena je primenom integrisanog stohastičkog pristupa, koji obuhvata geostatističke simulacije ležišta i simulacije tehno-ekonomskih parametara optimizacije. Geostatističke simulacije omogućavaju generisanje većeg broja podjednako verovatnih realizacija prostorne raspodele sadržaja, čime se odražava prirodna varijabilnost u ležištu, dok se tehnička i ekonomska neizvesnost modeluje kroz odgovarajuće raspodele verovatnoće ključnih ulaznih parametara. Kombinacijom ovih pristupa generiše se skup scenarija u kojima se za svaki scenario vrši optimizacija površinskog kopa i izračunavanje ekonomskih pokazatelja [256].

Na ovaj način, umesto jedne determinističke vrednosti, dobijaju se raspodele ključnih indikatora performansi (NPV, IRR i PBP), kao i verovatnoća ostvarenja negativnog finansijskog ishoda, izražena kroz pokazatelj $P(NPV < 0)$ [256].

Poseban doprinos ovog istraživanja ogleda se u razvoju probabilističkog modela eksploatacije, kojim se na osnovu integrisanja optimalnih kontura iz različitih stohastičkih realizacija određuje verovatnoća eksploatacije svakog pojedinačnog bloka. Na ovaj način uvodi se probabilistička interpretacija granica kopa i omogućava prelazak sa determinističkog na model odlučivanja uz uvažavanje rizika, čime se značajno unapređuje pouzdanost strateškog planiranja površinskih kopova [256].

U nastavku poglavlja rezultati su prikazani kroz četiri celine:

1. deterministički (bazni) scenario,
2. analiza osetljivosti ključnih parametara,
3. rezultati stohastičkog modela sa interpretacijom ishoda,
4. probabilističke konture eksploatacije,

čime se obezbeđuje jasan i logičan tok interpretacije razvijenog modela.

6.1. Rezultati determinističke optimizacije

Deterministička optimizacija predstavlja početni korak u evaluaciji analiziranog rudarskog projekta i služi kao referentna osnova za dalju analizu uticaja neizvesnosti. U ovom pristupu optimizacija granica kopa zasniva se na ekonomskom blok modelu ležišta, koji je generisan iz geološkog blok modela dodeljivanjem ekonomske vrednosti svakom bloku na osnovu fiksnog skupa tehnno-ekonomskih parametara definisanih u prethodnom poglavlju. Svi ulazni parametri tretiraju se kao determinističke veličine, bez razmatranja njihove varijabilnosti.

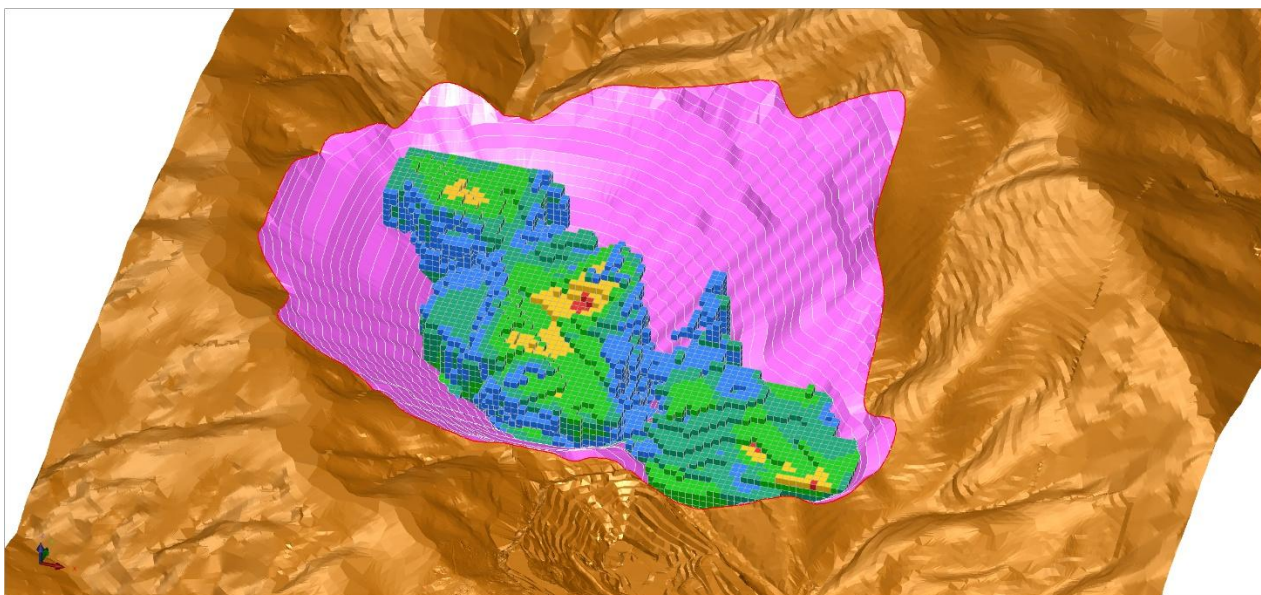
Primena *Lerchs–Grossmann algoritma* na ekonomski blok model rezultirala je definisanjem optimalne konture kopa koja maksimizuje ukupnu ekonomsku vrednost ležišta, uz poštovanje svih geometrijskih i tehnoloških ograničenja. Kako bi se omogućila procena vremenske raspodele eksploatacije i izračunavanje diskontovanih ekonomskih pokazatelja, na definisanu optimalnu konturu primenjen je algoritam za određivanje preliminarne dinamike eksploatacije zasnovan na *Milawa Balance* pristupu. Na taj način obezbeđena je konzistentna raspodela rudarskih radova kroz vremenski horizont projekta, što je omogućilo izračunavanje pokazatelja kao što su neto sadašnja vrednost (NPV), interna stopa rentabilnosti (IRR) i period povraćaja investicije (PBP). Numerički rezultati determinističke optimizacije prikazani su u tabeli 6.1 [256].

Tabela 6.1. Rezultati determinističke optimizacije [256]

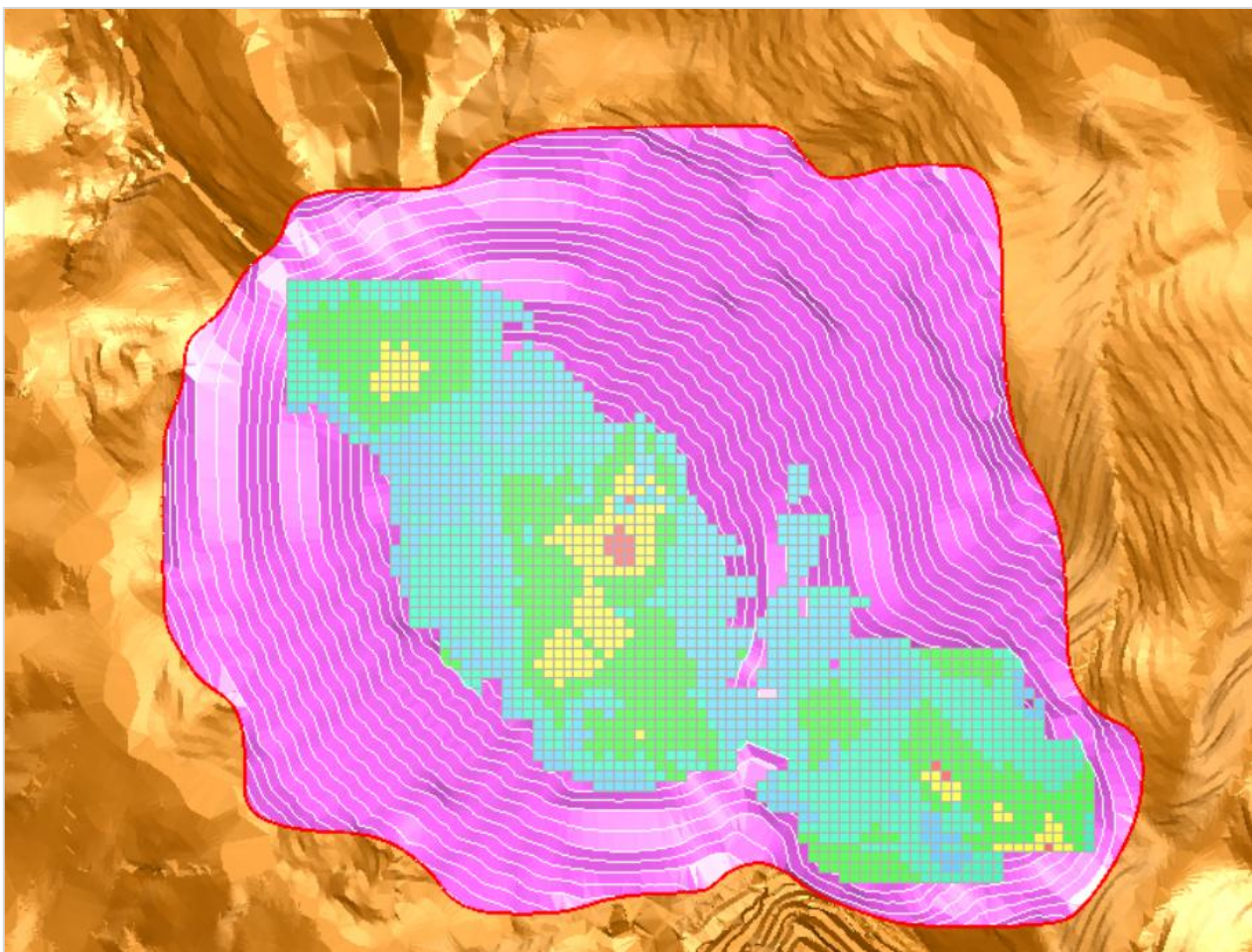
Ključni pokazatelj	Vrednost
<i>Ukupno iskopina (t)</i>	423.900.000
<i>Količina rude (t)</i>	142.338.255
<i>Količina jalovine (t)</i>	281.561.745
<i>Koeficijent otkrivke (t/t)</i>	1,98
<i>Prosečan sadržaj bakra (%)</i>	0,298 % Cu
<i>NPV (diskontna stopa od 10%)</i>	130.751.000 USD
<i>IRR (%)</i>	17,12 %
<i>Period povraćaja investicije</i>	3,84 godina
<i>Vek eksploatacije</i>	15 godina

Na osnovu dobijenih rezultata može se konstatovati da analizirani projekat, u okviru determinističkog pristupa, pokazuje pozitivne ekonomske performanse. Neto sadašnja vrednost od približno 130,8 miliona USD ukazuje na ekonomsku isplativost projekta pri diskontnoj stopi od 10%, dok interna stopa rentabilnosti od 17% potvrđuje njegovu atraktivnost u odnosu na uobičajene investicione kriterijume u rudarskoj industriji. Relativno kratak period povrata investicije (3,84 godina) dodatno ukazuje na povoljan odnos rizika i prinosa u ovom scenariju [256].

Optimalna kontura kopa dobijena na osnovu determinističke optimizacije, prikazana je na slici 6.1 i slici 6.2. Kontura obuhvata ukupno 142,3 miliona tona rude i 281,6 miliona tona jalovine, što odgovara definisanom ekonomskom optimumu. Ova kontura predstavlja bazni scenario eksploatacije i koristi se kao referentna tačka za poređenje sa rezultatima dobijenim primenom stohastičkog pristupa [256].

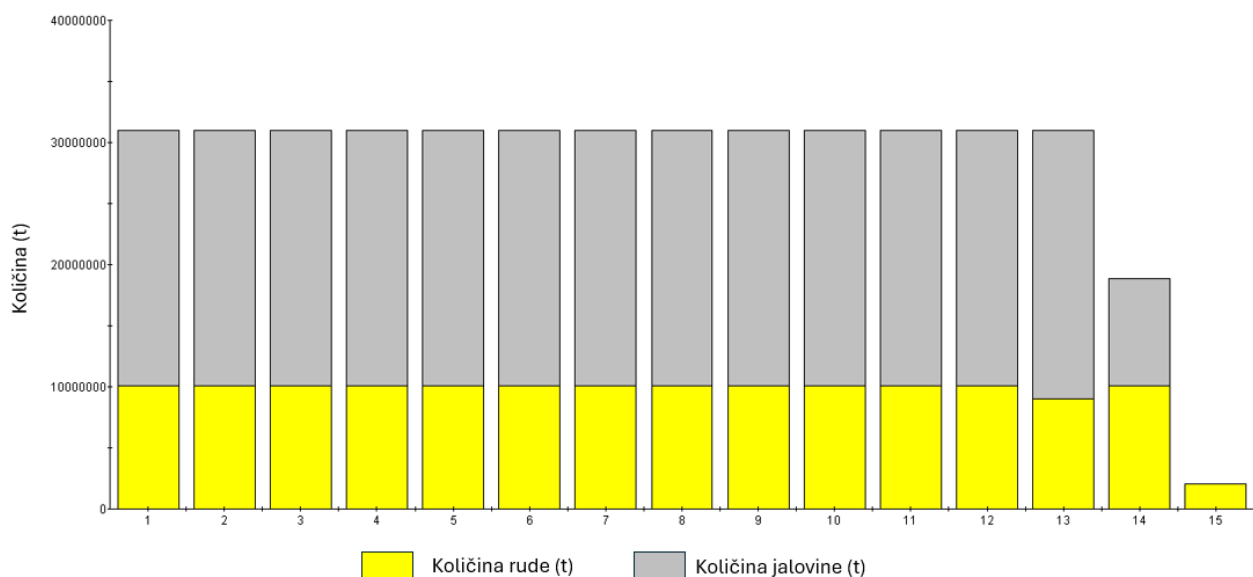


Slika 6.1. Optimalna kontura kopa sa prikazom rudnih blokova – 3D prikaz



Slika 6.2. Optimalna kontura kopa sa prikazom rudnih blokova – prikaz u planu

Definisana preliminarna dinamika eksploatacije prikazana je grafički na slici 6.3. Grafički prikaz pokazuje raspodelu ukupne količine materijala po godinama eksploatacije, uz razdvajanje rude i jalovine. Može se uočiti relativno stabilan nivo ukupne proizvodnje tokom većeg dela eksploatacionog perioda, što ukazuje na uravnotežen plan eksploatacije u skladu sa definisanim kapacitetima sistema.



Slika 6.3. Preliminarna dinamika eksploatacije u okviru optimalne konture kopa sa projektovanim kapacitetom od 10 Mt rude

Iako deterministički pristup omogućava jasan i intuitivan uvid u optimalno rešenje, njegovo osnovno ograničenje ogleda se u zanemarivanju neizvesnosti ulaznih parametara. U skladu sa tim, dobijeni rezultati ne predstavljaju jedinstven i izvestan ishod, već jednu od mogućih realizacija sistema.

U tom kontekstu, deterministički rezultat treba posmatrati kao referentni scenario, koji predstavlja osnovu za dalju analizu osetljivosti i razvoj stohastičkog modela, u cilju kvantifikacije rizika i donošenja odluka u uslovima neizvesnosti.

6.2. Rezultati analize osetljivosti

Analiza osetljivosti sprovedena je sa ciljem identifikacije ključnih ulaznih parametara koji imaju najveći uticaj na ekonomske performanse analiziranog rudarskog projekta. U okviru analize razmatrane su promene osnovnih tehnološko-ekonomskih parametara u rasponu od 80% do 120% u odnosu na baznu vrednost, pri čemu su ostali parametri zadržani konstantnim.

Rezultati analize prikazani su kroz promene osnovnih ekonomskih pokazatelja:

- neto sadašnje vrednosti (NPV) u tabeli 6.2,
- interne stope rentabilnosti (IRR) u tabeli 6.3Tabela 6.3, i
- perioda povraćaja investicije (PBP) u tabeli 6.4.

Grafički prikaz rezultata dat je na slici 6.4 kroz analizu osetljivost interne stope rentabilnosti (IRR) usled promene ulaznih parametara.

Tabela 6.2. Uticaj promene parametara na NPV [256]

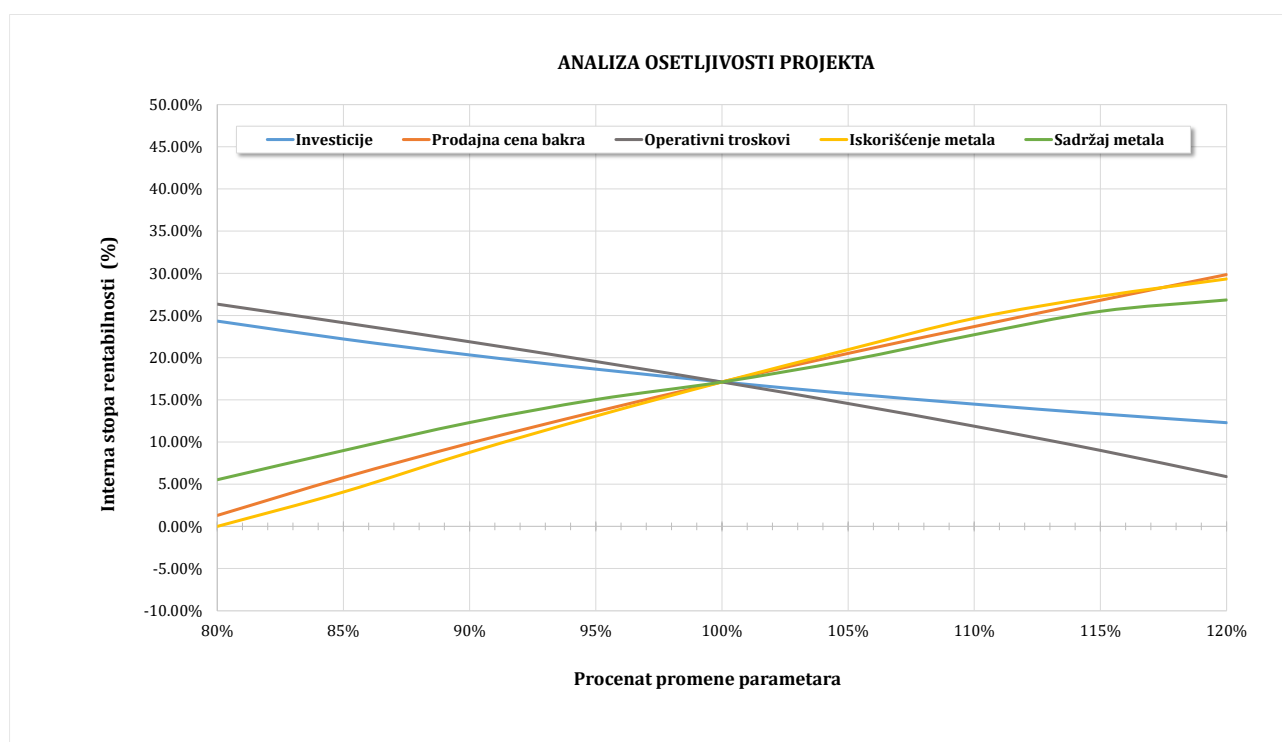
	80%	85%	90%	95%	100%	105%	110%	115%	120%
Investicije	210,750,989	190,750,989	170,750,989	150,750,989	130,750,989	110,750,989	90,750,989	70,750,989	50,750,989
Prodajna cena bakra	-133,404,250	-67,973,016	-1,607,050	64,385,023	130,750,989	197,490,847	263,109,027	329,288,047	395,654,012
Sadržaj metala	-60,074,684	-13,864,115	37,516,578	87,017,539	130,750,989	186,082,592	245,154,545	309,622,791	356,834,570
Operativni troškovi	325,656,645	276,930,231	228,203,817	179,477,403	130,750,989	82,024,575	33,298,160	-15,428,254	-64,154,668
Iskorišćenje metala	-170,364,088	-94,980,021	-19,806,550	55,366,921	130,750,989	205,986,999	281,308,527	356,544,537	379,309,775

Tabela 6.3. Uticaj promene parametara na IRR [256]

	80%	85%	90%	95%	100%	105%	110%	115%	120%
Investicije	24.33%	22.21%	20.32%	18.64%	17.12%	15.74%	14.49%	13.34%	12.29%
Prodajna cena bakra	1.29%	5.77%	9.85%	13.59%	17.12%	20.50%	23.68%	26.80%	29.84%
Sadržaj metala	5.54%	9.00%	12.32%	15.04%	17.12%	19.68%	22.73%	25.50%	26.85%
Operativni troškovi	26.35%	24.15%	21.89%	19.55%	17.12%	14.57%	11.88%	9.01%	5.90%
Iskorišćenje metala	0.00%	4.08%	8.78%	13.08%	17.12%	20.96%	24.67%	27.28%	29.34%

Tabela 6.4. Uticaj promene parametara na PBP [256]

	80%	85%	90%	95%	100%	105%	110%	115%	120%
Investicije	3.18	3.35	3.51	3.68	3.84	4.01	4.29	4.56	4.84
Prodajna cena bakra	14.23	8.95	7.24	4.33	3.84	3.55	3.30	3.09	2.84
Sadržaj metala	8.27	8.02	4.56	4.27	3.84	3.63	3.47	3.31	3.05
Operativni troškovi	3.15	3.30	3.46	3.64	3.84	4.12	4.57	7.78	8.84
Iskorišćenje metala	16.00	12.21	7.92	4.46	3.84	3.50	3.22	2.97	2.86



Slika 6.4. Osetljivost interne stope rentabilnosti (IRR) usled promene ulaznih parametara optimizacije

Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti da analizirani projekat pokazuje značajnu osetljivost na promene pojedinih ulaznih parametara, pri čemu se kao dominantni izdvajaju prodajna cena bakra i iskorišćenje metala.

Promena prodajne cene bakra ima najizraženiji uticaj na ekonomsku vrednost projekta. Povećanje cene na 120% rezultira rastom NPV na približno 395 miliona USD, dok smanjenje na 80% dovodi do negativne vrednosti NPV od oko –134 miliona USD. Ovakav raspon jasno ukazuje na visok nivo tržišnog rizika i direktnu zavisnost projekta od kretanja cena metala.

Sličan trend uočen je i kod parametra iskorišćenja metala, gde povećanje iskorišćenja značajno poboljšava ekonomske performanse, dok njegovo smanjenje ima izražen negativan efekat. Ovaj parametar ima direktan uticaj na količinu prodajnog metala i predstavlja jedan od ključnih tehničkih faktora rizika.

Operativni troškovi takođe imaju značajan uticaj na rezultate, ali u manjoj meri u odnosu na cenu metala i iskorišćenje. Povećanje troškova dovodi do smanjenja NPV, dok njihovo smanjenje poboljšava ekonomsku isplativost projekta, što je u skladu sa očekivanjima.

Sadržaj metala pokazuje umeren uticaj na ekonomske pokazatelje, pri čemu promene ovog parametra utiču na ukupnu količinu rudnih rezervi, ali sa manjim intenzitetom u odnosu na prethodno pomenute faktore. Važno je naglasiti da se u okviru ove analize promena sadržaja metala odnosi na varijaciju prosečnog sadržaja u blok modelu u rasponu od $\pm 20\%$, što predstavlja tipičan opseg moguće greške u proceni resursa u ranim fazama razvoja projekta. U tom smislu, dobijeni rezultati reflektuju direktan uticaj geološke neizvesnosti na ekonomske performanse, odnosno posledice potencijalnog precenjivanja ili potcenjivanja sadržaja u ukupnim količinama rude.

Sa druge strane, investicioni troškovi (CAPEX) imaju relativno linearan i predvidiv uticaj na ekonomsku vrednost projekta, pri čemu njihovo povećanje smanjuje NPV, ali bez izraženih nelinearnih efekata.

Analiza IRR i PBP pokazuje slične trendove, pri čemu promene dominantnih parametara dovode do značajnih odstupanja u stopi rentabilnosti i brzini povrata investicije. Posebno je značajno da pri nepovoljnim vrednostima ključnih parametara dolazi do značajnog smanjenja IRR i produženja perioda povrata, što dodatno potvrđuje prisustvo rizika u projektu.

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da su prodajna cena metala i iskorišćenje metala dominantni parametri koji generišu najveću neizvesnost u ekonomskim rezultatima projekta, dok operativni troškovi i sadržaj metala imaju sekundarni, ali i dalje značajan uticaj.

6.3. Rezultati stohastičkog modela

Rezultati stohastičkog modela predstavljaju ključnu fazu u kvantifikaciji neizvesnosti i proceni rizika analiziranog rudarskog projekta. Za razliku od determinističkog pristupa, koji daje jedinstveno optimalno rešenje, stohastički model omogućava sagledavanje spektra mogućih ishoda kroz generisanje većeg broja podjednako verovatnih scenarija.

Polazeći od parametara koji imaju uticaj na ekonomsku vrednost blokova (EVB), u stohastičkom modelu definisane su ključne promenljive koje direktno utiču na ekonomske i tehničke performanse projekta. Njihova varijabilnost modelovana je kroz odgovarajuće raspodele verovatnoće, dok je geološka neizvesnost obuhvaćena primenom geostatističkih simulacija ležišta, čime je omogućeno očuvanje prostorne varijabilnosti sadržaja [256].

Kombinacijom geoloških i tehno-ekonomskih simulacija generisan je skup scenarija, pri čemu je za svaki scenario izvršena optimizacija površinskog kopa i izračunavanje ekonomskih pokazatelja. Na taj način, umesto jedne determinističke vrednosti, dobijaju se raspodele ključnih indikatora performansi [256].

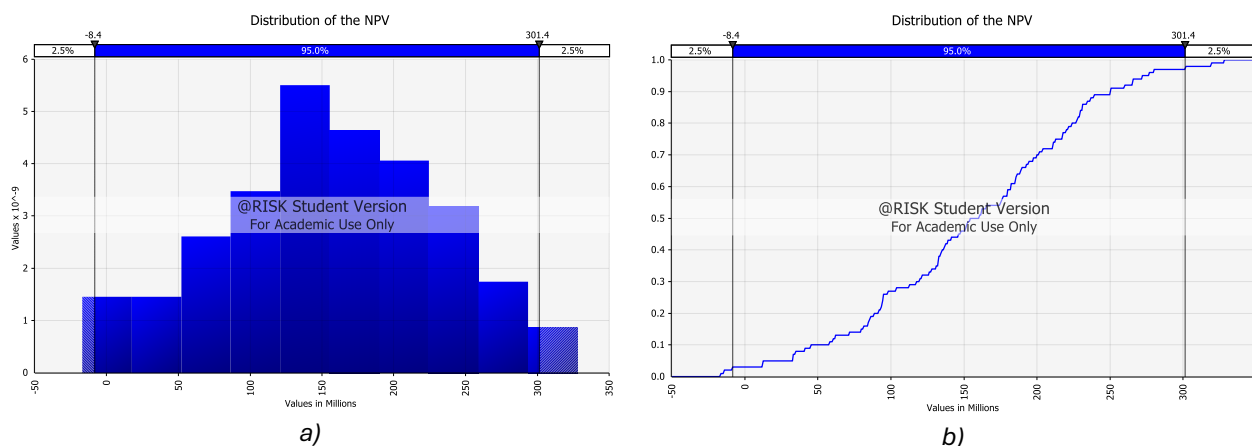
Ovakav pristup omogućava direktnu kvantifikaciju rizika kroz analizu verovatnoće ostvarenja negativnog finansijskog ishoda, kao i kroz primenu naprednih pokazatelja rizika, poput Value at Risk (VaR) i Conditional Value at Risk (CVaR) [256].

U nastavku poglavlja prikazani su rezultati stohastičkog modela kroz analizu raspodela ekonomskih pokazatelja, procenu verovatnoće negativnog ishoda, kao i interpretaciju rizika u kontekstu održivosti projekta.

6.3.1. Distribucije ekonomskih pokazatelja

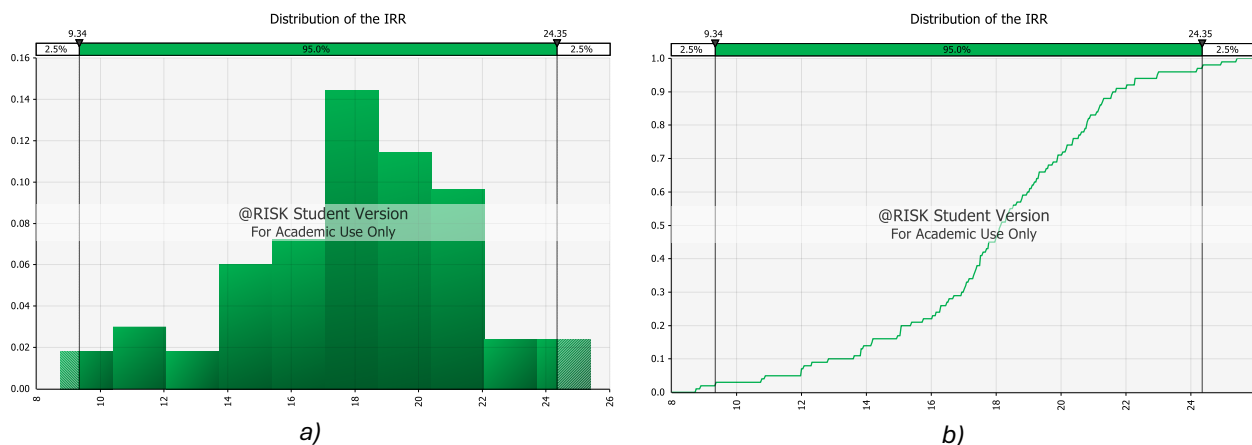
Rezultati primene stohastičkog modela omogućavaju detaljnije sagledavanje varijabilnosti ekonomskih performansi projekta kroz analizu više mogućih realizacija sistema. Umesto jedinstvenog rešenja, kao u determinističkom pristupu, ovde se razmatra čitav skup scenarija, čime se dobija realističniji uvid u potencijalne ishode projekta u uslovima neizvesnosti.

Distribucija neto sadašnje vrednosti (NPV) predstavlja osnovni indikator ekonomske održivosti projekta i prikazana je na slici 6.5. Dobijeni rezultati ukazuju na značajan raspon mogućih vrednosti, pri čemu srednja vrednost NPV iznosi približno 155,5 miliona USD, što je više u odnosu na deterministički rezultat od 130,8 miliona USD. Istovremeno, standardna devijacija od 76,5 miliona USD ukazuje na izraženu disperziju rezultata i visok nivo neizvesnosti. Minimalna zabeležena vrednost NPV iznosi oko -17,0 miliona USD, dok maksimalna dostiže približno 328 miliona USD, čime se potvrđuje širok opseg mogućih finansijskih ishoda. Histogram raspodele pokazuje relativno široku distribuciju sa izraženim varijacijama, dok kumulativna funkcija raspodele omogućava direktan uvid u verovatnoću ostvarenja određenih vrednosti [256].



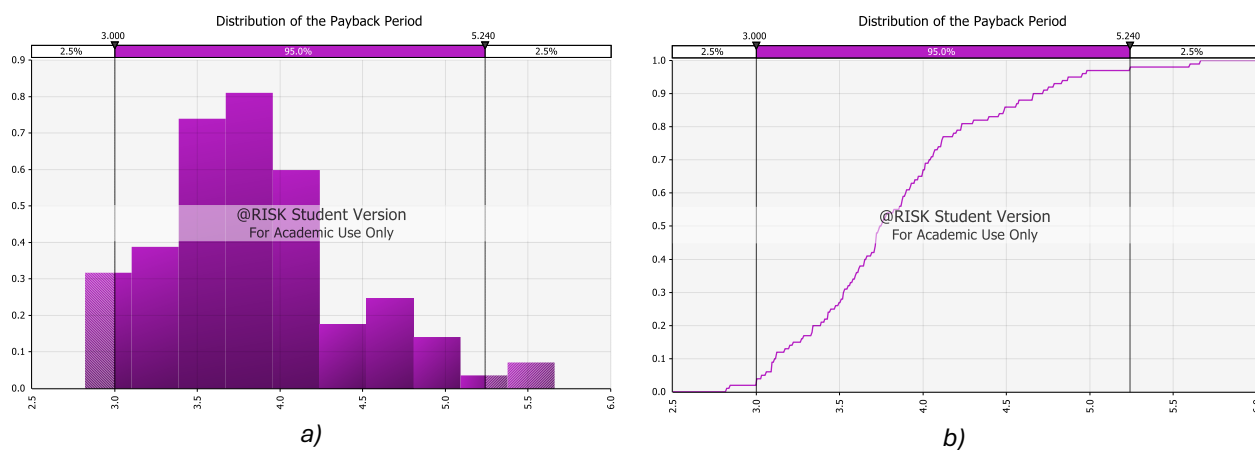
Slika 6.5. Distribucija NPV (miliona): (a) histogram raspodele; (b) kumulativna funkcija raspodele [256]

Slične karakteristike uočavaju se i kod distribucije interne stope rentabilnosti (IRR), prikazane na slici 6.6. Prosečna vrednost IRR iznosi 17,93%, uz standardnu devijaciju od 3,43%, dok se vrednosti kreću u rasponu od 8,74% do 25,39%. Ovakav raspon ukazuje na značajnu varijabilnost profitabilnosti projekta u zavisnosti od realizovanog scenarija, pri čemu se u nepovoljnim slučajevima IRR približava donjoj granici prihvatljivosti [256].



Slika 6.6. Distribucija IRR (%): (a) histogram raspodele; (b) kumulativna funkcija raspodele [256]

Distribucija perioda povrata investicije (PBP), prikazana na slici 6.7, dodatno ilustruje varijabilnost vremenske dinamike projekta. Dobijeni rezultati pokazuju da se period povrata kreće u rasponu od 2,82 do 5,66 godina, sa prosečnom vrednošću od 3,85 godina i standardnom devijacijom od 0,58 godina. Ovaj raspon ukazuje na to da brzina povrata investicije značajno zavisi od realizovanih ekonomskih i tehničkih uslova.



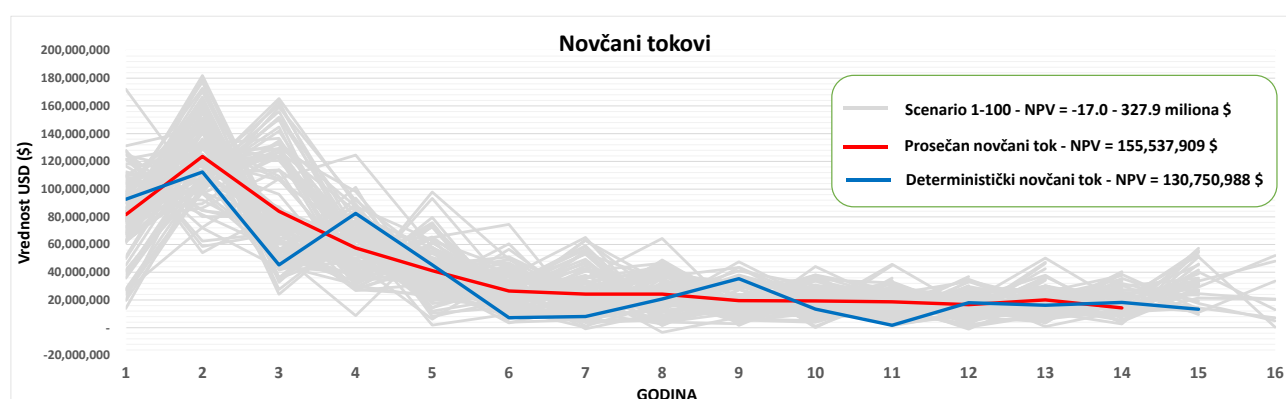
Slika 6.7. Distribucija PBP (godina): (a) histogram raspodele; (b) kumulativna funkcija raspodele [256]

Sumirani rezultati stohastičke analize ključnih ekonomskih i tehničkih pokazatelja prikazani su u tabeli 6.5. Pored srednjih vrednosti, tabela obuhvata i standardnu devijaciju, kao i minimalne i maksimalne vrednosti, čime se kvantifikuje opseg varijabilnosti analiziranog sistema.

Tabela 6.5. Sumirani rezultati stohastičke analize ključnih ekonomskih i tehničkih pokazatelja [256]

Ključni pokazatelj	Srednja vrednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Količina rude (t)	130.214.597	16.847.183	89.685.220	162.793.719
Količina jalovine (t)	280.104.403	68.480.510	139.139.780	435.053.781
NPV (\$)	155.537.909	76.537.723	-17.043.403	327.950.767
IRR (%)	17,93	3,43	8,74	25,39
PBP (godine)	3,85	0,58	2,82	5,66

Pored analize raspodela ekonomskih pokazatelja, dodatni uvid u performanse projekta obezbeđen je kroz analizu novčanih tokova po scenarijima, prikazanu na slici 6.8. Na grafikonu se može uočiti značajna varijabilnost novčanih tokova kroz životni vek projekta, pri čemu pojedinačni scenariji pokazuju izražena odstupanja u odnosu na srednju vrednost. Prosečan novčani tok ukazuje na relativno stabilniji trend, dok deterministički scenario predstavlja referentni slučaj. Međutim, prisustvo scenarija sa smanjenim ili negativnim novčanim tokovima u pojedinim periodima jasno ukazuje na postojanje finansijskog rizika tokom eksploatacije.



Slika 6.8. Novčani tokovi po scenarijima

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da, iako projekat ima pozitivnu očekivanu ekonomsku vrednost, karakteriše ga značajan nivo varijabilnosti, koji deterministički pristup ne može da obuhvati. Stohastički model omogućava identifikaciju kako povoljnih, tako i nepovoljnih scenarija, čime se obezbeđuje realističnija procena performansi projekta. Ovakav pristup predstavlja osnovu za dalju kvantifikaciju rizika i donošenje odluka zasnovanih na kriterijumima verovatnoće, što je predmet analize u narednom poglavlju.

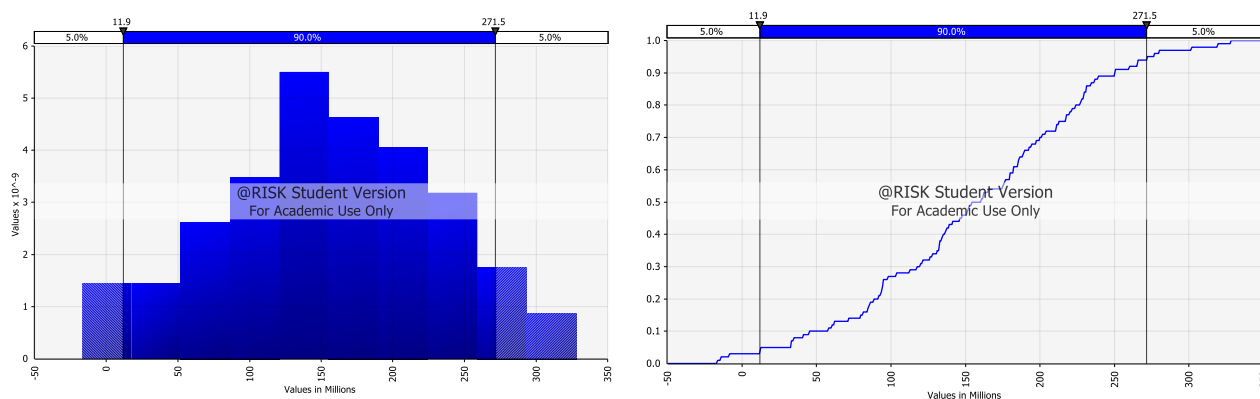
6.3.2. Kvantifikacija rizika ($P(NPV < 0)$, VaR, CVaR)

Kvantifikacija rizika sprovedena je na osnovu kumulativne funkcije raspodele neto sadašnje vrednosti (NPV), čime je omogućeno određivanje verovatnoće nepovoljnih finansijskih ishoda i definisanje ključnih pokazatelja rizika. Ovakav pristup omogućava direktno sagledavanje odnosa između verovatnoće i ekonomskog rezultata projekta, čime se prevazilaze ograničenja determinističkog pristupa.

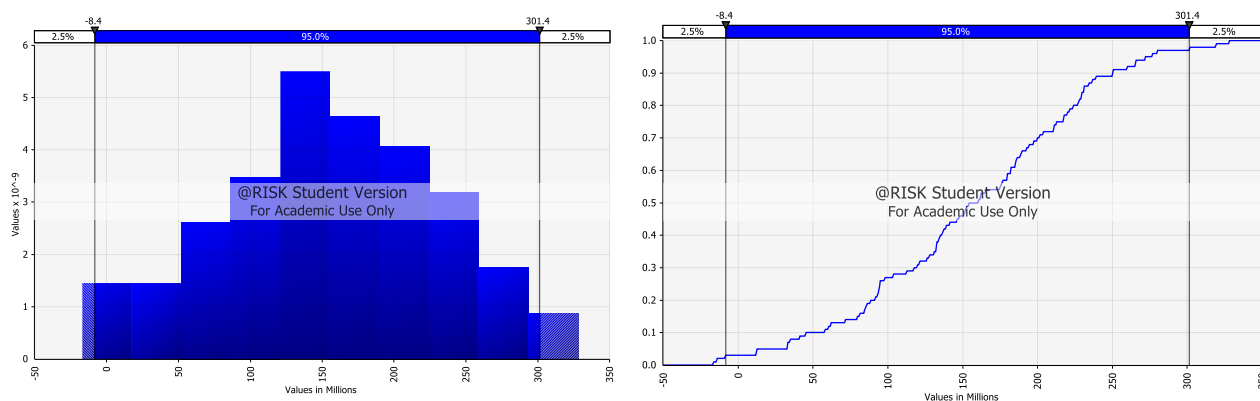
Na osnovu kumulativne raspodele NPV može se odrediti verovatnoća ostvarenja negativnog finansijskog ishoda. Dobijeni rezultati pokazuju da postoji približno **3% verovatnoće da NPV bude negativan**, što ukazuje na relativno nizak, ali ne i zanemarljiv rizik ekonomske neodrživosti projekta [256].

Dalja analiza sprovedena je primenom pokazatelja Value at Risk (VaR), koji predstavlja graničnu vrednost ispod koje se nalazi određeni procenat najnepovoljnijih ishoda. Pri nivou pouzdanosti od 90%, **VaR iznosi 11,9 miliona USD**, što znači da postoji 10% verovatnoće da NPV padne ispod ove vrednosti. Na nivou pouzdanosti od 95%, **VaR poprima negativnu vrednost od -8,4 miliona USD**, što ukazuje da u 5% najnepovoljnijih scenarija projekat ostvaruje gubitak. Pri nivou pouzdanosti od 97%, **VaR iznosi približno 0 miliona USD**, što potvrđuje da ekstremni scenariji uključuju prelazak u zonu negativnih ekonomskih rezultata [256].

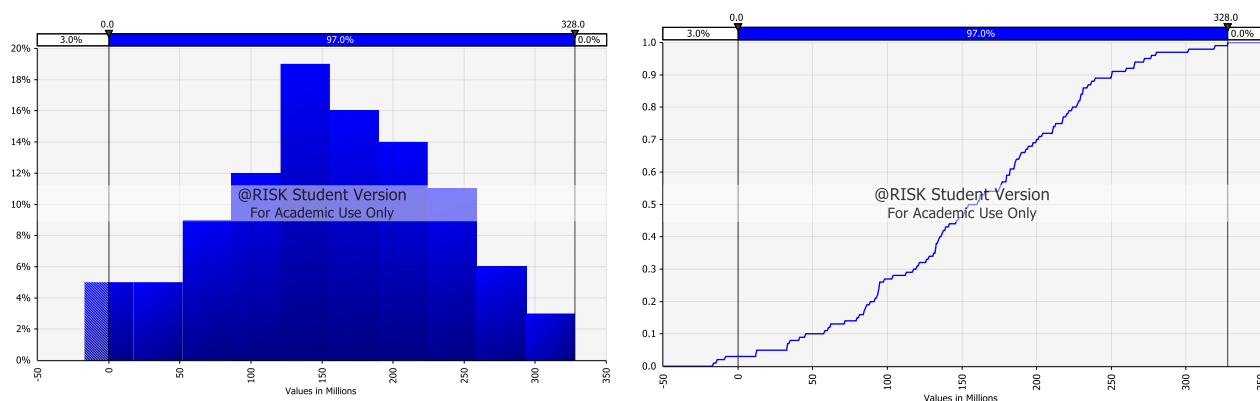
Grafički prikazi kumulativne funkcije raspodele za različite nivoe pouzdanosti prikazani su na slikama 6.9, 6.10 i 6.11.



Slika 6.9. Histogrami i kumulativne funkcije raspodele NPV za interval poverenja od CI=90% [256]



Slika 6.10. Histogrami i kumulativne funkcije raspodele NPV za interval poverenja od CI=95% [256]



Slika 6.11. Histogrami i kumulativne funkcije raspodele NPV za interval poverenja od CI=97% [256]

Pored VaR pokazatelja, primenjen je i Conditional Value at Risk (CVaR), koji predstavlja prosečnu vrednost gubitka u najnepovoljnijem delu raspodele. Dobijeni rezultati pokazuju da **CVaR iznosi –3,1 miliona USD za nivo pouzdanosti od 90%, –14,1 miliona USD za 95% i –13,2 miliona USD za 97%**. Ove vrednosti ukazuju na očekivani nivo gubitka u ekstremnim scenarijima i omogućavaju dublje sagledavanje repa raspodele, koji deterministički pristup ne obuhvata [256].

Numerički rezultati VaR i CVaR pokazatelja za različite nivoe pouzdanosti prikazani su u tabali 6.6.

Tabela 6.6. VaR i CVaR za različite intervale poverenja [256]

Interval poverenja	VaR (NPV u milionima \$)	CVaR (NPV u milionima \$)
90%	11,9	-3,1
95%	-8,4	-14,1
97%	0	-13,2

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da analizirani projekat, uprkos pozitivnoj očekivanoj vrednosti, nosi određeni nivo rizika koji je dominantno povezan sa nepovoljnim scenarijima u donjem delu raspodele. Međutim, imajući u vidu da je verovatnoća negativnog ishoda manja od 10%, može se smatrati da se projekat nalazi unutar prihvatljivog nivoa rizika, u skladu sa definisanim kriterijumima odlučivanja. Pri tome je važno naglasiti da je u ovom istraživanju prag prihvatljivosti definisan kao $P(NPV < 0) < 10\%$, pre svega u cilju testiranja i validacije razvijenog modela. U praksi, ovaj kriterijum može značajno varirati u zavisnosti od specifičnosti projekta, investicione strategije i sklonosti investitora ka riziku.

Ovakav pristup omogućava prelazak sa determinističkog na kvantitativno zasnovano upravljanje rizikom, pri čemu pokazatelji kao što su $P(NPV < 0)$, VaR i CVaR predstavljaju jedne od ključnih alata za donošenje strateških odluka u uslovima neizvesnosti.

6.3.3. Probabilistički model eksploatacije blokova

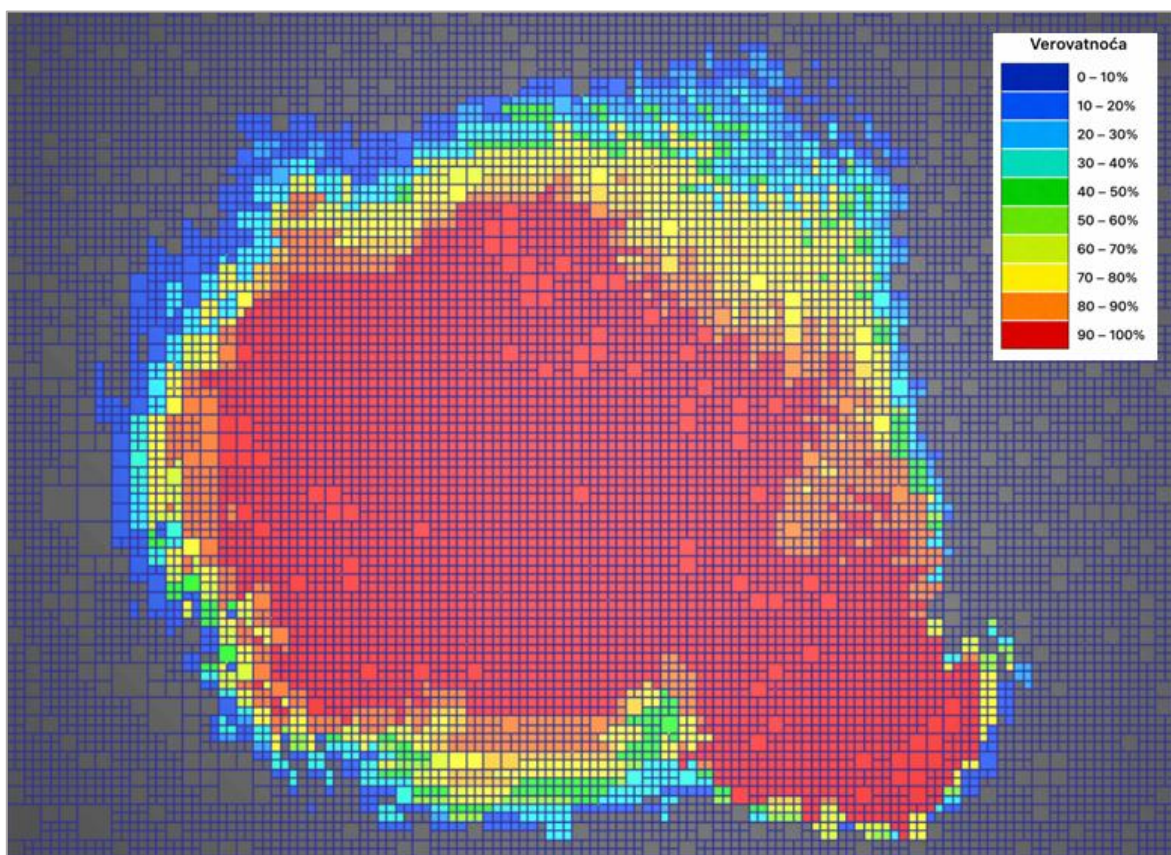
Polazeći od kvantifikovane geološke neizvesnosti, kao i varijabilnosti ključnih ekonomskih parametara, u okviru stohastičkog modela sproveden je niz optimizacija granica kopa kroz više podjednako verovatnih scenarija. Za svaki scenario definisan je optimalni oblik kopa primenom standardnog optimizacionog postupka, pri čemu su ulazni parametri varirani u skladu sa prethodno definisanim raspodelama [256].

Na ovaj način dobijen je skup optimalnih kontura, pri čemu svaka od njih predstavlja jedno moguće optimalno rešenje u uslovima neizvesnosti. Za razliku od determinističkog pristupa, gde se dobija jedinstvena kontura, stohastički pristup omogućava sagledavanje spektra mogućih geometrija kopa.

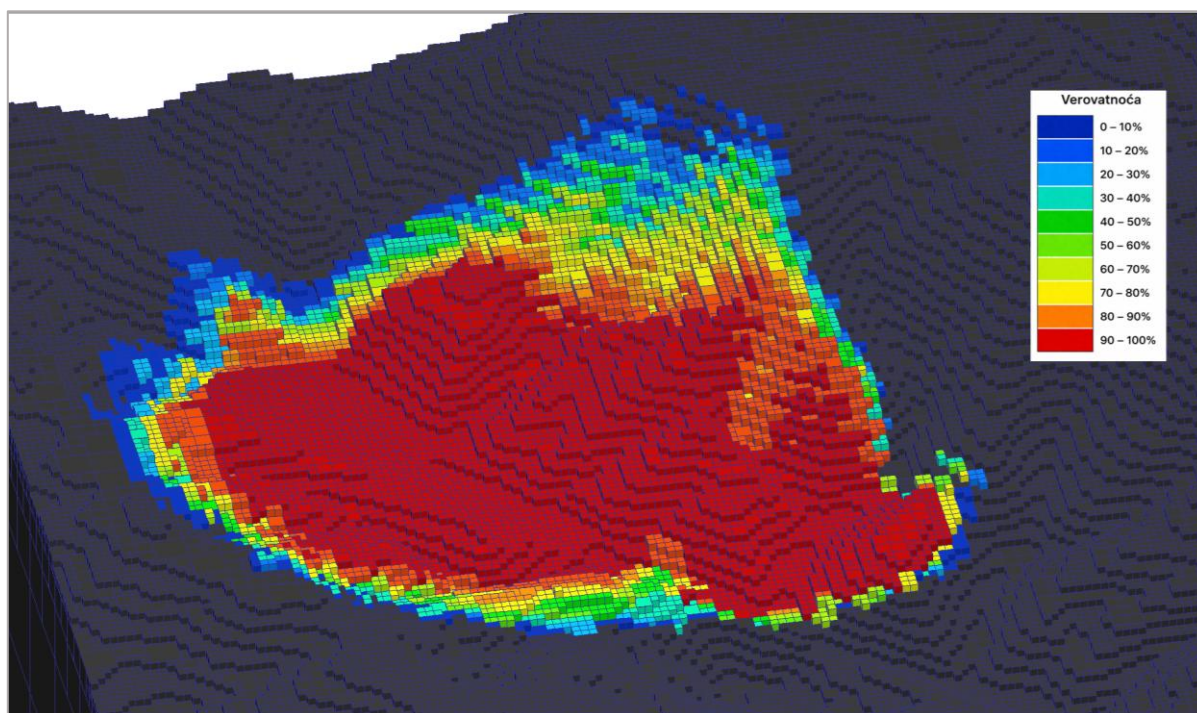
Integracijom rezultata svih realizacija definisana je verovatnoća eksploatacije za svaki pojedinačni blok, odnosno učestalost njegovog pojavljivanja unutar optimalne konture kroz sve analizirane

scenarije. Ovaj parametar predstavlja meru pouzdanosti eksploatacije i omogućava formiranje tzv. probabilističkog modela eksploatacije blokova (eng. Block Extraction Probability – BEP) [256].

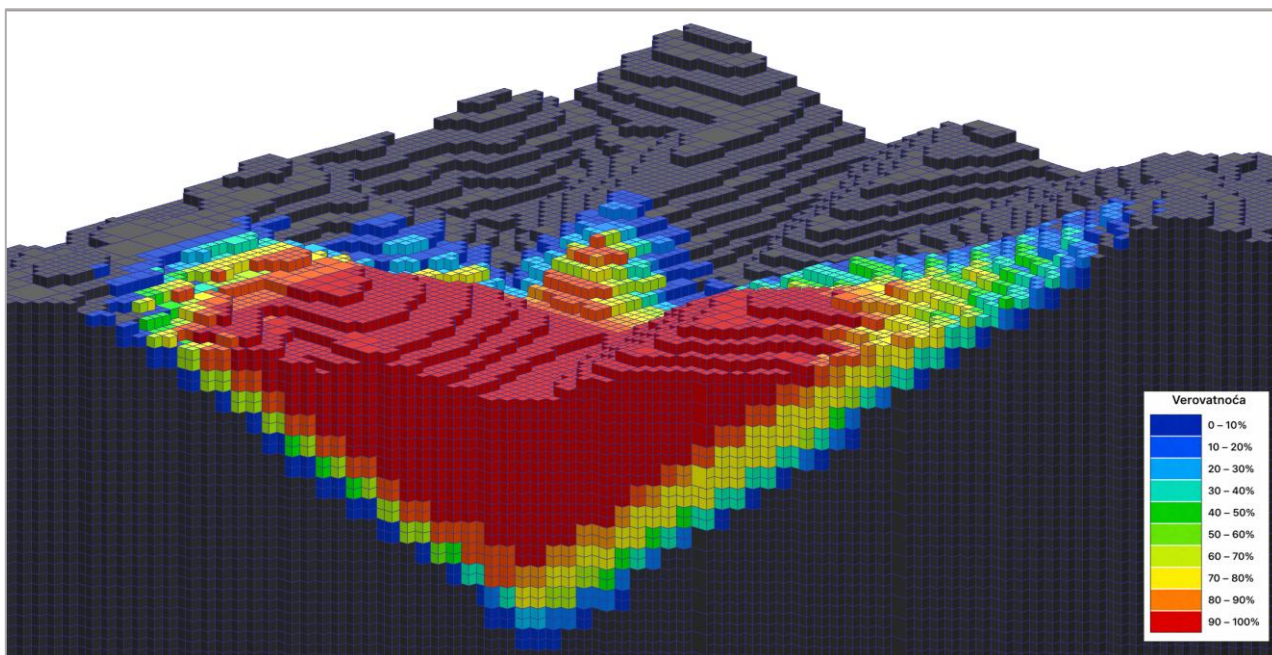
Slike 6.12, 6.13 i 6.14 prikazuju prostornu raspodelu verovatnoće eksploatacije blokova, gde se jasno izdvajaju zone različitog nivoa pouzdanosti.



Slika 6.12. Probabilistički model eksploatacije blokova - prikaz u planu [256]



Slika 6.13. Probabilistički model eksploatacije blokova – 3D prikaz [256]



Slika 6.14. Probabilistički model eksploatacije blokova – vertikalni presek [256]

Vizuelizacija probablističkog modela omogućava sagledavanje stabilnosti optimizacionog rešenja kroz različite prostorne prikaze. U planskom prikazu (slika 6.12) jasno se izdvajaju zone visoke verovatnoće eksploatacije koje formiraju kompaktno jezgro kopa, dok se u perifernim delovima uočava postepeni prelaz ka zonama niže pouzdanosti. Trodimenzionalni prikaz (slika 6.13) dodatno potvrđuje kontinuitet visokopouzdanih zona u prostoru, dok vertikalni presek (slika 6.14) omogućava analizu promena verovatnoće eksploatacije sa dubinom i identifikaciju kritičnih zona u okviru granica kopa.

Uočava se da najveći deo centralne zone ležišta karakterišu visoke vrednosti verovatnoće eksploatacije (80–100%), što ukazuje na stabilnost optimalnog rešenja i nisku osetljivost ovih blokova na promene ulaznih parametara. Ovi blokovi predstavljaju jezgro kopa koje se pojavljuje u gotovo svim razmatranim scenarijima, te se mogu smatrati pouzdanim za dugoročno planiranje eksploatacije.

Sa druge strane, u perifernim delovima kopa prisutne su zone srednje i niske verovatnoće eksploatacije (ispod 70%), koje ukazuju na povećanu osetljivost ovih blokova na promene geoloških i tehno-ekonomskih parametara. Ove zone predstavljaju prelazne oblasti u kojima dolazi do promene statusa blokova u odnosu na granični sadržaj, usled varijabilnosti sadržaja, cene metala i ostalih ulaznih parametara modela.

U cilju dodatne interpretacije rezultata, izvršeno je poređenje probablističkog modela eksploatacije blokova sa deterministički definisanom optimalnom konturom kopa. Analiza pokazuje da se najveći deo blokova unutar determinističke konture nalazi u zonama visoke verovatnoće eksploatacije (preko 80%), što potvrđuje da determinističko rešenje u velikoj meri obuhvata stabilni deo ležišta.

Međutim, uočeno je da se određeni delovi determinističke konture poklapaju sa zonama srednje i niske verovatnoće eksploatacije, posebno u perifernim delovima kopa. Ovo ukazuje da su pojedini blokovi uključeni u determinističko rešenje osetljivi na promene ulaznih parametara i da njihova eksploatacija nije u potpunosti pouzdana.

Sa druge strane, probablistički model omogućava jasno izdvajanje „sigurnog jezgra“ kopa, koje je stabilno kroz različite scenarije, kao i identifikaciju marginalnih zona kod kojih postoji povećan rizik promene statusa bloka u procesu optimizacije.

Posebno je značajno da se granice između visokopouzdanih i niskopouzdanih zona ne poklapaju u potpunosti sa deterministički definisanim granicama kopa, već pokazuju određeni stepen disperzije.

Ovo jasno ukazuje da determinističko rešenje predstavlja samo jedan od mogućih scenarija, dok stohastički pristup omogućava sagledavanje verovatnoće njegove realizacije. Na osnovu toga, probabilistički model eksploatacije blokova omogućava kvantifikaciju tzv. „pouzdanosti eksploatacije“ (mining confidence), pri čemu se za svaki blok definiše verovatnoća njegove eksploatacije kroz skup stohastičkih realizacija. Ovakav pristup pruža značajno unapređenje u odnosu na klasične determinističke metode, jer omogućava identifikaciju stabilnih i nestabilnih zona u okviru projekta [256].

Rezultati ukazuju da se najveći rizik u planiranju eksploatacije odnosi upravo na marginalne zone kopa, gde male promene ulaznih parametara mogu dovesti do značajnih promena u obuhvatu eksploatacije. U tim zonama postoji povećana verovatnoća odstupanja između planiranih i realizovanih rezultata, što može imati direktan uticaj na ekonomsku isplativost projekta. U tom kontekstu, probabilistički model predstavlja pouzdanu osnovu za donošenje odluka, jer omogućava [256]:

- identifikaciju stabilnih zona koje čine osnovu eksploatacije,
- prepoznavanje rizičnih zona koje zahtevaju dodatnu analizu ili oprez u planiranju,
- unapređenje definisanja faza eksploatacije i dugoročnih planova proizvodnje.

Na ovaj način se omogućava prelaz sa determinističkog pristupa zasnovanog na jedinstvenom rešenju ka pristupu koji uzima u obzir neizvesnost i varijabilnost ulaznih parametara, čime se obezbeđuje realističnija i pouzdanija procena performansi rudarskog projekta. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za integraciju geološke, tehničke i ekonomske neizvesnosti u proces strateškog planiranja, kao i za definisanje odgovarajućih mera upravljanja rizikom, koje će biti detaljnije razmatrane u narednom poglavlju [256].

6.3.4. Sinteza rezultata i tretman rizika

U ovom poglavlju izvršena je integrisana interpretacija rezultata determinističkog, stohastičkog i probabilističkog modela, sa ciljem sagledavanja ukupnog nivoa rizika i definisanja odgovarajućih smernica za donošenje odluka u procesu strateškog planiranja površinskog kopa.

Deterministička optimizacija obezbedila je referentni scenario eksploatacije, na osnovu koga su definisani osnovni tehničko-ekonomski pokazatelji projekta. Međutim, analiza osetljivosti je pokazala da ekonomski rezultati projekta značajno zavise od promene pojedinih ulaznih parametara, pri čemu su kao dominantni identifikovani prodajna cena metala, iskorišćenje u preradi, operativni troškovi i sadržaj korisne komponente. Ovi parametri predstavljaju ključne izvore neizvesnosti i direktno su uključeni u dalji razvoj stohastičkog modela.

Stohastička analiza omogućila je kvantifikaciju varijabilnosti ekonomskih pokazatelja, pri čemu su dobijene raspodele neto sadašnje vrednosti, interne stope rentabilnosti i perioda povraćaja investicije. Rezultati ukazuju da projekat, u skladu sa definisanim kriterijumom prihvatljivosti, ima relativno nizak nivo rizika negativnog ishoda, pri čemu verovatnoća da NPV bude manji od nule iznosi približno 3%. Ovaj rezultat ukazuje da se projekat nalazi unutar prihvatljivih granica rizika, pri čemu je važno naglasiti da je usvojeni kriterijum korišćen u cilju testiranja i validacije modela i može varirati u zavisnosti od investicione strategije i sklonosti investitora ka riziku.

I pored zadovoljavajućih rezultata u pogledu verovatnoće negativnog ishoda, neophodno je sagledati projekat u širem investicionom kontekstu. Ukupna kapitalna ulaganja od približno 400 miliona USD, u odnosu na očekivanu srednju vrednost NPV od oko 155 miliona USD, ukazuju na relativno ograničen odnos rizika i prinosa. U realnim uslovima donošenja investicionih odluka, ovakav odnos može biti ocenjen kao nedovoljno atraktivan, posebno imajući u vidu prisustvo dodatnih izvora neizvesnosti koji nisu u potpunosti kvantifikovani.

Posebnu pažnju treba posvetiti strukturi investicionih troškova, pri čemu se izdvajaju troškovi izmeštanja železničke infrastrukture, koji iznose oko 120 miliona USD i čine značajan deo ukupnog

kapitalnog ulaganja. Ova komponenta predstavlja jedan od ključnih izvora rizika, kako sa aspekta tačnosti procene troškova, tako i sa aspekta potencijalnih kašnjenja u realizaciji, koja mogu imati direktan uticaj na dinamiku projekta i njegovu ekonomsku isplativost. U tom smislu, preciznije definisanje ovih troškova predstavlja jedan od prioriteta u daljoj razradi projekta.

Za razliku od kapitalnih troškova, operativni troškovi su modelovani na osnovu realnih podataka iz postojećih rudarskih operacija sa sličnim geološkim i tehnološkim karakteristikama, što ukazuje na relativno visok nivo pouzdanosti ovih parametara. Sa druge strane, cena metala je definisana na osnovu dugoročnog proseka u prethodnom periodu i varirana kroz stohastički model u realističnom opsegu, što omogućava adekvatno sagledavanje tržišne neizvesnosti. Iako je trenutna tržišna cena značajno viša od usvojenog proseka, njen direktan prenos u model nije opravdan zbog izražene fluktuacije i nemogućnosti pouzdanog dugoročnog predviđanja.

Rezultati geostatističkih simulacija ukazuju na izraženu varijabilnost sadržaja u određenim zonama ležišta, posebno u centralnim delovima koji predstavljaju osnovu buduće eksploatacije. Ove zone, iako ekonomski najznačajnije, karakteriše povećana geološka neizvesnost, što može imati direktan uticaj na procenu rezervi i konačne ekonomske rezultate projekta. U tom smislu, unapređenje pouzdanosti geološkog modela (resursa), posebno kroz preciznije definisanje granica rudnog tela i dodatna istraživanja u zonama visoke varijabilnosti, predstavlja jednu od ključnih mera smanjenja rizika.

Dodatni izvor neizvesnosti identifikovan je u domenu prerade rude, odnosno u varijabilnosti iskorišćenja korisne komponente. Analiza osetljivosti pokazala je da promene ovog parametra mogu imati značajan uticaj na ekonomske performanse projekta. Posebno je značajno pitanje tretmana oksidne rude bakra, čije prisustvo može dovesti do smanjenja ukupnog iskorišćenja. U tom kontekstu, neophodno je obratiti posebnu pažnju na selektivnu eksploataciju, kontrolu kvaliteta rude i optimizaciju tehnološkog procesa prerade.

Probabilistički model eksploatacije blokova dodatno je omogućio identifikaciju prostornih zona različitog nivoa pouzdanosti, pri čemu su jasno izdvojene stabilne zone visoke verovatnoće eksploatacije i marginalne zone povećanog rizika. Ovakva podela ležišta na zone različitog nivoa pouzdanosti eksploatacije omogućava primenu različitih mera upravljanja rizikom u zavisnosti od karakteristika pojedinih zona, gde se stabilne zone mogu koristiti kao osnova za planiranje, dok marginalne zone zahtevaju dodatnu analizu, konzervativniji pristup ili redefinisane parametara.

Na osnovu integrisane analize može se zaključiti da razvijeni model predstavlja pouzdanu osnovu za donošenje odluka u uslovima neizvesnosti. Njegova validacija ogleda se u sposobnosti da konzistentno integriše rezultate determinističke optimizacije, analize osetljivosti i stohastičkog modeliranja, pri čemu su identifikovani ključni parametri i zone rizika u skladu sa geološkim karakteristikama ležišta i realnim tehno-ekonomskim uslovima eksploatacije. Dodatno se uz korišćenje realističnih ulaznih parametara i dobijanjem jasno obradivih i inženjerski smislenih rezultata potvrđuje praktična primenljivost modela.

Razvijeni pristup je u skladu sa principima međunarodnog standarda ISO 31000, jer obuhvata ključne faze upravljanja rizikom, uključujući identifikaciju izvora neizvesnosti, njihovu kvantitativnu analizu, evaluaciju nivoa rizika i definisanje potencijalnih mera za njegovo smanjenje. Time se obezbeđuje sistematičan i strukturiran okvir za upravljanje rizikom u strateškom planiranju rudarskih projekata.

U tom kontekstu, rezultati istraživanja omogućavaju definisanje konkretnih mera upravljanja rizikom, koje se odnose na unapređenje pouzdanosti geološkog modela, optimizaciju tehnoloških parametara prerade i preciznije definisanje kapitalnih troškova u segmentima sa izraženom neizvesnošću.

Na ovaj način, rezultati istraživanja ne samo da potvrđuju tehničku izvodljivost projekta u definisanim uslovima, već i ukazuju na ključne izvore neizvesnosti i konkretne pravce njihovog smanjenja. Time se obezbeđuje kvalitetna osnova za donošenje informisanih odluka i implementaciju efikasnih strategija upravljanja rizikom u daljim fazama razvoja projekta.

7. ZAKLJUČAK

Strateško planiranje površinskih kopova predstavlja kompleksan proces donošenja odluka u uslovima izražene geološke, tehničke i ekonomske neizvesnosti. Tradicionalni deterministički pristupi, koji se zasnivaju na jedinstvenom skupu ulaznih parametara i rezultiraju jedinstvenim optimizacionim rešenjem, ne omogućavaju adekvatno sagledavanje varijabilnosti i rizika koji prate razvoj rudarskih projekata. U tom kontekstu, osnovni cilj ovog istraživanja bio je razvoj metodološkog okvira koji omogućava integraciju različitih izvora neizvesnosti u proces strateškog planiranja, kao i kvantifikaciju njihovog uticaja na tehničko-ekonomske performanse projekta.

U disertaciji je razvijen hibridni model za upravljanje rizikom u strateškom planiranju površinskih kopova, koji integriše determinističke metode optimizacije, stohastičko modelovanje i principe međunarodnog standarda ISO 31000. Predloženi pristup omogućava prelazak sa jedinstvenog determinističkog rešenja ka probabilističkom okviru, u kome se odluke donose na osnovu raspodele mogućih ishoda, a ne samo njihove srednje vrednosti.

Primena geostatističkih simulacija omogućila je kvantifikaciju geološke neizvesnosti kroz generisanje većeg broja podjednako verovatnih realizacija blok modela, čime je očuvana prostorna varijabilnost sadržaja mineralne komponente. Na osnovu ovih rezultata definisan je koeficijent varijacije kao indikator geološke neizvesnosti, pri čemu je utvrđeno da povećana neizvesnost nije isključivo posledica nedovoljne istraženosti, već i inherentne geološke heterogenosti ležišta. Posebno je značajno da su zone sa povišenim sadržajem često istovremeno i zone povećane varijabilnosti, što ih čini ekonomski najznačajnijim, ali i najrizičnijim delovima ležišta.

Analiza osetljivosti identifikovala je ključne parametre koji dominantno utiču na ekonomske rezultate projekta, među kojima se izdvajaju cena metala, iskorišćenje u preradi, operativni troškovi i sadržaj korisne komponente. Ovi parametri su dalje modelovani kao slučajne promenljive u okviru stohastičkog modela, čime je omogućena kvantifikacija njihove varijabilnosti i uticaja na ekonomske performanse projekta.

Rezultati stohastičke analize pokazali su da projekat, u definisanim uslovima, ima relativno nizak nivo rizika negativnog ishoda, pri čemu verovatnoća da neto sadašnja vrednost bude manja od nule iznosi približno 3%. Međutim, i pored zadovoljavajućeg nivoa prihvatljivosti rizika, utvrđeno je da odnos između ukupnih investicionih troškova i očekivane vrednosti projekta ukazuje na određeni nivo investicione neizvesnosti, što zahteva dodatnu pažnju u fazi donošenja konačne odluke.

Poseban doprinos rada ogleda se u razvoju probabilističkog modela eksploatacije blokova, zasnovanog na integraciji optimalnih kontura dobijenih kroz stohastičke simulacije. Ovim pristupom za svaki blok definisana je verovatnoća njegove eksploatacije, čime je omogućena kvantifikacija pouzdanosti optimizacionog rešenja. Dobijeni rezultati ukazuju na jasno izdvajanje stabilne konture kopa, koja je karakterisana visokom verovatnoćom eksploatacije, kao i marginalnih zona u kojima postoji povećan nivo neizvesnosti. Time je pokazano da deterministički model ne pruža informaciju o pouzdanosti granica kopa, dok probabilistički pristup omogućava njihovu kvantifikaciju i interpretaciju.

Na osnovu sprovedene analize potvrđeno je da razvijeni model predstavlja pouzdanu osnovu za donošenje odluka u uslovima neizvesnosti. Validacija modela ogleda se u njegovoj sposobnosti da konzistentno integriše različite metode analize, kao i u činjenici da dobijeni rezultati imaju jasno geološko i ekonomsko utemeljenje i omogućavaju inženjerski smisleno tumačenje. Takođe, model omogućava kvantifikaciju rizika kroz više komplementarnih pokazatelja, što predstavlja značajno unapređenje u odnosu na klasične pristupe planiranju površinskih kopova.

U skladu sa principima standarda ISO 31000, razvijeni metodološki okvir obuhvata identifikaciju, analizu, evaluaciju i tretman rizika, čime se obezbeđuje sistematičan pristup upravljanju neizvesnošću u rudarskim projektima. Dobijeni rezultati omogućavaju ne samo procenu nivoa rizika, već i

identifikaciju konkretnih mera za njegovo smanjenje, uključujući unapređenje geološkog modela, optimizaciju tehnoloških parametara i preciznije definisanje investicionih troškova.

Glavni naučni doprinosi ovog istraživanja mogu se sumirati na sledeći način:

- razvoj integrisanog hibridnog modela zasnovanog na riziku, koji omogućava direktno uključivanje geološke i tehno-ekonomske neizvesnosti u proces strateškog planiranja površinskih kopova, u skladu sa principima standarda ISO 31000;
- razvoj jedinstvenog pristupa za simultanu integraciju geološke, tehničko-tehnološke i ekonomske neizvesnosti kroz povezivanje geostatističkih i simulacionih modela u okviru optimizacionog procesa;
- razvoj probabilističkog modela eksploatacije blokova zasnovanog na višestrukim optimizacionim scenarijima, kojim je omogućena kvantifikacija prostorne stabilnosti granica površinskog kopa;
- uvođenje novog kvantitativnog indikatora — verovatnoće eksploatacije bloka (Block Extraction Probability – BEP), kojim se definiše nivo pouzdanosti uključenja pojedinačnih blokova u optimalnu konturu kopa;
- unapređenje interpretacije rezultata optimizacije kroz definisanje probabilističkih kontura kopa i identifikaciju stabilnih i rizičnih zona eksploatacije;
- unapređenje procesa donošenja strateških odluka kroz integraciju rezultata optimizacije i kvantifikovanih pokazatelja rizika u jedinstven analitički okvir.

Sa aspekta praktične primene, rezultati istraživanja ukazuju da primena predloženog modela može značajno unaprediti postojeći proces donošenja odluka u rudarskoj industriji, kroz pouzdaniju procenu rizika i realističnije sagledavanje mogućih ishoda razvoja projekta. Ovakav pristup povećava pouzdanost i verodostojnost optimizacionih rešenja u uslovima realnih ulaznih parametara, dok istovremeno omogućava sistematično sagledavanje ključnih uticajnih faktora i analizu njihove međusobne interakcije. Time se obezbeđuje pouzdanija i realističnija osnova za donošenje informisanih i robusnih strateških odluka u uslovima neizvesnosti.

I pored toga što razvijeni model pruža značajne prednosti u odnosu na tradicionalne pristupe, određena ograničenja i dalje postoje, pre svega u pogledu zavisnosti rezultata od kvaliteta ulaznih podataka i pretpostavki korišćenih u modeliranju. U tom smislu, buduća istraživanja mogu biti usmerena ka unapređenju modela kroz integraciju dodatnih izvora neizvesnosti, primenu naprednih optimizacionih tehnika i razvoj robusnih pristupa planiranju proizvodnje.

Na osnovu svega navedenog može se zaključiti da razvijeni hibridni model predstavlja značajan korak ka unapređenju metodologije strateškog planiranja površinskih kopova, omogućavajući pouzdanije, transparentnije i informisanije donošenje odluka u uslovima neizvesnosti.

LITERATURA

- [1] D. Stevanović, „Optimizacija i planiranje površinskih kopova stohastičkim modelima (Doktorska disertacija)“, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2015.
- [2] P. Darling, *SME Mining Engineering Handbook*, Third Edition, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011.
- [3] Hustrulid, W.A., Kuchta, M. and Martin, R.K., *Open Pit Mine Planning & Design (3rd ed.)*, CRC Press, 2013.
- [4] H. Lerchs, „Optimum design of open-pit mines“, *CIM bulletin*, vol. 58, no. 633, pp. 47-54, 1965.
- [5] J. Whittle, „A decade of open pit mine planning and optimization - The craft of turning algorithms into packages“, u *Proceedings of APCOM'99: Computer Applications in the Minerals Industries: 28 International Symposium*, Golden, Colorado, 1999.
- [6] P. Dowd, „Risk in minerals projects: analysis, perception and management“, *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy Section A-Mining Technology*, vol. 106, pp. A9-A18, 1997.
- [7] Osanloo, M., Gholamnejad, J. and Karimi, B., „Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms“, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 22, no. 1, pp. 3-35, 2008.
- [8] Newman, A.M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A. and Eurek, K., „A review of operations research in mine planning“, *Interfaces*, vol. 40, no. 3, pp. 222-245, 2010.
- [9] H. Zhou, „Methods for Optimising Short-term Production Scheduling in Open-pit Mines“, The University of Sydney, Sydney, 2025.
- [10] K. Dagdelen, „Open pit optimization-strategies for improving economics of mining projects through mine planning“, u *17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, 2001.
- [11] J. M. Rendu, Risk management in evaluating mineral deposits, Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2017.
- [12] Blom, M., Pearce, A.R. and Stuckey, P.J., „Short-term planning for open pit mines: a review“, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 33, no. 5, pp. 318-339, 2019.
- [13] Wellmer, F.W., Dalheimer, M. and Wagner, M., Economic evaluations in exploration, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

- [14] C. Hutton, *Mining Economics Explained: A Guide for Boards, Executives, Managers and Investors*, Independently published, 2022.
- [15] Ministarstvo rudarstva i energetike, „Strategija upravljanja mineralnim i drugim geološkim resursima Republike Srbije za period do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine,“ Službeni glasnik Republike Srbije, Beograd, 2025.
- [16] P. Lassonde, *The Gold Book: The Complete Investment Guide to Precious Metals*, Toronto, Canada: Penguin Books, 1993.
- [17] J. Sykes, „Why is developing a new mine so difficult,“ u *Curtin Business School Colloquium*, Perth, Australia, 2013.
- [18] B. Cook, „Gold Miners & Explorers Face Serious Supply Problems,“ *The Gold Report*, 2010.
- [19] Rijdsdijk, T., Nehring, M., Kizil, M. and Roosta, F., „Confirming the Lassonde Curve through life cycle analysis and its effect on share price: A case study of three ASX listed gold companies,“ *Resources Policy*, vol. 77, p. 102704, 2022.
- [20] Resource Capital Funds, „Mining Value Creation – The Lassonde Curve,“ 2024.
- [21] Brennan, M.J. and Schwartz, E.S., „Evaluating natural resource investments. *Journal of business*,“ *The Journal of Business*, vol. 58, no. 2, pp. 135-157, 1985.
- [22] Anvari, K. and Benndorf, J., „Real time Mining—A review of developments within the last decade,“ *Mining*, vol. 5, no. 3, p. 38, 2025.
- [23] Andrade, L.B., Frenzel, M., Bookhagen, B., Kresse, C., Schmidt, M., Nassar, N., Alonso, E., Shojaeddini, E. and Sandmann, D., „From exploration to production: Understanding the development dynamics of lithium mining projects,“ *Resources Policy*, vol. 99, p. 105423, 2024.
- [24] Asr, E.T., Kakaie, R., Ataei, M. and Mohammadi, M.R.T., „A review of studies on sustainable development in mining life cycle,“ *Journal of Cleaner Production*, vol. 229, pp. 213-231, 2019.
- [25] Nehring, M. and Cheng, X., „An investigation into the impact of mine closure and its associated cost on life of mine planning and resource recovery,“ *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 228-239, 2016.
- [26] Vera-Burau, A., Pera, L.S. and Massanes, M.B., „Integration of quantitative ESG factors in a mining project: Case studies of a quarry,“ *Journal of Cleaner Production*, vol. 501, p. 145304, 2025.
- [27] „National Instrument 43-101: Standards of Disclosure for Mineral Projects,“ Canadian Securities Administrators (CSA), Ontario, Canada, 2023.

- [28] Al-Bakri, A.Y., Ahmed, H.A., Ahmed, H.M. and Hefni, M.A., „Evaluation studies of the new mining projects,“ *Open Geosciences*, vol. 15, no. 1, p. 20220466, 2023.
- [29] S. Rupprecht, „Establishing the feasibility of your proposed mining venture,“ u *Proceedings of the International Platinum Conference 'Platinum Adding Value'*, 2004.
- [30] Ataei, M. & Osanloo, M., „Determination of optimum cutoff grades of multiple metal deposits by using the Golden Section search method,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 103, no. 8, pp. 493-499, 2003.
- [31] J. Rendu, *An introduction to cut-off grade estimation*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2014.
- [32] Chanderman, L., Dohm, C.E. and Minnitt, R.C.A., „3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 117, no. 2, pp. 189-197, 2017.
- [33] Guo, J., Wang, J., Wu, L., Zhu, W., Jessell, M., Li, C., Li, F. and Hu, H., „Automatic and dynamic updating of three-dimensional ore body models from borehole and excavation data using the implicit function HRBF,“ *Ore Geology Reviews*, vol. 148, p. 105018, 2022.
- [34] T. Yıldız, „How can the effects of EIA procedures and legislation foreseen for the mining operation activities to mining change positively in Turkey?,“ *Resources Policy*, vol. 72, p. 102018, 2021.
- [35] Sydd, O., Sairinen, R., Orenius, O. and Tiainen, H., „Social impacts of modern small-scale mining: case studies from Serbia and Bosnia & Herzegovina,“ *Society & Natural Resources*, vol. 35, no. 8, pp. 816-83, 2022.
- [36] „Draft JORC Code: Australasian Code for Reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves,“ Joint Ore Reserves Committee (JORC), 2024.
- [37] „PERC Reporting Standard for Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves,“ Pan-European Reserves & Resources Reporting Committee (PERC), 2021.
- [38] Ajak, A.D. and Topal, E., „Real option in action: An example of flexible decision making at a mine operational level,“ *Resources Policy*, vol. 45, pp. 109-120, 2015.
- [39] Foo, N., Bloch, H. and Salim, R., „The optimisation rule for investment in mining projects,“ *Resources Policy*, vol. 55, pp. 123-132, 2018.
- [40] Miranda, O., Brandão, L.E. and Lazo, J.L., „A dynamic model for valuing flexible mining exploration projects under uncertainty,“ *Resources Policy*, vol. 52, pp. 393-404, 2017.
- [41] Chandra, A. and Hartley, P.R., „Sequential investment decisions for mining projects using compound multiple volatility real options approach,“ *Resources Policy*, vol. 97, p. 105241, 2024.

- [42] S. Myers, „Determinants of corporate borrowing,“ *Journal of financial economics*, vol. 5, no. 2, pp. 147-175, 1977.
- [43] J. Savolainen, „Real options in metal mining project valuation: Review of literature,“ *Resources Policy*, vol. 50, pp. 49-65, 2016.
- [44] „International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves,“ Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO), 2019.
- [45] „CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines,“ The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) , Westmount, Canada, 2019.
- [46] „The SME Guide for Reporting Exploration Results, Mineral Resources, and Mineral Reserves,“ Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Englewood, CO, 2017.
- [47] Rossi, M.E. and Deutsch, C.V., Mineral resource estimation, Springer Science & Business Media, 2013.
- [48] Boliden, „Boliden Summary Report, Mineral Resources and Mineral Reserves 2024 – Renström,“ 2024.
- [49] Box, G.E. and Draper, N.R., Empirical model-building and response surfaces, John Wiley & Sons, 1987.
- [50] J. Sterman, „All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist,“ *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, vol. 18, no. 4, pp. 501-53, 2002.
- [51] Al-Bakri, A.Y., Ahmed, H.A., Ahmed, H.M. and Hefni, M.A., „Evaluation studies of the new mining projects,“ *Open Geosciences*, vol. 15, no. 1, p. 20220466, 2023.
- [52] Bullock, R.L. and Mernitz, S., Mineral property evaluation: Handbook for feasibility studies and due diligence, Society for Mining, Metallurgy & Exploration., 2017.
- [53] Larsen, D., Addison, R., Kehmeier, R., Swendseid, T., Brown, T. and Uhrie, J., „Minimum engineering requirements for assessing mining projects,“ *Minerals & Metallurgical Processing*, vol. 33, no. 4, pp. 214-225, 2016.
- [54] P. Daniels, „Building a Mine With Just a PEA,“ u *SME Annual Conference 2024*, 2024.
- [55] Y. Y. Haimes, Risk Modeling, Assessment, and Management, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [56] „ISO 31000:2018; Risk management—Guidelines,“ ISO - International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2018.

- [57] P. Bartlett, „Strategic and tactical risk in mining,“ u *Strategic versus Tactical 2011: Proceedings of the Fourth International Seminar on Strategic versus Tactical Approaches in Mining*, 2011.
- [58] „IEC 31010:2019, Risk management – Risk assessment techniques,“ ISO - International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.
- [59] „ISO 31073:2022 Risk management —Vocabulary,“ ISO - International Standards Organization., Geneva, Switzerland, 2022.
- [60] F. P. Jovanović, Razvoj metodologije upravljanja rizikom strateških investicionih projekata, Bor: University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, 2016.
- [61] T. Consulting, „<https://tura.consulting/>,“ 1 November 2023. [Na mreži]. Available: <https://tura.consulting/insight/overview-of-risks-in-each-stage-of-mining-industry-development/>. [Accessed: 23 July 2025].
- [62] KPMG, „<https://kpmg.com>,“ 2024. [Na mreži]. Available: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/ca/pdf/2024/09/ca-digging-deep-risks-and-opportunities-in-mining-en.pdf>. [Accessed: 23 July 2025].
- [63] „Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2024,“ 2023. [Na mreži]. Available: https://www.ey.com/en_gl/insights/energy-resources/risks-opportunities. [Accessed: 22 July 2025].
- [64] Petar Marković, Dejan Stevanović, Mirjana Banković, Vuk Lazić, „Navigating the future: business risks and opportunities in the mining industry,“ u *XVI International conference OMC 2024*, Zlatibor, 2024.
- [65] „Enterprise Risk Management – Integrating with Strategy and Performance,“ COSO (Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission), 2017.
- [66] Badri, A., Nadeau, S. and Gbodossou, A., „A mining project is a field of risks: A systematic and preliminary portrait of mining risks,“ *International journal of safety and security engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 145-166, 2012.
- [67] Cruz-Ausejo, L., Cama-Ttito, N.A., Solano, P.F., Copez-Lonzoy, A. and Vera-Ponce, V.J., „Occupational accidents in mining workers: scoping review of studies published in the last 13 years,“ *BMJ open*, vol. 14, no. 10, p. e080572, 2024.
- [68] Aram, S.A., Saalidong, B.M., Appiah, A. and Utip, I.B., „Occupational health and safety in mining: Predictive probabilities of Personal Protective Equipment (PPE) use among artisanal goldminers in Ghana,“ *Plos one*, vol. 16, no. 9, p. e0257772, 2021.
- [69] Rudakov, M., Gridina, E. and Kretschmann, J., „Risk-based thinking as a basis for efficient occupational safety management in the mining industry,“ *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 470, 2021.

- [70] Rahayu, S. Y., Novrikasari, N., Hasyim, H., & Hasyim, H., „Systematic Review: Analysis of Factors Shaping Safety Culture in the Mining Industry,“ *Indonesian Journal of Global Health Research*, vol. 6, no. S6, pp. 909-916, 2024.
- [71] Ismail, S.N., Ramli, A. and Aziz, H.A., „Influencing factors on safety culture in mining industry: A systematic literature review approach,“ *Resources Policy*, vol. 74, p. 102250, 2021.
- [72] Tubis, A., Werbińska-Wojciechowska, S. and Wroblewski, A., „Risk assessment methods in mining industry—a systematic review,“ *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, p. 5172, 2020.
- [73] Petrović, D.V., Tanasijević, M., Milić, V., Lilić, N., Stojadinović, S. and Svrkota, I., „Risk assessment model of mining equipment failure based on fuzzy logic. Expert systems with applications,“ *Expert systems with applications*, vol. 41, no. 18, pp. 8157-8164, 2014.
- [74] V. Kazakidis, „Operating risk: Planning for flexible mining systems (Doctoral dissertation),“ University of British Columbia, 2001.
- [75] Nevskaya, M., Shabalova, A., Nikolaichuk, L. and Kirsanova, N., „Development of a Quantitative Assessment Algorithm for Operational Risks in Mining Engineering,“ *Resources*, vol. 14, no. 4, p. 53, 2025.
- [76] P. Bartlett, „Strategic and tactical risk in mining,“ u *Strategic versus Tactical 2011: Proceedings of the Fourth International Seminar on Strategic versus Tactical Approaches in Mining*, 2011.
- [77] T. Guerin, „Tactical problems with strategic consequences: A case study of how petroleum hydrocarbon suppliers support compliance and reduce risks in the minerals sector,“ *Resources Policy*, vol. 74, p. 102310, 2021.
- [78] ICMM, „Good Practice Guidance on Risk Management,“ The International Council on Mining and Metals (ICMM), 2024.
- [79] „Global Investor Commission on Mining 2030: 10-Year Vision and Recommendations for the Mining Industry,“ Global Investor Commission on Mining 2030, London, 2025.
- [80] Fu, C., Yu, C., Guo, M. and Zhang, L., „ESG rating and financial risk of mining industry companies,“ *Resources Policy*, vol. 88, p. 104308, 2024.
- [81] K. Komnitsas, „Social license to operate in mining: present views and future trends,“ *Resources*, vol. 9, no. 6, p. 79, 2025.
- [82] Chipangamate, N.S., Nwaila, G.T., Bourdeau, J.E. and Zhang, S.E., „Integration of stakeholder engagement practices in pursuit of social licence to operate in a modernising mining industry,“ *Resources Policy*, vol. 85, p. 103851, 2023.
- [83] Metropolis, N. and Ulam, S., „The monte carlo method,“ *Journal of the American statistical association*, vol. 44, no. 247, pp. 335-341, 1949.

- [84] P. Jorion, Value at risk: the new benchmark for managing financial risk, vol. 2, New York: McGraw-Hill, 1997.
- [85] Rockafellar, R.T. and Uryasev, S., „Optimization of conditional value-at-risk,“ *Journal of risk*, vol. 2, pp. 21-42, 2000.
- [86] Lane, G.R., Terblanche, M., Meyer, G. and Sasto, N., „Case study on quantitative risk modelling to obtain a realistic risk-adjusted project valuation,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 113, no. 3, pp. 181-190, 2013.
- [87] Armstrong, M., Galli, A., Ndiaye, A.A. and Lautier, D., „A reality check on hedging practices in the mining industry,“ u *Proceedings of the Project Evaluation Conference, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*, Melbourne, Australia, 2009.
- [88] A. Gillis, „How to avoid the worst financial outcomes in the mining industry,“ University of British Columbia, Vancouver, 2021.
- [89] Frolova, V., Glinkina, O. and Shpilkina, T., „Financial risks and their management in the mining industry,“ u *E3S Web of Conferences*, 2021.
- [90] R. Choudhary, „Risk Assessment and Its Management in Mining Industry,“ *International Journal of Geology, Earth & Enviromental Sciences*, vol. 5, no. 25, pp. 112-118, 2015.
- [91] Kuhn, C. and Visser, J.K., „Managing uncertainty in typical mining project studies,“ *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 105-120, 2014.
- [92] Maybee, B., Lowen, S. and Dunn, P., „Risk-based decision making within strategic mine planning,“ *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 44-58, 2010.
- [93] H. Kerzner, Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling, John Wiley & Sons, 2017.
- [94] Kamenopoulos, S., Agioutantis, Z. and Komnitsas, K., „A new hybrid decision support tool for evaluating the sustainability of mining projects,“ *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 259-265, 2018.
- [95] Nieto, L.S., Valverde, G.F., Krzemień, A., Fernández, P.R. and Rodríguez, F.J.I., „Economic risks in mining investments: A prospective analysis of capital cost estimation in copper mining projects,“ *Resources Policy*, vol. 99, p. 105427, 2024.
- [96] Domingues, M.S., Baptista, A.L. and Diogo, M.T., „Engineering complex systems applied to risk management in the mining industry,“ *International journal of mining science and technology*, vol. 27, no. 4, pp. 611-616, 2017.

- [97] Adam, K., Cambridge, M., Tsakarisianos, A. and Voudouris, N., „Evaluation of potential risks and mitigation measures in the design of a mining project,“ *Professor Kontopoulos Memorial Volume*, pp. 481-494, 2004.
- [98] „Risk Management in Mine Action,“ International Mine Action Standards (IMAS), New York, USA, 2019.
- [99] Foster, P. and Hoult, S., „The safety journey: Using a safety maturity model for safety planning and assurance in the UK coal mining industry,“ *Minerals*, vol. 3, no. 1, pp. 59-72, 2013.
- [100] J. Reason, Managing the risks of organizational accidents, New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2016.
- [101] D. Laurence, „Safety rules and regulations on mine sites—the problem and a solution,“ *Journal of safety research*, vol. 36, no. 1, pp. 39-50, 2005.
- [102] Hollnagel, E., Woods, D.D. and Leveson, N., Resilience engineering: Concepts and precepts. Ashgate Publishing, Ltd., Aldershot: Ashgate Publishing, Ltd., 2006.
- [103] B. Hati, „Risk Management Strategies in Mining Operations with a Project Management Approach,“ *Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)*, vol. 4, no. 4, pp. 6340-6346, 2025.
- [104] „IEC 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques,“ International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, 2019.
- [105] N. Pavlović, „Model upravljanja ekološkim rizicima površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina,“ Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2025.
- [106] Joy, J. and Griffiths, D., „National minerals industry safety and health risk assessment guideline - Version 6,“ Minerals Council of Australia, 2007.
- [107] C. Ericson, Hazard analysis techniques for system safety, John Wiley & Sons., 2015.
- [108] Fahl, S.K. and Askari-Nasab, H., „Benefits of discrete event simulation in modeling mining processes. Education and Research Archive,“ Mining Optimization Laboratory (MOL), University of Alberta, Edmonton, Canada, 2017.
- [109] B. Dhillon, Mining equipment reliability, maintainability, and safety, London: Springer London., 2008.
- [110] D. Laurence, „Optimisation of the mine closure process,“ *Journal of cleaner production*, vol. 14, no. 3-4, pp. 285-298, 2006.
- [111] Pavlovic, N., Ignjatovic, D. and Pavlovic, V., „Assessment of social and environmental risks on opencast coal mines,“ *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 10, no. 2-4, pp. 271-287, 2019.

- [112] Pavlovic, N., Petrovic, B., Subaranovic, T. and Pavlovic, V., „Opencast mine internal dump sanitation risks,“ u *Proceedings of the XI International Geomechanics Conference*, Varna, Bulgaria, 2024.
- [113] D. Nišić, „Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla (Doctoral dissertation),“ University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Belgrade, Serbia, 2018.
- [114] Simmons, D.C., Corbane, C., Menoni, S., Schneiderbauer, S. and Zschau, L., „Understanding disaster risk: risk assessment methodologies and examples,“ *Science for disaster risk management*, pp. 38-130, 2017.
- [115] Cáceres, A., Emery, X., Ibarra, F., Pérez, J., Seguel, S., Fuster, G., Pérez, A. and Riquelme, R., „A stochastic framework for mineral resource uncertainty quantification and management at Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi,“ *Minerals*, vol. 15, no. 8, p. 855, 2025.
- [116] S. Đenadić, „Razvoj sinteznog modela upravljanja rizikom kod rotornih bagera (Doctoral dissertation),“ University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, Belgrade, Serbia, 2022.
- [117] Quansah, E.A. and Yakin, Z., „Probabilistic and Stochastic Mine Planning: A Review of Methods for Managing Mine Project Uncertainties,“ *Journal Of Engineering And Computer Sciences*, vol. 4, no. 12, pp. 39-46, 2025.
- [118] Samis, M. and Davis, G.A., „Using Monte Carlo simulation with DCF and real options risk pricing techniques to analyse a mine financing proposal,“ *International Journal of Financial Engineering and Risk Management*, vol. 1, no. 3, pp. 264-281, 2014.
- [119] Anas, A.V., Amalia, R., Qaidahiyani, N.F., Djamaluddin and Herin, S.R.D., „Sensitivity Analysis of Net Present Value due to Optimal Pit Limit in PT Ceria Nugraha Indotama, Kolaka Regency, Southeast Sulawesi Province,“ u *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020.
- [120] Blooem, E.J.M.; J. D. van Wees, „Project Evaluation by Sensitivity, Scenario and Risk Analysis,“ u *Mine Planning and Equipment Selection*, Kalgoorline, WA, 2003.
- [121] Smith, G.L., Surujhlal, S.N. and Manyuchi, K.T., „Strategic mine planning-communicating uncertainty with scenarios,“ *Journal of the Southern African institute of mining and metallurgy*, vol. 108, no. 12, pp. 725-732, 2008.
- [122] Marchenko, R.S. and Cherepovitsyn, A.E., „Improvement of the quality of calculations using the Monte Carlo simulation method in the evaluation of mining investment projects,“ u *2017 International Conference" Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies"(IT&QM&IS)*, 2017.
- [123] Erdem, Ö.M.E.R., Güyagüler, T. and Demirel, N.U.R.A.Y., „Uncertainty assessment for the evaluation of net present value: a mining industry perspective,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 112, no. 5, pp. 405-412, 2012.

- [124] Rahmanpour, M. and Osanloo, M., „Determination of value at risk for long-term production planning in open pit mines in the presence of price uncertainty,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 116, no. 3, pp. 229-236, 2016.
- [125] Jelvez, E., Ortiz, J., Varela, N.M., Askari-Nasab, H. and Nelis, G., „A multi-stage methodology for long-term open-pit mine production planning under ore grade uncertainty,“ *Mathematics*, vol. 11, no. 8, p. 3907, 2023.
- [126] Donizetti de Lima, J., da Rosa da Silva, R., Dranka, G.G., Henrique Dal Molin Ribeiro, M. and Southier, L.F.P., „Introducing conditional expected loss: A novel metric for risk investment analysis,“ *The Engineering Economist*, vol. 69, no. 4, pp. 285-312, 2024.
- [127] Dimitrakopoulos, R.G. and Sabour, S.A.A., „Evaluating mine plans under uncertainty: Can the real options make a difference?,“ *Resources Policy*, vol. 32, no. 3, pp. 116-125, 2007.
- [128] R. Dimitrakopoulos, „Stochastic optimization for strategic mine planning: a decade of developments,“ *Journal of Mining Science*, vol. 47, no. 2, pp. 138-150, 2011.
- [129] J. Whittle, „The Facts and Fallacies of Open Pit Optimization,“ Whittle Programming Pty Ltd, North Balwyn, Victoria, 1989.
- [130] Morales, N., Seguel, S., Cáceres, A., Jélvez, E. and Alarcón, M., „Incorporation of geometallurgical attributes and geological uncertainty into long-term open-pit mine planning,“ *Minerals*, vol. 9, no. 2, p. 108, 2019.
- [131] Wang, J., Zhao, H., Bi, L. and Wang, L., „Implicit 3D modeling of ore body from geological boreholes data using hermite radial basis functions,“ *Minerals*, vol. 8, no. 10, p. 443, 2018.
- [132] Mery, N., Emery, X., Cáceres, A., Ribeiro, D. and Cunha, E., „Geostatistical modeling of the geological uncertainty in an iron ore deposit,“ *Ore Geology Reviews*, vol. 88, pp. 336-351, 2017.
- [133] „Pravilnika o klasifikaciji i kategorizaciji rezervi čvrstih mineralnih sirovina i vođenju evidencije o njima,“ Službeni list SFRJ, 1979.
- [134] Kolonja, B., Stevanović, D., Projektovanje površinskih kopova - Interna skripta, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.
- [135] Read, J. and Stacey, P., Guidelines for open pit slope design, Collingwood, Australia: CSIRO Publishing, 2009.
- [136] Quansah, E.A., Anani, A. and Adewuyi, S., „Optimizing Overall Slope Angle and Net Present Value (NPV) Through the Utilization of Ground-Based Pit Wall Monitoring Data,“ u *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2024.
- [137] Utili, S., Agosti, A., Morales, N., Valderrama, C., Pell, R. and Albornoz, G., „Optimal pitwall shapes to increase financial return and decrease carbon footprint of open pit mines,“ *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 39, no. 2, pp. 335-355, 2022.

- [138] Venter, J., Wesseloo, J. and Maybee, B., „A formulation for optimum risk in open-pit mining,” *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 124, no. 8, pp. 461-471, 2024.
- [139] Chaves, L.S., Carvalho, L.A., Souza, F.R., Nader, B., Ortiz, C.E.A., Torres, V.F.N., Câmara, T.R., Napa-García, G.F. and Valadão, G.E.S., „Analysis of the impacts of slope angle variation on slope stability and NPV via two different final pit definition techniques,” *REM-International Engineering Journal*, vol. 73, pp. 119-126, 2020.
- [140] L. Contreras, „An economic risk evaluation approach for pit slope optimization,” *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 115, no. 7, pp. 607-622, 2015.
- [141] K. Lane, The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice, COMET Strategy Pty Ltd, 2016.
- [142] P. Crowson, „Mine size and the structure of costs,” *Resources Policy*, vol. 29, no. 1-2, pp. 15-36, 2003.
- [143] Wellmer, F. and Scholz, R., „What is the optimal and sustainable lifetime of a mine?,” *Sustainability*, vol. 10, no. 2, p. 480, 2018.
- [144] Wagner, M. and Wellmer, F.W., „The optimum lifetime of a mine taking into account the learning curve of exploration,” u *Energy and Mineral Resources for the 21st Century: Geology of Mineral Deposits: Mineral Economics: Proceedings of the 30th International Geological Congress*, Beijing, China, 1997.
- [145] Savić M., Bugarin M., Modeliranje ležišta sa procenom resursa i planiranje otkopavanja na površinskim kopovima, Bor, Serbia: Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2019.
- [146] H. K. Taylor, „Mine valuation and feasibility studies,” Spokane, WA, Northwest Mining Association, 1977, pp. 1-17.
- [147] H. Taylor, „Rates of working of mines-a simple rule of thumb,” *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, vol. 95, pp. 95, A203–A204, 1986.
- [148] H. K. Taylor, „Ore reserves – the mining aspect,” *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, vol. 100, p. 146–158, 1991.
- [149] K. Long, „A test and re-estimation of Taylor’s empirical capacity–reserve relationship,” *Natural resources research*, vol. 18, no. 1, pp. 57-63, 2009.
- [150] Balci, M. and Kumral, M., „Capacity planning in open-pit mines under economies of scale and block sequence considerations,” *Mineral Economics*, vol. 38, no. 2, pp. 425-443, 2025.
- [151] Wang, S., Cao, B., Bai, R. and Liu, G., „Determination of production capacity for open-pit coal mines under uncertainty: A model based on economies of scale,” *PloS one*, vol. 20, no. 1, p. e0312130, 2025.

- [152] S. Sabour, „Mine size optimization using marginal analysis,“ *Resources Policy*, vol. 28, no. 3, pp. 145-151, 2002.
- [153] Souza, F.R., Câmara, T.R., Torres, V.F.N., Nader, B. and Galery, R., „Optimum mine production rate based on price uncertainty,“ *REM-International Engineering Journal*, vol. 72, no. 4, pp. 625-634, 2019.
- [154] R. Tatiya, *Surface and underground excavations: methods, techniques and equipment*, CRC press, 2005.
- [155] Hekmat, A., Osanloo, M. and Moarefvand, P., „Investigating the Effect of Different Block Dimensions on the Economic Life of Open Pit Mines,“ u *Proceedings of 35th APCOM Symposium 2011*, Wollongong, NSW, Australia, 2011.
- [156] Islam, M.M., Abankwa, B., Pranto, M.A., Sakibul, S., Hasan, M.G.R., Akther, M.A. and Shoumi, S., „Optimization of Transportation Infrastructure for Mining Supply Chain Efficiency,“ *North American Academic Research*, vol. 8, no. 2, pp. 231-262, 2025.
- [157] Mohutsiwa, M. and Musingwini, C., „Parametric estimation of capital costs for establishing a coal mine: South Africa case study,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 115, no. 8, pp. 789-797, 2015.
- [158] Losaladjome Mboyo, H., Huo, B., Mulenga, F.K., Mabe Fogang, P. and Kaunde Kasongo, J.K., „Distribution of operating costs along the value chain of an open-pit copper mine,“ *Applied Sciences*, vol. 15, no. 3, p. 1602, 2025.
- [159] Dehghani, H. and Ataee-Pour, M., „Determination of the effect of operating cost uncertainty on mining project evaluation,“ *Resources Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 109-117, 2012.
- [160] Nourali, H. and Osanloo, M., „A regression-tree-based model for mining capital cost estimation,“ *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 34, no. 2, pp. 88-100, 2020.
- [161] Ebrahimi, A. and Eng, P., „The importance of dilution factor for open pit mining projects,“ u *World Mining Congress*, Montreal, 2013.
- [162] Masoumi, I., Kamali, G., Asghari, O. and Emery, X., „Assessing the impact of geologic contact dilution in ore/waste classification in the Gol-Gohar iron ore mine, southeastern Iran,“ *Minerals*, vol. 10, no. 4, p. 336, 2020.
- [163] Marković, P., Stevanović, D., Pesić-Georgiadis, M. and Banković, M., „Application of MCDA in the determination of optimal block size for open-pit modelling and mine planning. Podzemni radovi, (38), pp.67-85,“ *Underground mining engineering*, vol. 38, pp. 67-85, 2021.
- [164] Leuangthong, O., Neufeld, C. and Deutsch, C.V., „Optimal selection of selective mining unit (SMU) size,“ *University of Alberta, Alberta*, 2003.

- [165] Nwaila, G.T., Frimmel, H.E., Zhang, S.E., Bourdeau, J.E., Tolmay, L.C., Durrheim, R.J. and Ghorbani, Y., „The minerals industry in the era of digital transition: An energy-efficient and environmentally conscious approach,“ *Resources Policy*, vol. 78, p. 102851, 2022.
- [166] Wills, B.A. and Finch, J., *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Butterworth-heinemann, 2015.
- [167] L. Xi-guan, „Metallurgical Recovery Techniques: Methods, Advancements, and Environmental Considerations,“ *Journal of Powder Metallurgy & Mining*, vol. 13, no. 6, p. 448, 2024.
- [168] McNulty, B.A. and Jowitt, S.M., „Exploration for Byproduct Critical Element Resources: Proxy Development Using a LA–ICP–MS Database,“ *Frontiers in Earth Science*, vol. 10, p. 892941, 2022.
- [169] Dominy, S.C., O’connor, L., Parbhakar-Fox, A., Glass, H.J. and Purevgerel, S., „Geometallurgy—A Route to More Resilient Mine Operations,“ *Minerals*, vol. 8, no. 12, p. 560, 2018.
- [170] Tilton, J.E. and Guzmán, J.I., *Mineral economics and policy*. Routledge, Routledge: RFF Press, 2016.
- [171] „The London Metal Exchange (LME),“ [Na mreži]. Available: <https://www.lme.com/metals>. [Accessed: 29 January 2026].
- [172] Chen, Y. and Li, J., „Price Formation Mechanisms of Energy and Critical Minerals,“ u *Energy and Critical Mineral Security in China*, Singapore, Springer Nature Singapore, 2025, pp. 179-217.
- [173] I. Runge, Title: *Mining Economics and Strategy*, Littleton, CO, U.S.A.: Society for Mining Metallurgy & Exploration (SME), 1998.
- [174] B. Hall, *Cut-off Grades and Optimising the Strategic Mine Plan*, Carlton, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), 2014.
- [175] *Cost Estimation Handbook - Monograph 27*, Carlton Victoria, Australia: The Australian Institute Of Mining And Metallurgy, 2012.
- [176] „Copper prices have hit record highs, but smelters face mounting strategic pressures,“ IEA (International Energy Agency), Paris, 2026.
- [177] U. Söderström, „Copper Smelter Revenue Stream,“ Boliden Capital Markets Day Presentation, 2008.
- [178] Whittle, D. and Vassiliev, P., „Synthesis of stochastic recovery prediction and cutoff optimization,“ u *Proceedings of the Mine to Mill Conference*, Brisbane, Australia, 1998.

- [179] Whittle, D. and Wooller, R., „Maximising the economic performance of your comminution circuit through cut-off optimization,” *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environmen*, vol. 13, no. 4, pp. 147-153, 1999.
- [180] Asad, M.W.A. and Dimitrakopoulos, R., „A heuristic approach to stochastic cutoff grade optimization for open pit mining complexes with multiple processing streams,” *Resources Policy*, vol. 38, no. 4, pp. 591-597, 2013.
- [181] Githiria, J. and Musingwini, C., „A stochastic cut-off grade optimization model to incorporate uncertainty for improved project value,” *Journal of the Southern African institute of mining and metallurgy*, vol. 119, no. 3, pp. 217-228, 2019.
- [182] Thompson, M. and Barr, D., „Cut-off grade: A real options analysis,” *Resources Policy*, vol. 42, pp. 88-92, 2014.
- [183] KPI Mining Solutions, „Cutoff Optimization in KPI-COSMO: Improving Destination Decisions Under Uncertainty“.
- [184] K. Lane, „Choosing the optimum cut-off grade,” *Colorado School of Mines Quarterly*, vol. 59, no. 4, pp. 881-829, 1964.
- [185] K. Lane, *The Economics Definition of Ore: Cut Off Grades in Theory and Practice*, London: Mining Journal Books Ltd, 1988.
- [186] Baek, J., Choi, Y. and Park, H.S., „Uncertainty representation method for open pit optimization results due to variation in mineral prices,” *Minerals*, vol. 6, no. 1, p. 17, 2016.
- [187] Saleki, M., Kakaie, R. and Ataei, M., „Mathematical relationship between ultimate pit limits generated by discounted and undiscounted block value maximization in open pit mining,” *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, no. 2, pp. 94-99, 2019.
- [188] Díaz, A.B., Álvarez, I.D., Fernández, C.C., Krzemień, A. and Rodríguez, F.J.I., „Calculating ultimate pit limits and determining pushbacks in open-pit mining projects,” *Resources Policy*, vol. 72, p. 102058, 2021.
- [189] Wright, A., „MOVING CONE II-A simple algorithm for optimum pit limits design,” u *Proceedings of the 28th Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries (APCOM)*, Golden, CO, USA, 20–22 October 1999.
- [190] Pana, M. T., „The simulation approach to open pit design,” u *Proceedings of the 5th Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries (APCOM)*, Tucson, AZ, USA, 1965.
- [191] Carlson, T.R., Erickson, J.D., O’Brain, D.T. and Pana, M.T., „Computer techniques in mine planning,” *Mining Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 53-56, 1966.

- [192] Ares, G., Castañón Fernández, C., Álvarez, I.D., Arias, D. and Díaz, A.B., „Open pit optimization using the floating cone method: A new algorithm,“ *Minerals*, vol. 12, no. 4, p. 495, 2022.
- [193] Johnson, T.B. and Sharp, W.R., „A Three-dimensional dynamic programming method for optimal ultimate open pit design (vol. 7553),“ Bureau of Mines, US Department of the Interior, 1971.
- [194] Laurent, M., Placet J., & W. Sharp., „Optimum design of open-pit mines,“ Gecamines Rapport No. 04/77, Lubumbashi, 1977.
- [195] Mousavi, A., Kozan., E., Liu. S.-Q., „Integrated approach to optimize open-pit mine block sequencing,“ u *Industrial engineering non-traditional applications in international settings*, USA, CRC Press, 2014, pp. 83-98.
- [196] Underwood, R. and Tolwinski, B., „A mathematical programming viewpoint for solving the ultimate pit problem,“ *European Journal of Operational Research*, vol. 107, no. 1, pp. 96-107, 1998.
- [197] D. Hochbaum, „The pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum-flow problem,“ *Operations research*, vol. 56, no. 4, pp. 992-1009, 2008.
- [198] Chandran, B.G. and Hochbaum, D.S., „A computational study of the pseudoflow and push-relabel algorithms for the maximum flow problem,“ *Operations research*, vol. 57, no. 2, pp. 358-376, 2009.
- [199] Hochbaum, D.S. and Orlin, J.B., „Simplifications and speedups of the pseudoflow algorithm,“ *Networks*, vol. 61, no. 1, pp. 40-57, 2013.
- [200] Bai, X., Turczynski, G., Baxter, N., Place, D., Sinclair-Ross, H. and Ready, S., „Pseudoflow method for pit optimization,“ Geovia Whittle; Dassault Systemes; White paper, Waltham, MA, USA., 2017.
- [201] D. Muir, „Pseudoflow, new life for Lerchs-Grossmann pit optimisation.,“ *Spectrum Series. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, vol. 14, pp. 97-104, 2008.
- [202] J. Poniewierski, „Pseudoflow explained. A discussion of Deswik Pseudoflow Pit Optimization in comparison to Whittle LG Pit Optimization.,“ Deswik Mining Consultants Pty Ltd., 2017.
- [203] Gholamnejad, J., Lotfian, R. and 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*, vol. 120, no. 2, pp. 665-670, 2020.
- [204] Marković, P., Stevanović, D., Šubaranović, T., Banković, M., „Primena savremenih softveriskih alata za upravljanje proizvodnjom na kamenolomu Ćeramide,“ u *16. Međunarodna konferencija CCM 2025*, Zlatibor, Srbija, 2025.

- [205] Mallick, M.K., Choudhary, B.S. and Budi, G., „Long-term open pit mine production scheduling with variable cut off grade for cost optimization,“ *Journal of Mines, Metals & Fuels*, vol. 68, no. 5, pp. 153-157, 2020.
- [206] Xu, X.C., Gu, X.W., Wang, Q., Gao, X.W., Liu, J.P., Wang, Z.K. and Wang, X.H., „Production scheduling optimization considering ecological costs for open pit metal mines,“ *Journal of cleaner production*, vol. 180, pp. 210-221, 2018.
- [207] Askari-Nasab, H., Awuah-Offei, K. and Eivazy, H., „Large-scale open pit production scheduling using mixed integer linear programming,“ *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 185-214, 2010.
- [208] J. Whittle, „Beyond optimization in open-pit design,“ u *First Canadian Conference on Computer Applications in the Minerals Industries*, Balkema, Rotterdam, 1988.
- [209] Kržanović, D., Rajković, R., Jovanović, M., Jovanović, I. and Mikić, M., „The impact of an error in selection the pushbacks in the long-term planning of the open pit production on project quality, case study: Open pit Veliki Krivelj, Bor, Serbia,“ *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, vol. 1, pp. 1-6, 2023.
- [210] J. Whittle, „Four-X user manual,“ Whittle Programming Pty Ltd., 1998.
- [211] Whittle, D., Whittle, J., Wharton, C., Hall, G., „Strategic Mine Planning, 8th Edition,“ Gemcom Software International Inc., 2005.
- [212] D. Kržanović, „Model za optimizaciju graničnog saržaja metala u rudi u funkciji dugoročnog planiranja površinskih kopova,“ Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2016.
- [213] W. C., „Add value to your mine through improved long term scheduling,“ u *Whittle North American strategic mine planning conference*, Colorado, 2000.
- [214] Morales, N., Jélvez, E., Nancel-Penard, P., Marinho, A. and Guimarães, O., „A comparison of conventional and direct block scheduling methods for open pit mine production scheduling. Application of Computers and Operations Research in the Mineral Indu,“ u *37th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*, Fairbanks, Alaska, USA, 2015.
- [215] T. Johnson, „Optimum open-pit mine production scheduling (PhD thesis),“ University of California, Berkeley (Operations Research Department), 1968.
- [216] Caccetta, L. and Hill, S.P., „An application of branch and cut to open pit mine scheduling. Journal of global optimization,“ *Journal of global optimization*, vol. 27, no. 2, pp. 349-365, 2003.
- [217] Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E. and Kalantari, S., „Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling,“ *Journal of Mining Science*, vol. 47, no. 3, pp. 338-359, 2011.

- [218] M. Gershon, „Optimal mine production scheduling: evaluation of large scale mathematical programming approaches,“ *International journal of mining engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 315-329, 1983.
- [219] A. Gleixner, „Solving large-scale open pit mining production scheduling problems by integer programming (Doctoral dissertation),“ Zuse Institute Berlin (ZIB), Berlin, 2009.
- [220] Bienstock, D. and Zuckerberg, M., „Solving LP relaxations of large-scale precedence constrained problems,“ u *International Conference on Integer Programming and Combinatorial Optimization*, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [221] Bienstock, D. and Zuckerberg, M., „A new LP algorithm for precedence constrained production scheduling,“ *Optimization Online*, 2015.
- [222] Ramazan, S. and Dimitrakopoulos, R., „Recent applications of operations research and efficient MIP formulations in open pit mining. SME Transactions, 316.,“ *SME Transactions (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration)*, vol. 316, pp. 73-78, 2004.
- [223] S. Ramazan, „The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines,“ *European Journal of Operational Research*, vol. 177, no. 2, pp. 1153-1166, 2007.
- [224] Ota, R.R.M., Martinez, L.A. and R&O, A., „SimSched Direct Block Scheduler: A new practical algorithm for the open pit mine production scheduling problem. In Conference APCOM,“ u *Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry - APCOM*, Golden, CO, USA, 2017.
- [225] Morales, N., Jélvez, E., Nancel-Penard, P., Marinho, A. and Guimarães, O., „A comparison of conventional and direct block scheduling methods for open pit mine production scheduling,“ u *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)*, Golden, Colorado USA, 2015.
- [226] Fathollahzadeh, K., Asad, M.W.A., Mardaneh, E. and Cigla, M., „Review of solution methodologies for open pit mine production scheduling problem,“ *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 35, no. 8, pp. 564-599, 2021.
- [227] Sholqamy, M. and Elwageeh, M., „A Greedy Genetic Hybrid Heuristic for Solving the Open-pit Production Scheduling Problem,“ *Mining, Metallurgy & Exploration*, pp. 1-17, 2026.
- [228] Navarro, F., Morales, N., Contreras-Bolton, C., Rey, C. and Parada, V., „Open-pit pushback optimization by a parallel genetic algorithm,“ *Minerals*, vol. 14, no. 5, p. 438, 2024.
- [229] M. Gershon, „Heuristic approaches for mine planning and production scheduling,“ *International Journal of Mining and Geological Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 1-13, 1987.
- [230] Almufti, S.M., Shaban, A.A., Ali, Z.A., Ali, R.I. and Fuente, J.D., „Overview of metaheuristic algorithms,“ *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, vol. 2, no. 2, pp. 10-32, 2023.

- [231] Pirbalouti, S.M. and Askari-Nasab, H., „Stochastic Optimization and Deterministic Models in Strategic Mine Planning Problems: An Overview of Solution Methods and Comparisons,“ University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, 2024.
- [232] Paithankar, A. and Chatterjee, S., „Open pit mine production schedule optimization using a hybrid of maximum-flow and genetic algorithms,“ *Applied Soft Computing*, vol. 81, p. 105507, 2019.
- [233] Danish, A.A.K., Khan, A., Muhammad, K., Ahmad, W. and Salman, S., „A simulated annealing based approach for open pit mine production scheduling with stockpiling option,“ *Resources Policy*, vol. 70, p. 102016, 2021.
- [234] Lamghari, A. and Dimitrakopoulos, R., „A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty,“ *European Journal of Operational Research*, vol. 223, no. 3, pp. 642-652, 2012.
- [235] Shishvan, M.S. and Sattarvand, J., „Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization,“ *European Journal of Operational Research*, vol. 240, no. 3, pp. 825-836, 2015.
- [236] Dimitrakopoulos, R., Farrelly, C.T. and Godoy, M., „Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design,“ *Mining Technology*, vol. 111, no. 1, pp. 82-88, 2002.
- [237] R. Dimitrakopoulos, „Stochastic mine planning—Methods, examples and value in an uncertain world,“ u *Applied Strategic Mine Planning*, Springer International Publishing, 2018, pp. 101-115.
- [238] C. Deutsch, „The place of geostatistical simulation in resource/reserve estimation,“ u *International Conference Mining Innovation (MININ)*, 2004.
- [239] Deutsch, C.V. and Journel, A.G., *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide (Second Edition)*, New York: Oxford University Press, 1997, p. 369.
- [240] G. Matheron, „Principles of geostatistics,“ *Economic Geology*, vol. 58, no. 8, pp. 1246-1266, 1963.
- [241] A. Journel, „Geostatistics for conditional simulation of ore bodies,“ *Economic Geology*, vol. 69, no. 5, pp. 673-687, 1974.
- [242] C. Deutsch, „The place of geostatistical simulation through the life cycle of a mineral deposit,“ *Minerals*, vol. 13, no. 11, p. 1400, 2023.
- [243] Dimitrakopoulos, R. and Lamghari, A., „Simultaneous stochastic optimization of mining complexes-mineral value chains: An overview of concepts, examples and comparisons,“ *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 36, no. 6, pp. 443-460, 2022.

- [244] Saliba, Z. and Dimitrakopoulos, R., „Simultaneous stochastic optimization of an open pit gold mining complex with supply and market uncertainty,” *Mining Technology*, vol. 128, no. 4, pp. 216-229, 2019.
- [245] Maleki, M., Jélvez, E., Emery, X. and Morales, N., „Stochastic open-pit mine production scheduling: A case study of an iron deposit,” *Minerals*, vol. 10, no. 585, p. 7, 2020.
- [246] Bertsimas, D., Brown, D.B. and Caramanis, C., „Theory and applications of robust optimization,” *SIAM review*, vol. 53, no. 3, pp. 464-501, 2011.
- [247] Ben-Tal, A. and Nemirovski, A., „Robust optimization—methodology and applications,” *Mathematical programming*, vol. 92, no. 3, pp. 453-480, 2002.
- [248] M. Kumral, „Robust stochastic mine production scheduling,” *Engineering Optimization*, vol. 42, no. 6, pp. 567-579, 2010.
- [249] W. Liu, „A robust optimization modeling for mine supply chain planning under the big data. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021(1), p.1709363,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, no. 90, p. 1709363, 2021.
- [250] Qaeze, F., Guillaume, R. and Thierry, C., „Robust optimization for mine planning,” u *11ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes (MOSIM 2016)*, Montréal, Canada, 2016.
- [251] Liu, S.Q., Liu, L., Kozan, E., Corry, P., Masoud, M., Chung, S.H. and Li, X., „Machine learning for open-pit mining: a systematic review,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 39, no. 1, pp. 1-39, 2025.
- [252] Jung, D. and Choi, Y., „Systematic review of machine learning applications in mining: Exploration, exploitation, and reclamation,” *Minerals*, vol. 11, no. 2, p. 148, 2021.
- [253] Kumar, A. and Dimitrakopoulos, R., „Production scheduling in industrial mining complexes with incoming new information using tree search and deep reinforcement learning,” *Applied Soft Computing*, vol. 110, p. 107644, 2021.
- [254] Yaakoubi, Y. and Dimitrakopoulos, R., „Learning to schedule heuristics for the simultaneous stochastic optimization of mining complexes,” *Computers & Operations Research*, vol. 159, p. 106349, 2023.
- [255] Levinson, Z., Dimitrakopoulos, R. and Keutchayan, J., „Simultaneous stochastic optimization of an open-pit mining complex with preconcentration using reinforcement learning,” *Applied Soft Computing*, vol. 138, p. 110180, 2023.
- [256] Markovic, P., Stevanovic, D., Kolonja, B., Slavkovic, D. and Krzanovic, D., „A hybrid model for risk-based strategic planning in open-pit mining: Integrating deterministic, stochastic, and ISO 31000 approaches,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 5, p. 2500, 2025.

- [257] Godoy, M. and Dimitrakopoulos, R., „Managing risk and waste mining in long-term production scheduling of open-pit mines,” *SME transactions*, vol. 316, no. 3, pp. 43-50, 2004.
- [258] Ramazan, S. and Dimitrakopoulos, R., „Traditional and new MIP models for production scheduling with in-situ grade variability,” *International Journal of Surface Mining*, vol. 18, no. 2, pp. 85-98, 2004.
- [259] Leite, A. and Dimitrakopoulos, R., „Stochastic optimisation model for open pit mine planning: application and risk analysis at copper deposit,” *Mining Technology*, vol. 116, no. 3, pp. 109-118, 2007.
- [260] Leite, A. and Dimitrakopoulos, R., „Stochastic optimization of mine production scheduling with uncertain ore/metal/waste supply,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 755-762, 2014.
- [261] Kizilkale, A.C. and Dimitrakopoulos, R., „Optimizing mining rates under financial uncertainty in global mining complexes,” *International Journal of Production Economics*, vol. 158, no. 359-365, 2014.
- [262] Montiel, L. and Dimitrakopoulos, R., „Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: An uncertainty-based approach,” *European Journal of Operational Research*, vol. 247, no. 1, pp. 166-178, 2015.
- [263] Goodfellow, R.C. and Dimitrakopoulos, R., „Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty,” *Applied Soft Computing*, vol. 40, pp. 292-304, 2016.
- [264] Montiel, L. and Dimitrakopoulos, R., „A heuristic approach for the stochastic optimization of mine production schedules,” *Journal of Heuristics*, vol. 23, no. 5, pp. 397-415, 2017.
- [265] Moreno, E., Emery, X., Goycoolea, M., Morales, N. and Nelis, G., „A two-stage stochastic model for open pit mine planning under geological uncertainty,” u *Proceedings of the 38th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM)*, 2017.
- [266] Rim   , M.A., Dimitrakopoulos, R. and Gamache, M., „A stochastic optimization method with in-pit waste and tailings disposal for open pit life-of-mine production planning,” *Resources Policy*, vol. 57, pp. 112-121, 2018.
- [267] Saliba, Z. and Dimitrakopoulos, R., „Simultaneous stochastic optimization of an open pit gold mining complex with supply and market uncertainty,” *Mining Technology*, vol. 128, no. 4, pp. 216-229, 2019.
- [268] Kumar, A. and Dimitrakopoulos, R., „Application of simultaneous stochastic optimization with geometallurgical decisions at a copper–gold mining complex,” *Mining Technolog*, vol. 128, no. 2, pp. 88-105, 2019.

- [269] Quigley, M. and Dimitrakopoulos, R., „Incorporating geological and equipment performance uncertainty while optimising short-term mine production schedules,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 34, no. 5, pp. 362-383, 2020.
- [270] Sepúlveda, G.F., Álvarez, P.J. and Bedoya, J.B., „Stochastic optimization in mine planning scheduling,” *Computers & Operations Research*, vol. 115, p. 104823, 2020.
- [271] Rimélé, A., Dimitrakopoulos, R. and Gamache, M., „A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty,” *Resources Policy*, vol. 65, p. 101570, 2020.
- [272] Gilani, S.O., Sattarvand, J., Hajihassani, M. and Abdullah, S.S., „A stochastic particle swarm based model for long term production planning of open pit mines considering the geological uncertainty,” *Resources Policy*, vol. 68, p. 101738, 2020.
- [273] Guo, H., Nguyen, H., Vu, D.A. and Bui, X.N., „Forecasting mining capital cost for open-pit mining projects based on artificial neural network approach,” *Resources Policy*, vol. 74, p. 101474, 2021.
- [274] Fattahi, M., Mosadegh, H. and Hasani, A., „Sustainable planning in mining supply chains with renewable energy integration: A real-life case study,” *Resources Policy*, vol. 74, p. 101296, 2021.
- [275] Alipour, A., Khodaiari, A.A., Jafari, A. and Tavakkoli-Moghaddam, R., „An integrated approach to open-pit mines production scheduling,” *Resources Policy*, vol. 75, p. 102459, 2022.
- [276] de Carvalho, J.P. and Dimitrakopoulos, R., „Integrating short-term stochastic production planning updating with mining fleet management in industrial mining complexes: an actor-critic reinforcement learning approach,” *Applied Intelligence*, vol. 53, no. 20, pp. 23179-23202, 2023.
- [277] Xu, X., Gu, X., Wang, Q., Zhao, Y., Kong, W., Zhu, Z. and Wang, F., „Enumeration optimization of open pit production scheduling based on mobile capacity search domain,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 91, 2023.
- [278] Morales, D. and Dimitrakopoulos, R., „High-order simulation of geological domains and effects on stochastic long-term planning of mining complexes,” *Mining Technology*, vol. 133, no. 2, pp. 89-108, 2024.
- [279] Findlay, L. and Dimitrakopoulos, R., „Stochastic optimization for long-term planning of a mining complex with in-pit crushing and conveying systems,” *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 41, no. 4, pp. 1677-1691, 2024.
- [280] Noriega, R. and Pourrahimian, Y., „Shovel allocation and scheduling for open-pit mining using deep reinforcement learning,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 38, no. 6, pp. 442-459, 2024.

- [281] Icarte-Ahumada, G. and Herzog, O., „Intelligent Scheduling in Open-Pit Mining: A Multi-Agent System with Reinforcement Learning,“ *Machines*, vol. 13, no. 5, p. 350, 2025.
- [282] A. Ebrahimi, „Ultimate Pit Size Selection, Where Is the Optimum Point?,“ u *In Proceedings of the 26th International Mining Congress*, Antalya, Turkey, 16–19 April 2019.
- [283] Hall, A.; Hall, B., „The role of mine planning in high performance,“ *AusIMM Bulletin*, pp. 68-71, 2015.
- [284] Das, R., Topal, E. and Mardaneh, E., „A review of open pit mine and waste dump schedule planning,“ *Resources policy*, vol. 85, no. Part A, p. 104064, 2023.
- [285] Dai, H., Li, N., Wang, Y. and Zhao, X., „The analysis of three main investment criteria: NPV IRR and payback period,“ u *2022 7th International Conference on Financial Innovation and Economic Development (ICFIED 2022)*, 2022.
- [286] Slaper, T.F. and Hall, T.J., „The triple bottom line: What is it and how does it work,“ *Indiana business review*, vol. 86, no. 1, pp. 4-8, 2011.
- [287] Kishore, K., & Kushwah, S.V , „ Environmental and social aspects in projects: a boost towards sustainable marketing,“ *Academy of Marketing Studies Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 1-9, 2022.
- [288] Arnaboldi, M., Azzone, G., Giorgino, M., Performance Measurement and Management for Engineers, London, U.K.: Academic Press, Elsevier Inc, 2015.
- [289] Platon, V. and Constantinescu, A., „Monte Carlo Method in risk analysis for investment projects,“ *Procedia Economics and Finance*, vol. 15, pp. 393-400, 2014.
- [290] Maselli, G., Macchiaroli, M. and Nestico, A., „ALARP criteria to estimate acceptability and tolerability thresholds of the investment risk,“ *Applied Sciences*, vol. 11, no. 19, p. 9086, 2021.
- [291] Marhavilas, P.K. and Koulouriotis, D.E., „Risk-acceptance criteria in occupational health and safety risk-assessment—the state-of-the-art through a systematic literature review,“ *Safety*, vol. 7, no. 4, p. 77, 2021.
- [292] Lane, G.R., Terblanche, M., Meyer, G. and Sasto, N., „Case study on quantitative risk modelling to obtain a realistic risk-adjusted project valuation,“ *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 113, no. 3, pp. 181-190, 2013.
- [293] Salama, A., Nehring, M. and Greberg, J., „Evaluation of the impact of commodity price change on mine plan of underground mining,“ *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 375-382, 2015.
- [294] Baek, J., Choi, Y. and Park, H.S., „Uncertainty representation method for open pit optimization results due to variation in mineral prices,“ *Minerals*, vol. 6, no. 1, p. 17, 2016.

- [295] Rahmanpour, M. and Osanloo, M., „Determination of value at risk for long-term production planning in open pit mines in the presence of price uncertainty,“ *Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 116, no. 3, pp. 229-236, 2016.
- [296] Amini, M., Alijani, F. and Mozaffari, Z., „Economic evaluation of mining projects under conditions of uncertainty for prices and operating costs,“ *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 10, no. 3, p. 881, 2015.
- [297] World Bank, „Commodity Markets Outlook,“ World Bank, [Na mreži]. Available: <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>. [Accessed: 18 March 2026].
- [298] International Monetary Fund, „Primary Commodity Prices,“ IMF, [Na mreži]. Available: <https://www.imf.org/en/research/commodity-prices>. [Accessed: 18 March 2026].
- [299] Goldman Sachs, „Goldman Sachs,“ Copper price outlook / Commodities Research, [Na mreži]. Available: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/copper-prices-forecast-to-decline-from-record-highs-in-2026>. [Accessed: 18 March 2026].
- [300] J.P. Morgan, „Commodities outlook,“ J.P. Morgan, [Na mreži]. Available: <https://www.jpmorgan.com/insights/global-research/commodities>. [Accessed: 18 March 2026].
- [301] Pavolová, H., Bakalár, T., Tokarčík, A., Kozáková, L. and Pastyrčák, T., „An economic analysis of brownfield and greenfield industrial parks investment projects: A case study of Eastern Slovakia,“ *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 7, p. 3472, 2021.
- [302] Bullock, R.L. and Mernitz, S. eds, Mineral property evaluation: Handbook for feasibility studies and due diligence, Englewood, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 201.
- [303] „Mining Cost Service,“ Costmine Intelligence, Spokane, WA.
- [304] „The SME Guide for Reporting Exploration Results, Mineral Resources, and Mineral Reserves,“ Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2017.
- [305] Stevanović, D.R., Banković, M.V., Pešić, G.M.D. and Stojanović, L.B., „Hybrid model for uncertainty assessment in open pit optimization,“ *Tehnika*, vol. 75, no. 2, pp. 161-171, 2020.
- [306] R. Carlson, „Understanding geologic uncertainty in mining studies,“ *SEG Newsletter*, vol. 117, pp. 21-29, 2019.
- [307] L. Raputsoane, „Market uncertainty developments and the minerals industry,“ MPRA Paper 124374, University Library of Munich, Germany, 2025.
- [308] Mata, J.F.C.D., Nader, A.S. and Mazzinghy, D.B., „A case study of incorporating variable recovery and specific energy in long-term open pit mining,“ *Mining*, vol. 3, no. 2, pp. 367-386, 2023.

- [309] Shapiro, A., Dentcheva, D. and Ruszczyński, A., Lectures on stochastic programming: modeling and theory, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021.
- [310] P. Glasserman, Monte Carlo methods in financial engineering, New York: Springer, 2003.
- [311] „@RISK: Risk Analysis for Excel, Version 8.2.2.,“ Palisade Corporation.
- [312] „Dassault Systèmes. GEOVIA Whittle: Strategic Mine Planning Software, Version 4.7.3.“.
- [313] Thomas J. Linsmeier & Neil D. Pearson, „Risk Measurement: An Introduction to Value at Risk,“ University of Illinois at Urbana-Champaign, 1996.
- [314] Vaughan, E.J. and Vaughan, T., Fundamentals of risk and insurance, 10th ur., John Wiley & Sons, 2008.
- [315] Groeneveld, B., Topal, E. and Leenders, B., „Robust, flexible and operational mine design strategies,“ *Mining Technology*, vol. 121, no. 1, pp. 20-28, 2012.
- [316] Miranda, O., Brandão, L.E. and Lazo, J.L., „A dynamic model for valuing flexible mining exploration projects under uncertainty,“ *Resources Policy*, vol. 52, pp. 393-404, 2017.
- [317] Ajak, A.D. and Topal, E., „Real option in action: An example of flexible decision making at a mine operational level,“ *Resources Policy*, vol. 45, pp. 109-120, 2015.
- [318] Eidsvik, J. and Ellefmo, S.L., „The value of information in mineral exploration within a multi-gaussian framework,“ *Mathematical Geosciences*, vol. 45, no. 7, pp. 777-798, 2013.
- [319] Li, S.X., Knights, P. and Dunn, D., „Geological uncertainty and risk: implications for the viability of mining projects,“ *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, vol. 14, no. 2, pp. 176-180, 2008.
- [320] Gligorić, Z., Gligorić, M., Halilović, D., Beljić, Č. and Urošević, K., „Hybrid stochastic-grey model to forecast the behavior of metal price in the mining industry,“ *Sustainability*, vol. 12, no. 6, p. 6533, 2020.
- [321] J. McKay, „Joint Ventures and Mining Partnerships,“ *Kansas Law Review*, vol. 7, no. 1, p. 22–30, 1958.
- [322] Shapiro, D., Russell, B.I. and Pitt, L.F., „Strategic heterogeneity in the global mining industry,“ *Transnational Corporations*, vol. 16, no. 3, pp. 1-35, 2007.
- [323] Maybee, B., Lowen, S. and Dunn, P., „Risk-based decision making within strategic mine planning,“ *Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 44-58, 2010.
- [324] „Dassault Systèmes. GEOVIA Surpac: Geology and Mine Planning Software, Version Surpac 2024.,“ [Na mreži]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/surpac/>. [Accessed: 18 December 2025].

- [325] Marković, P.; Stevanović, D.; Pešić, G.M.; Banković, M., „Application of MCDA in the determination of optimal block size for open-pit modelling and mine planning,“ *Underground Mining Engineering*, vol. 38, pp. 67-85, 2021.
- [326] Tavares, A.C., Monte, M.B.D.M. and Tavares, L.M., „Effect of long-term stockpiling on oxidation and flotation response of low-grade copper sulphide ore,“ *Minerals*, vol. 13, no. 2, p. 269, 2023.
- [327] Kelebek, S. and Nanthakumar, B., „Characterization of stockpile oxidation of pentlandite and pyrrhotite through kinetic analysis of their flotation. International journal of mineral processing, 84(1-4), pp.69-80,“ *International journal of mineral processing*, vol. 84, no. 1-4, pp. 69-80, 2007.
- [328] E. Lilford, „Natural resources: Cost of capital and discounting–Risk and uncertainty,“ *Resources Policy*, vol. 80, p. 103242, 2023.
- [329] Taheri, M., Ataee-pour, M. and Irannajad, M., „Estimating the discount rate for projects of a mining complex,“ *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 277-289, 2010.
- [330] P. Saluga, „Discount rate selection for long-term sequential mineral projects. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 33(3).,“ *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, vol. 33, no. 3, pp. 49-70, 2017.
- [331] Y. Dodge, *The concise encyclopedia of statistics*, New York, NY: Springer Science & Business Media, 2008.
- [332] World Bank Group, „Commodity Markets Outlook—Persistence of Commodity Shocks,“ World Bank, Washington, DC., 2020.
- [333] UNCTAD, „Global Trade Update (May 2025): Focus on critical minerals – copper in the new green and digital economy,“ United Nations Conference on Trade and Development, 2025.
- [334] World Bank Group, „Commodity Markets Outlook,“ World Bank, Washington, DC, 2025.
- [335] S&P Global Energy & Market Intelligence, „Copper in the Age of AI: Challenges of Electrification,“ S&P Global, 2026.
- [336] Ernst & Young, „Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2025,“ Ernst & Young, 2024.
- [337] Holden, J., Li, Y., Liwanag, A., Gan, P., Cruz, J., „Mine cost outlook 2026: Inflation, new supply reshape global mining landscape,“ S&P Global Market Intelligence, 2026.
- [338] Ernst & Young, „Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2026,“ Ernst & Young, 2025.

- [339] Marinin, M., Marinina, O. and Wolniak, R., „Assessing of losses and dilution impact on the cost chain: Case study of gold ore deposits,” *Sustainability*, vol. 13, no. 7, p. 3830, 2021.
- [340] Dachri, K., Bouabidi, M., Naji, K., Nouar, K., Benzakour, I., Oummouch, A., Hibti, M. and El Amari, K., „Predictive insights for copper recovery: A synergistic approach integrating variability data and machine learning in the geometallurgical study of the Tizert deposit, Morocco,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 212, p. 105208, 2024.
- [341] Tungpalan, K., Wightman, E. and Manlapig, E., „Relating mineralogical and textural characteristics to flotation behaviour,” *Minerals Engineering*, vol. 82, pp. 136-140, 2015.
- [342] Feng, Q., Yang, W., Wen, S., Wang, H., Zhao, W. and Han, G., „Flotation of copper oxide minerals: A review,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 32, no. 6, pp. 1351-1364, 2022.
- [343] McKinsey & Company, „The capex crystal ball: Beating the odds in mining project delivery,” 2024.
- [344] Faúndez, P. and Guzmán, J.I., „Deconstructing cost overrun and delay in mining projects: A system-based model of prices, quantities, and time,” *Resources Policy*, vol. 110, p. 105754, 2025.
- [345] Hekmat, A., Osanloo, M. and Moarefvand, P., „Investigating the Effect of Different Block Dimensions on the Economic Life of Open Pit Mines,” u *Proceedings of 35th APCOM Symposium*, Australia, 2011.
- [346] Mwangi, A.D., Jianhua, Z., Gang, H., Kasomo, R.M. and Innocent, M.M., „Ultimate pit limit optimization methods in open pit mines: A review,” *Journal of Mining Science*, vol. 56, no. 4, pp. 588-602, 2020.

BIOGRAFIJA

Petar Marković, master inženjer rudarstva, rođen je 9. januara 1997. godine u Prištini, Republika Srbija. Osnovnu školu završio je u Kostolcu, a nakon toga i srednju Politehničku školu u Požarevcu.

Osnovne akademske studije završio je 2019. godine na Univerzitetu u Beogradu, na Rudarsko-geološkom fakultetu, studijski program Rudarsko inženjerstvo, modul Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina, sa prosečnom ocenom 9,02. Master akademske studije na istom fakultetu završio je 2020. godine sa prosečnom ocenom 10,00, odbranivši master rad iz oblasti projektovanja i planiranja površinskih kopova.

Doktorske akademske studije na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu upisao je 2020. godine, pri čemu je do sada položio sve ispite sa prosečnom ocenom 10,00.

Od 2019. godine zaposlen je na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, najpre kao stručni saradnik, a od 2023. godine u zvanju asistenta na Katedri za projektovanje i planiranje površinskih kopova. U nastavnom procesu angažovan je na predmetima iz oblasti projektovanja, optimizacije i planiranja površinskih kopova, kao i geostatističkog modeliranja i tehno-ekonomske analize rudarskih projekata.

U dosadašnjem radu učestvovao je u izradi više od 30 rudarskih projekata, studija i tehničkih elaborata, u svojstvu odgovornog projektanta ili saradnika. Njegov stručni rad obuhvata primenu savremenih softverskih alata za modeliranje ležišta, projektovanje i planiranje površinskih kopova, kao i optimizaciju i simulaciju rudarskih sistema, u skladu sa principima savremene međunarodne prakse.

Autor je i koautor ukupno 11 naučnih radova objavljenih u međunarodnim i domaćim naučnim časopisima, uključujući radove publikovane na SCI listi, kao i radove prezentovane na međunarodnim naučnim konferencijama.

Profesionalni je član međunarodnog udruženja Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), kao i organizacije The Society of Mining Professors (SOMP).

Položio je stručni ispit iz oblasti rudarstva, čime je stekao uslove za obavljanje stručnih poslova u skladu sa važećim zakonodavstvom.

Njegova istraživačka interesovanja usmerena su na optimizaciju površinskih kopova, upravljanje rizikom u rudarskim projektima, geostatističko modeliranje ležišta i primenu stohastičkih metoda u planiranju eksploatacije mineralnih resursa.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Петар Марковић

Број индекса: P706/20

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању
површинских копова

- 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 кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 08.04.2026.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Петар Марковић

Број индекса: P706/20

Студијски програм: Рударско инжењерство

Наслов рада: Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком
планирању површинских копова

Ментор: проф. др Дејан Стевановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањена 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, 08.04.2026.

Изјава о коришћењу

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

Развој хибридног модела за управљање ризиком при стратешком планирању
површинских копова

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао 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.

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, 08.04.2026.

1. **Ауторство.** Дозвољаваје 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.** Дозвољаваје 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.** Дозвољаваје 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.** Дозвољаваје 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.** Дозвољаваје 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.** Дозвољаваје 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.