

# Optimizacija faznog razvoja Površinskog kopa Ciganuša – Škorac u cilju definisanja dugoročne dinamike eksploatacije

Dejan Stevanović, Petar Marković, Mirjana Banković, Milan Živković



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Optimizacija faznog razvoja Površinskog kopa Ciganuša – Škorac u cilju definisanja dugoročne dinamike eksploatacije | Dejan Stevanović, Petar Marković, Mirjana Banković, Milan Živković | XV Međunarodna konferencija OMC 2022, Zlatibor, 12-15. oktobar 2022. | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007111>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)



**OPTIMIZACIJA FAZNOG RAZVOJA POVRŠINSKOG KOPA CIGANUŠA - ŠKORAC U  
CILJU DEFINISANJA DUGOROČNE DINAMIKE EKSPLOATCIJE**

**PUSHBACK DESIGN OPTIMIZATION OF OPEN PIT MINE CIGANUSA - SKORAC IN  
ORDER TO DEFINE LONG TERM MINE PRODUCTION SCHEDULE**

Stevanović D.<sup>1</sup>, Marković P.<sup>2</sup>, Banković M.<sup>3</sup> Živković M.<sup>4</sup>

**Apstrakt**

Definisanje dugoročne dinamike razvoja rudarskih radova koja je u potpunosti usaglašena sa strateškim ciljevima Investitora, veoma je zahtevan zadatak, koji vrlo često podrazumeva veliki broj ograničenja. Adekvatno definisana dinamika razvoja rudarskih radova treba da obezbedi dugoročne zahteve u pogledu kapaciteta, kvaliteta i raspodele resursa neophodnih za ispunjavanje strateških ciljeva, koji se po pravilu svode na ostvarenje maksimalnog profita. Uspešno definisanje dinamike eksploatacije (posebno kod metaličnih ležišta) u najvećoj meri zavisi od optimizacije faznog razvoja površinskog kopa, odnosno od pravilnog izbora broja i veličine faza razvoja (*pushbacks*). Iz ovog razloga, veoma je bitna upotreba savremenih programskih paketa koji sadrže specijalizovane alate, pomoću kojih je na efikasan način moguće utvrditi optimalan razvoj rudarskih radova na površinskim kopovima u definisanim vremenskim okvirima za predviđen period eksploatacije. U ovom radu, prikazano je nekoliko rešenja faznog razvoja površinskog kopa Ciganuša-Škorac, sa različitim brojem i veličinama faza razvoja, u cilju definisanja dugoročne dinamike eksploatacije. Rezultati su generisani primenom programskog paketa Whittle.

**Ključne reči:** dinamika razvoja, faze razvoja, optimizacija kopa, strateški ciljevi, Whittle

**Abstract**

Defining the long-term mine production schedule, which is fully aligned with the strategic goals of the Investor, is a very demanding task, which very often implies a large number of constraints. Appropriately defined mine production schedule, should ensure long-term requirements in terms of capacity, quality and distribution of resources necessary for the fulfillment of strategic goals, which is mainly the realization of maximum profit. The successful defined mine production schedule, largely depends on the optimization of the pushback design, i.e. from the correct selection of the number and size of development phases (*pushbacks*). For this reason, it is very important to use modern software packages that contain a wide range of tools, with which it is possible to efficiently determine the optimal mine plan in defined time frames for the intended period of exploitation. In this paper, several solutions of the phased development of the open pit mine Ciganusa-Skorac are presented, with different number and sizes of phases, in order to define the long-term mine plan. The results were generated using the Whittle software package.

**Keywords:** mine schedule, pushbacks design, pit optimization, strategic goals, Whittle

<sup>1</sup> Prof. dr Stevanović Dejan, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

<sup>2</sup> Marković Petar, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

<sup>3</sup> Doc. dr Banković Mirjana, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

<sup>4</sup> Milan Živković, Serbia Zijin Bor Copper doo, Bor

## 1. Uvod

Uzimajući u obzir složenost problema, proces planiranja proizvodnje na površinskim kopovima obično se deli na tri međusobno zavisne faze [1], odnosno na:

1. optimizacija granica kopa,
2. definisanje faza razvoja kopa, i
3. definisanje dugoročne dinamike eksploatacije

Osnovni cilj ove procedure u procesu strateškog planiranja, jeste ostvarivanje maksimalne neto sadašnje vrednosti (NPV), zajedno sa ispunjavanjem brojnih drugih poslovnih i fizičkih ograničenja [2]. Ovaj rad fokusiran je na drugu i treću fazu procesa planiranja, kao i na njihovu međusobnu zavisnost.

Definisanje faza razvoja i dugoročne dinamike eksploatacije od ključnog je značaja za uspešnu realizaciju rudarskih projekata, te je neophodno njihovo usklađivanje sa strateškim ciljevima koje proces proizvodnje na površinskom kopu treba da ispuni.

Faze razvoja kopa (*pushbacks*) predstavljaju privremena granice otkopavanja unutar finalne konture kopa, do kojih se kop sukcesivno proširuje tokom veka trajanja [3]. Pravilan odabir broja i veličine faza razvoja, od suštinskog je značaja za planiranje životnog veka rudnika jer one diskretizuju prostor zahvaćen površinskim kopom na pojedinačne jedinice, koje prilikom eksploatacije u velikoj meri kontrolišu proizvodni proces sa aspekta: profita, koeficijenta otkrivke, ujednačavanja kvaliteta rude, i dr. [4].

O značaju problematike koja se odnosi na optimizaciju faznog razvoja površinskog kopa i dugoročne dinamike eksploatacije, govori značajan broj istraživanja koji je sproveden na ovu temu, od strane velikog broja domaćih i stranih autora [5] [6] [7] [8] [9] [10].

Definisanjem faza razvoja treba da se obezbedi dovoljna količina rude za dalji proces prerade i prodaje, tako da se u svakom trenutku može ostvariti očekivani novčani tok. Uslovi o kojima se mora voditi računa tokom definisanja faza [11]: da se zadovolji minimalno sigurnosno rastojanje između granica faza, da se zadovolji minimalna radna širina dna u svakoj fazi, da se obezbedi potrebna količina i kvalitet, da NPV u svakoj fazi bude pozitivna, NPV za definisane faze biti maksimalna i dr.

Međutim, fazni razvoj površinskog kopa može imati i negativne posledice u slučaju da je broj faza (*pushbacks*) pogrešno projektovan, tj. ukoliko je broj faza veći od potrebnog. Konkretno preveliki broj faza može dovesti do [12]: značajnih troškova za održavanje većeg broja radnih kosina, operativnih problema povezanih sa premeštanjem opreme, nemogućnosti postizanja vertikalne brzine napredovanja kopa, nedostatka odgovarajuće širine otkopavanje, dodatnih troškova vezanih za izradu transportnih puteva, povećanog broja osnovne i pomoćne opreme i dr.

Tradicionalne metode za definisanje dinamike otkopavanja, primenom savremenih programski paketa poput Whittle-a, za cilj imaju ostvarivanje maksimalne neto sadašnje vrednosti (NPV) kroz optimizaciju faza razvoja i redosleda otkopavanja po fazama. Ovakav pristup, najčešće podrazumeva automatski ili ručni (manuelni) odabir faza razvoja na osnovu dobijenih rezultata ekonomske optimizacije granice kopa (*Pit by Pit Graph*), nakon čega algoritam definiše redosled otkopavanja po fazama u cilju generisanja maksimalnog NPV-a. Ovakav pristup često može proizvesti rešenja koja nisu usklađena sa strateškim ciljevima, odnosno u slučaju kada primarni cilj nije ostvarivanje maksimalnog NPV [13].

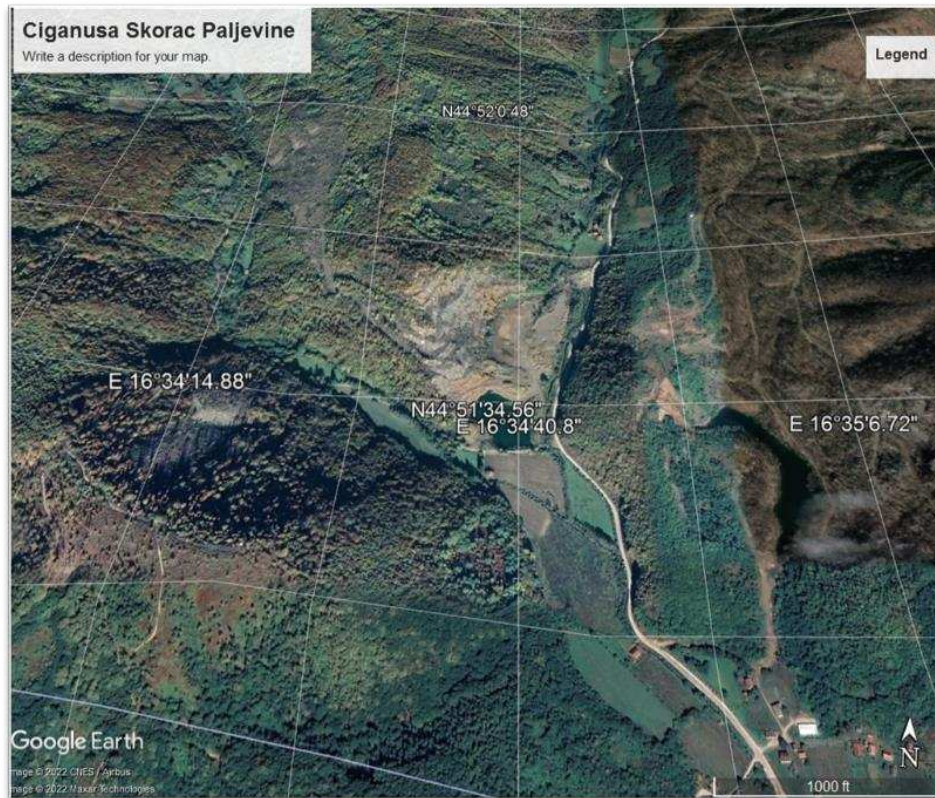
Upravo ova problematika obrađena je kroz optimizaciju faznog razvoja površinskog kopa Ciganuša - Škorac, gde otkopana ruda nema klasičnu ekonomsku vrednost (cilj nije maksimalan NPV), već se otkopava u manjim količinama (odgovarajućeg kvaliteta) radi mešanja sa rudom sa površinskog kopa Buvač, u cilju dobijanja komercijalnog proizvoda znatno boljih metalurških karakteristika. Na ovaj način, kompanija indirektno ostvaruje veći profit.

## 2. Studija slučaja - ležište rude gvožđa Ciganuša - Škorac

Ležište rude gvožđa Ciganuša - Škorac - Paljevine nalazi se u brdovitom području, na oko 7 km južno

od naselja Ljubija, u smeru juga prema naselju Stari Majdan, odnosno oko 20 km jugozapadno od Prijedora. Sastoji se od tri rudna tela: Ciganuša, Škorac i Paljevine. Ležište je jedno od niza ležišta (oko 35 ležišta) rude gvožđa rudnika Ljubija, koja su smeštena, gotovo u linijskom rasporedu, duž puta Ljubija-Stari Majdan. Eksploatacija se odvijala u industrijskom obimu od 1916. do 1992. godine, i na većini ležišta je završena. Rudarske aktivnosti su obustavljene zbog građanskog rata 1992. godine.

Prikaz trenutnog stanja rudarskih radova na površinskom kopu Ciganuša-Škorac (Google Earth satelitski snimak) dat je na Slici 1.



*Slika 1. Prikaz trenutnog stanja rudarskih radova na površinskom kopu Ciganuša-Škorac (Google Earth satelitski snimak)*

Ležište Ciganuša-Škorac se sastoji od rudnih tela izgrađenih od limonita i karbonatnih rudnih tela (siderit-ankerita) koja su daleko većih razmera od limonitnih tela. U višim nivoima ležišta nalaze se, uglavnom, limonitna tela.

Planom ArcelorMittala doo Prijedor, predviđeno je da se buduća proizvodnja rude na ležištima Ciganuša-Škorac odvija uporedo sa proizvodnjom u rudniku Omarska, tj. kombinacijom različitih vrsta rude, kupcu bi se isporučivao komercijalni proizvod. Eksploatacija karbonatne bazične rude gvožđa nije do sada vršena u rudniku Ljubija i ona predstavlja novu sirovinu koju je potrebno uvesti u proces proizvodnje i prerade.

S obzirom da je ArcelorMittala doo Prijedor dobio koncesiju za eksploataciju rude na ležištu Ciganuša-Škorac u količini od 3 miliona tona, plan je da u narednom periodu godišnji kapaciteti proizvodnje koncentrata rude gvožđa budu sledeći:

- 1,100,000 tona rude sa aktivnog površinskog kopa Buvač i
- 500,000 tona sa planiranog površinskog kopa Ciganuša-Škorac

Ovaj plan proizvodnje bi se realizovao u periodu od 2022. do 2027. godine saglasno projektovanim godišnjim kapacitetima. U skladu sa koncesionim količinama i godišnjim kapacitetima rude, izvršena je optimizacija granice kopa i definisana je dinamika razvoja rudarskih radova.

### 3. Optimizacija i izbor granične konture kopa

Optimizacija je urađena korišćenjem *Whittle* programskog paketa, koji podrazumeva upotrebu *Lerchs-Grossmann* algoritama [14] i pomoću koga je generisana serija konturi površinskog kopa na osnovu različitih faktora prihoda (*Revenue factor - RF*) sa iterativnim korakom promene cene metala u odnosu na baznu cenu. Svaka generisana kontura predstavlja inkrementalno povećanje količina rezervi rude prema inkrementalnom povećanju prodajne cene metala. Kriterijum optimizacije se bazira na određivanju maksimalne neto sadašnje vrednosti prihoda (NPV), odnosno diskontovane razlike prihoda od prodaje metala i ukupnih operativnih troškova [15].

Početni korak u pripremi optimizacije i projektovanja površinskog kopa je definisanje ulaznih parametara za optimizaciju.

#### 3.1 Ograničenja za optimizaciju na terenu

Razmatrana su sledeća dodatna ograničenja na samom terenu koja su korišćena u procesu optimizacije i analizi projektnih rešenja:

- 20 m bafer zona oko regionalnog puta R406 i potoka Stara Rijeka u zoni površinskog kopa
- ograničenje prema ležištu Paljevine u jugozapadnoj zoni površinskog kopa Ciganuša;
- rezervisanje prostora pored puta R406 unutar kopa Ciganuša za postrojenje pripreme rude.
- nisu primenjena ograničenja po dubini/visini rudnog tela, odnosno blok modela - optimizacija kopa je stoga uzela u obzir sve resurse sa ekonomskom vrednošću blokova.

#### 3.2 *Whittle* blok model i DTM model terena

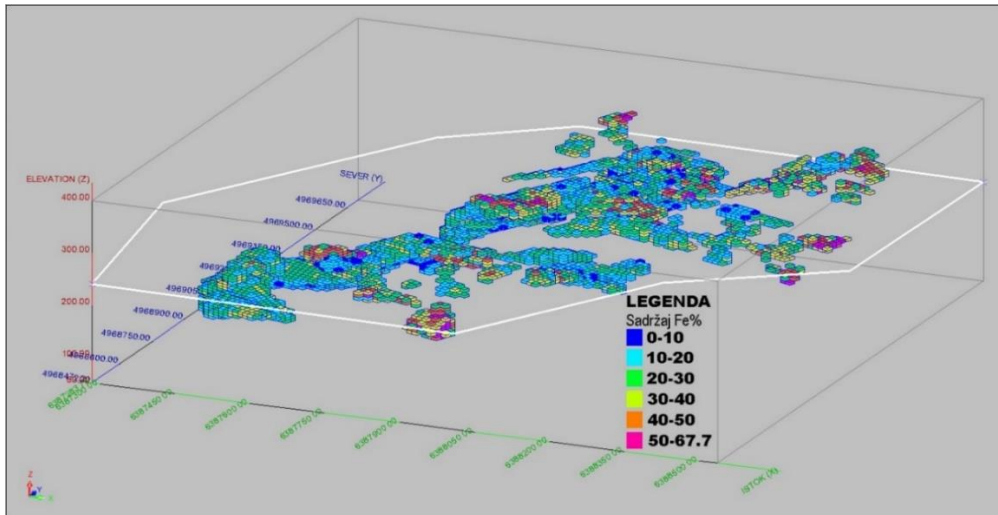
Prvo je u odgovarajućoj formi u softver uvezen digitalni geološki blok model sa odgovarajućom topografijom terena. Originalni geološki blok model urađen je sa mini blokovima dimenzija 12.5\*12.5\*5 metara, ali je za potrebe optimizacije izvršen *reblocking* modela na dimenzije blokova 12.5\*12.5\*10 m, što omogućava lakše kreiranje tehnoloških blokova - etaža za potrebe planiranja eksploatacije.

U Tabeli 1 prikazani su prostorni parametri *Whittle* blok modela koje softver koristi za izvršavanje optimizacije, dok je na Slici 2 prikazan blok model sa sadržajem Fe% po blokovima u ležištu. Procenjene količine resursa iznose 28,902,512 t, sa prosečnim sadržajem 28.19% Fe (procenjeni resursi uključuju ležišta Ciganuša, Škorac i Paljevine).

**Tabela 1. Parametri *Whittle* blok modela**

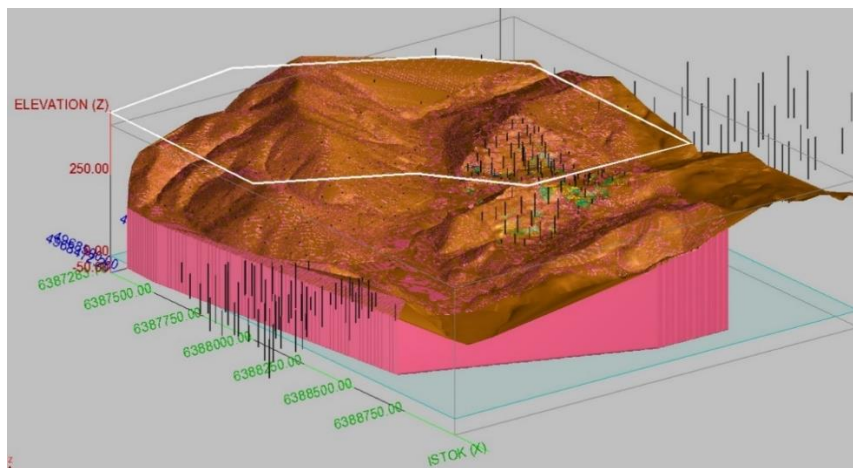
Tip	Y	X	Z
Minimalna koordinate	4,968,400	6,386,540	-210
Maksimalna koordinata	4,970,400	6,388,503	400
Veličina glavnog bloka	12.5	12.5	5
Veličina pod blokova (XYZ)	12.5	12.5	5
Rotacija	21	0.00	0.00
<b>Ukupan broj blokova</b>	<b>1,532,320</b>		





Slika 2. Blok model prema Whittle kodovima i tipovima rude

Na Slici 3 prikazan je DTM model terena, odnosno površ terena iznad modeliranih ležišta Ciganuše-Škorac. DTM model u suštini predstavlja trenutno stanje terena i starih rudarskih radova na površinskom kopu, i koristi se kao granična površ za potrebe projektovanja i procenu količina rude i jalovine.



Slika 3. Blok model prema Whittle kodovima i tipovima rude

### 3.3 Tehno - ekonomski parametri za optimizaciju

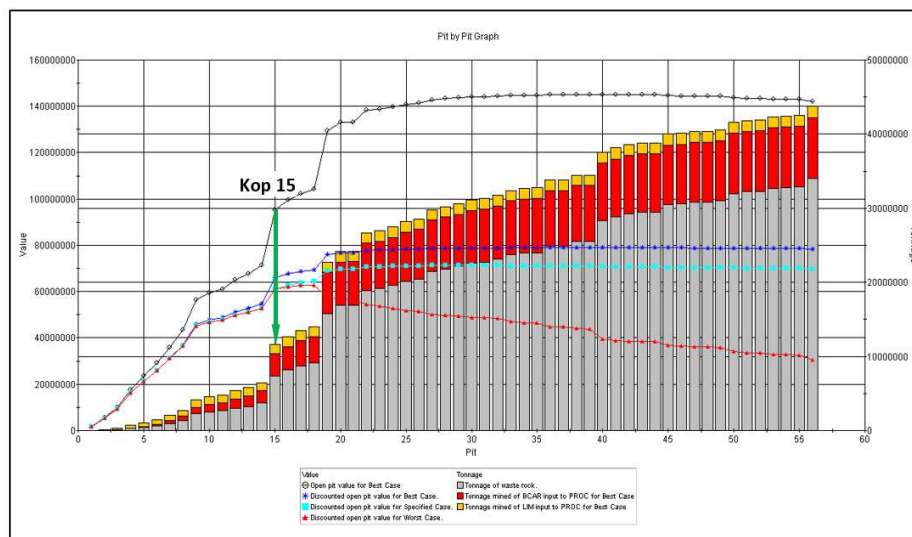
Sledeći korak u pripremi ulaznih podataka je definisanje i unos tehno-ekonomskih parametara na osnovu kojih softver određuje optimalne konture (školjke) kopova za odgovarajuće prodajne cene finalnog proizvoda po kriterijumu maksimalnog profita (NPV-a). U nastavku sledi prikaz tehno-ekonomskih podataka, pri čemu su novčane vrednosti svedene na valutu Euro (€).

Godišnji kapacitet kopa na rudi: .....	500,000 t/god
Godišnji maksimalni kapacitet na ukupnim iskopinama: .....	3,500,000 t/god
Generalni uglovi završnih kosina kopa:.....	36 <sup>0</sup>
Iskorišćenje metala: .....	100%
Troškovi pripreme rude: .....	6.12 €/t
Troškovi otkopavanja jalovine: .....	2.12 €/t
Troškovi otkopavanja rude: .....	1.99 €/t
Troškovi transporta koncentrata do železare: .....	10 €/t
Prodajna cena koncentrata: .....	34.4€/t

Diskontna stopa: ..... 10 %  
Troškovi koncesione naknade:..... 0.98 €/t

### 3.4 Rezultati optimizacije

Optimizacijom je definisano 56 kontura mogućih kopova sa preliminarnim tehničkim parametrima (količinama jalovine i rude, sadržajima i količinama metala), i ekonomskim parametrima za *Best* i *Worst case* scenario. Prilikom optimizacije bazna cena metala je varirana u rasponu od 0.24 do 1.5 sa korakom *Revenue Factor* (RF) od 0.02. Rezultati optimizacije prikazani su Slici 4.



Slika 4. Grafički prikaz rezultata ekonomske optimizacije

Rezultati optimizacije pokazuju da kontura kopa broj 39 ima maksimalni NPV za polazne parametre optimizacije. Međutim, kako je projektnim zadatkom definisana koncesiona količina rude od 3.000.000 t, kao optimalna kontura kopa je izabrana **kontura broj 15**. Odabrana kontura kopa poslužiće će kao podloga za detaljnu konstrukciju završne konture površinskog kopa koji obezbeđuje koncesione količine rude od 3.000.000 t, odnosno vek kopa od 6 godina sa kapacitetom od 500.000 t godišnje. Izabrana Whittle kontura kopa ima maksimalnu diskontovanu vrednost NPV za *Best case* oko 66 miliona evra, dok nediskontovani NPV iznosi oko 95 miliona evra.

Parametri optimalne konture površinskog kopa za koncesionu količinu rude navedeni su u Tabeli 2.

Tabela 2. Parametri optimalne konture površinskog kopa

Parametar	Jedinica	Vrednost	Sadržaj, %
Ukupna količina rude	tona	4,255,511	33% Fe
Karbonatna ruda	tona	2,939,617	26% Fe
Limonitna ruda	tona	1,350,894	48% Fe
Količina jalovine	tona	7,413,763	-
Koeficijent otkrivke	t/t	1.74	-
Best case NPV	€	95,389,108	-
Best case NPV-diskontovan	€	66,107,287	-
Worst case NPV	€	61,173,624	-

### 3.5 Završna kontura i eksploatacione rezerve rude i jalovine

Optimalna kontura površinskog kopa određena Lerchs-Grossmann algoritmom (kop br. 15) korišćena je kao smernica za detaljno projektovanje završne konture površinskog kopa Ciganuša-Škorac. Proces projektovanja završne konture površinskog kopa podrazumeva ugrađivanje transportnih rampi do dna kopa koristeći geotehničke parametre i geometriju etaža. Konstrukcija površinskog izvršena je u

softveru *Geovia Surpac*.

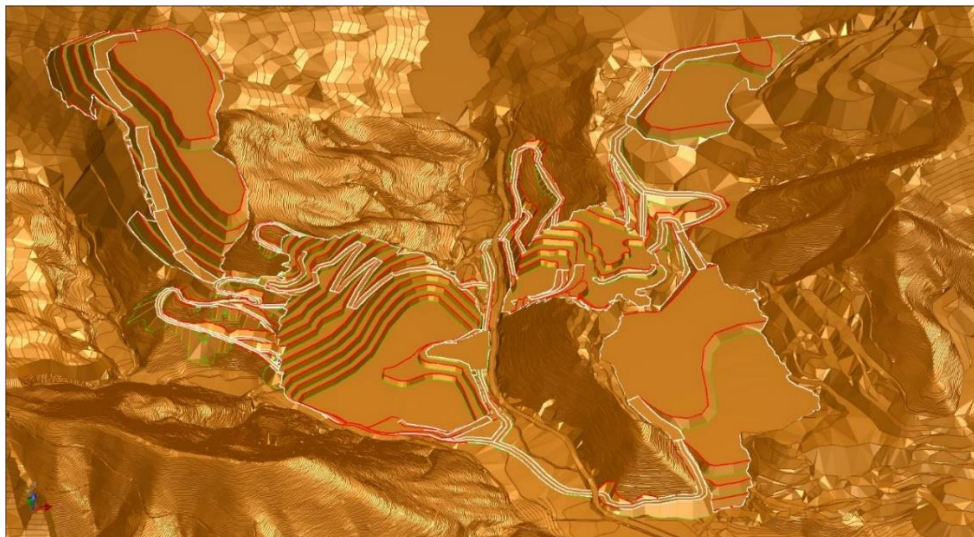
Usvojeni geometrijski elementi površinskog kopa Ciganuša-Škorac su sledeći:

- Visina radne etaže iznosi 10 m;
- Ugao kosine radne etaže iznosi 75°;
- Ugao završne kosine kopa u svim pravcima, bez transportnih puteva, iznosi 38°;
- Širina berme minimalno iznosi 10 m.

Na osnovu projektovane završne konture površinskog kopa u programu SURPAC sračunate su eksploatacione rezerve rude i pripadajuće jalovine, sa sadržajima Fe u rudi. Parametri projektovanog površinskog kopa prikazani su u Tabeli 3, dok je na Slici 5 dat 3D prikaz završne konture.

**Tabela 3. Parametri projektovanog površinskog kopa**

Parametar	Jedinica	Vrednost	Sadržaj, %
Ukupna količina rude	tone	3,506,471	31.9 % Fe
Karbonatna ruda	tone	2,505,308	25.7 % Fe
Limonitna ruda	tone	1,001,162	47.6 % Fe
Količina jalovine	tona	8,367,192	-
Koeficijent otkrivke	t/t	2.4	-



*Slika 5. 3D prikaz završne konture površinskog kopa Ciganuša-Škorac*

#### 4. Planiranje faznog razvoja kopa i dinamike eksploatacije

Dugoročna dinamika otkopavanja definisana je na osnovu analize različitog broja faza razvoja i redosleda otkopavanja po fazama. U konkretnom slučaju, primarni ciljevi optimizacije faza razvoja rudarskih radova su sledeći:

- da se svake godine obezbedi projektovani kapacitet na eksploataciji rude (500,000 t),
- da se svake godine obezbedi projektovani kvalitet rude (30%  $\pm$ 3%),
- da se poboljša NPV po godinama rada balansirajući kvalitet rude na potrebni nivo koeficijenta otkrivke, i
- da se optimizira sistem eksploatacije (kraće transportne dužine, manje stope ulaganja u opremu, itd.).

Ovako definisani ciljevi, gde ostvarivanje maksimalnog NPV nije u prvom planu, otežavaju proces optimizacije faznog razvoja i zahtevaju ulaganje dodatnog napora od strane projekatanta. Naime, algoritam ugrađen u programski paket Whittle, ima za cilj da pronađe varijantu otkopavanja po fazama



kojom će se ostvariti maksimalan NPV, stavljajući u drugi plan ujednačavanje kvaliteta rude tokom pojedinačnih perioda eksploatacije. U skladu sa tim, bilo je neophodno da se proces optimizacije delimično kontroliše, u cilju obezbeđivanja projektovanih kapaciteta i kvaliteta rude, sa što manjim uticajem na smanjenje NPV.

S obzirom da je ležište po prirodi takvo, da je neophodno vršiti eksploataciju na fizički dva odvojena površinska kopa, prvo je sprovedena analiza prostornog rasporeda tipova rude (limonitna i karabonatna) i sadržaja Fe. Analizom projektovane završne konture, moglo se zaključiti da se na kopu Ciganuša uglavnom nalazi karbonatna ruda sa nižim sadržajem, dok se manji deo limonitne rude nalazi na površinskim etažama kopa. Što se tiče kopa Škorac, prostorna distribucija karbonatne i limonitne rude je mešovita po etažama sa preovlađujućim količinama limonitne rude sa znatno većim sadržajem gvožđa.

Takođe, izvršena je analiza geometrije površinskih kopova, u cilju određivanja maksimalnog broja faza razvoja, uzimajući u obzir minimalno rastojanje koje između njih mora postojati i koje je jednako minimalnoj širini etažne ravni. Ovom analizom utvrđeno je da se na površinskom kopu Ciganuša mogu formirati maksimalno 3 faze, dok površinski kop Škorac nema smisla razvijati prema fazama razvoja uzimajući u obzir njegovu veličinu i prostorni raspored rudnih blokova, te će on u celosti predstavljati jednu od faza razvoja.

Na osnovu prethodno navedenog, analiza se svela na dve moguće varijante u pogledu optimizacije faznog razvoja kopa Ciganuša-Škorac, i to na:

1. projektovanje faznog razvoja kopa sa ukupno 3 faze
2. projektovanje faznog razvoja kopa sa ukupno 4 faze

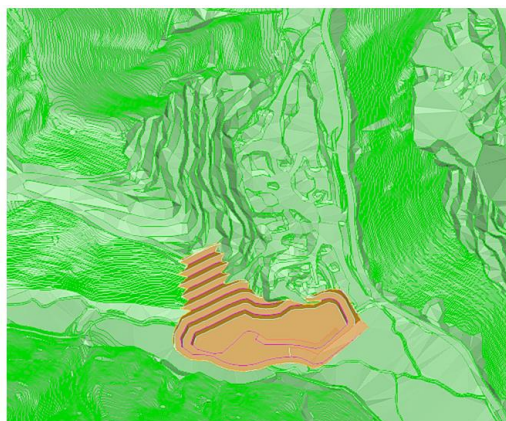
U obe varijante, najveći izazov odnosio se na kontrolisanje redosleda otkopavanja po fazama u programskom paketu Whittle, kako bi se ujednačio zahtevani godišnjeg kvaliteta otkopane rude. S obzirom da algoritam pronalazi varijantu otkopavanja koja generiše maksimalan NPV, on teži da zadovolji projektovani kapacitet na rudi uz što veći sadržaj gvožđa, jer na ovaj način ostvaruje veći profit u početnim godinama i daje najveću kumulativnu vrednost NPV-a.

Rezultati kalendarskog otkopavanja u zavisnosti od broja faza i redosleda otkopavanja, prikazani su u nastavku.

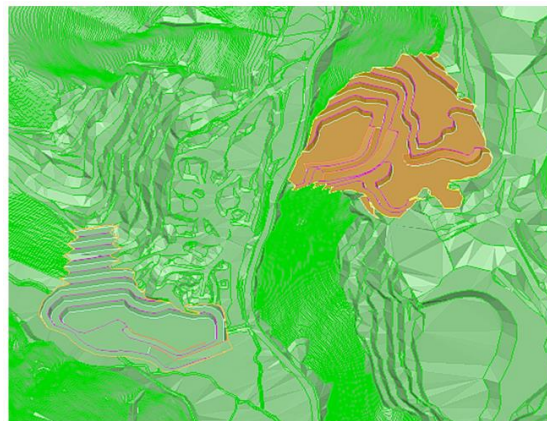
#### **4.1 Dinamika otkopavanja sa tri faze (pushbacks)**

Nakon analize dobijenih kontura kopova u procesu optimizacije, izabrane su moguće konture kopova za projektovanje faza razvoja i širenja zahvata u različitim zonama površinskog kopa.

Na slici 6 prikazane su projektovane konture zahvata (*Push Backs - PB*) koje su izbrane za projektovanje faza razvoja i konačne konture kopa definisanih u Whittle optimizaciji. Kontura zahvata kopa u Fazi 1 (PB1) određena je na osnovu kopa broj 7, dok zahvati Faze 2 (PB2) i Faze 3 (PB3) predstavljaju delove konture kopa broj 15 iz optimizacije. Ovakav izbor faza otkopavanja uslovljen je potrebom mešanja karbonatne i limonitne rude u odgovarajućem odnosu tokom eksploatacije radi dobijanja odgovarajućeg prosečnog sadržaja Fe što je moguće približnije zahtevanom.



**Push Back 1 – PB 1**



**Push Back 2 – PB 2**

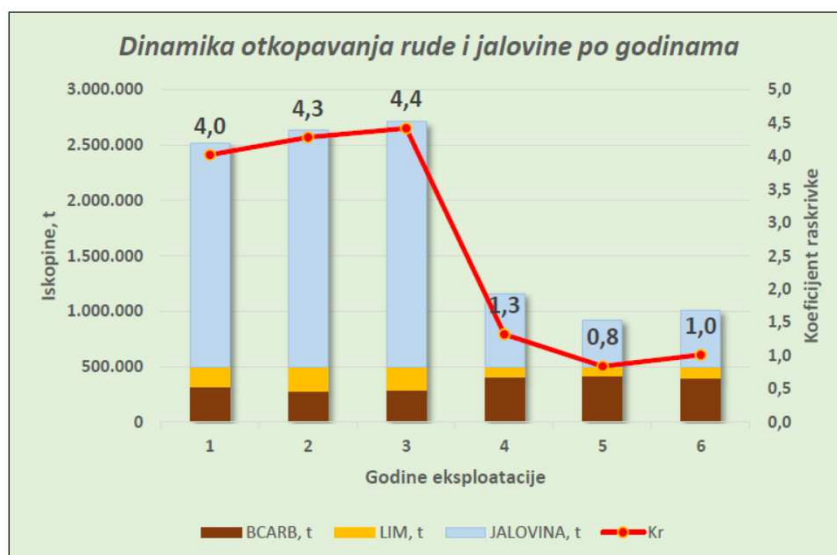


**Push Back 3 – PB 3**

*Slika 6. 3D izgled kontura faza za projektovanje razvoja kopova*

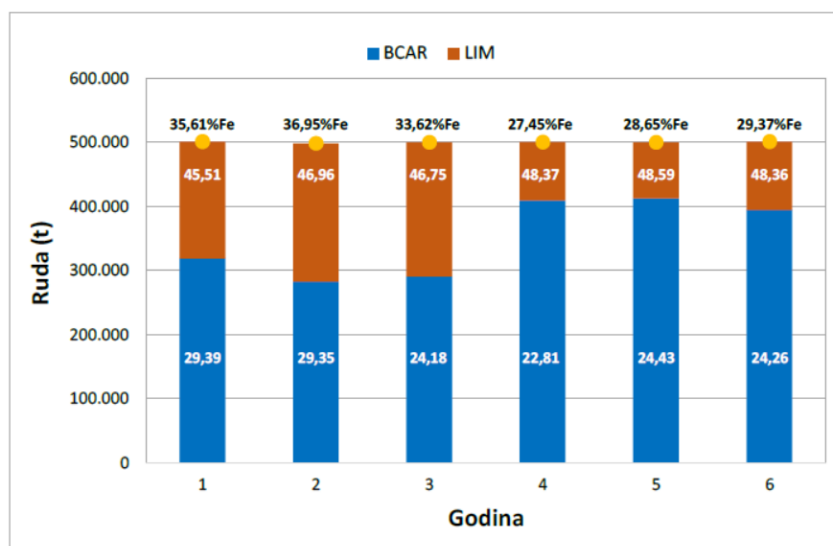
Zahvat PB-1 (Slika 6), predstavlja prvu fazu, za koju je kao podloga poslužila školjka kopa iz optimizacije u jugozapadnom delu kopa Ciganuša. Zahvat PB-2 (Slika 6), odnosno druga faza otkopavanja, definisana je na osnovu korišćenja konture kopa broj 15 iz optimizacije u severoistočnom delu kopa - Škorac. Za treću fazu (PB3), korišćena je kontura kopa broj 15 u centralnom i severnom delu kopa do završne konture - Ciganuša, kao proširenje zahvata PB1 do završne konture kopa Ciganuša - Škorac.

Na Slici 7 dat je grafički prikaz otkopavanja ukupnih količina rude i jalovine po godinama i koeficijent otkrivke.



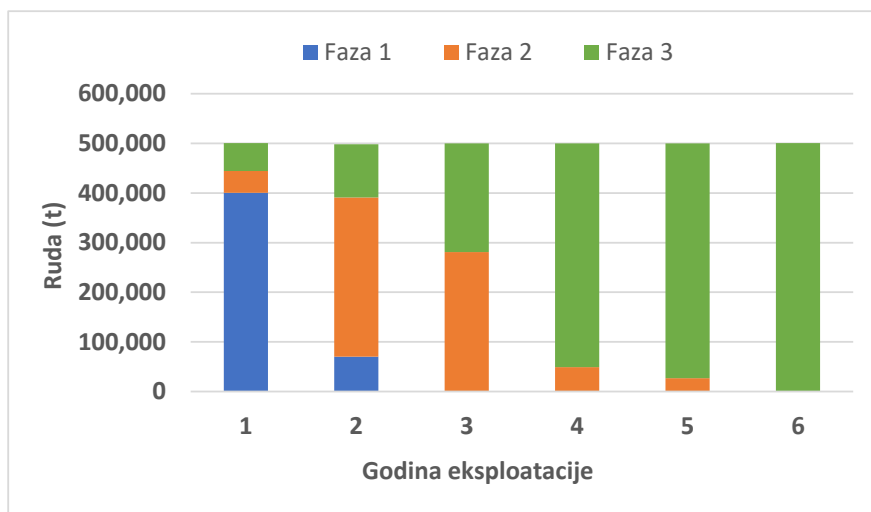
Slika 7. Dugoročna dinamika eksploatacije rude i jalovine

Na Slici 8 dat je grafički prikaz količina rude koje se otkopavaju (BCAR-karabonatna, LIM-limonitna) po godinama u veku površinskog kopa Ciganuša-Škorac.



Slika 8. Otkopavanje rude (BCAR, LIM) po godinama

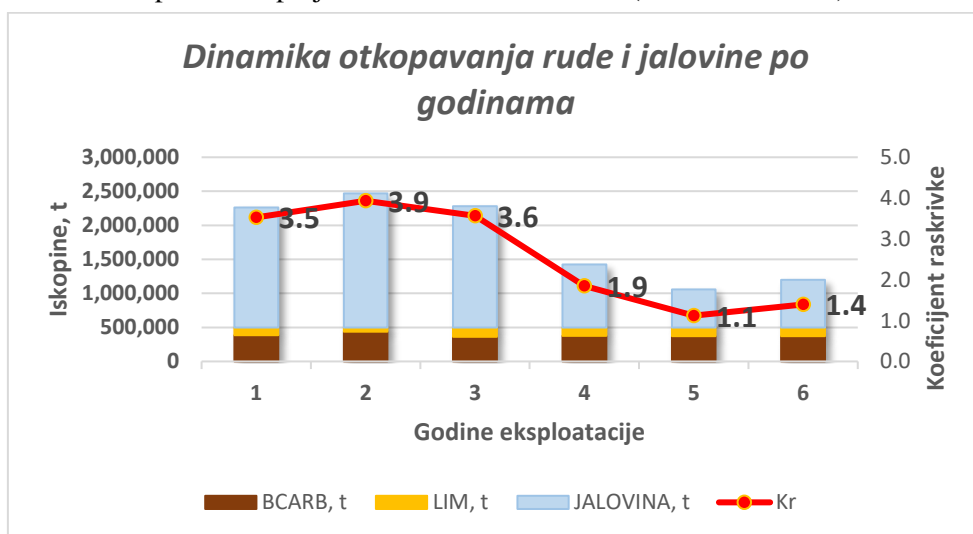
Na slici 9 dat je grafički prikaz otkopavanja ukupnih količina rude po godinama i fazama razvoja u veku površinskog kopa Ciganuša-Škorac.



Slika 9. Dinamika eksploatacije rude po godinama i fazama razvoja

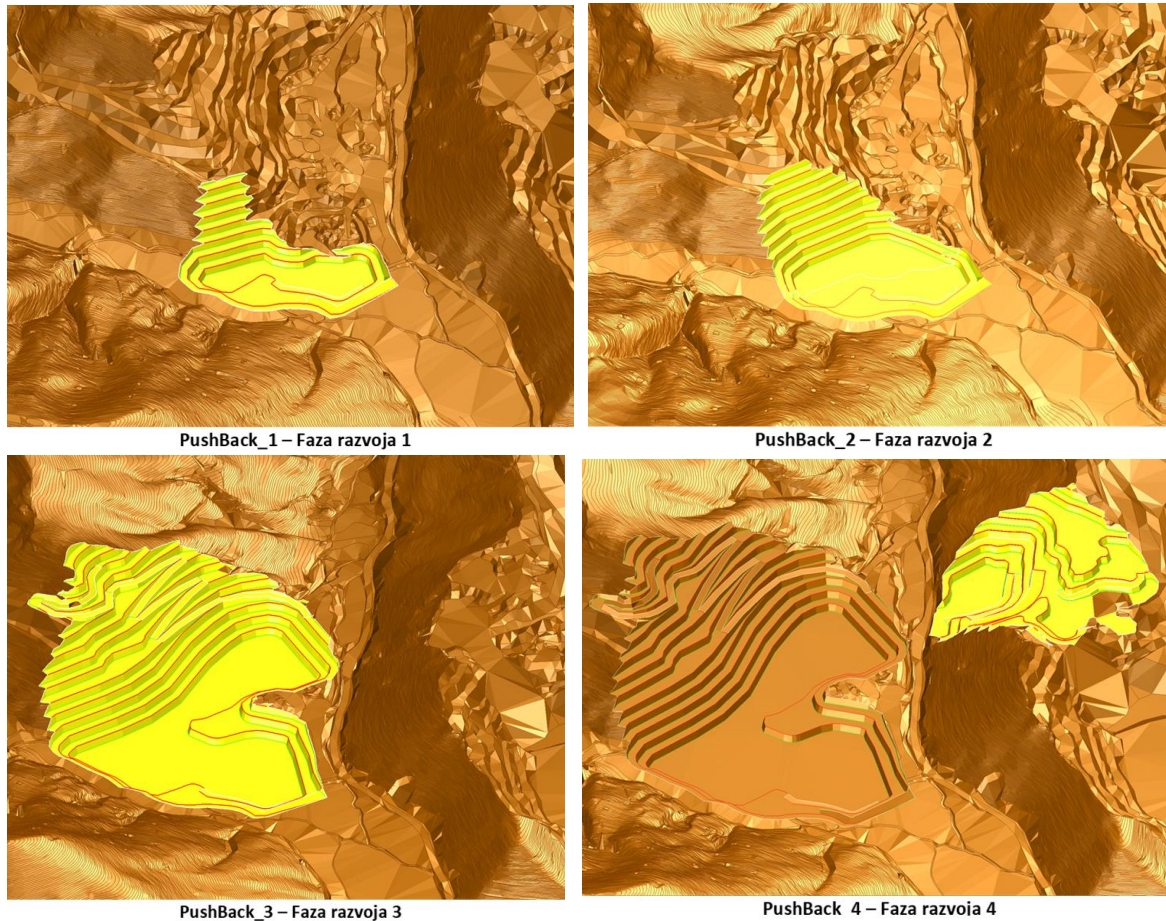
#### 4.2 Dinamika otkopavanja sa četiri faze (pushbacks)

Kao i u slučaju razvoja kopa sa 3 faze, projektovanje faza razvoja izvršeno je na bazi kontura kopa definisanih u Whittle optimizaciji. Kontura kopa u Fazi 1 određena je na osnovu kopa broj 7, Faze 2 na osnovu južnog dela konture 13 dok zahvati Faze 3 i Faze 4 predstavljaju delove konture kopa broj 15 iz Whittle optimizacije. Projektovana detaljna dinamika otkopavanja po godinama prikazana je na Slici 10, dok su na Slici 11 prikazane projektovane konture zahvata (*Push Backs* - PB).



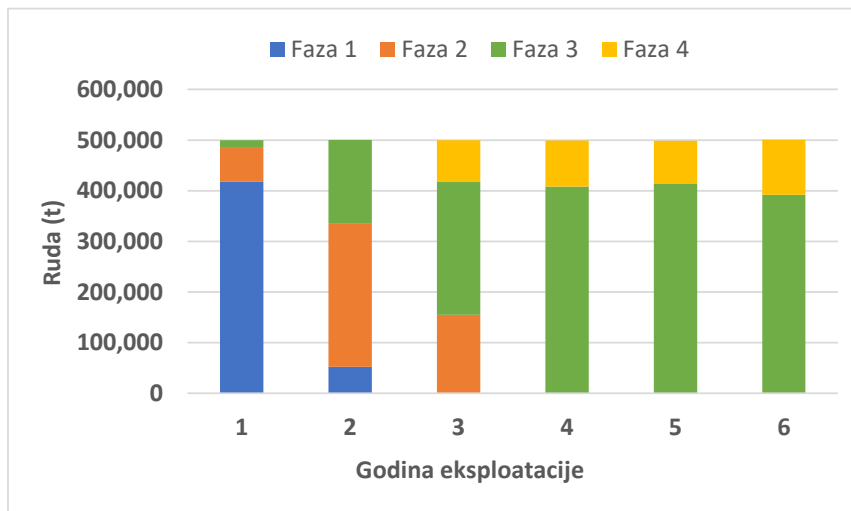
Slika 10. Dinamika otkopavanja rude i jalovine po godinama eksploatacije





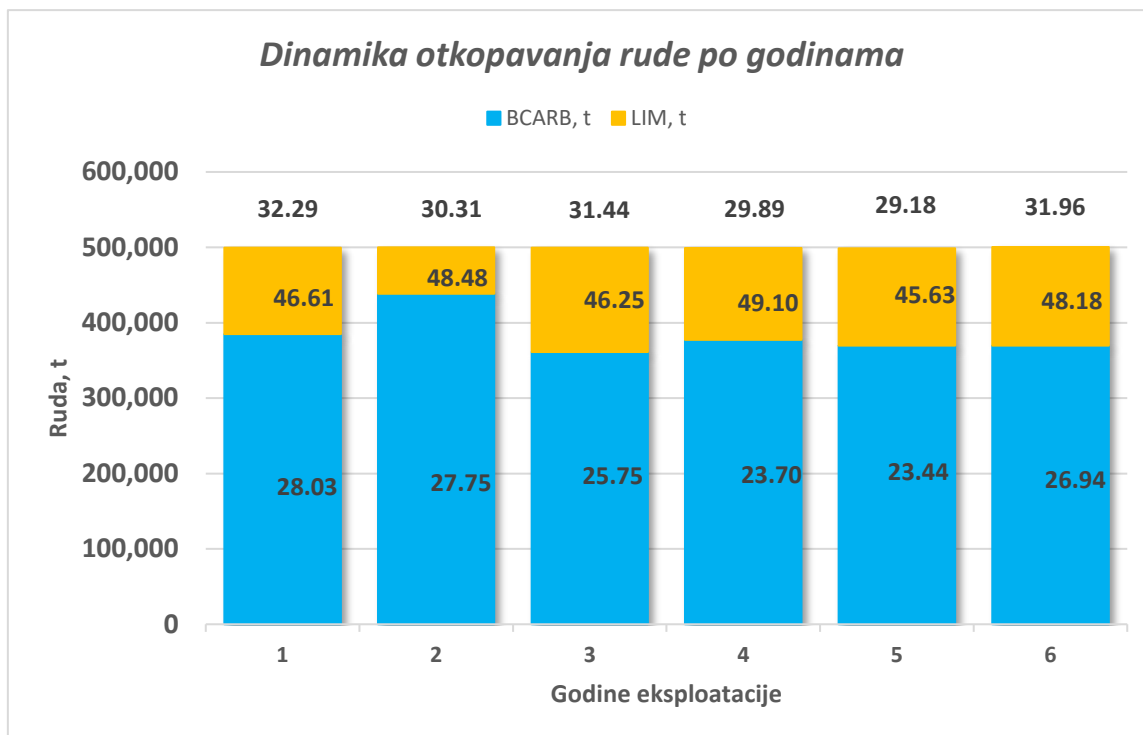
Slika 11. 3D izgled kontura faza za projektovanje razvoja kopova

Na Slici 12 dat je grafički prikaz otkopavanja ukupnih količina rude po godinama i fazama razvoja u veku površinskog kopa Ciganuša-Škorac.



Slika 12. Dinamika eksploatacije rude po godinama i fazama razvoja

Na Slici 13 dat je grafički prikaz količina rude (BCAR, LIM) sa prosečnim sadržajem Fe% koje se otkopavaju po godinama eksploatacije u veku površinskog kopa Ciganuša-Škorac.



Slika 13. Dinamika otkopavanje rude (BCARB, LIM) po godinama sa sadržajima Fe%

## 5. Zaključak

U okviru ovog radu, prikazana je metodologija optimizacije faznog razvoja i dinamike otkopavanja površinskog kopa, kao i problematika sa kojom se rudarski inženjer kao projektant suočava tokom procesa strateškog planiranja. U radu su prikazane dve varijante dinamike otkopavanja za različiti broj faza razvoja i redosled otkopavanja po fazama.

Detaljna analiza dinamike otkopavanja rude i jalovine na površinskom kopu, urađena je u Whittle softveru primenom Milawa balanced algoritama. Detaljnom analizom mogućih varijanti godišnje dinamike po fazama i etažama, u iterativnom postupku, od više dobijenih i analiziranih dinamika izabrana je varijanta dinamike kojom je dobijen maksimalni preliminarni NPV sa polaznim parametrima korišćenim i pri optimizaciji finalne konture kopa.

Prilikom izbora najpovoljnije varijante dinamike vodilo se računa da se u svakoj godini ostvaruje zahtevani godišnji kapacitet od 500,000 tona rude sa odgovarajućim prosečnim sadržajem gvožđa. Takođe, vodilo se računa i da koeficijent otkrivke bude ujednačen po godinama i da se minimiziraju oscilacije prosečnog sadržaja Fe po godinama.

Kako se može videti iz prikazanih rezultata, projektovana dinamika otkopavanja sa tri faze razvoja (*pushbacks*) obezbeđuje zahtevani godišnji kapacitet od 500.000 t rude u svakoj godini rada. Međutim, zahtevani prosečni sadržaj Fe u rudi nije bilo moguće u potpunosti ostvariti. Donja granica prosečnog sadržaja Fe u rudi je ostvarena, ali prosečni sadržaj Fe u rudi u prve dve godine nije bilo moguće ostvariti s obzirom na geološke karakteristike ležišta, odnosno prostornu raspodelu limonitne i karbonatne rude rudnih tela Ciganuša i Škorac po etažama. Kako je na prve 4 etaže na rudnom telu Škorac dominantna limonitna ruda sa visokim sadržajem Fe, u odnosu 5.7:1 prema karbonatnoj rudi, nije bilo moguće izbeći da u nekim godinama prosečni sadržaj Fe bude veći od 33%.

Analizom prikazanih rezultata projektovane dinamike otkopavanja sa 4 faze razvoja (*pushbacks*), može se zaključiti da je kao i u prethodnoj varijanti obezbeđen zahtevani godišnji kapacitet od 500.000t rude u svakoj godini rada. Prosečni sadržaj Fe u rudi se u periodu otkopavanja kreće u zahtevanim granicama, pri čemu je donja granica prosečnog sadržaja Fe iznosi 29,18%, a gornja 32,29%.

Komparativna analiza dveju prikazanih varijanti, ukazuje na značaj optimizacije faznog razvoja površinskog kopa, odnosno na pravilan odabir broja i veličine faza. Dinamika otkopavanja sa tri faze razvoja nije dala zadovoljavajuće rezultate, jer postoji značajna razlika u pogledu veličine faza na površinskom kopu Ciganuša (Faza 3 je značajno veća u odnosu na Fazu 1). U tom slučaju, neophodno je u početnim godinama vršiti otkopavanje većih količina rude sa površinskog kopa Škorac, jer se do rudnih blokova iz Faze 3 dolazi u kasnijim godinama zbog klasične metode otkopavanja *etaža po etaža*. Visok sadržaj gvožđa u otkopanoj rudi sa kopa Škorac, kao i nemogućnost zahvatanja rudnih bloka iz Faze 3 (kop Ciganuša), kao rezultat generišu neujednačen kvalitet korisne mineralne sirovine.

Ovaj problem rešen je uvođenjem dodatne faze u razvoju površinskog kopa Ciganuša, usled čega je omogućeno ranije pristupanje rudnim blokovima sa ovog kopa, dok je otkopavanje rude na kopu Škorac, sa višim sadržajem gvožđa, moguće odložiti za kasnije godine, kada dolazi do pada kvaliteta.

Tradicionalni pristup za definisanje faza razvoja i dinamike otkopavanja, često može dovesti do nezadovoljavajućih rešenja ukoliko primarni cilj nije ostvarivanje maksimalnog NPV-a. U slučajevima kao što je ovaj, ukazano je na značaj ljudskog faktora i primene specijalizovanih softverskih alata u procesu planiranja. U slučaju kada funkcija cilja primenjenog algoritma nije kompatibilna sa primarnim ciljevima projektanata, iskustvo i znanje su od presudnog značaja za definisanje optimalnih rešenja.

## Literatura

- [1] Jélvez E., Morales N., Askari-Nasab H.: A new model for automated pushback selection, *Computers & Operations Research*, br. 115, 2020.
- [2] M. Menabde, G. Froyland, P. Stone, G. Yeates: Mining Schedule Optimisation for Conditionally Simulated Orebodies, *Advances in Applied Strategic Mine Planning*, pp. 91-100, 2018.
- [3] Milensko Savić, Mile Bugarin: Modeliranje ležišta sa procenom resursa i planiranjem otkopavanja na površinskim kopovima, Bor, Srbija: Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2019.
- [4] R. Goodfellow, R. Dimitrakopoulos: Algorithmic integration of geological uncertainty in pushback designs for complex multi-process open pit mines, *Mining Technology*, t. 122, br. 2, pp. 67-77, 2013.
- [5] F. R. Albor Consuegra, R. Dimitrakopoulos: Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons, *Mining Technology*, t. 119, br. 2, pp. 88-101, 2010.
- [6] T. Elkington, R. Durham: Integrated open pit pushback selection and production capacity optimization, *Journal of Mining Science*, t. 47, br. 2, pp. 177-190, 2011.
- [7] P. Nancel-Penard, N. Morales Varela: Optimizing pushback design considering minimum mining width for open pit strategic planning, *Engineering Optimization*, t. 54, br. 9, pp. 1494-1508, 2022.
- [8] C. Meagher, S. A. Abdel Sabour, R. Dimitrakopoulos: Pushback design of open pit mines under geological and market uncertainties, *Advances in Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, t. 17, pp. 291-298, 2009.
- [9] D. Kržanović, N. Vušović, M. Ljubojev: Selection of the optimum pushbacks in a long-term planning process of the open pit: A condition for maximization the net present value: Case study: The open pit Veliki Krivelj, Serbia, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, pp. 37-44, 2018.
- [10] J.L. Yarmuch, M. Brazil, H. Rubinstein, T. Doreen: A model for open-pit pushback design with operational constraints, *Optimization and Engineering*, 2021.
- [11] Kržanović D.: Modeli za optimizaciju graničnog sadržaja metala u rudu u funkciji dugoročnog planiranja površinskih kopova, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, 2016.

- [12]Whittle D.: Open-Pit Planning and Design, SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2011.
- [13]C. Meagher, R. Dimitrakopoulos, D. Avis: Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem - a review, Journal of Mining Science, t. 50, br. 3, pp. 508-526, 2014.
- [14]Lerchs, H. and Grossman, F.: Optimum Design of Open-Pit Mines, Transactions CIM Bullitin, t. 58, pp. 47-54, 1965.
- [15]Whittle, G.; Burks, S.: Simultaneous mining and mineral processing enterprise optimization for the platinum industry, u In Proceedings of the 4th International Platinum Conference, Platinum in transition Boom or, Johannesburg, South Africa, 2010.