Vitomir Milić*, Igor Svrkota*, Dejan Petrović*

ANALYSIS THE EFFECTS OF TECHNO-ECONOMIC PARAMETERS ON THE ECONOMY OF UNDERGROUND MINING IN JAMA BOR**

Abstract

When a new mining method is designed, it is necessary to define the optimal parameters of method. Applicability of a method in certain conditions is tested through determination of each relevant method parameter. Their values have to be acceptable. This paper presents a case study for analyses of parameters related to the ore body Borska Reka. The analysis was focused on determination the share of costs in the final price, ore value and copper production economy.

Keywords: underground mining, techno-economic parameters, ore value

1 INTRODUCTION

Borska Reka is a massive, large-scale ore body, with 600 million tonnes of ore. Low grades and great depth, 600 to 1,200 m, are serious limiting factor. That is why detailed analysis of each relevant parameter is required in order to prove the positive economic results. The main techno-economic parameters are: productivity of applied mining method; intensity of excavation; development ratio; effects of excavation; manpower norms; material and energy norms; ore recovery, ore dilution and ore loss; excavation costs and cost price of one ton of excavated ore. Cost price is a dominant parameter. It is a sum of all costs: material, energy, maintenance, amortization, wages and many other material and non-material costs. Value of ore is a variable due to directly relation to the variation of metal prices at the London

Metal Exchange (LME). When metal prices at the global market are too low, they can jeopardize economies of the mines and cause great financial losses.

2 THE EFFECTS OF TECHNO-ECONOMIC PARAMETERS ON BUSINESS ECONOMY

2.1 Mining costs

Mining costs, or production costs, are the most important. They are a sum of all individual costs in production process. Production costs are a base for defining the price of excavated ore and financial planning in a certain period of time. Also, in comparison with prices of ore, concentrate or metal at the national or global market, it shows

* University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, isvrkota@tf.bor.ac.rs

** This work is the result of the Projects TR33021 „Research and Monitoring the Changes of the Stress Strain State in the Rock Mass „In-Situ“ around the Underground Rooms with Development of Models with Special Reference to the Tunnel of the Krivelj River and Pit Bor“ and TR33038 “Improvement of Copper Ore Mining and Processing Technology with Monitoring of Living and Working in RTB-BOR Group“, funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia

whether mining operations can provide profit or not.

This way the producer, in this case the mine is forced to match pre-defined frames of economic policy, and to enable basic precondition for financially justified mining operations:

$$C_k \leq C_{\text{prod.}}, \text{ din/t or US \$/t} \quad (1)$$

i.e. cost price C_k has to be equal or lower than selling price, $C_{\text{prod.}}$.

In cases when it is necessary to cut the costs, the structure of costs has to be analyzed in order to define possible sectors for cost cuts. For example, Fig.1 shows a structure of costs used for operational plan in Jama Bor [1].

Figure 1 Structure of costs in Jama Bor; Individual costs: 1. Material, 2. Energy, 3. Maintenance, 4. Other material costs, 5. Amortization, 6. Non-material costs, 7. Gross wages

Such a high share of wages in total costs, as in this example, is usually a sign of poor organization, low level of mechanization and automation and similar problems, although, in case of Jama Bor, the level of mechanization is satisfying.

The most important factors in costs calculation are norms. Norms of material, energy and manpower are defined for two main purposes: calculation of material quantities, usually calculated in creation of annual operational plans, and calculation of costs, for instance costs of material, energy, wages, etc.

Norms of material are determined for each material separately, based on material consumption and achieved production. Costs of material are calculated as a product of norms and prices:

$$T_{\text{nm}} = N_{\text{nm}} \cdot C_{\text{nm}}, \text{ din/t, (US\$/t)} \quad (2)$$

where:

T_{nm} – costs of material, din/t, (US\$/t),

N_{nm} – norm of material, (unit/t),

C_{nm} – price of material, din/unit, (US\$/unit).

Annual material consumption is calculated by following formula:

$$Q_{\text{nm.god.}} = N_{\text{nm}} \cdot Q_{\text{god.}}, \text{ unit/year} \quad (3)$$

By analogy, costs of energy are a product of energy consumption and energy price, as well as costs of wages, which are the product of norms and prices of manpower.

Development ratio, K_p , is a relation between a length of development drifts and excavated ore from developed mine section:

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{L_p}{Q_{rm}} = \frac{L_p \cdot (1 - K_o)}{Q_r \cdot K_i} = \\ &= \frac{L_p}{Q_r \cdot K_{rm}} \text{ m/t} \end{aligned} \quad (4)$$

Where:

L_p – total length of development drifts, m

Q_m - quantity of bulk ore, t
 K_o - dilution ratio
 K_i - recovery ratio
 Q_r - quantity of ore, t
 K_m - bulk ore ratio.

Quantity of excavated ore in this equation is presented by quantity of bulk ore. Sometimes, units like mm/t or m/1.000 t can be used for development ratio, but in this case it will stay in m/t.

Development ratio is a parameter that can be used for various purposes, for instance:

- For evaluation of development works, when different mining methods or different variants can be compared;
- For calculation of development costs, through following formula:

$$T_p = K_p \cdot C_{ip}, \text{ din/t (m/t x din/m = din/t)}. \quad (5)$$

When development costs are calculated, development ratio has to be defined separately for each type of drift, because costs of drifting vary. Total development costs are calculated by following formula:

$$T_p = \sum K_{p,i} \cdot C_{ip,i}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (6)$$

Development ratio is suitable for annual or long-term planning, because it provides easy calculation of lengths of development drifts. For instance, total length of drifts needed for annual production is:

$$L_p = K_p \cdot Q_{god}, \text{ m/year,}$$

and

$$L_p = \sum L_{pi} = \sum K_{pi} \cdot Q_{god}, \text{ m/year,} \quad (7)$$

where:

L_p or $\sum L_{pi}$ – total length of development drifts per year, m/year,

K_{pi} – individual development ratio, calculated for each type of drift.

Development ratio is also suitable for calculation of drifting norms and their values per ton of ore. Norms of materials in development works are defined per meter of drift advance (unit/m), for instance kg/m, m³/m,

units/m, etc. Following formula is used to define the norms per tonnes (unit/t):

$$N_m = N'_m \cdot K_{pi}, \text{ unit/t} \\ (\text{unit/m x m/t = unit/t}), \quad (8)$$

Where N_m is norm of material per ton of excavated ore and N'_m is norm of material per meter of drift advance.

Similarly, development costs can also be defined per ton of excavated ore:

$$T_{ip} = T'_{ip} \cdot K_{pi}, \text{ din/t, (US$/t),} \\ (\text{din/m x m/t = din/t}), \quad (9)$$

Where:

T'_{ip} - development costs in din/m, (US\$/m)

T_{ip} - development costs in din/t, (US\$/t).

Beside development ratio, there are some other parameters of mining methods that also have a significant influence to costs of mining. Values of these parameters have to be optimal, whether it means that they need to be maximized or minimized. For instance, mining method productivity, intensity of excavation, ore recovery and labor output should have highest possible values, while ore loss or ore dilution should be minimal.

2.2 Value of ore and economy of mining

Defining the cost price and sell price, and matching the price determined by market, is just one aspect of approach to this problem. In cases when final product is mineral raw material, or metal, whose prices are dictated by global market, economy of the mine is facing many risks. Intensive oscillations of prices, with rapid decreases, may cause a financial loss for mines. In such cases there is a dilemma, whether to abort the mining operations temporarily, or carry on the production, but with financial loss. Temporary closing or mine conservation are very complicated tasks, so some other solutions are usually found, like reducing the level of production, minimization of costs, restructuring or looking for help from the government.

The essence of business economy in this case can be simply expressed through the following relation:

$$T_u \leq V_r, \text{ din/t, (US$/t),} \quad (10)$$

which means that total costs, T_u , per ton of excavated ore, have to be lower than total value of a ton of ore. Calculation of cost price and range of positive financial results will be considered on example copper ore mining in Bor ore deposit.

Value of ore represents total value of extractable metals in the ore, but only the ones that could be valorized. For instance, ore from the Borska Reka deposit includes copper, precious metals (gold and silver), but also magnetite and molybdenum. However, in calculation of ore value, last two components are not taken in consideration, because their economic valorization, based on existing technology, has not been confirmed yet.

Generally, value of ore can be defined by following relation:

$$V_r = \frac{m_r}{m_m} \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m, \quad \text{din/t (US$/t),} \quad (11)$$

where:

- m_r - percentage of metal in the ore, %,
- m_m - percentage of metal in final product, %,
- K_{im} - metal recovery ratio,
- $K_{im} = 1 - K_{om}$,
(K_{om} - metal dilution ratio)
- K_f - metal recovery ratio in mineral processing,
- K_m - metal recovery ratio in metallurgical processing,
- C_m - price of metal on local or global market, din/t or US\$/t.

Relation m_r/m_m is used in cases where the final product purity is less than 100%. In case of copper extraction, its final purity is 99.9%, so previous formula will be [1]:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (12)$$

When the value of complex ore is defined, it is calculated as a sum of values of individual components:

$$V_r = 0,01 \cdot \sum m_i \cdot K_{im i} \cdot K_{f i} \cdot K_{m i} \cdot C_{m i}, \quad \text{din/t (US$/t)} \quad (13)$$

Parameters in this equation are same as in previous, the only difference is that they refer to individual components in the ore.

In calculation of value of ore in the ore body Borska Reka, total valorization of each component in the ore: copper, precious metals, sulfur, magnetite and molybdenum has been used, through following relation:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot (1 - K_{om}) \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m + V_{pm} + V_{FeS_2} + V_{Fe_3O_4} + V_{Mo}, \quad \text{din/t, (US$/t),} \quad (14)$$

Where:

- V_{pm} - value of precious metals in a ton of ore, din/t, (US\$/t),
- V_{FeS_2} - value of sulfur, expressed through pyrite, din/t, (US\$/t),
- $V_{Fe_3O_4}$ - value of magnetite concentrate in a ton of ore, din/t, (US\$/t),
- V_{Mo} - value of molybdenum concentrate in a ton of ore, din/t, (US\$/t)

Values of individual components are defined based on their percentage in the ore, metal recovery ratio in mining, mineral processing and smelting and price of metal at global market. Value of precious metals is:

$$V_{pm} = V_{Au} + V_{Ag}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (15)$$

$$V_{Au} = 0,001 \cdot m_{Au} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Au} \cdot K_{m,Au} \cdot C_{Au}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (16)$$

$$V_{Ag} = 0,001 \cdot m_{Ag} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Ag} \cdot K_{m,Ag} \cdot C_{Ag}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (17)$$

Where:

- m_{Au} , m_{Ag} - content of gold and silver in the ore, g/t,
- $K_{f,Au}$, $K_{f,Ag}$ - gold and silver recovery ratio in mineral processing,
- $K_{m,Au}$, $K_{m,Ag}$ - gold and silver recovery ratio in smelting,

C_{Au} , C_{Ag} – prices of gold and silver at global market, din/kg, (US\$/kg).

In calculations, a special attention should be paid on units. Content of precious metals is usually given in g/t, so factor 0.001 is used to convert it in kilos, since price of precious metals is usually given in US\$/kg.

Values of concentrates of magnetite and molybdenum are calculated without taking into consideration the recovery in smelting, because concentrates are considered as the final product which can be sold on the market:

$$V_{Fe_3O_4} = \frac{m_{Fe_3O_4} \cdot K_{im} \cdot K_{f.Fe_3O_4}}{m_{k.Fe_3O_4}} \cdot C_{k.Fe_3O_4}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (18)$$

$$V_{Mo} = \frac{m_{Mo} \cdot K_{im} \cdot K_{f.Mo}}{m_{k.Mo}} \cdot C_{k.Mo}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (18a)$$

Where:

$m_{Fe_3O_4}, \dots, m_{Mo}$ – content of magnetite and molybdenum in the ore, %

$m_{k.Fe_3O_4}, \dots, m_{k.Mo}$ – content of magnetite and molybdenum concentrate in the ore, %

$K_{f.Fe_3O_4}, \dots, K_{f.Mo}$ – magnetite and molybdenum recovery ratios in mineral processing,

$C_{k.Fe_3O_4}, \dots, C_{k.Mo}$ – cost price of a ton of magnetite and molybdenum concentrate, din/t, (US\$/t).

This is how previous formulas were derived:

- Value of metal in the ore is:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m, \quad \text{din/t, (US$/t)},$$

- In order to calculate the value of metal per ton of concentrate, the value of concentrate is calculated as:

$$V_k = 0,01 \cdot m_k \cdot K_m \cdot C_m = C_k, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (19)$$

- Price of metal calculated through price of concentrate is:

$$C_m = \frac{C_k}{0,01 \cdot m_k \cdot K_m}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (20)$$

When relation (20) is included in formula for calculation of value of ore:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot \frac{C_k}{0,01 \cdot m_k \cdot K_m} = \frac{m_r \cdot K_{im} \cdot K_f}{m_k} \cdot C_k \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (21)$$

In some previous analyses [3], [4], [5], only values of copper and precious metals were taken into consideration in defining the ore value since only their valorization was certain. Generally, there are three ways to define the ore value.

The first one was already explained in this paper, it is based on partial calculation of values of individual components:

$$V_r = V_{Cu} + V_{Au} + V_{Ag}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (22)$$

$$V_{Cu} = 0,01 \cdot m_{Cu} \cdot K_{im} \cdot K_{f.Cu} \cdot K_{m.Cu} \cdot C_{Cu}, \quad \text{din/t, (US$/t)}$$

$$V_{Au} = 0,001 \cdot m_{Au} \cdot K_{im} \cdot K_{f.Au} \cdot K_{m.Au} \cdot C_{Au}, \quad \text{din/t, (US$/t)}$$

$$V_{Ag} = 0,001 \cdot m_{Ag} \cdot K_{im} \cdot K_{f.Ag} \cdot K_{m.Ag} \cdot C_{Ag}, \quad \text{din/t, (US$/t)}$$

The second way is to define the equivalent ore grade, which means that grade of copper is increased according to the value of precious metals. Calculation of equivalent ore grade is given in the example of the ore body Borska Reka, while the ore value is given in US\$ per ton. Ore grades are as follows: 0.763% of copper, 0.315 g/t of gold, 1.67 g/t of silver [6]. Prices of metals are: copper - 4,500 US\$/t, gold - 34,350 US\$/kg, silver - 450 US\$/kg [7]. The ore value, as the sum of values of individual metals, is calculated by the following parameters:

Table 1 Values of recovery ratios

Parameter	Copper	Gold	Silver
Metal recovery ratio, K_{im}	0.90	0.90	0.90
Mineral processing recovery ratio, K_f	0.86	0.40	0.50
Smelting recovery, K_m	0.97	0.92	0.89

Value of copper:

$$V_{Cu} = 0.01 \times 0.763 \times 0.9 \times 0.86 \times 0.97 \times 4,500.00 = 25,778 \text{ US\$/t}$$

Value of gold:

$$V_{Au} = 0.001 \times 0.315 \times 0.9 \times 0.4 \times 0.92 \times 34,350.00 = 3,584 \text{ US\$/t}$$

Value of silver:

$$V_{Ag} = 0.001 \times 1.67 \times 0.9 \times 0.5 \times 0.89 \times 450 = 0.301 \text{ US\$/t}$$

Total value of metal in a ton of ore: 29,663 US\$/t

Equivalent ore grade, which refers to total value of metal, is than calculated by the following formula:

$$m_{ekv} = \frac{\sum V_m}{0.01 \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_{Cu}} = \frac{29,663}{0.01 \times 0.9 \times 0.86 \times 0.97 \times 4,500.00} = 0.878 \% \text{ Cu.}$$

This means that, due to presence of precious metals in the ore, the copper grade in the ore increased from 0.763% to 0.878%, or by 0.115%. Although the increase of ore grade in % does not seem too significant, this means that value of ore is increased by 3.882 US\$/t, or by 15.06%, which is very significant for the final financial result.

The third way is based on precious metals ratio [5]. In this case, total value of ore is calculated by following relation:

$$V_r = 0.01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot K_{pm} \cdot C_m, \text{ din/t, (US\$/t)} \quad (23)$$

A part of formula without precious metals ratio (K_{pm}) is a value of copper in the ore (V_{Cu}), while the entire formula provides total

value of ore. So, it can be expressed like this:

$$V_r = V_{Cu} \cdot K_{pm},$$

and

$$K_{pm} = \frac{V_r}{V_{Cu}} \quad (24)$$

In this example, value of precious metals ratio is: $K_{pm} = \frac{29,663}{25,778} = 1.151$

2.3 Determining the ore value for mining

Mining ore value is an economic category, introduced in order to separate the value of ore which should cover costs of mining. Total ore value needs to cover costs of mining, mineral processing and smelting, so, for a positive financial result, the ore value has to be higher than the sum of costs:

$$V_r \geq T_d + T_f + T_m, \text{ din/t, (US\$/t),} \quad (25)$$

where:

T_d – costs of mining, din/t, (US\$/t),

T_f – costs of mineral processing, din/t, (US\$/t),

T_m – costs of smelting, din/t, (US\$/t).

To define these costs, it is necessary to determine a quantity of excavated ore needed for a ton of concentrate and a ton of metal. Quantity of ore needed for production of one tone of concentrate is:

$$Q_r^k = \frac{m_k}{m_r \cdot K_{im} \cdot K_f}, \text{ t}_r/\text{t}_k, \text{ (tons of ore per ton of concentrate)} \quad (26)$$

Quantity of ore needed for production of one ton of metal is:

$$Q_r^m = \frac{m_m}{m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m}, \text{ t}_r/\text{t}_m, \text{ (tons of ore per ton of metal)} \quad (27)$$

Quantity of concentrate needed for production of one ton of metal is:

$$Q_k = \frac{m_m}{m_k \cdot K_m}, t_k/t_m \text{ (tons of concentrate per ton of metal)} \quad (28)$$

For copper ore in the ore body Borska Reka, and designed copper grade in the concentrate $m_k = 20\%$ Cu, the calculation is provided below:

$$Q_r^k = \frac{20.0}{0.763 \times 0.9 \times 0.86} = 33.87, t_r/t_k,$$

$$Q_r^m = \frac{99.9}{0.763 \times 0.9 \times 0.86 \times 0.97} = 174.39, t_r/t_m,$$

$$Q_k = \frac{99.9}{20 \times 0.97} = 5.15, t_k/t_m.$$

It is now possible to determine the costs of mineral processing per ton of ore, if the costs of mineral processing per ton of concentrate (T_k) are known. Similarly, it is possible to determine metallurgical costs per ton of ore, if the metallurgical costs per ton of copper (T_t) are known.

- Mineral processing costs per ton of ore:

$$T_f = \frac{T_k}{Q_r^k} = \frac{120}{33.87} = 3.54, \text{ US\$/t},$$

- Metallurgical costs per ton of ore:

$$T_m = \frac{T_t}{Q_r^m} = \frac{600}{174.39} = 3.44, \text{ US\$/t}$$

Now the mining ore value can be calculated:

$$V_{\pi} = V_r - (T_f + T_m), \text{ din/t, (US\$/t)}. \quad (29)$$

Value of ore V_r according to equation (25) is $V_r = T_d + T_f + T_m$, and if it is put in the upper equation, then $V_{\pi} = T_d$ and the relation for proving the financially justified mining is:

$$V_{\pi} > T_d \quad (30)$$

In the ore body Borska Reka, the mining ore value is:

$$V_{\pi} = 29.663 - (3.54 + 3.44) =$$

$$= 29.663 - 6.98 = 22.683 \text{ US \$/t}$$

3 ANALYSIS OF RESULTS

The results show that, for prices at the London Metal Exchange on a day of analysis (copper – 4,500 US\$/t, gold – 34,350 US\$/kg, silver – 450 US\$/kg), there is a possibility for the financially justified mining. In order to provide it, the mining costs have to be minimized and limited to 10 US\$/t, mineral processing costs to 4 US\$/t and metallurgical costs up to 4 US\$/t. Since the value of ore is 25,778 US\$/t for the ore grade of 0.763% Cu, and 29,663 US\$/t for the equivalent ore grade of 0.878% Cu, it is obvious that the ore value is higher than costs and the positive financial results are possible.

Figure 2 Relationship between the variation of ore grades and copper price for different values of mining costs (5 – 10 US\$/t)

Dominant factor in business economy of mining is the price of metals, primarily copper, gold and silver, at LME. In last 15 years, the prices of metals varied significantly. The range of copper price was from 1,800 US\$/t to almost 10,000 US\$/t. Several years ago, the analyses were based on the copper price at 2,400 US\$/t, as it was at the beginning of this century [5]. A detailed analysis requires defining the relations between the mining ore value and variation of prices at LME and variation of ore grades. The result of analysis shows that the costs of underground mining could not be lower than 7 - 8 US\$/t, while the mineral processing and metallurgical costs in RTB Bor are much higher than it was planned. In order to provide the positive results, the mining operations have to be deployed inside the 0.5% Cu contour, with the average ore grade of 0.8% Cu (Figure 2).

4 CONCLUSION

In analyses of economy of mining, the most important influential factors are the ore value, which depends on the ore grades and prices of metals at LME, and costs of mining, mineral processing and smelting. Analysis in this paper was focused on the ore body Borska Reka, above the Level XIX, and remaining ore reserves in the ore bodies Tilva Ros, P₂A, T₃ and D in Jama Bor. According to data gained from RTB Bor technical documentation, the average ore grades are as follows: 0.763% Cu, 0.315 g/t Au and 1.67 g/t Ag. The current prices at LME are: 4,500 US\$/t for copper, 34,350 US\$/t for gold and 450 US\$/t for silver. The ore value, calculated from these data, is 25,778 US\$/t. The equivalent ore grade, i.e. copper grade increased by grades of precious metals, is 0.878% Cu. In this case, the ore value is 29,663 US\$/t.

Based on this ore value, the financially justified underground mining is achievable

if the mining costs are limited to 10 US\$/t, mineral processing costs up to 4 US\$/t and metallurgical costs below 4 US\$/t.

However, the actual costs are much higher. The main reasons for increased mining costs are unfavorable distribution of the ore bodies in the Bor ore deposit and low level of output, reaching only 700,000 t/year. Mineral processing costs are also excessive, mainly due to the obsolete equipment. Significant increase of annual output in underground mining is necessary, because it enables reducing of fixed costs and therefore total costs, which is the main task for future of underground mining in Jama Bor.

REFERENCES

- [1] Z. Milicevic, R. Nikolic, Fundamentals of Mine Design, Technical Faculty in Bor, 2003 (in Serbian);
- [2] V. Milic, Z. Milicevic, Fundamentals of Mining, Technical Faculty in Bor, 2005 (in Serbian);
- [3] Z. Milicevic, Valorization of Low Graded Copper Ore and defining of Real Ore Value, 23th October Conference on Mining and Metallurgy, D. Milanovac, 1991, p.457;
- [4] Z. Milicevic et al., Optimization of sublevel caving, II International Symposium: Application of Numerical Methods and Computers in Geology, Mining and Metallurgy, Belgrade, 1991, p.457 (in Serbian);
- [5] Z. Milicevic, Possibilities of Mining in RTB Bor Mines, 33th October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, 2001, p.1;
- [6] Technical Documentation of RTB Bor, Jama Bor, Annual Operating Plan, Bor, 2014;
- [7] <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/>

Vitomir Milić*, Igor Svrkota*, Dejan Petrović*

ANALIZA UTICAJA TEHNO-EKONOMSKIH POKAZATELJA NA EKONOMIČNOST EKSPLOATACIJE U JAMI BOR**

Izvod

Pri istraživanju mogućnosti primene nove konstrukcije metoda otkopavanja neophodno je definisati optimalne parametre metode. Primenljivost za konkretne uslove podrazumeva proračun svih pokazatelja koji moraju da imaju povoljne vrednosti. Analiza pokazatelja uradjena je na primeru rudnog tela Borska reka. Posebna pažnja posvećena je određivanju troškova u strukturi cene koštanja, određivanju vrednosti rude, vrednosti rude za rudarenje i ekonomičnosti proizvodnje rude bakra.

Ključne reči: podzemna eksploatacija, tehnno-ekonomski pokazatelji, vrednost rude

1. UVOD

U rudnom telu Borska reka u konturi sa srednjim sadržajem bakra od 0,3% nalazi se oko 600.000.000 t rude. Nisak sadržaj korisne komponente i velika dubina od 600 do 1200 m dubine na kojoj rudno telo zaleže zahtevaju detaljnu analizu svih pokazatelja zbog potvrde ekonomičnosti otkopavanja. Osnovni tehnno-ekonomski pokazatelji na ekonomičnost eksploatacije su: proizvodnost primenjene metode otkopavanja, intenzitet otkopavanja, koeficijent pripreme, učinci na otkopavanju, normativi radne snage, materijala i električne energije, iskorišćenje, gubici i osiromašenje rude, troškovi otkopavanja i cena koštanja 1 t rude. Dominantni uticaj ima cena koštanja proizvodnje mineralne sirovine. Cena koštanja predstavlja sumu svih troškova na dobijanju mineralnih sirovina: troškovi materijala, energije, održavanja, amortizacije, troškovi bruto ličnih dohodaka i ostali materijalni i nematerijalni troškovi. Vrednost rude je promenljiva i

direktno je uslovljena cenama metala na svetskom tržištu. Veće variranje ovih cena, naročito kada se radi o većem padu cena, može dovesti rudnik u situaciju da ne može ekonomično posloovati.

2. UTICAJ TEHNO-EKONOMSKIH POKAZATELJA NA EKONOMIČNOST POSLOVANJA

2.1. Troškovi otkopavanja

Troškovi otkopavanja ili cena koštanja proizvodnje mineralne sirovine su jedan od najznačajnijih pokazatelja i predstavljaju sumu svih troškova na dobijanju mineralne sirovine. Oni se koriste za definisanje prodajne cene mineralne sirovine, odnosno da se planiraju ekonomski parametri poslovanja rudnika u toku obračunskog perioda. Takođe, na osnovu uporedjenja poznatih cena osnovnog proizvoda (koncentrata, metala i

* Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, isvrkota@tf.bor.ac.rs

** Ovaj rad je proistekao iz projekata TR33021 „Istraživanje i praćenje promena naponsko deformacijskog stanja u stenskom masivu „in-situ“ oko podzemnih prostorija sa izradom modela sa posebnim osvrtom na tunel Kriveljske reke i Jame Bor“ i TR33038 „Usavršavanje tehnologije eksploatacije i prerade rude bakra sa monitoringom životne i radne sredine u RTB-BOR grupa“, koji je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

sl.) na domaćem ili svetskom tržištu može se odrediti mogućnost ekonomičnog rada rudnika.

Na taj način, proizvođači, u ovom slučaju rudnici, primorani su da se uklapaju u unapred definisane okvire ekonomske politike, pa je potrebno zadovoljiti osnovni preduslov ekonomičnosti eksploatacije mineralnih sirovina da je:

$$C_k \leq C_{\text{prod.}}, \text{ din/t ili US \$/t} \quad (1)$$

tj. da je cena koštanja, C_k , manja ili granično jednaka sa prodajnom cenom, $C_{\text{prod.}}$.

Medjutim, u slučaju kada se razmatra potreba racionalizacije proizvodnje, potrebno je pažljivo analizirati strukturu cene koštanja, jer se iz nje može uočiti u kom pravcu se najpre može intervenisati u cilju njenog smanjenja. Kao primer, navodi se struktura cene koštanja uzeta iz jednog plana za jamu Bor [1].

Sl. 1. Primer učešća pojedinih troškova u strukturi cene koštanja za Jamu Bor
(1. Troškovi materijala, 2. Troškovi energije, 3. Troškovi održavanja 4. Ostali materijalni troškovi, 5. Amortizacija, 6. Nematerijalni troškovi, 7. Troškovi bruto LD)

Visoko učešće troškova radne snage obično govori o neracionalnom poslovanju, niskom stepenu organizacije rada, mehanizacije i automatizacije pojedinih procesa, mada se, u konkretnom slučaju ne može govoriti i o niskom stepenu mehanizovanosti procesa, obzirom da je on u suštini zadovoljavajući.

Za određivanje troškova materijala, energije i radne snage najznačajniji su njihovi normativi [2].

Normativi materijala, energije i radne snage proračunavaju se iz dva osnovna razloga: radi utvrđivanja potrebnih količina materijala za nabavku, što se radi pri izradi godišnjih operativnih planova proizvodnje, i za određivanje troškova materijala, energije i radne snage.

Normativi materijala se izračunavaju za svaku vrstu materijala posebno, na osnovu potrebne količine materijala na radilištima, i dobijene količine mineralne sirovine.

Troškovi materijala izračunavaju se iz proizvoda normativa i cena materijala, tj.:

$$T_{\text{nm}} = N_{\text{nm}} \cdot C_{\text{nm}}, \text{ din/t, (US\$/t)} \quad (2)$$

gde su:

T_{nm} – troškovi normativnog materijala, din/t, (US\$/t),

N_{nm} – normativi materijala, (jed.mere/t),

C_{nm} - cena normativnog materijala, din/jed. mere, (US\$/jed. mere).

Za planiranje godišnje potrošnje normativnih materijala, izračunavanje se vrši po formuli:

$$Q_{\text{nm.god.}} = N_{\text{nm}} \cdot Q_{\text{god.}}, \text{ (jed. mere/god.)} \quad (3)$$

Po istoj analogiji, određuju se troškovi energije na osnovu normativa potrošnje energije i cene energije, kao i troškovi radne snage na osnovu normativa i cene radne snage.

Koeficijent pripreme, K_p , se određuje iz dužina izradjenih prostorija i količina prip-

remljene rude njihovom izradom, po poznatom izrazu:

$$K_p = \frac{L_p}{Q_{rm}} = \frac{L_p \cdot (1 - K_o)}{Q_r \cdot K_i} = \frac{L_p}{Q_r \cdot K_{rm}} \text{ m/t.} \quad (4)$$

I u ovom slučaju treba računati sa količinama rudne mase, jer je ona relevantna za obračun. U praksi projektovanja i stručnom žargonu koeficijenti pripreme se nekad izražavaju u mm/t ili m/1.000 t, međutim za praktično korišćenje pogodnije je izražavanje usvojenim jedinicama mere, u m/t.

Koeficijent pripreme se koristi za različite namene:

- kao pokazatelj pripreme radi uporedjenja različitih metoda ili varijanti određene metode,
- za izračunavanje troškova pripreme po formuli:

$$T_p = K_p \cdot C_{ip}, \text{ din/t (m/t x din/m=din/t)} \quad (5)$$

Za ove potrebe, obzirom na različite cene izrade 1 m prostorija, potrebno je izračunavati koeficijente pripreme za svaku vrstu prostorija posebno. Ukupni troškovi pripreme određuju se izrazom:

$$T_p = \Sigma K_{p,i} \cdot C_{ip,i}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (6)$$

Pri izradi godišnjih operativnih ili dugoročnih planova, a i za druge potrebe, koeficijentom pripreme se na najjednostavniji način određuju potrebne dužine pripremnih prostorija ili dužine svake vrste prostorija pojedinačno. Dužina pripremnih prostorija, koja se mora izraditi u toku jedne godine, na primer, iznosi:

$$L_p = K_p \cdot Q_{god}, \text{ m/god.,}$$

odnosno

$$L_p = \Sigma L_{pi} = \Sigma K_{pi} \cdot Q_{god}, \text{ m/god.,} \quad (7)$$

gde su:

L_p ili ΣL_{pi} - ukupna dužina pripremnih prostorija koja bi trebalo da se izradi u toku jedne godine, m/god,

K_{pi} - pojedinačni (parcijalni) koeficijenti pripreme za svaku vrstu prostorija posebno.

Takodje, koeficijent pripreme se može pogodno koristiti i za preračunavanje normativa izrade pripremnih prostorija i njihovo prevodjenje na 1 t proizvedene mineralne sirovine. Normativi potrošnje materijala i drugi, na izradi pripremnih prostorija daju se u jedinici mere po metru dužnom prostorije (jed.mere/m), na primer kg/m, kom/m, m³/m itd. Za prevodjenje ovih normativa u jed.mere/t, koristi se izraz:

$$N_m = N'_m \cdot K_{pi}, \text{ jed.mere/t}$$

$$(\text{jed.mere/m x m/t} = \text{jed.mere/t}), \quad (8)$$

U formuli su:

N_m - normativ materijala po toni dobijene mineralne sirovine,

N'_m - normativ materijala po metru izradjene prostorije.

Na isti način se i troškovi izrade pripremnih prostorija mogu prevesti na jednu tonu dobijene mineralne sirovine po formuli:

$$T_{ip} = T'_{ip} \cdot K_{pi}, \text{ din/t, (US$/t),} \quad (9)$$

$$(\text{din/m x m/t} = \text{din/t}),$$

T'_{ip} - troškovi izrade prostorije u din/m, (US\$/m)

T_{ip} - troškovi izrade prostorije u din/t, (US\$/t).

I ostali pokazatelji značajno utiču na određivanje troškova podzemne eksploatacije primenom odgovarajućih metoda otkopavanja. Osnovni zahtev je da, pri izboru optimalnih parametara metoda otkopavanja, pokazatelji imaju najpovoljnije vrednosti. Proizvodnost metode, intezitet otkopavanja, iskorišćenje rude, učinci na otkopavanju treba da imaju što veće vrednosti, a gubici rude i osiromašenje minimalne vrednosti.

2.2. Odredjivanje vrednosti rude i ekonomičnosti proizvodnje mineralne sirovine

Utvrđivanje cene koštanja i prodajne cene, odnosno uklapanje cene u limitirane prodajne cene na domaćem tržištu, predstavlja samo jedan vid pristupa ovoj problematici. Za slučaj kada se radi o proizvodnji mineralne sirovine ili konačnog proizvoda (metala na primer), čije su cene uslovljene cenama na svetskom tržištu, ekonomika

poslovanja rudnika suočava se sa znatno više rizika. Veće variranje ovih cena, naročito kada se radi o većem padu cena na svetskom tržištu, može lako dovesti rudnik u situaciju da ne može ekonomično poslovati, kada se javlja dilema da li privremeno obustaviti proizvodnju ili je nastaviti sa negativnim ekonomskim efektima poslovanja. Konzerviranje ili zatvaranje rudnika nije nimalo jednostavan postupak, pa se moraju tražiti druga rešenja (značajno redukovanje proizvodnje, poslovanje sa minimalnim troškovima rada, izvesno prestrukturiranje ili obezbedjenje sredstava od države, koja treba da omogući rudniku da prebrodi teškoće u periodu niskih cena na tržištu).

Sušтина ekonomičnog poslovanja u ovakvim prilikama može se jednostavno izraziti na sledeći način:

$$T_u \leq V_r, \text{ din/t, (US$/t),} \quad (10)$$

što znači da ukupni troškovi, T_u , svedeni na 1 t rude, treba da budu manji od ukupne vrednosti 1 t rude. Problematika određivanja cene koštanja i utvrđivanje oblasti ekonomičnog poslovanja razmotriće se na primeru eksploatacije rude bakra u Boru.

Vrednost rude definiše se ukupnom vrednošću korisnih komponenti u njoj, pri čemu se uzimaju samo one komponente koje se mogu valorizovati. Tako na primer, ruda u rudnom telu „Borska reka“, osim minerala bakra i plemenitih metala (zlata i srebra), sadrži još i manje količine magnetita i molibdena, ali se one obično ne uzimaju u obzir jer prema sadašnjem nivou tehnologije nije utvrđena mogućnost njihove valorizacije na ekonomičan način.

U opštem slučaju vrednost rude se može definisati sledećim izrazom:

$$V_r = \frac{m_r}{m_m} \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m, \quad \text{din/t (US$/t),} \quad (11)$$

gde su:

m_r - sadržaj metala u rudi, %,

m_m - sadržaj metala u konačnom produktu, %,

K_{im} - koeficijent iskorišćenja metala u procesu otkopavanja, koji je jednak

$$K_{im} = 1 - K_{om}$$

K_{om} - koeficijent osiromašenja metala,

K_f - koeficijent iskoršćenja metala u procesu flotacijske prerade,

K_m - koeficijent iskorišćenja metala pri metalurškoj preradi,

C_m - cena metala na domaćem ili svetskom tržištu, din/t ili US\$/t.

Izraz m_r/m_m koristi se u slučajevima kada je finalni proizvod (metal ili dr.) manje čistoće od 100 %, U slučaju prerade bakra, njegova čistoća je 99,9 % pa se uzima kao 100 %, te prethodna formula ima sledeći oblik [1]:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (12)$$

Kada se radi o eksploataciji kompleksnih ruda, njihova vrednost se izračunava iz sume vrednosti pojedinih komponenti, tj.:

$$V_r = 0,01 \cdot \sum m_i \cdot K_{im,i} \cdot K_{f,i} \cdot K_{m,i} \cdot C_{m,i}, \quad \text{din/t, (US$/t)} \quad (13)$$

U formuli su pojedine oznake adekvatne prethodnim, samo se odnose na pojedine korisne komponente u rudi.

Za rudu rudnog tela „Borska reka“ u Borskom ležištu računata je vrednost rude s obzirom na ukupnu valorizaciju svih korisnih komponenti: bakra, plemenitih metala, sumpora, magnetita i molibdena. Za to se može koristiti sledeća formula:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot (1 - K_{om}) \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m + V_{pm} + V_{FeS_2} + V_{Fe_3O_4} + V_{Mo}, \quad \text{din/t, (US$/t),} \quad (14)$$

gde su:

V_{pm} - vrednost plemenitih metala u 1 t rude, din/t, (US\$/t),

V_{FeS_2} - vrednost sumpora izražena preko sadržaja pirita, din/t, (US\$/t),

$V_{Fe_3O_4}$ - vrednost koncentrata magnetita, koja se odnosi na 1 t rude, din/t, (US\$/t),

V_{Mo} - vrednost koncentrata molibdena, koja se odnosi na 1 t rude, din/t, (US\$/t)

Vrednosti pojedinih komponenti izračunavaju se na osnovu njihovog sadržaja u rudi, koeficijena eksploatacionog, flota-

cijskog i metalurškog iskorišćenja metala i cena metala na svetskom tržištu. Vrednost plemenitih metala iznosi.

$$V_{pm} = V_{Au} + V_{Ag}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (15)$$

$$V_{Au} = 0,001 \cdot m_{Au} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Au} \cdot K_{m,Au} \cdot C_{Au}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (16)$$

$$V_{Ag} = 0,001 \cdot m_{Ag} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Ag} \cdot K_{m,Ag} \cdot C_{Ag}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (17)$$

U formulama su:

m_{Au} , m_{Ag} - sadržaji zlata i srebra u rudi, g/t,

$K_{f,Au}$, $K_{f,Ag}$ - koeficijenti flotacijskog iskorišćenja zlata i srebra

$K_{m,Au}$, $K_{m,Ag}$ - koeficijenti metalurškog iskorišćenja zlata i srebra,

C_{Au} , C_{Ag} - cene zlata i srebra na svetskom tržištu, din/kg, (US\$/kg).

Pri proračunima vrednosti treba obratiti posebnu pažnju na korišćene jedinice. Pošto se sadržaj plemenitih metala daje u g/t, faktorom 0,001 se ovaj sadržaj prevodi u kilograme, u kojima se obično izražava cena plemenitih metala, (US\$/kg).

Vrednosti koncentrata magnetita i molibdena se izračunavaju bez metalurških iskorišćenja, jer se računa sa plasmanom koncentrata, tj. njegovom prodajom drugim preradivačima.

$$V_{Fe_3O_4} = \frac{m_{Fe_3O_4} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Fe_3O_4}}{m_{k,Fe_3O_4}} \cdot C_{k,Fe_3O_4}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (18)$$

$$V_{Mo} = \frac{m_{Mo} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Mo}}{m_{k,Mo}} \cdot C_{k,Mo}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (18a)$$

U formulama su:

$m_{Fe_3O_4}$, ..., m_{Mo} - sadržaji magnetita i molibdena u rudi, %

m_{k,Fe_3O_4} , ..., $m_{k,Mo}$ - sadržaji koncentrata magnetita i molibdena, %

K_{f,Fe_3O_4} , ..., $K_{f,Mo}$ - koeficijenti flotacijskog iskorišćenja magnetita i molibdena,

C_{k,Fe_3O_4} , ..., $C_{k,Mo}$ - cena koštanja 1t koncentrata magnetita i molibdena, din/t, (US\$/t).

Prethodne formule izvedene su na sledeći način:

- vrednost metala u rudi je:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_m, \text{ din/t, (US$/t)},$$

- da bi se izračunala vrednost prema ceni 1 t koncentrata, određuje se njegova vrednost, koja iznosi:

$$V_k = 0,01 \cdot m_k \cdot K_m \cdot C_m = C_k, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (19)$$

- iz ovog izraza dobija se vrednost (cena) metala u odnosu na cenu koncentrata:

$$C_m = \frac{C_k}{0,01 \cdot m_k \cdot K_m}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (20)$$

Zamenom u izraz za vrednost rude (prema konkretnoj vrsti metala) dobija se:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot \frac{C_k}{0,01 \cdot m_k \cdot K_m} = \frac{m_r \cdot K_{im} \cdot K_f}{m_k} \cdot C_k, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (21)$$

U većem broju radova [3], [4], [5] i drugima, vrednost rude bakra računata je uzimanjem u obzir samo vrednosti bakra i plemenitih metala, čija je valorizacija izvesna. Ona se u principu može računati na tri načina.

Prvi način je već prikazan napred, a sastoji se u posebnom (parcijalnom) proračunu vrednosti pojedinih komponenti, tj.:

$$V_r = V_{Cu} + V_{Au} + V_{Ag}, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (22)$$

$$V_{Cu} = 0,01 \cdot m_{Cu} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Cu} \cdot K_{m,Cu} \cdot C_{Cu}, \text{ din/t, (US$/t)}$$

$$V_{Au} = 0,001 \cdot m_{Au} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Au} \cdot K_{m,Au} \cdot C_{Au}, \text{ din/t, (US$/t)}$$

$$V_{Ag} = 0,001 \cdot m_{Ag} \cdot K_{im} \cdot K_{f,Ag} \cdot K_{m,Ag} \cdot C_{Ag}, \text{ din/t, (US$/t)}$$

Drugi način je preko izračunavanja ekvivalentnog sadržaja bakra, a to je onaj uvećani sadržaj bakra u rudi, koji svojom vrednošću obuhvata i vrednost plemenitih metala. Proračun ekvivalentnog sadržaja daje se na primeru rudnog tela "Borska reka", a usvaja se izražavanje vrednosti u US\$/t. Sadržaj bakra u rudi je prosečno 0,763 %, a

zlata 0,315 g/t, a srebra 1,67 g/t [6] Cene metala su: bakra 4.500,00 US\$/t, zlata 34.350 US\$/kg, srebra 450 US\$/kg

Tabela 1. Vrednosti pokazatelja koeficijena iskorišćenja

Pokazatelj	Bakar	Zlato	Srebro
Koef. iskorišćenja metala, K_{im}	0,90	0,90	0,90
Koef. flotacijskog iskoriš. , K_f	0,86	0,40	0,50
Koef. metalurškog iskor. , K_m	0,97	0,92	0,89

Vrednost bakra:

$$V_{Cu} = 0,01 \times 0,763 \times 0,9 \times 0,86 \times 0,97 \times 4.500,00 = 25,778 \text{ US$/t}$$

Vrednost zlata:

$$V_{Au} = 0,001 \times 0,315 \times 0,9 \times 0,4 \times 0,92 \times 34.350,00 = 3,584 \text{ US$/t}$$

Vrednost srebra:

$$V_{Ag} = 0,001 \times 1,67 \times 0,9 \times 0,5 \times 0,89 \times 450 = 0,301 \text{ US$/t}$$

Ukupna vrednost metala u 1 t rude je 29,663 US\$/t

Ekvivalentni sadržaj bakra u rudi, koji odgovara ukupnoj vrednosti metala, određuje se iz sledećeg izraza:

$$m_{ekv.} = \frac{\sum V_m}{0,01 \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot C_{Cu}} = \frac{29,663}{0,01 \times 0,9 \times 0,86 \times 0,97 \times 4.500,00} = 0,878 \% \text{ Cu.}$$

Kao što se vidi, sadržaj plemenitih metala utiče na povećanje ekvivalentnog sadržaja bakra od vrednosti 0,763 % Cu na vrednost 0,878 % Cu, odnosno za 0,115 % Cu. Međutim, bez obzira na relativno malu veličinu, povećanje vrednosti rude je za 3,882 US\$/t ili za 15,06 %, čime se može pokriti izvođenje većeg broja procesa pri eksploataciji rude.

Treća mogućnost, koja je korišćena u više radova [5], bazira se na koeficijentu učešća plemenitih metala, koji se izračunava po sličnom postupku. U tom slučaju, se ukupna vrednost rude može izraziti formulom:

$$V_r = 0,01 \cdot m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m \cdot K_{pm} \cdot C_m, \text{ din/t, (US$/t)} \quad (23)$$

U uzetom primeru, deo izraza bez koeficijenta plemenitih metala, daje vrednost

[7]. Vrednost rude kao suma vrednosti pojedinih metala izračunava se na bazi usvojenih sledećih pokazatelja:

bakra u rudi (V_{Cu}), a ukupni izraz (sa koeficijentom K_{pm}) daje ukupnu vrednost rude. Prema tome, može se napisati da je:

$$V_r = V_{Cu} \cdot K_{pm}, \text{ odakle je}$$

$$K_{pm} = \frac{V_r}{V_{Cu}} \quad (24)$$

Za uzeti primer, vrednost ovog koeficijenta iznosi:

$$K_{pm} = \frac{29,663}{25,778} = 1,151$$

2.3. Odredjivanje vrednosti rude za rudarenje

Vrednost rude za rudarenje je ekonomska kategorija uvedena sa ciljem da označi onu vrednost rude, koja pripada rudarima, odnosno koja treba da opravda učinjene troškove na dobijanju rude. S obzirom da ukupna vrednost rude treba da pokrije troškove eksploatacije (dobijanja), flotacijske i metalurške prerade, to se može napisati da je potreban uslov za ekonomičnu eksploataciju:

$$V_r \geq T_d + T_f + T_m, \text{ din/t, (US$/t)}, \quad (25)$$

gde su:

T_d - ukupni troškovi dobijanja (rudarske eksploatacije) rude, din/t, (US\$/t),

T_f - troškovi flotacijske prerade, svedeni na 1 t rude, din/t, (US\$/t),

T_m - troškovi metalurške prerade, svedeni na 1 t rude, din/t, (US\$/t).

Da bi se odredili ovi troškovi, potrebno je znati koja je količina rude potrebna za dobijanje 1 t koncentrata ili 1 t metala. Količina rude potrebna za dobijanje 1 t koncentrata, iznosi:

$$Q_r^k = \frac{m_k}{m_r \cdot K_{im} \cdot K_f}, t_r / t_k, \quad (26)$$

a za dobijanje 1 t metala potrebno je dobiti sledeću količinu rude:

$$Q_r^m = \frac{m_m}{m_r \cdot K_{im} \cdot K_f \cdot K_m}, t_r/t_m, \quad (27)$$

Za dobijanje 1 t metala potrebna je sledeća količina koncentrata:

$$Q_k = \frac{m_m}{m_k \cdot K_m}, t_k/t_m \quad (28)$$

Za slučaj eksploatacije rude bakra, a za usvojeni sadržaj koncentrata $m_k = 20\%$ Cu, izračunavanjem se dobijaju sledeće količine:

- količina rude za 1 t koncentrata:

$$Q_r^k = \frac{20,0}{0,763 \times 0,9 \times 0,86} = 33,87, t_r/t_k,$$

- količina rude za 1 t metala

$$Q_r^m = \frac{99,9}{0,763 \times 0,9 \times 0,86 \times 0,97} = 174,39, t_r/t_m,$$

- količina koncentrata za 1 t metala:

$$Q_k = \frac{99,9}{20 \times 0,97} = 5,15, t_k/t_m.$$

Primenom ovih formula, i izračunatih vrednosti, mogu se dobiti troškovi flotiranja, ako su poznati troškovi dobijanja 1 t koncentrata, kao i troškovi metalurške prerade, ako se znaju troškovi topljenja i rafinacije 1 t bakra. U usvojenom primeru ovi troškovi iznose:

- troškovi flotacijske prerade:

$$T_f = \frac{T_k}{Q_r^k} = \frac{120}{33,87} = 3,54, \text{ US$/t rude,}$$

- troškovi metalurške prerade:

$$T_m = \frac{T_r}{Q_r^m} = \frac{600}{174,39} = 3,44, \text{ US$/t rude.}$$

Ako se znaju troškovi flotacijske i metalurške prerade svedeni na 1 t rude, tada se može odrediti i vrednost rude za rudarenje, koja iznosi:

$$V_{rr} = V_r - (T_f + T_m), \text{ din/t, (US$/t)} \quad (29)$$

Prema napred datom izrazu, odnosno pri njegovoj graničnoj vrednosti $V_r = T_d + T_f + T_m$, proizilazi da je $V_{rr} = T_d$, mada bi trebalo da bude zadovoljen uslov da je:

$$V_{rr} > T_d \quad (30)$$

jer samo taj uslov obezbeđuje ekonomično otkopavanje ležišta menaralne sirovine.

Za uzeti primer proračuna, vrednost rude za rudarenje iznosi:

$$\begin{aligned} V_{rr} &= 29,663 - (3,54 + 3,44) = \\ &= 29,663 - 6,98 = 22,683 \text{ US \$/t} \end{aligned}$$

3. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Dobijeni rezultati proračuna ukazuju da u uslovima cena bakra i plemenitih metala na svetskom tržištu, na dan ocene i to: bakra 4.500,00 US\$/t, zlata 34.350 US\$/kg, srebra 450 US\$/kg [7], postoji realna mogućnost da se ostvari ekonomski opravdana podzemna eksploatacija rude bakra. To podrazumeva da troškovi podzemne eksploatacije - dobijanja imaju minimalnu vrednost koja treba da se kreće oko 10 US\$/t, troškovi flotacijske pripreme do 4 US\$/t i troškovi metalurške prerade manje od 4 US\$/t. Pošto je pri sadržaju rude bakra od 0,763 % Cu vrednost bakra u rudi 25,778 US\$/t, a pri ekvivalentnom sadržaju bakra od 0,878 US\$/t ukupna vrednost metala u rudi 29,663 US\$/t bila bi značajno veća od ukupnih troškova eksploatacije i mogla bi da omogući i pozitivne efekte eksploatacije.

Očigledno je da dominantnu ulogu na ekonomske efekte poslovanja ima cena bakra, zlata i srebra. Analizirajući period od poslednjih 15 godina beleže se značajne promene cena obojenih i plemenitih metala. Bakar je imao cenu i ispod 1.800 US\$/t pa do blizu 10.000 US\$/t. U ranijem periodu [5] vršene su ekonomske analize koje su bile bazirane na cenama metala od 2.400 US\$/t, kakve su i bile na početku poslednje decenije prošlog veka. Detaljna analiza ukazuje da je neophodno sagledati kakve su promene vrednosti rude i vrednosti rude za rudarenje, pri promenljivim cenama bakra i sadržajima metala u rudi. Zaključak je da troškovi podzemne eksploatacije ne mogu biti ispod 7 – 8 US\$/t, a da su troškovi troškove flotacijske i metalurške prerade mnogo veći od prosečno planiranih. To zahteva da se eksploatacija obavlja unutar konture rudnog tela sa višim sadržajem metala (0,5 %), u kojoj je prosečni sadržaj metala u rudi 0,8 % (sl. 2.)

Sl. 2. Grafik funkcionalne zavisnosti promene sadržaja metala u rudi od cena bakra na svetskom tržištu, a za različite troškove dobijanja (5 – 10 US\$/t)

4. ZAKLJUČAK

Pri analizi objektivne mogućnosti ekonomske eksploatacije rude bakra najveći uticaj imaju vrednost rude i plementih metala koji zavise od sadržaja korisnih komponenti i od njihovih cena na svetskom tržištu i troškovi podzemne eksploatacije, flotacijske pripreme i metalurške prerade. U ovom radu proračuni su urađeni za rudno telo „Borska reka“ iznad XIX horizonta, preostale rude u rudnim telima „Tilva Roš“ i „P₂A“, „T3“ i „D“. Prema podacima koji su preuzeti iz tehničke dokumentacije RBB-a i to: srednji sadržaji bakra Cu = 0,763 %, zlata Au = 0,315 g/t, i srebra Ag = 1,67 g/t, i cena (na dan ocene) bakra 4.500 US \$/t, zlata 34 350 US \$/kg i srebra 450 US \$/kg, dobija se vrednost bakra u rudi 25,778 US \$/t. Ekvivalentni sadržaj bakra u rudi koji odgovara ukupnoj vrednosti metala $m_{ekv.} = 0,878 \%$ povećava vrednost bakra tako da je ukupna vrednost metala u 1 t rude 29,663 US \$/t.

Ovako dobijena vrednost rude može omogućiti ekonomsku opravdanost podzemne eksploatacije pod uslovom da su troškovi dobijanja 10 US \$/t, troškovi flotacijske pripreme do 4 US \$/t i troškovi metalurške prerade manje od 4 US \$/t.

Međutim, ostvareni troškovi u praksi su mnogo veći zbog razuđenosti rudnih tela koja se sada otkopavaju i pre svega male godišnje proizvodnje u Jami od samo 700.000 t. Troškovi flotacijske pripreme, takođe, nadmašuju vrednosti troškova zbog zastarelosti opreme. Višestrukim povećanjem godišnjeg kapaciteta,

značajno se smanjuju jedinični troškovi, svedeni na tonu dobijene rudne mase, a samim tim i ukupni troškovi. To je i osnovni zahtev za buduću podzemnu eksploataciju u Jami Bor.

LITERATURA

- [1] Ž. Milićević, R. Nikolić, Osnove projektovanja rudnika. Univerzitetski udžbenik. Bor, 2003. godine
- [2] V. Milić, Ž. Milićević, Osnovi eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Osnovi univerzitetski udžbenik. Bor, 2005.
- [3] Ž. Milićević, Valorizacija siromašnih ruda bakra zavisi i od određivanja realne vrednosti rude. 23. Oktobarsko savetovanje rudara i metalurga, D. Milanovac 1991. s. 457.
- [4] Ž. Milićević, D. Stanujkić, V. Milić, Optimizacija parametara metode podetažnog zarušavanja. II Medjunarodni simpozijum Primena matematičkih metoda i računara u geologiji, rudarstvu i metalurgiji“. Beograd 1991. s.457.
- [5] Ž. Milićević, Objektivne mogućnosti rudarenja u rudnicima bakra RTB – Bor. 33. Oktobarsko savetovanje rudara i metalurga, Bor 2001. s. 1.
- [6] Tehnička dokumentacija RBB, pogon Jama Bor. Godišnji operativni plan. Bor, 2014.
- [7] <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/> 2015. godine