

UDK: 622.271/.3(045)=163.41
DOI: 10.5937/bakar2501001R
NAUČNI RAD
Oblast: Rudarstvo

Primljen: 20.03.2025.
Prerađen: 27.03.2025.
Prihvaćen: 28.03.2025.

**ANALIZA STABILNOSTI ZAVRŠNIH KOSINA NA POVRŠINSKOM
KOPU SEVERNI REVIR RUDNIKA BAKRA MAJDANPEK**

**ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE FINISHING SLOPES AT
THE SURFACE MINING SEVERNI REVIR OF
THE MAJDANPEK COPPER MINE**

Radmilo Rajković^{1a}, Daniel Kržanović^{1b},
Miomir Mikić^{1c}, Milenko Jovanović^{1d}

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Alberta Ajnštajna 1, 19210 Bor

^{1a} E-mail: radmilo.rajkovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5905-6613>

^{1b} E-mail: daniel.krzanovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3841-8667>

^{1c} E-mail: miomir.mikic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7659-769X>

^{1d} E-mail: milenko.jovanovic@irmbor.co.rs, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6757-4143>

Izvod

Geometrijski elementi za konstrukciju površinskog kopa Severni revir Rudnika bakra Majdanpek usvojeni su na osnovu inženjersko-geoloških karakteristika radne sredine, uzimajući u obzir primenjenu tehnologiju rada i usvojenu mehanizaciju, kao i na osnovu dosadašnjih iskustva u radu. U ovom radu su prikazani rezultati geotehničkih ispitivanja radne sredine, i rezultati proračuna njihove stabilnosti saglasno važećoj zakonskoj regulativi.

Ključne reči: površinski kop Severni revir, inženjersko-geološka istraživanja, proračun stabilnosti

Abstract

Geometrical elements for the construction of the open pit Severni revir of the Majdanpek copper mine were adopted based on the engineering-geological characteristics of the working environment, taking into account the applied work technology and the adopted mechanization, as well as based on previous work experience. This paper presents the results of geotechnical tests of the working environment, as well as the results of their stability calculations in accordance with current legislation.

Keywords: surface mine Severni revir, engineering-geological research, stability calculation

1. UVOD

Dugoročno projektovanje razvoja površinskog kopa Severni revir je bazirano na važećem *Elaboratu o rezervama ležišta bakra „Severni revir“ i ležišta polimetalične mineralne sirovine (Zn-Pb-Cu) „Tenka – Severni revir“ kod Majdanpeka, stanje 30.06.2011*, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2011. Optimizacija i izbor završne konture površinskog kopa, planiranje i projektovanje faznog razvoja radova je izvršena primenom *Gemcom GemsTM* i

WhittleTM softvera, koji u savremenom rudarstvu predstavljaju standard za strateško planiranje i projektovanje površinskih kopova. Optimizacija je izvršena na osnovu blok modela ležišta i tehno-ekonomskih parametara proizvodnje. Na osnovu projektovane završne konture površinskog kopa Severni revir sračunate su eksploatacione rezerve rude i pripadajuće količine jalovine, kao i sadržaji i količine bakra, zlata i srebra u rudi.

U geološkoj građi ležišta Severni revir učestvuju: kristalasti škriljci, stene facije zelenih škriljaca, kvarcne žice, gnajs-graniti, konglomerati i peščari (lijasa i dogera), krečnjaci (titon-valendina), mermeri, senonski fliš, vulkaniti gornje krede, skarnovi i skarnoidi, tektonske breče i laramijski plutoniti. Teren površinskog kopa Severni revir je u više navrata tokom njegovog formiranja bio predmet uglavnom geomehaničkih istraživanja. Istraživanja su vršena 1980-1981. godine, 1997. i 2000. godine.

Dostupni podaci geotehničkih istraživanja i ispitivanja su bili ograničenog obima i starijeg datuma, i nisu sistematizovani za sve inženjerskogeološke sredine koje se javljaju na istražnom prostoru, tako da su pružali samo okvirnu sliku o problematici sadašnjeg stanja kopa.

2. INŽENJERSKO-GEOLOŠKA ISTRAŽIVANJA

Godine 2021. urađen je *Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor.

Obim i vrsta izvedenih geoloških, inženjersko-geoloških i hidro-geoloških radova definisani su na osnovu *Projekta detaljnih inženjerskogeoloških i hidrogeoloških istraživanja stabilnosti kosina na površinskim kopovima rudnika bakra Majdanpek*, Georing group d.o.o iz Beograda. Na osnovu tog dokumenta, u periodu 2019-2020. godina, izvedeno je ukupno 20 istražnih bušotina, izvršeni su prateći terenski istražni radovi, osmatranja i uzet optimalan broj uzoraka za laboratorijska geomehanička ispitivanja. Nakon završetka celokupnih istraživanja i ispitivanja, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor je 2021. godine izradio *Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*.

Nakon terenskih i laboratorijskih ispitivanja, u prikazu rezultata istraživanja, dati su: Geomorfološke i hidrološke karakteristike terena; Geološke karakteristike terena; Tektonske karakteristike terena; Seizmičnost terena; Hidrogeološke karakteristike i analiza ispitivanog područja.

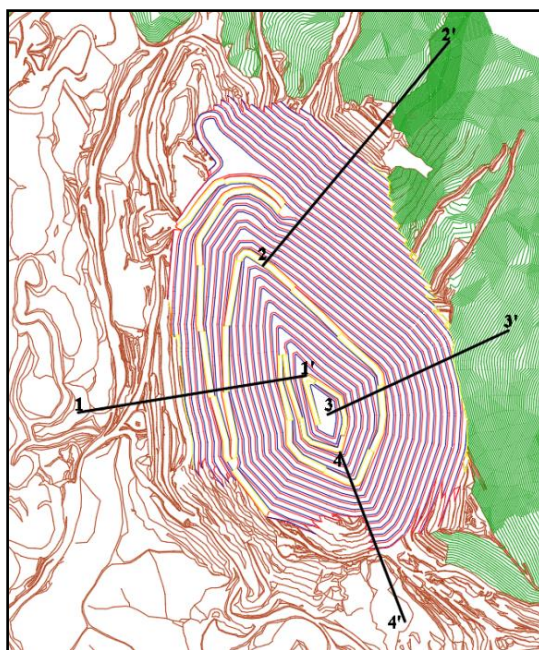
Definisani su inženjerskogeološka svojstva terena: Inženjerskogeološke jedinice; Egzodinamički procesi; Inženjersko geološke karakteristike terena na četiri istražnih preseka; Kategorizacija terena prema stepenu stabilnosti.

Na svakom od četiri profila definisani su parametri inženjerskogeoloških sredina:

GSI - Geological Strenght Index proračunat na osnovu statističke obrade vrednosti RMR89 klasifikacije stenske mase za svaku izdvojenu zonu na osnovu rezultata geotehničkog kartiranja, korišćenjem formule $GSI = RMR89 - 5$ [1-3];

- σ_p - Intaktna pritisna čvrstoća monolita σ_p , dobijena na osnovu rezultata statističke obrade laboratorijskih ispitivanja jednoaksijalne pritisne čvrstoće, korišćenjem rezultata Point load testa i procenjene čvrstoće stene pri geotehničkom kartiranju [4,5];
- m_i - materijalna konstanta bazirana na litološkom sastavu stene. Korišćene su literaturne vrednosti na bazi petrološke determinacije i strukturnih i teksturnih karakteristika stenske mase korićenjem baze programa RocData (Marinos i Hoek, 2001);
- E, ν - Modul elastičnosti i Poisson-ov koeficijent (parametri deformabilnosti stene dobijeni statističkom obradom laboratorijskih podataka) [6,7];
- D - faktor oštećenosti stenske mase usled eksploatacije. Kreće se u intervalu od 0-1 u zavisnosti od oštećenosti stenske mase.

Položaj inženjerskogeoloških profila prikazan je na slici 1 a fizičko mehanički parametri radne sredine za svaki profil u tabelama 1 – 4.



Sl. 1. Položaj inženjersko-geoloških profila

Tabela 1. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 1-1'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
σ_1	Granatodni gnajzovi	25,76	29,21	27,19	1,12	11	79	37	13	7,45	65,94	40,62	17,08	2218	22113	13093	5797	0,23	0,29	0,26	0,02	30	0,3
Gibum	Gnajzovi-biotitski, amfibolitski, muskovitski	26,35	28,61	27,24	0,70	10	71	38	14	2,76	62,51	29,00	18,55	808	22661	9848	6789	0,23	0,29	0,26	0,02	26	0,3

Tabela 2. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 2-2'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
β_1	Mauvri i bankovni krečnjaci	26,4	27,25	26,65	0,26	14	82	49	17	23,81	80,05	46,35	15,40	14680	47780	27838	8999	0,22	0,24	0,23	0,01	15	0,3

Tabela 3. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 3-3'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
β_1	Mauvri i bankovni krečnjaci	26,4	27,2	26,65	0,26			15		23,81	80,05	46,35	15,40	14680	47780	27838	8999	0,22	0,24	0,23	0,01	12	0,4
Gibum	Gnajzovi-biotitski, amfibolitski, muskovitski	25,9	29,2	27,0	0,9	11	67	27	7	12,61	56	38,81	13,79	4033	21390	13944	5547	0,24	0,28	0,26	0,01	26	0,3
Sco se	Škriljci zelene facije			27,5				37				20,2				7761				0,26		12	-

Tabela 4. Geomehanički parametri stenskih masa za profil 4-4'

Inženjerskogeološka (litološka) sredina		Zapreminska težina γ_s [kN/m ³]				GSI				σ_p [MPa]				E [MPa]				ν				mi	D
		Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD	Min.	Max.	Sred. vred. (proračunska)	Standard. dev. SD		
α	Andeziti i tektonske breče			26,03				23				24,5				9740				0,21		20	0,3
β_1	Mauvri i bankovni krečnjaci	26,45	31,7	27,04	2,32	15	82	41	19	26,31	66,44	44,07	14,35	8775	44117	23974	12940	0,2	0,37	0,30	0,06	15	0,3
Gibum	Gnajzovi-biotitski, amfibolitski, muskovitski	24,54	27,4	26,52	1,02	8	79	32	17	6,95	55,14	35,74	15,51	2778	23405	14820	6827	0,25	0,29	0,27	0,01	26	0,3

3. IZBOR RAČUNSKIH PARAMETARA

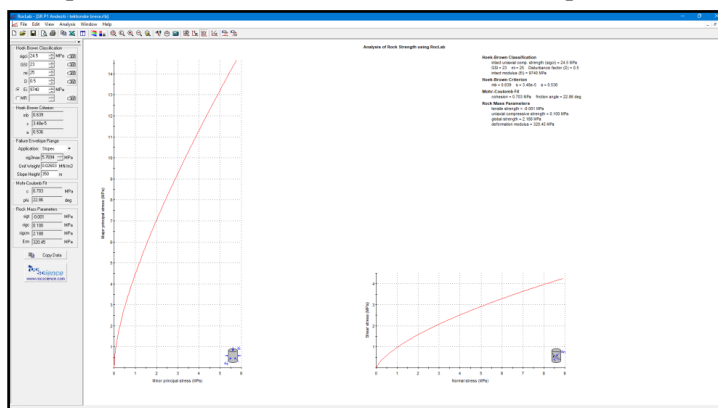
Računski parametri za proračun stabilnosti na geotehničkim profilima određeni su programom RocLab v1.033 firme Rocscience, na osnovu podataka definisanih u *Izveštaju o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*.

Na osnovu literature koja obrađuje ovu tematiku preporuka je da, pri analizi stabilnosti kosina površinskih kopova na kojima se vrše masovna miniranja, vrednost parametra D bude u granicama 0,5 – 1,0 [1,2]. Vrednosti

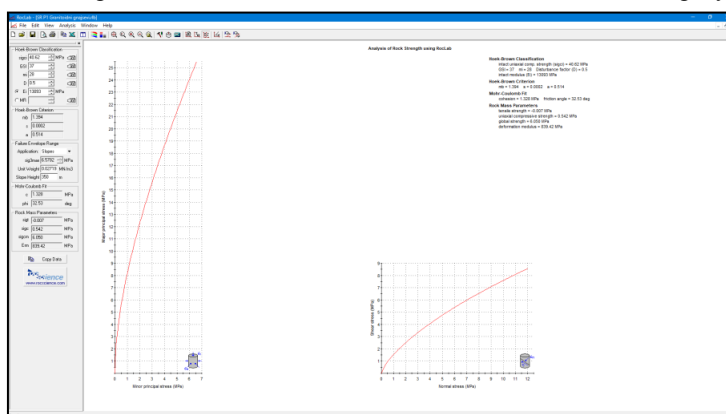
faktora oštećenja stenske mase D i materijalne konstante m_i u *Izveštaju o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, potcjenjene su u odnosu na preporučene vrednosti koje su date u literaturi iz ove oblasti.

Za proračun stabilnosti nisu usvojene vrednosti parametra $D = 0,3$ iz *Izveštaja o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, već je usvojena vrednost parametra $D = 0,5$ koja je u opsegu preporuka [1,2]. Takođe nije usvojena vrednost parametra m_i iz *Izveštaja o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*, već je usvojena srednja vrednost parametra m_i na osnovu literaturnih preporuka [1].

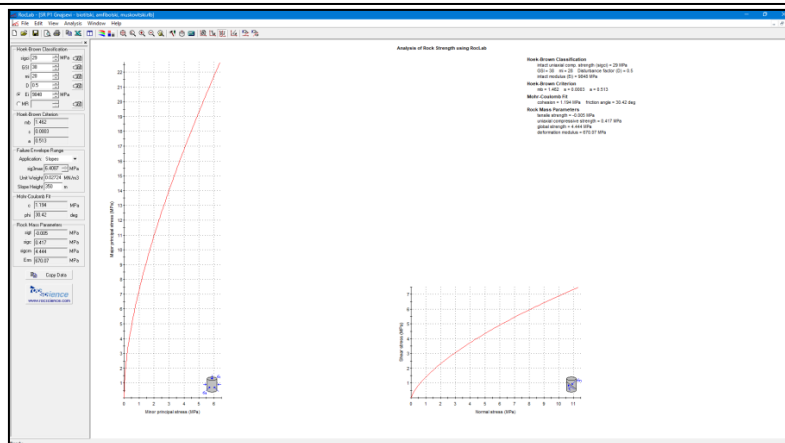
Određivanje računskih parametara za proračun stabilnosti na profilu 1 – 1' prikazano je na slikama 2 – 4. U tabeli 5 prikazane su vrednosti računskih parametara za proračun stabilnosti za sve radne sredine i profile.



Sl. 2. Računski parametri za radnu sredinu andeziti i tektonske breče, profil 1 – 1'



Sl. 3. Računski parametri za radnu sredinu granitoidni gnajsevi, profil 1 – 1'



Sl. 4. Računski parametri za radnu sredinu gnajsevi – biotitski, amfibolski, muskovitski, profil 1 – 1'

Tabela 5. Vrednosti računskih parametara za proračun stabilnosti površinskog kopa

Profil	Radna sredina	γ , kN/m ³	UCS, kPa	m_b	s	r_u
1-1'	Granitoidni gnajsevi	27,19	40.620	1,39404	0,000224867	0,2
1-1'	Gnajsevi - biotitski, amfibolski, muskovitski	27,24	29.000	1,46203	0,000256940	0,2
1-1'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2
2-2'	Masivni i bankoviti krečnjaci	26,65	46.350	1,32244	0,001113780	0,1
2-2'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2
3-3'	Škriljci zelene facije	27,50	20.200	0,59745	0,000224867	0,2
3-3'	Gnajsevi - biotitski, amfibolski, muskovitski	27,00	38.810	0,86590	0,000059274	0,2
3-3'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2
4-4'	Gnajsevi - biotitski, amfibolski, muskovitski	26,52	35.740	1,09868	0,000115451	0,2
4-4'	Masivni i bankoviti krečnjaci	27,04	44.070	0,90351	0,000383310	0,1
4-4'	Andeziti i tekonske breče	26,03	24.500	0,63904	0,000034773	0,2

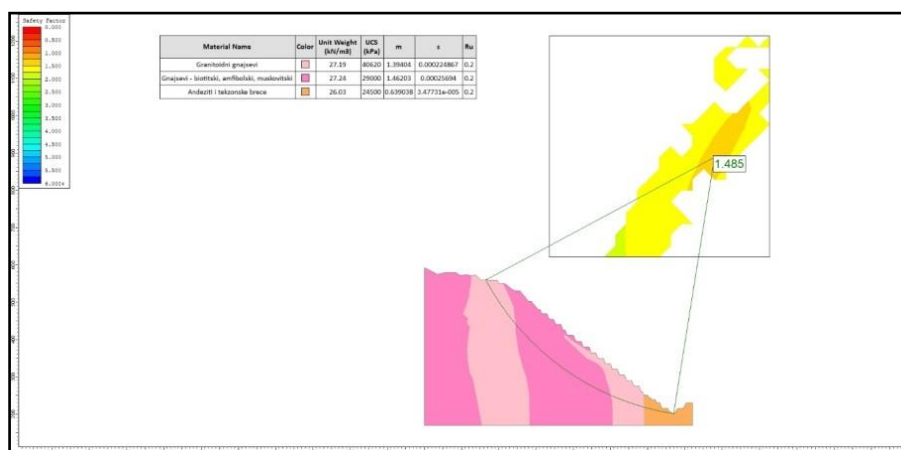
4. PRORAČUN STABILNOSTI ZAVRŠNIH KOSINA POVRŠINSKOG KOPA

Analiza stabilnosti završnih kosina kopa, urađena je na geotehničkim profilima 1-1' – 4-4' koji su definisani u dokumentu: *Izveštaj o inženjerskogeološkim istraživanjima na površinskom kopu Severni revir u Majdanpeku*. Položaj geotehničkih profila prikazan je na slici 1. Geometrija kosina na profilima prikazana je u tabeli 6.

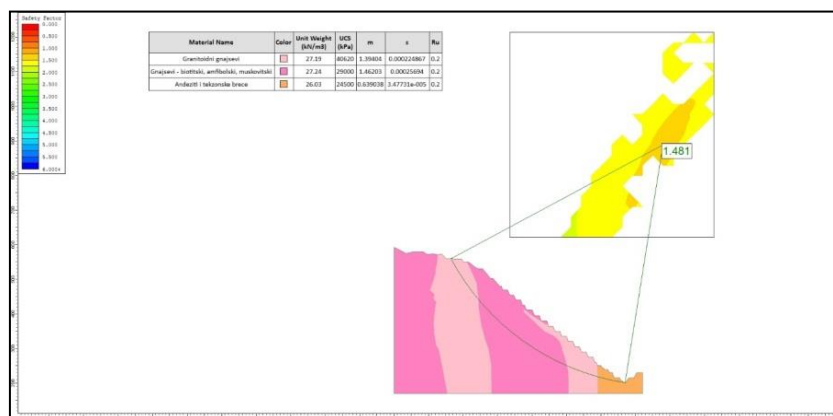
Tabela 6. Geometrija kosina na analiznim profilima

Profil	Visina kosine, m	Nagib kosine, °
1 – 1'	350	38
2 – 2'	475	38
3 – 3'	300	39
4 – 4'	260	35

Proračun stabilnosti je izvršen pomoću softverskog paketa *Rocscience*, odnosno njegovim alatom *Slide* koji se bazira na uslovima granične ravnoteže [8-15]. Proračuni su sprovedeni metodama *Bishop* i *Morgenstern-Price* za proizvoljne klizne površine. Program omogućava automatsko traženje kritične klizne ravni sa minimalnim faktorom sigurnosti. Izlazni interfejs programa *Slide* za proračun stabilnosti na profilu 1 – 1' prikazan je na slikama 5 i 6. U rezultatu proračuna prikazana je klizna površina sa najmanjim koeficijentom stabilnosti. Sve ostale klizne ravni imaju veći koeficijent stabilnosti od prikazane.



Sl. 5. Proračun stabilnosti za profil 1 – 1' po metodi Bishop



Sl. 6. Proračun stabilnosti za profil 1 – 1' po metodi Morgenstern-Price

Zbirni pregled rezultata proračuna stabilnosti završnih kosina površinskog kopa prikazan je u tabeli 7.

Tabela 7. Zbirni pregled koeficijenata stabilnosti za projektovano završno stanje

Profil	F _s Bishop	F _s Morgenstern-Price
1 – 1'	1,485	1,481
2 – 2'	1,351	1,355
3 – 3'	1,399	1,389
4 – 4'	1,593	1,587

5. ZAKLJUČAK

Analiza stabilnosti odlagališta na površinskom kopu Severni revir je urađena na osnovu sprovedenih istraživanja i analiza:

- Terenskih istražnih radova,
- Laboratorijskih ispitivanja,
- Proračuna stabilnosti računarskim softverom što je ustaljeni standard za ovu problematiku.

Upoređenjem proračunatih vrednosti koeficijenata stabilnosti završnih kosina površinskog kopa sa minimalnom dozvoljenom vrednošću $F_{smin} = 1,30$ koja je definisana Pravilnikom o tehničkim zahtevima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina ("Sl. glasnik RS", br. 96/2010), zaključak je da su završne kosine stabilne.

U cilju bezbednosti, najmanje dva puta godišnje mora da se proverí ugao nagiba završnih kosina ("Sl. glasnik RS", br. 96/2010). Takođe je potreban stalni monitoring završnih kosina u cilju pravovremenog utvrđivanja eventualnih pukotina, sleganja i sl. i u slučaju pojava istih moraju se preduzeti mere za saniranje.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor u 2025. godini, evidencioni broj 451-03-136/2025-03/ 200052.

LITERATURA

- [1] E. Hoek, E.T. Brown, Rocscience – Practical estimates of rock mass strength International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 34, 8 (1997) 1165-1186.
<https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/hoek/1997-Practical-Estimates-of-Rock-Mass-Strength.pdf>
- [2] G. Somodi, N. Bar, L. Kovács, M. Arrieta, Á. Török, B. Vásárhelyi, Study of Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) Correlations in Granite, Siltstone, Sandstone and Quartzite Rock Masses, Applied Sciences, 11 (8) (2021) 3351.
<https://doi.org/10.3390/app11083351>
- [3] F. Ceballos, C. Olalla, R. Jiménez, Relationship between RMRb and GSI based on in situ data, Conference: EUROCK Vigo 2014, ISRM European rock mechanics symposium At: Vigo, Madrid, 2014, DOI:10.13140/2.1.1813.3768
- [4] J.A. Franklin, Suggested method for determining point load strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstract, 22(2) (1985) 51-60.
- [5] ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [6] M. Ljubojev, R. Popović, Osnove geomehanike, 2006. ISBN: 86-7827-020-9
- [7] V. Đorđević, Uporedna analiza Q i GSI klasifikacije za definisanje parametara smičuće čvrstoće stenske mase, Master rad, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2023.
<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007501>

-
- [8] R. Rajković, M. Gomilanović, D. Kržanović, S. Stepanović, M. Mikić, M. Jovanović, Determination of safety distances due to the seismic earthquakes during blasting at the open pit North mining district of the Majdanpek copper mine, *Mining & Metallurgy Engineering Bor*, 2 (2024) 21-34. DOI:10.5937/mmeb2402021R
 - [9] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, S. Trujić, Stabilnost odlagališta jalovine na površinskom kopu beli kamen na Fruškoj Gori, *Zbornik*, 14. Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Rudarstvo 2023“, 30. maj -2. jun 2023, Zlatibor, Srbija, str. 248-256.
 - [10] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, S. Milutinović, Stability analysis of the integrated waste dumps of the open pits Žuta Prla and Brskovo near Mojkovac, *Mining & Metallurgy Engineering Bor*, 2 (2023) 9-16. DOI: 10.5937/mmeb2302009R.
 - [11] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, E. Požega, Analiza stabilnost završne kosine površinskog kopa Južni revir Rudnika bakra Majdanpek u severozapadnom delu – zona klizišta, Srbija, *Zbornik*, 13. Simpozijum sa međunarodnim učešćem „Rudarstvo 2022“, Privredna komora Srbije, Beograd, 2022.
 - [12] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, Calculation of safety distance for work of mining equipment in working environment with weakened characteristics on open pit "Severni revir" of Majdanpek copper mine, *The 52nd International October Conference on Mining and Metallurgy*, November 29th – 30th 2021, Bor, Serbia, pp. 79-82.
 - [13] R. Rajković, Lj. Obradović, D. Kržanović, M. Mikić, Stability of the Dam "Prevoj Šaška" of the Flotation Tailing Dump "Valja Fundata" in Majdanpek, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1-2 (2019) 9-18. DOI:10.5937/mmeb1902009R
 - [14] R. Rajković, D. Kržanović, M. Mikić, M. Jovanović, Stability of the ash and slag landfill "Maljevac" – Pljevlja for overtop to the peak elevation K+832 m, *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1-2 (2018) 17-26. DOI 10.5937/mmeb1802017R
 - [15] R. Rajković, Lj. Obradović, M. Mikić, D. Kržanović, Application of standards for designing embankments and earth dams in the stability check dams flotation tailing RTH in RTB Bor; „Rudarstvo 2016“, 24.-26.05.2016, Sremski Karlovci, str. 298-307.