Doi broj: 10.5937/rudarstvo26325M

UTICAJ PARAMETRA RU NA FAKTOR SIGURNOSTI KOSINE FLOTACIJSKOG JALOVIŠTA

THE INFLUENCE OF THE RU PARAMETER ON THE SAFETY FACTOR OF THE SLOPE OF A FLOTATION TAILINGS DAM

Sandra Milutinović, Ljubiša Obradović, Radmilo Rajković, Ivana Mikić
Institut za Rudarstvo i Metalurgiju Bor, Alberta Anštajna 1, Bor
sandra.milutinović@irmbor.co.rs

Apstrakt

Stabilnost kosina flotacijskih jalovišta u velikoj meri zavisi od veličine pornih pritisaka u telu nasipa. U praksi se, u nedostatku detaljne filtracione analize, često primenjuje pojednostavljeni pristup kroz uvođenje koeficijenta pornih pritisaka Ru. Cilj ovog rada je analiza uticaja parametra Ru na faktor sigurnosti kosine brane na jalovištu primenom metode granične ravnoteže.
Ključne reči: *stabilnost, jalovišta, kosine, Ru faktor*

Abstract

The stability of flotation tailings slopes largely depends on the magnitude of pore water pressures within the embankment body. In engineering practice, in the absence of a detailed seepage analysis, a simplified approach is often applied through the introduction of the pore pressure coefficient Ru. The aim of this paper is to analyze the influence of the Ru parameter on the slope safety factor of a tailings dam using the limit equilibrium method.
Keywords*: stability, tailings facilities, slopes, Ru factor*

1. UVOD

Flotacijska jalovišta predstavljaju specifične geotehničke objekte namenjene za trajno odlaganje otpada nastalog procesom prerade rude. Zbog velikih zapremina odloženog materijala, promenljivih geotehničkih karakteristika jalovine i prisustva vode, stabilnost kosina jalovišta predstavlja jedan od najvažnijih aspekata

projektovanja, eksploatacije i monitoringa ovih objekata.Istorijski posmatrano, veliki broj havarija na flotacijskim jalovištima bio je direktno povezan sa neadekvatnim sagledavanjem uticaja vode i pornih pritisaka u telu nasipa i deponovanom materijalu. Povećani porni pritisci dovode do smanjenja efektivnih napona, a samim tim i do smanjenja smičuće otpornosti materijala, što može izazvati pojavu klizanja i narušavanje stabilnosti kosina [1].U inženjerskoj praksi stabilnost kosina najčešće se procenjuje primenom metoda granične ravnoteže, pri čemu je pravilno definisanje nivoa podzemne vode i pornih pritisaka od izuzetnog značaja. Kada detaljna filtraciona analiza nije dostupna, često se koristi pojednostavljeni pristup kroz primenu Ru parametra. Parametar Ru predstavlja odnos pornih pritisaka i ukupnog vertikalnog napona i omogućava aproksimaciju uticaja vode na stabilnost kosine [2]..Cilj ovog rada je analiza uticaja različitih vrednosti Ru parametra na faktor sigurnosti kosine flotacijskog jalovišta. Analize su sprovedene metodom granične ravnoteže kako bi se utvrdila zavisnost između pornih pritisaka i stabilnosti nasipa.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. STABILNOST KOSINA

Stabilnost kosina podrazumeva sposobnost tla ili nasipa da se odupre silama koje izazivaju klizanje. Faktor sigurnosti predstavlja odnos između sila otpornosti i sila koje izazivaju pomeranje mase:

$$Fs=\frac{OTPORNE\ SILE}{POKRETAČKE\ SILE}$$

Ukoliko je faktor sigurnosti veći od propisane minimalne vrednosti, kosina se smatra tabilnom. Za geotehničke objekte kao što su flotacijska jalovišta, zahtevane vrednosti faktora sigurnosti zavise od faze rada objekta, vrste opterećenja i primenjenih standarda.

2.2. PORNI PRITISCI I Ru PARAMETAR

Prisustvo vode u tlu dovodi do pojave pornih pritisaka koji smanjuju efektivne napone i smičuću čvrstoću materijala. Efektivni napon definisan je Terzagijevim izrazom [2]:

$$\sigma' = \sigma - u$$

gde su:

- σ'– efektivni napon,
- σ– ukupni napon,
- u– porni pritisak.

U pojednostavljenim analizama stabilnosti koristi se Ru parametar definisan izrazom:

$$Ru = \frac{u}{\gamma h}$$

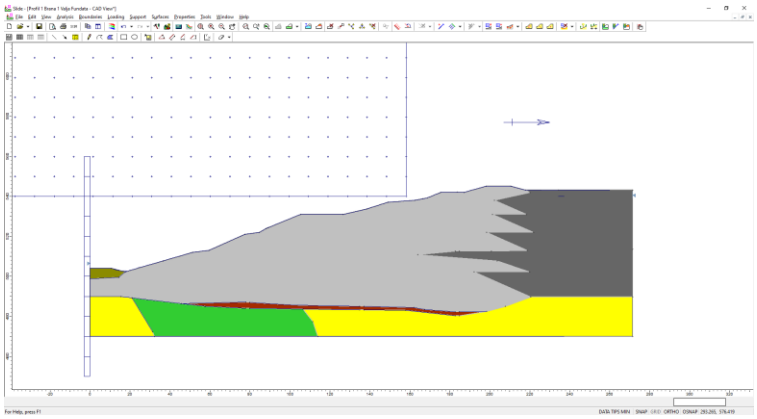
gde su:

- u– porni pritisak,
- γ– zapreminska težina materijala,
- h– visina iznad posmatrane tačke.

Veće vrednosti Ru parametra ukazuju na veće porne pritiske i nepovoljnije uslove stabilnosti.

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Geometrija modela definisana je na osnovu stvarnog poprečnog preseka brane jalovišta. Model obuhvata uzvodnu i nizvodnu kosinu nasipa, zonu odložene jalovine, kao i temeljni sloj ispod nasipa. U okviru modela definisana je i raspodela pornih pritisaka primenom Ru parametra.Analize stabilnosti sprovedene su metodom granične ravnoteže u softverskom paketu SLIDE, korišćenjem Bishop-ove pojednostavljene metode [3]. Za određivanje kritične klizne površine korišćen je automatski postupak pretrage kružnih kliznih površina, Slika 1.



Slika 1. Poprečni profil Brane 1 na flotacijskom jalovištu Valja Fundata [4]

U cilju sagledavanja uticaja pornih pritisaka na stabilnost kosine, analizirani su sledeći slučajevi:

- Ru = 0.0
- Ru = 0.1
- Ru = 0.15
- Ru = 0.2
- Ru = 0.3
- Ru = 0.4

Za svaki analizirani slučaj određen je minimalni faktor sigurnosti kosine, a rezultati su međusobno upoređeni.

3.1. GEOTEHNIČKI PARAMETRI

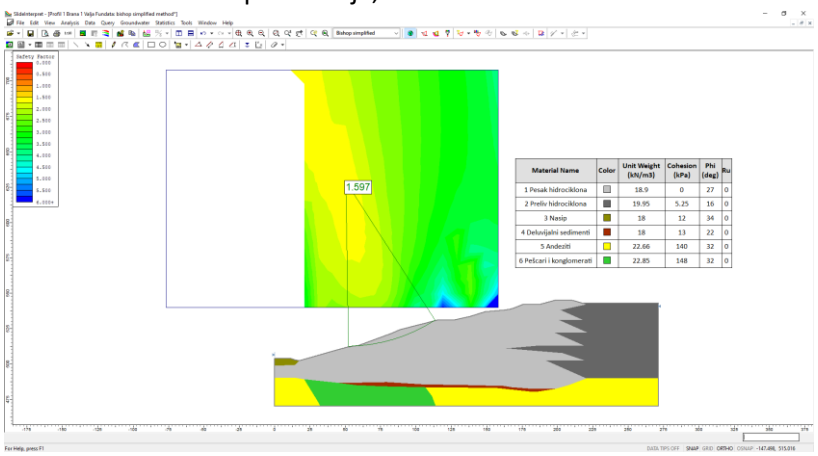
U analizama su korišćeni sledeći parametri materijala, tabela 1:

Tabela 1: Parammetri koji su potrebni za analizu stabilnosti

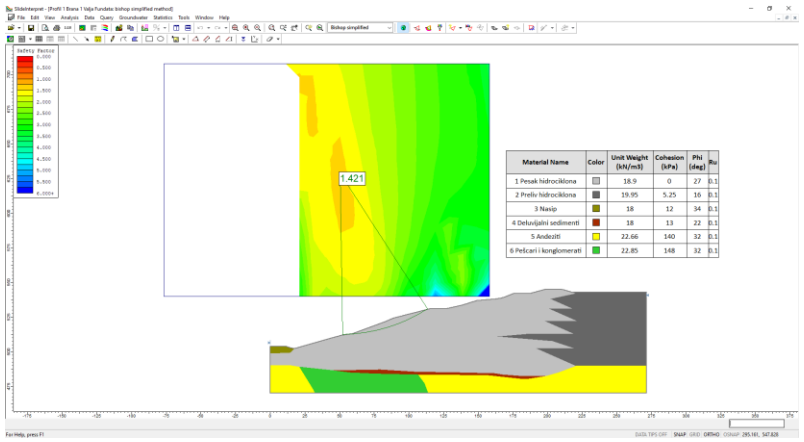
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
1 Pesak hidrociklona		18.9	Mohr-Coulomb	0	27	0
2 Preliv hidrociklona		19.95	Mohr-Coulomb	5.25	16	0
3 Nasip		18	Mohr-Coulomb	12	34	0
4 Deluvijalni sedimenti		18	Mohr-Coulomb	13	22	0
5 Andeziti		22.66	Mohr-Coulomb	140	32	0
6 Pešcari i konglomerati		22.85	Mohr-Coulomb	148	32	0

4. REZULTATI

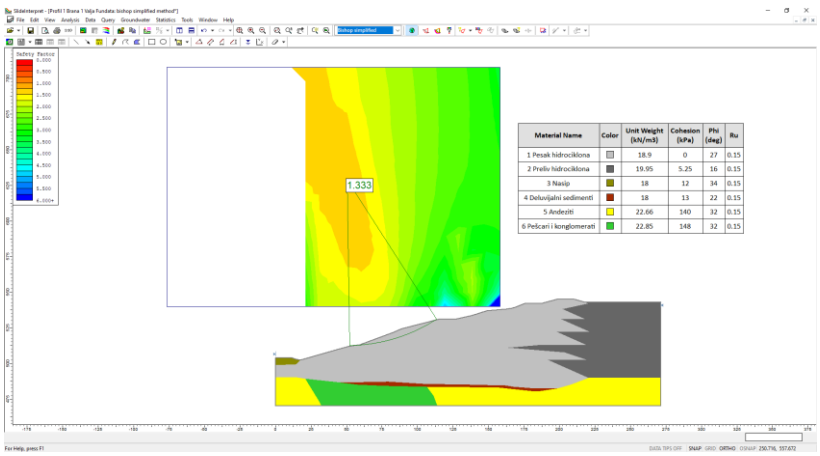
Na sledećim slikama su prikazani poprečni profili brane gde su menjane vrednosti Ru parametara za statička opterećenja, slika 2-7.



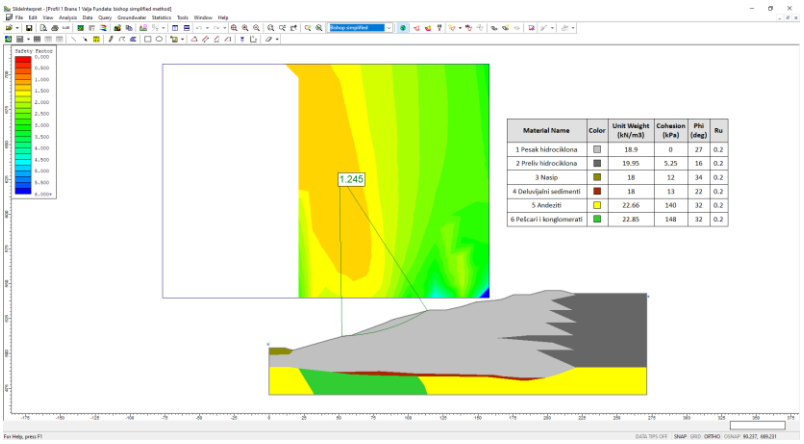
Slika 2. Poprečni profil brane sa vrednošću Ru=0



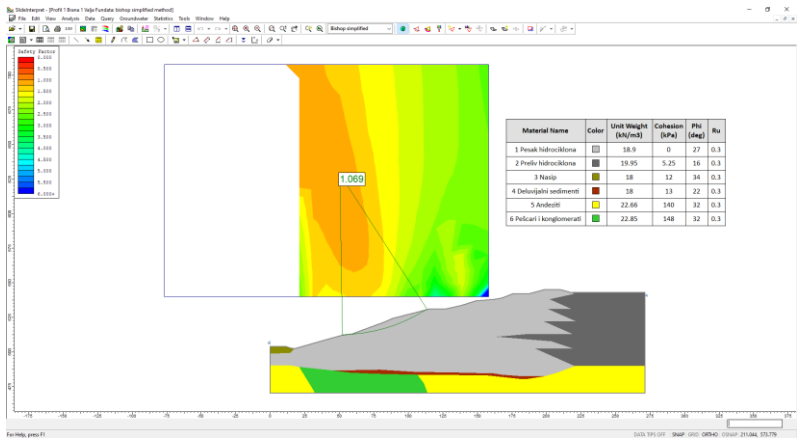
Slika 3. Poprečni profil brane sa vrednošću Ru=0,1



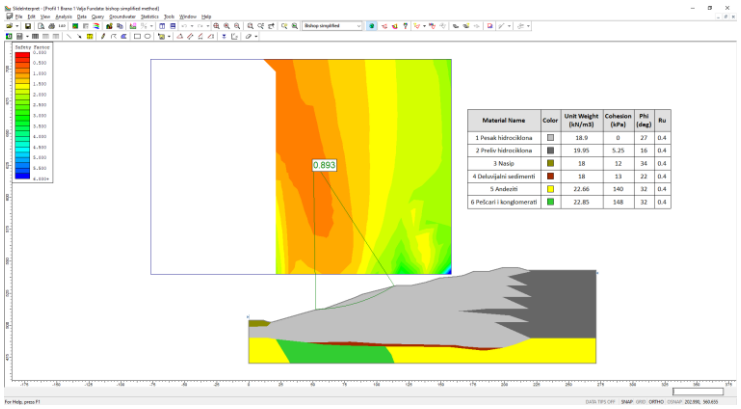
Slika 4. Poprečni profil brane sa vrednošću Ru=0,15



Slika 5. Poprečni profil brane sa vrednošću Ru=0,2



Slika 6. Poprečni profil brane sa vrednošću Ru=0,3



Slika 7. Poprečni profil brane sa vrednošću Ru=0,4

Dobijeni rezultati (Tabela 2) pokazuju jasnu zavisnost faktora sigurnosti od vrednosti Ru parametra. Sa povećanjem Ru vrednosti dolazi do povećanja pornih pritisaka i smanjenja efektivnih napona, što direktno utiče na smanjenje smičuće otpornosti materijala.

Tabela 2: Rezultati analize

Parametar Ru	Faktor sigurnosti Fs
0	1,597
0,1	1,421
0,15	1,333
0,2	1,245
0,3	1,069
0,4	0,893

Na osnovu rezultata može se zaključiti da i relativno mala promena pornih pritisaka može značajno uticati na stabilnost kosine jalovišta.

5. DISKUSIJA

Rezultati sprovedenih analiza pokazuju izraženu zavisnost faktora sigurnosti kosine flotacijskog jalovišta od vrednosti parametra Ru, odnosno od intenziteta pornih

pritisaka u telu nasipa i odloženoj jalovini. Sa povećanjem vrednosti Ru parametra dolazi do kontinuiranog smanjenja faktora sigurnosti, što potvrđuje značajan uticaj vode i pornih pritisaka na stabilnost kosina jalovišta.Za slučaj bez pornih pritisaka (Ru = 0), dobijen je faktor sigurnosti Fs = 1,597, što ukazuje na stabilno stanje kosine i zadovoljavajući nivo sigurnosti. Međutim, već pri vrednosti Ru = 0,1 faktor sigurnosti opada na Fs = 1,421, što predstavlja smanjenje stabilnosti usled pojave pornih pritisaka i smanjenja efektivnih napona u materijalu.Daljim povećanjem Ru parametra na 0,15 i 0,2 dolazi do dodatnog smanjenja faktora sigurnosti na vrednosti Fs = 1,333 i Fs = 1,245. Ovakvi rezultati ukazuju da čak i umereno povećanje pornih pritisaka može značajno uticati na smičuću otpornost materijala i stabilnost kosine. U ovom opsegu vrednosti stabilnost kosine se približava minimalno dozvoljenim vrednostima koje se uobičajeno zahtevaju za dugoročne uslove eksploatacije jalovišta.Posebno je značajan rezultat dobijen za Ru = 0,3, kada faktor sigurnosti iznosi Fs = 1,069. Ova vrednost ukazuje na stanje granične stabilnosti, pri čemu i manje promene hidrogeoloških uslova, seizmičkog opterećenja ili dodatnog zasićenja materijala mogu izazvati pojavu klizanja.

Za najveću analiziranu vrednost Ru = 0,4 dobijen je faktor sigurnosti Fs = 0,893, što ukazuje na nestabilno stanje kosine, odnosno na mogućnost pojave loma nasipa. U ovom slučaju porni pritisci značajno redukuju efektivne napone i smičuću čvrstoću materijala, pri čemu sile koje izazivaju klizanje postaju veće od sila otpornosti.

Dobijeni rezultati potvrđuju da pravilno definisanje pornih pritisaka predstavlja jedan od ključnih faktora u analizama stabilnosti flotacijskih jalovišta. Takođe, rezultati ukazuju na značaj adekvatnog drenažnog sistema, kontrole nivoa vode i kontinuiranog oskultiranja piezometarskih nivoa u cilju pravovremenog praćenja promena hidrogeoloških uslova u telu nasipa.Na osnovu sprovedenih analiza može se zaključiti da povećanje Ru parametra ima gotovo linearno negativan uticaj na faktor sigurnosti kosine, pri čemu kritične vrednosti pornih pritisaka mogu dovesti do prelaska kosine iz stabilnog u nestabilno stanje.

6. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran uticaj parametra Ru na faktor sigurnosti kosine flotacijskog jalovišta primenom metode granične ravnoteže u softverskom paketu *SLIDE*. Analize su sprovedene za različite vrednosti pornih pritisaka kako bi se sagledao

njihov uticaj na stabilnost nasipa.Dobijeni rezultati jasno pokazuju da povećanje vrednosti Ru parametra dovodi do značajnog smanjenja faktora sigurnosti kosine. Za slučaj bez pornih pritisaka (Ru = 0) dobijen je faktor sigurnosti Fs = 1,597, što ukazuje na stabilno stanje kosine. Sa povećanjem Ru parametra dolazi do progresivnog opadanja faktora sigurnosti, tako da pri vrednosti Ru = 0,3 faktor sigurnosti iznosi Fs = 1,069, što predstavlja stanje granične stabilnosti. Pri najvećoj analiziranoj vrednosti Ru = 0,4 dobijen je faktor sigurnosti Fs = 0,893, čime kosina prelazi u nestabilno stanje.Rezultati istraživanja potvrđuju da porni pritisci imaju dominantan uticaj na stabilnost flotacijskih jalovišta, jer povećanje pornih pritisaka dovodi do smanjenja efektivnih napona i smičuće otpornosti materijala. Iz tog razloga pravilno definisanje hidrogeoloških uslova i raspodele pornih pritisaka predstavlja jedan od najvažnijih elemenata pri projektovanju i analizi stabilnosti jalovišta.Na osnovu sprovedenih analiza može se zaključiti da je neophodno obezbediti kontinuirano praćenje nivoa podzemnih voda i pornih pritisaka putem piezometarskog sistema, kao i održavanje efikasnog drenažnog sistema u cilju očuvanja stabilnosti nasipa. Takođe, rezultati ukazuju da primena pojednostavljenog Ru pristupa može biti korisna u preliminarnim analizama stabilnosti, posebno u slučajevima kada detaljne filtracione analize nisu dostupne.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2026. godini, br. 451-03-33/2026-03/ 200052

REFERENCE

[1] Duncan, J. M., Wright, S. G. Soil Strength and Slope Stability. Wiley.
[2] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
[3] Eurocode 8 – Geotechnical Design.
[4] Godišnji izveštaj o oskultaciji flotacijskog jalovišta Valja Fundata