

Optimizacija ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Tamnava-Zapad

Natalija Pavlović, Branko Petrović, Tomislav Šubaranović, Ivan Janković

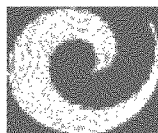


Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Optimizacija ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Tamnava-Zapad | Natalija Pavlović, Branko Petrović, Tomislav Šubaranović, Ivan Janković | 15. Međunarodna konferencija o površinskoj eksploataciji OMC 2022, Zlatibor, 12.-15.10.2022. | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0007234>



OPTIMIZACIJA UGLA NAGIBA GENERALNE KOSINE UNUTRAŠNJEG ODLAGALIŠTA POVRŠINSKOG KOPA TAMNAVA-ZAPAD

OPENCAST COAL MINE TAMNAVA-WEST FIELD OVERALL INTERNAL DUMP SLOPE ANGLE OPTIMIZATION

Pavlović N.¹, Petrović B.², Šubaranović T.³, Janković I.⁴

Apstrakt

Formiranje geomehanički stabilnih unutrašnjih odlagališta otkrivke ima izuzetno značajnu ulogu pri projektovanju i planiranju razvoja površinskih kopova uglja sa aspekta preraspodele masa otkrivke, dinamike eksploatacije, ekoloških zahteva, rudarskih rizika i troškova. Uvećanje zavodnjenosti unutrašnjeg odlagališta otkrivke površinskog kopa Tamnava-Zapadno Polje, kao posledica globalnih klimatskih promena sa pojavom katastrofalnih obimnih padavina i velike poplave, dovelo je i do značajnih ali i trajnih promena geomehaničkih karakteristika materijala, umanjena stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta i znatnog povećanja rudarskog rizika. Inovirane varijantne analize stabilnosti kosine sa korišćenjem teorije verovatnoće i kvantitativnim pristupom za procenu rizika, predstavljaju osnovu za optimizovanje ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta, što je prikazano u obrađenom primeru. Uz preporuke za planiranje mogućih konstruktivnih izmena, dinamike razvoja unutrašnjeg odlagališta i povećanja efikasnosti sistema odvodnjavanja, svakako se realizuje pouzdaniji rad površinskog kopa i sigurnost na radu.

Ključne reči: *Unutrašnje odlagalište, stabilnost kosina, verovatnoće, posledice, rizik*

Abstract

The formation of geomechanically stable internal dumps for overburden has an extremely significant role in designing and planning the development of opencast coal mines from the aspect of overburden mass redistribution, mining dynamics, environmental requirements, mining risks and costs. The increase of water content in the internal dump of the Tamnava-West Field opencast mine, as a consequence of global climate changes with the occurrence of catastrophic rainfall and large floods, led to significant but also permanent changes in the geomechanical characteristics of the material, a decrease in the stability of the overall internal dump slope and a significant increase in mining risk. Innovative variant analyzes of slope stability using probability theory and a quantitative approach to risk assessment represent the basis for optimizing the overall slope of the internal dump, which is shown on this example. With recommendations for planning possible constructive changes, the dynamics of the internal dump development and increasing the dewatering system efficiency, a more reliable mine operation and safety at work will certainly be achieved.

Keywords: *Internal dump, slope stability, probabilities, consequences, risk*

¹ Pavlović Natalija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

² Petrović Branko, EPS Beograd, RB Kolubara, Lazarevac

³ Prof. dr Šubaranović Tomislav, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

⁴ Doc. dr Janković Ivan, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu

1. Uvod

Površinski kop uglja Tamnava-Zapadno Polje sa najvećom proizvodnjom uglja u EPS-u, nalazi se u fazi punog razvoja sa formiranim unutrašnjim odlagalištem. Nakon posledica velike poplave 2014. godine i tekućih klimatskih promena sa uvećanim padavinama došlo je do značajnih hidroloških promena i promena geomehaničkih parametara radne sredine što je dovelo u pitanje ranije usvojene parametre za proračun stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta i dobijeni faktor sigurnosti u skladu sa važećom zakonskom regulativom. Zbog toga se ukazala potreba za inoviranom analizom stabilnosti završne kosine i posledično mogućim izmenama konstrukcije i dinamike formiranja unutrašnjeg odlagališta. Pri tome je korišćen neophodni kvantitativni pristup utvrđivanja rizika od otkaza stabilnosti generalne kosine odlagališta. Vrednost rizika se dobija kao proizvod ukupne verovatnoće mogućnosti otkaza stabilnosti generalne kosine, koja predstavlja proizvod zavisnih verovatnoća utvrđenih uticajnih faktora i ekonomskih posledica. U okviru uticajnih faktora definisane su verovatnoće otkaza stabilnosti kosine za promenljive faktore sigurnosti, otkaza zbog katastrofalnih prirodnih događaja i otkaza sistema odvodnjavanja. Nakon utvrđivanja posledica otkaza i ekonomske analize utvrđuju se rizici svih opcija i vrši izbor optimalnog ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa. U obrađenom primeru, posledice otkaza obuhvataju gubitke zbog troškova sanacije unutrašnjeg odlagališta, revitalizacije opreme i infrastrukturnih objekata, obnavljanja sistema odvodnjavanja, tehnoloških rekonstrukcija uz smanjenje zapremine odlagališta i proizvodnje, kao i mogućih gubitaka života ili zdravlja ljudi.

2. Rizik od otkaza stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta

Rizik (R) od otkaza stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa, koji se može postaviti kao slučajni proces, metodološki se zasniva se na osnovnom i dobro poznatom principu, po kome je definisan kao proizvod ukupne verovatnoće otkaza stabilnosti kosine (P_o) i kvantitativno određenih posledica (C) na funkcionisanje i ekonomiju eksploatacije uglja [1, 7, 9, 12]. Tako je, rizik od otkaza stabilnosti generalne kosine praktično mogućnost pojave događaja koji će imati negativne posledice na rad površinskog kopa i može biti definisan kao:

$$R = P_o \cdot C \quad (1)$$

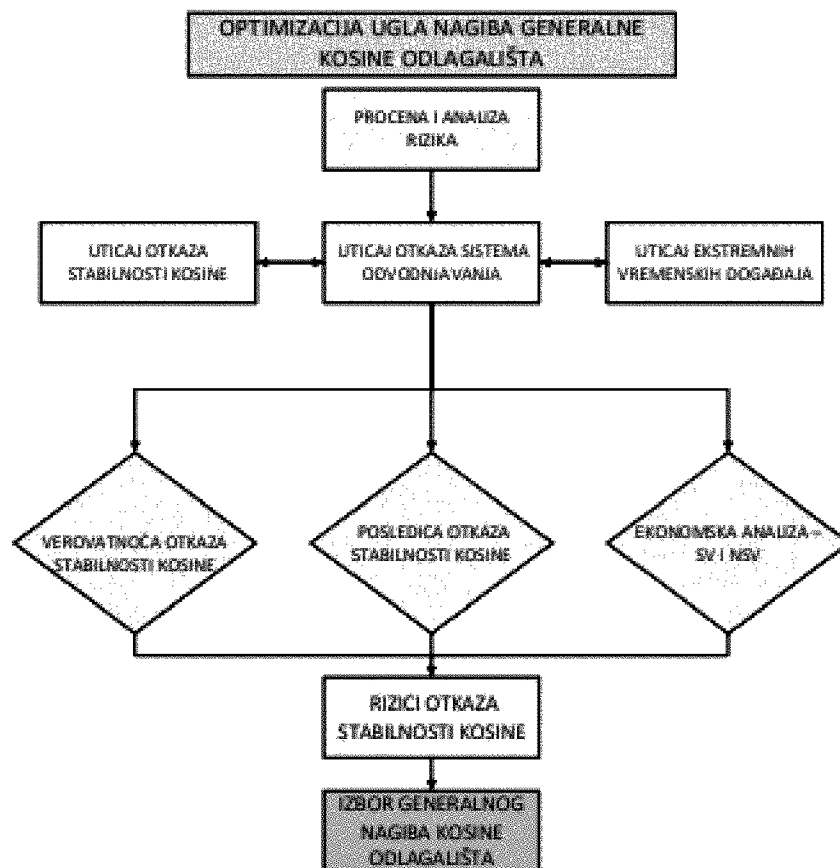
gde je: P_o - verovatnoća otkaza stabilnosti generalne kosine odlagališta
 C - očekivani gubici/posledice nastali zbog otkaza

U zavisnosti od tipa posledica gubici mogu biti izraženi u novčanim jedinicama, broju stradalih osoba, gubitka vremena za saniranje ili obnavljanje, jedinica izgubljene proizvodnje i drugo.

U postavljenoj metodologiji procene rizika izdvojena su tri osnovna zavisna uticajna faktora na verovatnoću otkaza stabilnosti kosine (Slika 1). To je uticaj geomehaničke pouzdanosti softverski proračunatog faktora sigurnosti (F_s) [2, 4, 6], uticaj nedopustivog otkaza sistema odvodnjavanja unutrašnjeg odlagališta i uticaj nepredvidljivih pojava ekstremnih padavina i poplava učestalih zbog globalnih klimatskih promena. Uticaj pojave klizišta na gubitke ljudskih života ili narušavanja zdravlja predstavlja jednu od posledica događaja - otkaza stabilnosti [7, 9]. Ekonomskom analizom utvrđuje se vremenski uticaj toka novca/troškova zbog posledica otkaza, preko sadašnje vrednosti (SP), negativne buduće akumulirane vrednosti i neto sadašnje vrednosti (NSP) u zadatom vremenu [7, 9]. Nakon toga definišu se rizici po varijantnim uglovima nagiba i izbor optimalnog ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta.

Proračuni F_s su zasnovani na teoriji granične ravnoteže. Korišćenjem jednog od priznatih softvera, uz poznavanje svih zahtevanih geomehaničkih ulaznih parametara, dobija se faktor sigurnosti, označen softverski kao FSS , koji je propisan zakonskom regulativom u oblasti rudarstva ili preporučen od strane eksperata i strukovnih organizacija na osnovu najbolje prakse [6]. Prema Pravilniku (2010) za generalni nagib kosina odlagališta predviđen je dozvoljeni faktor sigurnosti od 1.5 do 2 kada je u pitanju lom podloge ili klizanje po podlozi. Imajući u vidu složenost unutrašnjih odlagališta na površanskim

kopovima uglja i klimatske promene, sugerise se minimalna vrednost $F_s = 2$.



Slika 1. Model izbora ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta

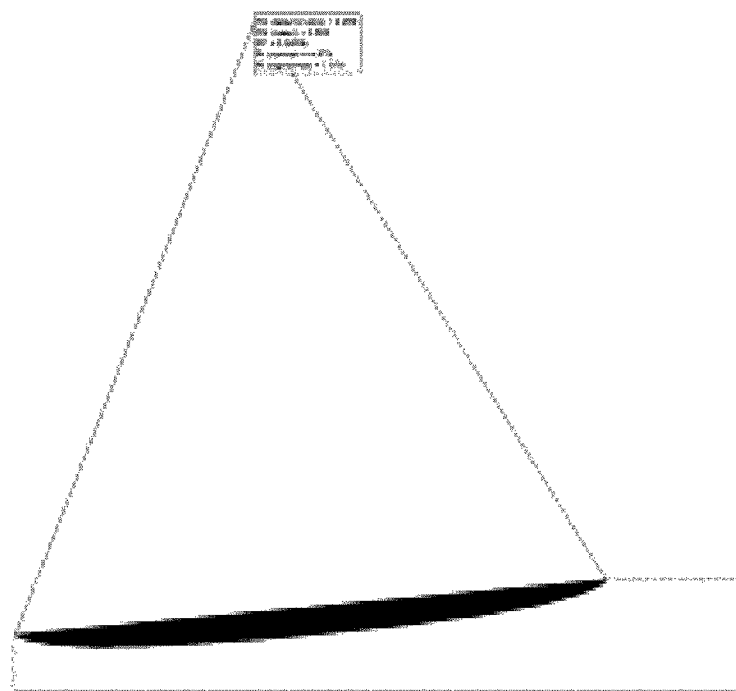
Među izlaznim softverski dobijenim parametrima, pored F_s , dobija se direktno i verovatnoća otkaza stabilnosti kosine P_{ot} (označena softverski kao PF). Vrednost verovatnoće otkaza kosine, u odnosu na odgovarajući faktor sigurnosti, kao primer, može se uočiti na Slici 2. Verovatnoća da se neće dogoditi otkaz stabilnosti kosine je $P_{ot} = 1 - P_{ot}$.

Funkcionisanje sistema odvodnjavanja i njegovo dimenzionisanje u odnosu na klimatske promene ima izuzetno značajan uticaj na stabilnost kosina unutrašnjeg odlagališta. Otkazi ovog sistema dovode do većeg zavodnjavanja tela odlagališta što negativno utiče na stabilnost kosina i može dovesti do otkaza stabilnosti i obrušavanja sa značajnim ekonomskim i ekološkim posledicama. Verovatnoća otkaza sistema odvodnjavanja dobija se na bazi vremena funkcionisanja do otkaza (T_{fo}) i vremena obnavljanja (T_{ov}).

Verovatnoća normalnog funkcionisanja do otkaza sistema odvodnjavanja, koji izuzetno utiče na stabilnost generalne kosine unutrašnjeg odlagališta, može biti definisana različitim zakonima raspodele. Najjednostavniji i u praksi najviše korišćen u analizi stacionarnih verovatnoća rada sistema je eksponencijalna raspodela izražena preko odgovarajućeg vremena funkcionisanja do otkaza sistema odvodnjavanja (T_{fo}) [8, 10, 11, 13]:

$$P_{fo}(t) = \exp(-a \cdot t)$$

gde je: t - planirano vreme rada do otkaza, a - parametar raspodele (intenzitet otkaza - $a = 1/T_{fo}$).



Slika 2. Proračun stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Tamarva-Zapad sa uglom nagiba od 5° (Visina odlagališta = 120 m; Porni pritisak = $R_u = 0.3$; Faktor sigurnosti = $F_s = 2.50$)

Srednje vreme do otkaza funkcionisanja sistema odvodnjavanja T_{fo} je:

$$T_{fo} = \int P_{od}(t) dt = \int \exp(-a \cdot t) dt = 1/a \quad (2)$$

Sa druge strane, rizik ili verovatnoća obnavljanja sistema odvodnjavanja nakon otkaza u vremenu t , prema eksponencijalnom zakonu raspodele, definisana je preko odgovarajućeg vremena obnavljanja (T_{oo}) sa parametrom raspodele b (intenzitet obnavljanja - $b = 1/T_{oo}$) u vremenu od 0 do t , te je:

$$P_{oo}(t) = \exp(-b \cdot t)$$

Srednje vreme obnavljanja sistema odvodnjavanja unutrašnjeg odlagališta je:

$$T_{oo} = \int P_{oo}(t) dt = \int \exp(-b \cdot t) dt = 1/b \quad (3)$$

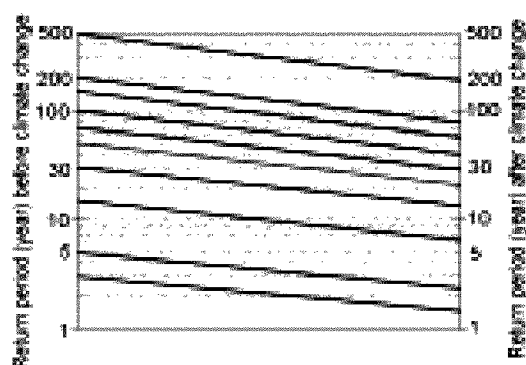
Kada $t \rightarrow \infty$, granična stacionarna verovatnoća funkcionisanja sistema odvodnjavanja (P_{fo}) i verovatnoća obnavljanja sistema odvodnjavanja posle otkaza (P_{oo}) su:

$$P_{fo} = b/(a + b) \quad (4)$$

$$P_{oo} = a/(a + b)$$

Nepredvidljivi vremenski događaji ekstremnih padavina, značajno učestali zbog globalnih klimatskih promena, dovode do poplava površinskih kopova uglja i pojava klizišta zbog promene geomehaničkih karakteristika i usporenog i otežanog odvodnjavanja unutrašnjih odlagališta. To pokazuje potrebu za smanjenjem povratnog perioda ovakvih događaja i kalkulacijama stabilnosti kosina sa uvećanim uobičajenim pornim pritiskom i redizajnanjem sistema odvodnjavanja.

Postoji veliki broj istraživanja u svetu vezanih za poplave u opštem smislu i izmenjene meteorološke uslove. Promene u 21. veku u odnosu na 20. vek su značajne. Japanski eksperti su utvrdili da povratni period katastrofalnih pojava poplava i nevremena ($T_r = 1/p$) od 50 godina mora da se svede na današnji povratni period od 20 godina (Slika 3) [3]. Hidrološki proračuni u oblasti rudarstva baziraju se na starijoj propisanoj vrednosti povratnog perioda pre klimatskih promena od 100 godina, ali je, imajući u vidu promene realno taj povratni period svesti na 50 godina.



Slika 3. Povratni periodi pre i nakon izraženih klimatskih promena [3]

Za analize verovatnoća ekstremnih pojava u zadatom vremenu od n godina je uobičajeno da se koristi geometrijska raspodela sa parametrom povezanim sa povratnim periodom (T_p) takvih događaja [5, 6, 7], sa parametrom p , gde je $p = 1/T_p$, sa funkcijom $f(t) = p(1 - p)^t$.

Verovatnoća da se katastrofalni nekontrolisani događaj (P_{kf}) neće desiti za vreme analiziranog perioda od n godina, tako da odlagalište ostaje u funkcionalnom stanju, je:

$$P_{kf} = (1 - p)^n \quad (5)$$

Rizik, ili verovatnoća da će se katastrofalan događaj desiti najmanje jedanput za vreme analiziranog perioda, kao stanje otkaza, je:

$$P_{ko} = 1 - (1 - p)^n$$

Stabilnost kosine unutrašnjeg odlagališta u celini može se definisati kao stabilnost sistema od tri nezavisna uticajna serijski povezana elementa [5, 10, 13]. Kada se sistem sastoji od m elemenata povezanih u seriji, verovatnoća stabilnog funkcionalnog stanja odlagališta $P_{st}(t)$ za verovatnoće funkcionisanja bez otkaza svakog od uticajnih elemenata $P_{fi}(t)$ iznosi:

$$P_{st}(t) = P_{f1}(t) \cdot P_{f2}(t) \cdot \dots \cdot P_{fm}(t) = \prod_{i=1}^m P_{fi}(t) \quad (6)$$

Verovatnoća otkaza sistema je:

$$P_{ot} = 1 - P_{st}(t) \quad (7)$$

Unutrašnje odlagalište površinskog kopa uglja je, po pravilu, složeni sistem koji je opterećen sa visokim troškovima. Dinamika pojave troškova kao posledica otkaza stabilnosti kosina odlagališta je promenljiva u vremenu, pa je i finansijski uticaj na tako ostvarene troškove veoma važan za procenu rizika [9, 12]. Zbog toga je dobro koristiti u proračunima sadašnju vrednost (PV - *Present Value*) za ukupne troškove u zadatom vremenu od n godina preko poznate jednačine $PV = C/(1+r)^t$, gde je r interesna stopa povraćaja, a C procenjeni troškovi posledica. Odatle se izvodi i formula za izračunavanje negativne akumulirane vrednosti C_a sadašnjih procenjenih troškova posledica C : $C_a = C(1+r)^n$.

Takođe je pogodno i uobičajeno analizirati neto sadašnju vrednost (NPV - *Net Present Value*) za ocenu rizika u odnosu na sukcesivnu sumu ukupnih vrednosti troškova do konačnog zadatog vremena od n godina prema formuli: $NPV = \sum_{t=1}^n C/(1+r)^t$. Uprošćeni ekonomski pristup kvantifikovanja uticaja otkaza stabilnosti odlagališta obuhvata proračun različitih vrednosti PV , C_a i NPV po varijantama nagiba generalne kosine odlagališta, koristeći model toka novca (*Cash Flow*) za troškovne posledice otkaza u zadatom vremenu od n godina.

Posledice stanja otkaza stabilnosti kosina odlagališta obuhvataju troškove sanacije masa obrušene kosine (C_s) datih u Euro/m³, troškove obnavljanja opreme i infrastrukturnih objekata (C_o), troškova zbog pojave mogućih tehnoloških i organizacionih problema sa ugrožavanjem i mogućim prestankom ili smanjenjem proizvodnje (C_p) i troškova zbog gubitaka ljudskih života ili zdravlja (C_z) [7]:

$$C = C_s + C_u + C_p + C_z, \text{ (Euro)} \quad (8)$$

3. Izbor ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Tamnava-Zapadno Polje

Površinski kop Tamnava-Zapadno Polje je imao ogromne posledice zbog poplave 2014. godine sa direktnim troškovima rehabilitacije od preko 200 MEuro ne uzimajući u obzir indirektno troškove zbog gubitaka u proizvodnji uglja i električne energije (Slika 5 - levo). Posle sanacije katastrofalne poplave i daljih učestalih padavina došlo je do povremenih otkaza stabilnosti kosina unutrašnjeg odlagališta (Slika 4 - desno). Ozbiljno pogoršanje geomehaničkih karakteristika unutrašnjeg odlagališta dovelo je do neophodne potrebe za povećanje stabilnosti generalne kosine kroz smanjenje ugla nagiba u skladu sa najboljom svetskom praksom i zakonskom regulativom.

Slika 4. Poplavljeno unutrašnje odlagalište površinskog kopa Tamnava-Zapadno Polje (levo) i cirkularno klizište nakon sanacije (desno)

Inovirani varijantni proračun stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta vršen je za uglove nagiba od 0 do 10 stepeni. Za demonstraciju metodološkog pristupa izbora nagiba generalne kosine u ovom primeru, analize stabilnosti radene su sa pormam pritiscima (Ru) od 0 do 0.5.

Usvojena su sledeća fizičko-mehanička svojstva odloženog materijala i drugi ulazni geometrijski, zakonski i vremenski parametri:

Zapremnska masa: $\gamma = 18.5 \text{ KN/m}^3$

Kohezija: $C_s = 5 \text{ KN/m}^2$

Ugao unutrašnjeg trenja: $\phi = 16^\circ$

Koeficijent pornog pritiska: $Ru = 0 \text{ do } 0.5$

Visina generalne kosine: $H_o = 120 \text{ m}$

Generalni ugao nagiba kosine odlagališta (α): 0 do 10 stepeni

Faktor sigurnosti je usvojen prema Pravilniku: $F_s = 2$ za lom ili klizanje po podlozi

Vreme funkcionisanja sistema odvodnjavanja do otkaza (2): $T_p = 1/a = 3 \text{ years}$

Vreme obnavljanja sistema odvodnjavanja (3): $T_{\text{ov}} = 1/b = 0.25 \text{ godine za } 6^\circ \text{ i } 0.17 \text{ godine za } 4^\circ$

Povratni period nekontrolisanog ekstremnog događaja: $T_r = 20 \text{ godina } (p = 1/T_r = 0.05)$

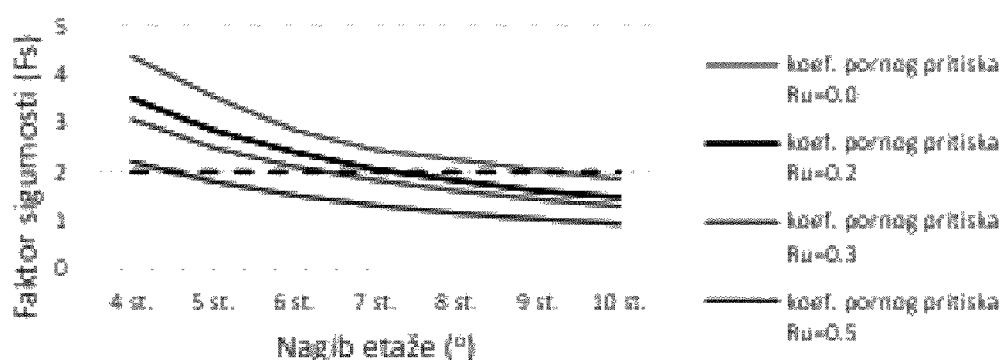
Analizirani period: $n = 6 \text{ godina}$

Proračunate vrednosti F_s za koeficijente pornih pritiskaa (Ru) od 0 do 0.5, visinu odlagališta (H_o) od 120 m i uglove nagiba generalne kosine od 4 do 10 stepeni, dobijene su korišćenjem softvera Rocscience, Slide 6.0, i date su u Tabeli 1. Grafički prikaz promene faktora sigurnosti u odnosu na uglove nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta je dat na Slici 5.

Tabela 1. Proračunati F_s u zavisnosti od nagiba kosine i koeficijenta pornog pritiska

R_u	F_s za $H_c = 120$ m						
	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
0	4.37	3.55	2.85	2.45	2.25	2.04	1.85
0.2	3.51	2.85	2.41	2.05	1.82	1.61	1.48
0.3	3.08	2.5	2.11	1.83	1.61	1.44	1.3
0.5	2.21	1.8	1.52	1.31	1.15	1.03	0.93

Generalna kosina unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa TAMNAVA-ZAPADNO POLJE (visina 120 m)



Slika 5. Promene faktora sigurnosti u odnosu na uglove nagiba kosine odlagališta

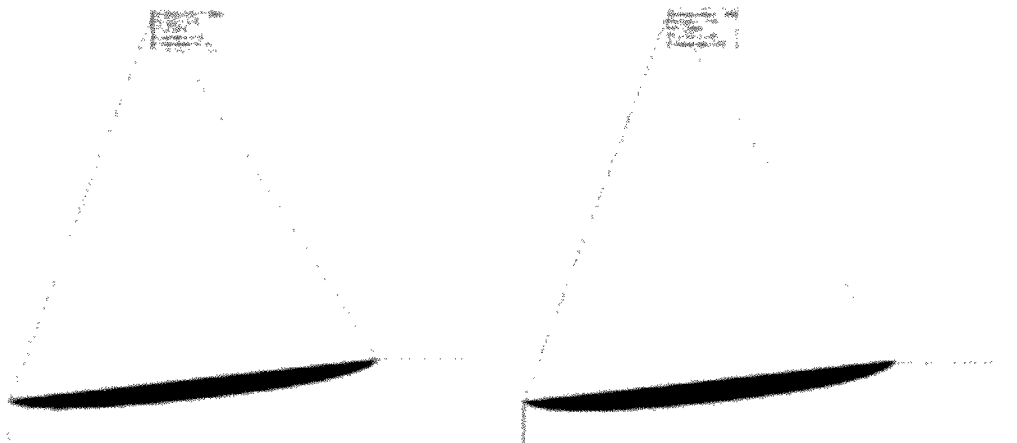
U Tabeli 1 se vidi da generalna ugao nagiba kosine odlagališta od 10° nema zadovoljavajući usvojeni faktor sigurnosti ($F_s = 2$) za sve analizirane koeficijente pornog pritiska. Faktori sigurnosti od 2.04, 2.25 i 2.05 za uglove nagiba od 9° , 8° i 7° stepeni su zadovoljavajući, ali za koeficijente pornog pritiska $R_u = 0$ za 9° i 8° stepeni i 0.2 za 7° stepeni, koje realno nije moguće realizovati sa ovim tipom unutrašnjih odlagališta na površinskim kopovima uglja, tako da analize sa ovim parametrima dalje nisu vršene. Analize za ugao nagiba generalne kosine odlagališta od 5° (Slika 2) nisu vršene imajući u vidu previsoke vrednosti F_s i princip da se za isti koeficijent pornog pritiska i sličnu vrednost F_s usvaja za dalju obradu veći ugao nagiba.

Utvrđivanje ukupne verovatnoće stanja stabilnosti generalne kosine odlagališta (P_{Σ}) (stanje bez otkaza) vršeno je na osnovu proizvodnje verovatnoća u odnosu na uticajne faktore. Verovatnoća da će doći do otkaza stabilnosti kosine odlagališta (P_o) dobija se iz osnovnog softverskog proračuna faktora stabilnosti (F_s) sa izračunatim P_o (softverski PF - Slike 2 i 6). Verovatnoća da neće doći do otkaza stabilnosti kosine dobija se iz izraza $P_s = 1 - P_o$.

Verovatnoća rada do otkaza sistema odvodnjavanja odlagališta, odnosno, njegovog funkcionisanja (P_{Σ}) dobijena je iz formula (2), (3) i (4). Zbog manjeg uticaja na funkcionisanje, vreme obnavljanja (P_{Σ}) je skraćeno sa 0.25 na 0.17 godine za ugao nagiba generalne kosine odlagališta od 4° u odnosu na 6° .

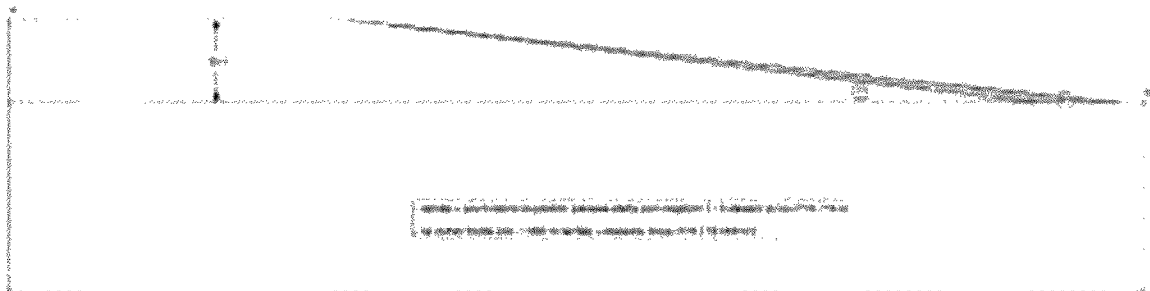
Verovatnoće da se neće dogoditi katastrofalni nekontrolisani događaj (P_{Σ}) za povratni period od 20 godina u narednom periodu od 6 godina su dobijene iz formule (5).

U konkretnoj analizi, ukupne verovatnoće da neće doći do otkaza stabilnosti kosine (P_{Σ}) su date uglove od 6° i 4° u narednih 6 godina rada površinskog kopa izračunate su prema formuli 6. Verovatnoće da će doći do otkaza stabilnosti kosine za date uglove dobijene su iz formule (7). Rezultati su prikazani u Tabeli 2.



Slika 6. Faktori stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog urađen za uglove nagiba od 6° i $R_u = 0,3$ (levo) - $F_s = 2,11$, i ugao nagiba od 4° i $R_u = 0,5$ (desno) - $F_s = 2,21$

Procenjeno je da posledice stanja otkaza stabilnosti kosine odlagališta obuhvataju troškove sanacije masa obrušene kosine od $C_s = 8$ i 6 Mm^3 za generalne uglove nagiba od 6° i 4° , po ceni od 2 Euro/ m^3 , troškove opravki i rekonstrukcija opreme i drugih infrastrukturnih objekata od $C_r = 2$ i 1 MEuro za uglove generalne kosine 6° i 4° , moguće gubitke u proizvodnji $C_p = 3$ i 2 MEuro za generalne uglove nagiba 6° i 4° i troškove gubitka ljudskih života ili zdravlja $C_a = 0,5$ MEuro. Gubici u proizvodnji za ugao od 4° su dodatno uvećani zbog skraćivanja prostiranja i procenjenih gubitaka zapremine unutrašnjeg odlagališta od 18 Mm^3 (Slika 7) po ceni od 1 Euro/ m^3 u odnosu na formiranje pod uglom od 6° . Svi rezultati su prikazani u Tabeli 2.



Slika 4. Razlika u površinama poprečnih preseka unutrašnjeg odlagališta pri smanjenju ugla nagiba generalne kosine sa 7° na 6° ($P = 9,719 \text{ m}^2$, što na dužini fronta od 1,000 m iznosi $V = 9,719.000 \text{ m}^3$)

Tabela 2. Verovatnoće stabilnog stanja kosine odlagališta za uglove od 6 i 4 stepena u odnosu na uticajne faktore i odgovarajuće posledice (euro)

Ugao nagiba kosine	$P_{st} = 1 - P_{ak}$	P_{je} (2), (3), (4)	P_{st} (5)	P_{je} (6)	P_{ak} (7)	C_s	C_r	C_p	C_a	C (8) MEuro	R (1)	R_{st} (1)
6°	1	0,92	0,74	0,68	0,32	16	2	3	0,5	21,5	6,88	3,89
4°	1	0,95	0,74	0,70	0,30	12	1	20	0,5	33,5	10,05	5,67

Rizik od otkaza stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta na površinskom kopu Tamnava-Zapadno Polje za uglove nagiba od 6 i 4 stepena su $R6^\circ = 6,88$ i $R4^\circ = 10,05$. Jasno se može zaključiti da je opcija izbora ugla nagiba od 6 stepeni povoljnija sa znatno manjim rizikom u odnosu na opciju nagiba od 4 stepena.

Izvršena je ekonomska analiza troškova posledica otkaza generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Tamnava-Zapadno Polje po varijantama uglova nagiba na osnovu procene sadašnje vrednosti i neto sadašnje vrednosti, uzimajući u obzir troškove prikazane u Tabeli 6. Usvajena interna stopa povraćaja je $r = 10\%$ dok je vreme do pojave otkaza $n = 6$ godina za PV i C_s analizu. Za NPV analizu su dodati godišnji tekući troškovi odvodnjavanja od 1 MEuro za nagib kosine od 4 stepena i uvećani preventivno 100% na 2 MEuro u varijanti sa uglom nagiba od 6 stepeni zbog smanjenja pornog pritiska sa 0.5 na 0.3. Rezultati proračuna dati su u Tabeli 3.

Tabela 3. Sadašnja i neto sadašnja vrednost troškova za period od 6 godina

Nagib kosine odlagališta	4°	6°
$PV(\text{€}) - PV = C/(1+r)^n$	-18.91	-12.15
$C_s(\text{€}) - C_s = C/(1+r)^n$	-59.30	-38.06
$NPV(\text{€}) - NPV = \sum_{t=0}^n C/(1+r)^t$	-23.27	-20.85

Iz Tabele 3 se može jasno zaključiti da je, sa aspekta sadašnje vrednosti kao i neto sadašnje vrednosti, povoljniji izbor opcije sa uglom nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta od 6 stepeni.

U odnosu na rizik otkaza stabilnosti generalne kosine unutrašnjeg odlagališta za ugao nagiba od 4°, rizik za kosinu od 6° je umanjeno za 32% za klasični proračun ($R6^0$ i $R4^0$), kao i za vrednosti PV analize ($Rr6^0$ i $Rr4^0$) (Tabela 2). Akumulirana vrednosti sadašnjih troškova posledica PV posle šest godina C_s za $PV4^0$ je uvećana za 21 MEuro u odnosu na $PV6^0$ (Tabela 3). Jasno je da je opcija formiranja generalne kosine unutrašnjeg odlagališta od 6° sa svih aspekata najprihvatljivija. Takođe, i analiza NPV , sa učešćem godišnjih neophodnih troškova odvodnjavanja za obezbeđenje stabilnosti, pokazuje jasnu prednost varijante sa uglom nagiba od 6° sa ukupnim iznosom NPV u šestogodišnjem periodu manjim za preko 2 MEuro u odnosu na varijantu ugla nagiba kosine odlagališta od 4° (Tabela 3).

Uočljivo je da najveći uticaj na promenu ukupne verovatnoće stabilnosti odlagališta softverski proračunata verovatnoća otkaza stabilnosti, imajući u vidu da su razlike u verovatnoćama druge dva uticajna faktora relativno male ili ih uopšte nema, tako da je neophodno posebnu pažnju usmeriti na što tačnije procene ulaznih geomehaničkih parametara i stalna dodatna istraživanja radne sredine u vremenu i prostoru.

4. Zaključak

Tekuće klimatske promene praćene obilnim padavinama i poplavama površinskih kopova dovode do znatnog pogoršanja geomehaničkih karakteristika, posebno kada su u pitanju materijali otkrivke unutrašnjih odlagališta. Ovo uslovljava određene promene pristupu proračuna dozvoljenih vrednosti uticajnih faktora obuhvaćenih u obrađenom primeru, kao što su faktor sigurnosti, stepen zavodnjivosti, povratni period ekstremnih vremenskih pojava i funkcionisanje sistema odvodnjavanja. Na primeru površinskog kopa Tamnava-Zapadno Polje je pokazana mogućnost primene modela verovatnoća sa kvantitativnim pristupom za optimizaciju ugla nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta u funkciji rizika. Ovi rizici su dobijeni na osnovu proizvoda ukupne verovatnoće otkaza stabilnosti dobijene na osnovu verovatnoća otkaza zavisno povezanih uticajnih elemenata i ozbiljnih posledica otkaza stabilnosti odlagališta. Analizu prati i dodatna ekonomska vremenska analiza za realnu procenu troškova sanacije i tehničko-tehnološke rehabilitacije unutrašnjeg odlagališta. Praktične analize su pokazale da je za proračune rizika od izuzetne važnosti vršiti stalna geomehanička istraživanja i monitoring odlagališta za verifikaciju ulaznih parametara za proračun faktora sigurnosti, kao i što precizniju kontinualnu procenu posledica. Na ovaj način se obezbeđuje sigurno funkcionisanje unutrašnjeg odlagališta i pouzdan rad površinskog kopa Tamnava-Zapadno Polje i u promenjenim klimatskim uslovima.

Literatura

- [1] Cox D. R. & Miller H. D. (1998): The Theory of Stochastic Processes, Chapman and Hall,

London

- [2] Jean-Alain Fleurisson (2011): Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach, 1st International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry [SYMPHOS 2011], Procedia Engineering 46 (2012)
- [3] Masaru Morita (2014): Flood Risk Impact Factor for Comparatively Evaluating the Main Causes that Contribute to Flood Risk in Urban Drainage Areas, Water 2014
- [4] Narendranathan S. and others (2021): A case study - from operation to closure, transient slope supplementation measures for the northern batters of the Hazelwood mine, using the MGR1 approach, Mine Closure 2021 - AB Fourie, M Tibbett & A Sharkau (eds), ISBN 978-9919-25-266-3
- [5] Ozga-Zielinski B., Adamowski J. and Ciupak M. (2018): Applying the Theory of Reliability to the Assessment of Hazard, Risk and Safety in Hydrologic System: A Case Study in the Upper Sola River Catchment. Water, 10 (723)
- [6] Pavlovic N., Petrovic B., Subaranovic T., Jakovljevic I. (2022): Internal Damp Slope Stability Risk Assessment on Opencast Coal Mine Tamnava-West, X International Geomechanics Conference, Varna
- [7] Pavlovic N., Ignjatovic D., Pavlovic V. (2019): Assessment of social and environmental risks on open cast coal mines, Int. J. Mining and Mineral Engineering, Vol. 10, Nos. 2/3/4, 2019 271, Inderscience Enterprises Ltd.
- [8] Pavlovic V. (1998): Continuous Mining Reliability, Ellis Horwood Limited, Chichester
- [9] Pavlovic V., Ignjatovic D., Subaranovic T. (2016): Implementation of the rehabilitation operational strategy for the flooded opencast coal mine Tamnava-West Field, IMWA2016, Leipzig
- [10] Pavlović V., Ignjatovic D., Šubaranović T. (2017): Reliability and risks of mining projects realization, 8th International Conference COAL2017, Zlatibor
- [11] Pavlović V., Subaranovic T. (2012): Opencast mining dewatering systems reliability, optimization and management, Monograph (in Serbian), ISBN: 978-86-7352-240-1, COBISS.SR-ID 192077836, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Belgrade
- [12] Todinov M. T. (2006): Risk-Based Reliability Analysis and Generic Principles for Risk Reduction, Elsevier Science & Technology Books
- [13] Wolstenholme L. C. (1999): Reliability Modelling, Chapman and Hall, London