Usporedba proračuna stabilnosti kosina 2D metodama granične ravnoteže na primjeru eksploatacijskog polja šljunka

Krmek, Toni

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:450674

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

USPOREDBA PRORAČUNA STABILNOSTI KOSINA 2D METODAMA GRANIČNE RAVNOTEŽE NA PRIMJERU EKSPLOATACIJSKOG POLJA ŠLJUNKA

Diplomski rad

Toni Krmek

R164

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet Diplomski rad

USPOREDBA PRORAČUNA STABILNOSTI KOSINA 2D METODAMA GRANIČNE RAVNOTEŽE NA PRIMJERU EKSPLOATACIJSKOG POLJA ŠLJUNKA

Toni Krmek

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Stabilnost kosina predstavlja jedan od većih izazova u rudarstvu i geotehnici. Razvojem znanosti i računala razvijene su i brojne metode i načini proračuna stabilnosti kosina. Različite metode i načini proračuna često imaju za posljedicu i različite faktore sigurnosti za kosinu uz pretpostavku istih parametara tla i geometrijskih uvjeta. Cilj istraživanja bio je usporediti faktore sigurnosti radnih i završnih kosina koristeći tri različite metode, dvije računalne, te jednu tabličnu. Korištene metode su pojednostavljena Bishopova metoda korištena pri računalnoj i tabličnoj obradi podataka, te Morgenstern-Priceova metoda. Za računalnu obradu podataka korišten je program GeoStudio, Student licence koji na jednostavan i efektivan način omogućuje izračunavanje željenih faktora sigurnosti služeći se prethodno unesenim veličinama. Tablična obrada podataka provedena je u MS Excelu. Rezultati analiza ukazuju da postoje manje razlike u dobivenim faktorima sigurnosti, međutim ove razlike ne bi trebalo bitno utjecati na stabilnost kosina obzirom na primjenu faktora sigurnosti.

Ključne riječi: Bishopova metoda, Morgenstern Priceova metoda, metode granične ravnoteže, stabilnost kosina

Završni rad sadrži: 53 stranice, 8 tablica, 53 slike i 8 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Pomagao pri izradi: Dr. sc. Helena Vučenović

Ocjenjivači: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF
Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF

Datum obrane: 06.09.2019, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

COMPARISON OF THE ESTIMATED SLOPE STABILITY USING 2D LIMIT EQUILIBRIUM METHODS ON THE EXAMPLE OF EXPLOITATION FIELD OF GRAVEL

Toni Krmek

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Slope stability represents one of the major challenges in mining and geotechnics. With the development of science and computers, numerous methods and ways of calculating the stability of the slopes have been developed. Different methods and estimations often result in different safety factors for the slope with the assumption of the same parameters of soil and geometric conditions. The aim of the research was to compare the safety factors of working and finishing slopes using three different methods, two computer and one tabular. The methods used are the simplified Bishop method used in computing and data processing and the Morgenstern-Price method. For computer data processing, the GeoStudio Student License Program has been used, which in a simple and effective way allows to calculate the desired security factors by using previously entered values. Tabular data processing was performed using MS Excel. The results of the analysis indicate that there are minor differences in the safety factors obtained, however, these differences should not significantly affect the stability of the slope with regard to the application of safety factors.

Keywords: Bishop´s method, Morgenstern Price method, limit equilibrium methods, slope stability

Thesis contains: 53 pages, 8 tables, 53 figures and 8 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor

Tech. assistance: PhD Helena Vučenović

Reviewers: PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
PhD Želimir Veinović, Assistant Professor
PhD Mario Klanfar, Assistant Professor

Defence date: September, 06, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

1. SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. OPIS LEŽIŠTA 2
2.1 Zemljopisni položaj 2
2.2. Geološko-tektonske osobine ležišta 3
2.3. Osobine mineralne sirovine 5
2.4. Geometrijske karakteristike radne i završne kosine 7

3. METODE GRANIČNE RAVNOTEŽE 9

3.1 Kritična klizna ploha 10
3.2 2D Metoda granične ravnoteže 10
3.3 Varijante metode granične ravnoteže 11
3.4 Pojednostavljena Bishopova metoda 12
3.5 Metoda Morgensterna i Pricea 15

4. RAČUNALNI OBLIK BISHOPOVE POJEDNOSTAVLJENE METODE 19

5. ODREĐIVANJE FAKTORA SIGURNOSTI 23

5.1 Radna kosina sa šljunkovitim materijalom 24
5.2 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline 26
5.3 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom 28
5.4 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline 30
5.5 Interpretacija rezultata 33

6. RAČUNALNI OBLIK MORGENSTERN-PRICEOVE METODE 34

6.1 Radna kosina sa šljunkovitim materijalom 34
6.2 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline 37
6.3 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom 39
6.4 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline 41
6.5 Usporedba MP i pojednostavljene Bishopove metode 43

7. TABLIČNA METODA 44
7.1 Tablični izračun radne kosine sa šljunkovitim materijalom 45
7.2 Tablični izračun radne kosine s proslojkom gline 46
7.3 Tablični izračun završne kosine s proslojkom gline 47
7.4 Tablični itačun završne kosine sa šljunkovitim materijalom 49

8. USPOREDBA REZULTATA 51

9. ZAKLJUČAK 52

10. LITERATURA 53

2. POPIS SLIKA

Slika 2-1 Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja Hrastovljan 2
Slika 2-2 Geološka karta eksploatacijskog polja 4
Slika 2-3 Krivulja granulometrijskog sastava s prikazanom granicom šljunka 7
Slika 2-4 Prikaz planirane radne kosine 8
Slika 2-5 Prikaz planirane završne kosine 8
Slika 3-1 Prikaz lamela 9
Slika 3-2 Prikaz mogućih kliznih ploha 10
Slika 3-3 Klizna ploha i sile koje djeluju na lamelu 13
Slika 3-4 Metoda Morgensterna i Pricea 16
Slika 3-5 Polusinusne funkcije 17
Slika 4-1 Ulazni parametri Bishopove metode 19
Slika 4-2 Određivanje karakteristika slojeva 20
Slika 4-3 Raspodjela pornih tlakova na kosini 21
Slika 4-4 Prikaz rezultata iteracijskog postupka 21
Slika 4-5 Prikaz zona sloma 22
Slika 5-1 Prikaz sila na lamelu korištenjem pojednostavljene Bishopove metode 24
Slika 5-2 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine sa šljunkovitim materijalom 25
Slika 5-3 Posmična čvrstoća duž klizne plohe 25
Slika 5-4 Posmično naprezanje duž klizne plohe 26
Slika 5-5 Tlak vode na osnovicama lamela 26
Slika 5-6 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine sa šljunkovitim materijalom 27
Slika 5-7 Posmična čvrstoća duž klizne plohe 27
Slika 5-8 Posmično naprezanje duž klizne plohe 28
Slika 5-9 Porni tlakovi na osnovicama lamela 28
Slika 5-10 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine s proslojkom gline 29
Slika 5-11 Posmična čvrstoća duž klizne plohe 29
Slika 5-12 Posmično naprezanje duž klizne plohe 30
Slika 5-13 Porni tlak na osnovicama lamela 30
Slika 5-14 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine s proslojkom gline 31
Slika 5-15 Posmična čvrstoća duž klizne plohe 31
Slika 5-16 Posmično naprezanje duž klizne plohe 32
Slika 5-17 Porni tlak na osnovicama lamela 32
Slika 6-1 Prikaz sila na lamelu korištenjem MP metode 34
Slika 6-2 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine šljunkovitog materijala MP metodom 35
Slika 6-3 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom 35
Slika 6-4 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom 36
Slika 6-5 Porni tlak na osnovicama lamela dobiven MP metodom 36
Slika 6-6 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine šljunkovitog materijala MP metodom 37
Slika 6-7 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom 37
Slika 6-8 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom 38
Slika 6-9 Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela dobiven MP metodom 38
Slika 6-10 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine s proslojkom gline MP metodom 39
Slika 6-11 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom 39
Slika 6-12 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom 40
Slika 6-13 Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela dobiven MP metodom 40
Slika 6-14 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine s proslojkom gline MP metodom 41
Slika 6-15 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom 41
Slika 6-16 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom 42
Slika 6-17 Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela dobiven MP metodom 42
Slika 7-1 Profil radne kosine sa šljunkovitim materijalom 45
Slika 7-2 Profil radne kosine s proslojkom gline 46
Slika 7-3 Profil završne kosine s proslojkom gline 48

Slika 7-4 Profil završne kosine sa šljunkovitim materijalom 49

3. POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Rezultati petrografske analize po frakcijama 5
Tablica 2-2 Rezultati laboratorijskih ispitivanja 6
Tablica 3-1 Opis metoda granične ravnoteže 12
Tablica 7-1 Iterativni postupak za nagib radne kosine sa šljunkovitim materijalom 45
Tablica 7-2 Iterativni postupak za nagib radne kosine s proslojkom gline 47
Tablica 7-3 Iterativni postupak za nagib završne kosine s proslojkom gline 48
Tablica 7-4 Iterativni postupak za nagib završne kosine sa šljunkovitim materijalom 50
Tablica 8-1 Usporedba rezultata analiza stabilnosti kosina 51

4. POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	duljina
ρ	kg/m^3	gustoća
m	kg	masa
γ	t/m^3	obujmna masa materijala
G	N	težina
P	N/m^2	tlak
M	Nm	moment sile
c	Pa	kohezija

1. UVOD

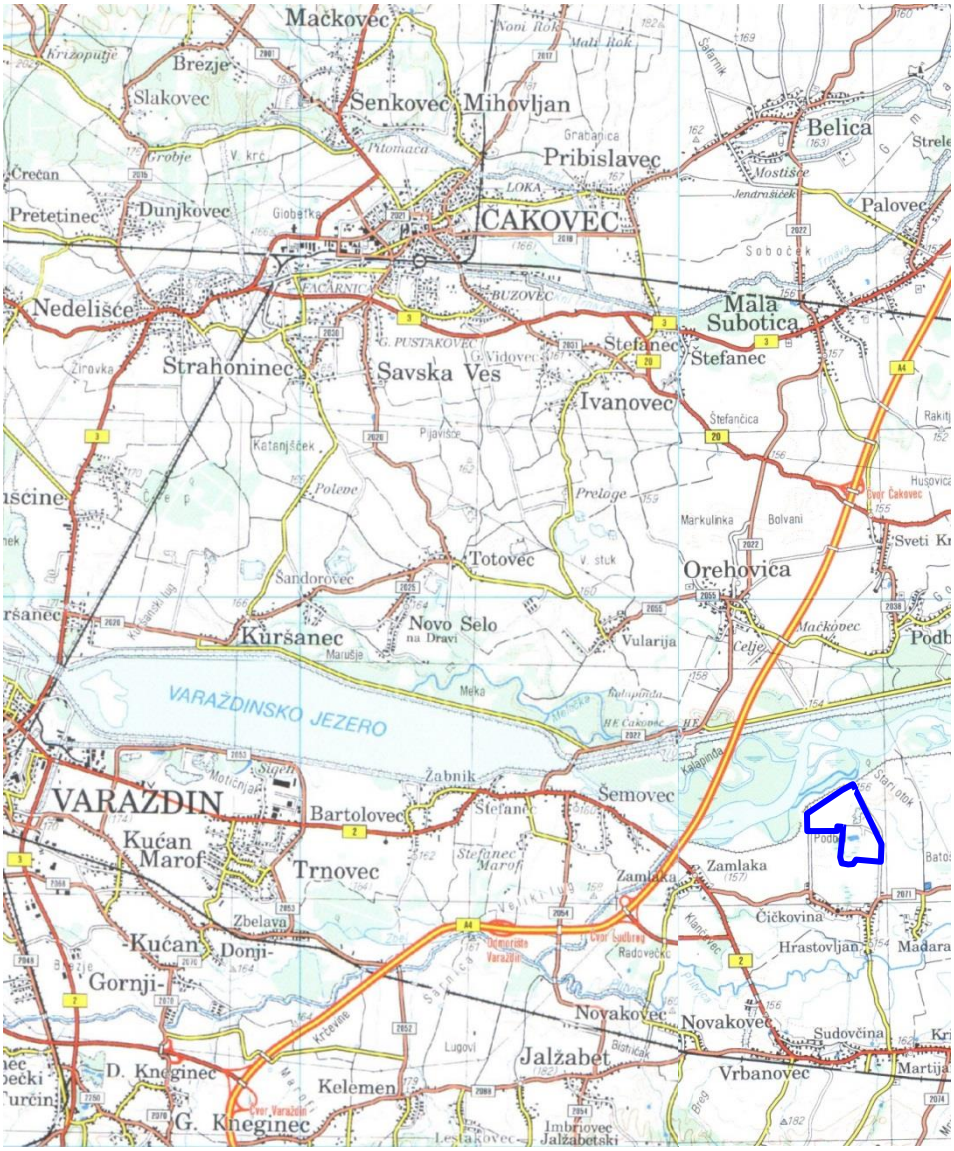
U zadnjih par desetljeća veliki napori su utrošeni u području analize stabilnosti i deformacije kosina, uglavnom zahvaljujući široko rasprostranjenoj upotrebi i dostupnosti računala došlo je do promjena u metodama pristupa poznatim problemima. Metode stabilnosti kosina se razlikuju u teorijskoj pozadini koja stoji iza svake metode, što dovodi do određene razlike između dobivenih rezultata vezanih za faktore sigurnosti. Trenutno, niti jedna metoda nema prednost nad drugima, te stoga rudarski inženjer ima potpunu slobodu u odabiru odgovarajuće metode (U.S. Army Corps of Engineers, 2003)

U ovome diplomskom radu usporedit će se tri načina proračuna kosina potencijalne eksploatacije šljunka: dva računalna načina temeljena na pojednostavljenoj Bishopovoj metodi i metodi Morgenstern-Pricea, te tablični način, temeljen na pojednostavljenoj Bishopovoj metodi. Potencijalne završne kosine, zajedno s radnima za koje će se provoditi istraživanje nalaze se u istražnom području „*Hrastovljan"* u Varaždinskoj županiji. Potencijalne su jer još nije došlo do faze eksploatacije, tj. konstruiranja završnih kosina. Kao rezultat prikazat će se na različiti način dobiveni faktori sigurnosti te njihova analiza i usporedba.

2. OPIS LEŽIŠTA

2.1 Zemljopisni položaj

Eksploatacijsko polje Hrastovljan je eksploatacijsko polje šljunka i pijeska koje se nalazi u Varaždinskoj županiji, u općini Martijenec. Definirajući pobliže, eksploatacijsko polje se nalazi uz desnu obalu rijeke Drave koja brzo pritječe iz viših krajeva, te koja je u prošlosti (prije hidroenergetskih zahvata) donosila velike količine šljunka i pijeska i na taj način formirala ovo ležište. Na slici 2-1 moguće je vidjeti zemljopisni položaj danoga polja označenoga plavom bojom.



Slika 2-1 Zemljopisni položaj eksploatacijskog polja Hrastovljan (Calx, 2016)

2.2 Geološko-tektonske osobine ležišta

Eksploatacijskim poljem Hrastovljan zahvaćen je samo manji dio ukupnih rezervi građevnog pijeska i šljunka prve dravske terase, koji izgrađuju šire područje. Geološka karta prostora prikazana je na slici 2-2.

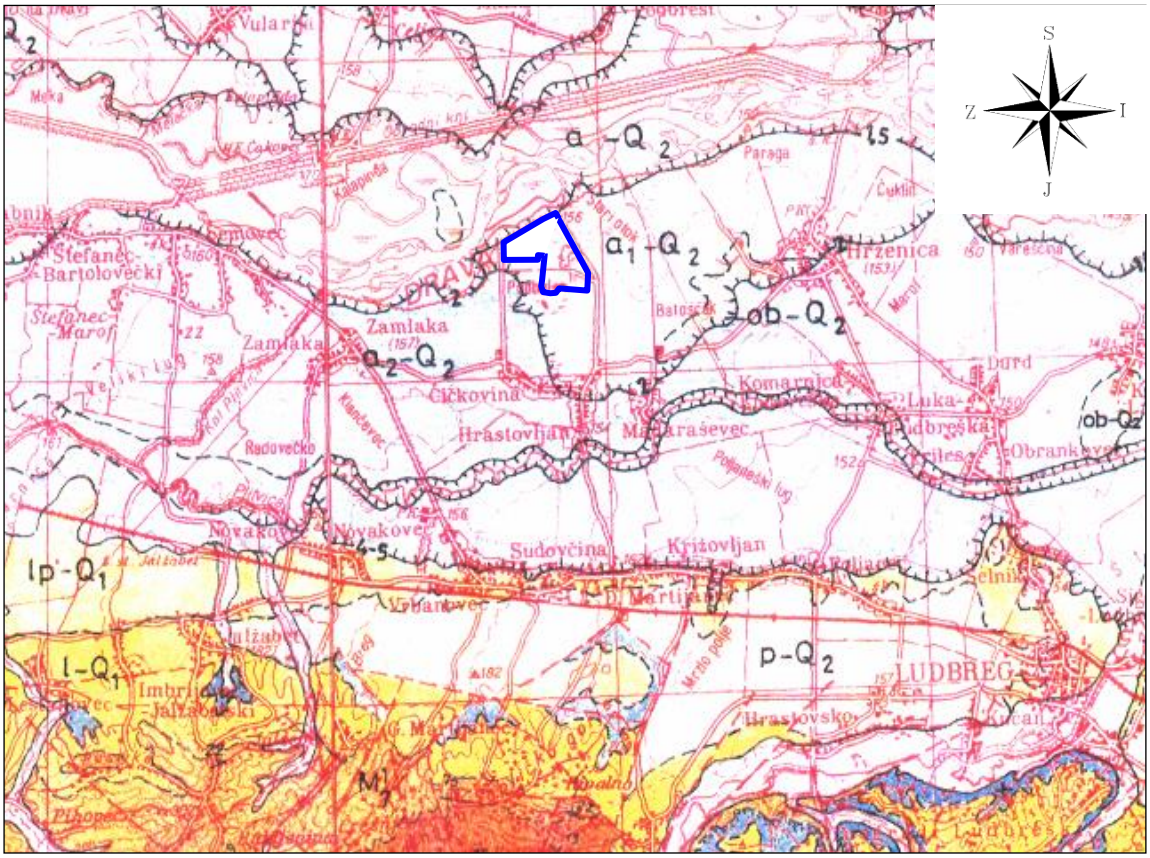
Postojeće naslage su nastale donošenjem i sedimentacijom materijala za vrijeme holocena iz izvora rijeke Drave, tj. iz Alpskog područja. Izgrađuju ih nevezane stijene aluvijalnog porijekla, a zastupljene su pijescima i šljuncima. Najveća dubina ovoga materijala u ležištu iznosi 148 m (Calx, 2016). Istražnim bušotinama, unutar polja, nije uočeno postojanje podine do dubine od 60 m, do te dubine do koje se vrši eksploatacija.

Ležište je homogene građe, sastojeći se od sitnozrnatog do srednjezrnatog šljunka sa značajnim udjelom pjeskovite komponente. Generalno, šljunak gornjih horizonata je uglavnom krupnozrnatiji, dok se udio sitnozrnatoga povećava s dubinom. Pijesak i šljunak su silikatnog sastava, a prevladavaju zrna kvarca i kvarcita (cca 56-74%). Također, iako je ležište „više-manje“ homogeno, u krovini pjeskovito-šljunkovitog horizonta nalazi se sloj glinovitog praha (humusa) debljine do 0,80 m ispod kojeg slijedi sloj vrlo prašinastog pijeska (SFs) debljine do 3,00 metra (Calx, 2016).

Šljunak je slabo graduiran, sadrži do 39% ukupne mase pijeska i praha. Među takvim materijalom i česticama vrijednost kohezije je mala pa na stabilnost kosina primarno utječe zbijenost i trenje među česticama.

Osim postojanja glinene komponente, istražnim radovima uočeno je postojanje podzemnih voda čiji je nivo registriran na dubini od 3,8-4,6 m od površine terena. Još jedna bitna stavka je što duž ležišta nije zabilježeno postojanje rasjeda (Calx, 2016).

Pošto se proslojci gline ne protežu kroz cijelo ležište, analize i metode upotrjebljene u ovome radu će se odnositi na dva slučaja, tj. na kosine koje sadrže samo šljunkovito-pijeskoviti materijal i na kosine koje sadrže šljunkovito-pijeskoviti materijal s proslojkom gline.



LEGENDA:

ob-Q_2	Organsko-barski sedimenti: pijesak i glina pomiješani s ostacima bilja
p-Q_2	Eolski sedimenti: pijesak i silt
a-Q_2	Aluvij rijeka i potoka: šljunak i pijesak
a_1-Q_2	Sedimenti prve dravske terase: šljunak i pijesak
a_2-Q_2	Sedimenti druge dravske terase: šljunak i pijesak
lp-Q_1	Lesoidni sedimenti na trećoj dravskoj terasi: pijesak, silt i glina
l-Q_1	Les: pjeskoviti i glinoviti silt
M^1_7	Donji pont: izmjena glinovitog lapora i pijeska

Slika 2-2 Geološka karta eksploatacijskog polja, M1: 100 000 (Calx, 2016)

2.3 Osobine mineralne sirovine

Istraživanje ležišta je provedeno bušenjem istražnih bušotina i jezgrovanjem, te analizom jezgri. Na temelju petrografske analize, dobiveni su podaci vidljivi u tablici 2-1.

Tablica 2-1 Rezultati petrografske analize po frakcijama (IGH, 2016)

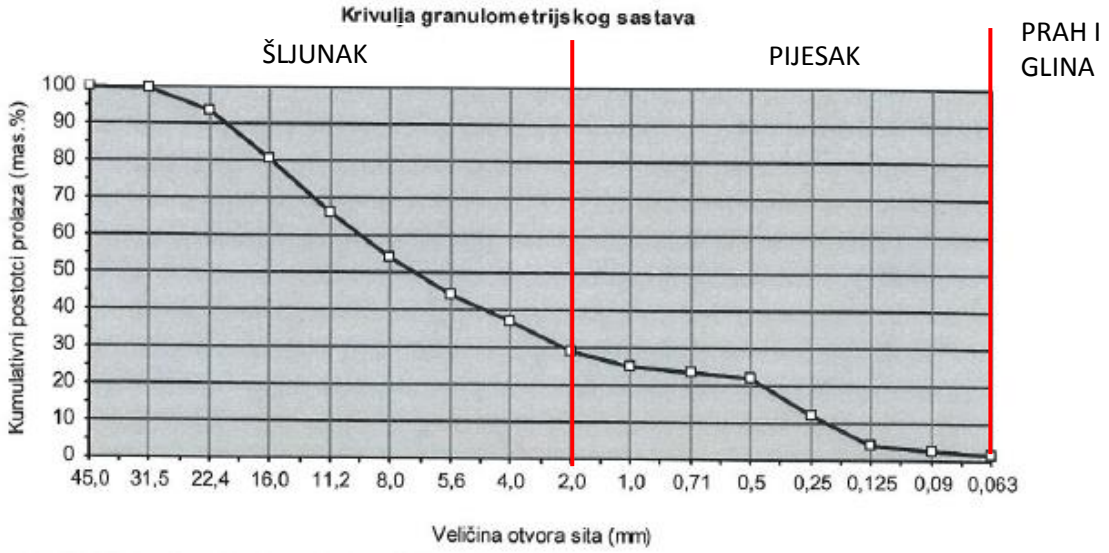
Naziv stijene ili minerala	**UDIO POJEDINIH MINERALOŠKO-PETROGRAFSKIH SASTOJAKA PO FRAKCIJAMA**			
	0,125/0,25	0,25/0,5	0,50/1	4/32
	Magmatske stijene			
efuziv				
intruziv				
	Sedimentne stijene			
čert	1	1,9	4,5	2,8
pješčenjak			1,8	14,2
slitit				2,8
vapnenac	7,7		2,7	5,7
	Metamorfne stijene			
kvarcit	22,1	44,7	62,7	62,3
škriljavac	1,9	6,8	10	9,4
	Minerali			
amfibol	4,8			
feldspat	9,6	9,7	6,4	
granat	8,7	1,9		
kvarcit	37,5	29,1	7,3	
opaki minerali	2,9			
tinjci	2,9	3,9	0,9	
UKUPNO	**100**	**100**	**100**	**100**

Također, pranjem i prosijavanjem uzoraka dobivenih iz jezgre istražnih bušotina definiran je geometrijski sastav i sadržaj čestica iz kojega je vidljivo da u ukupnoj granulometrijskoj krivulji prevladava sitno do srednjezrnati šljunak (krupnoće od 2,0 mm do 22,4 mm) koji čini 70% ukupne mase materijala. Slika 2-3 grafički prikazuje rezultate ispitivanja iz koje su lako uočljivi već navedeni podaci. Slika prikazuje podatke dobivene iz jedne bušotine, ali je primjenjiva, uzimajući u obzir već navedenu homogenost polja.

Na uzorcima je proveden niz ostalih ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava, mineraloško-petrografskog i kemijskog sastava uzoraka jezgre istražnih bušotina čiji su rezultati prikazani u tablici 2-2.

Tablica 2-2 Rezultati laboratorijskih kompozitnih ispitivanja (Calx, 2016)

VRSTA ISPITIVANJA		**Oznaka istražne bušotine**		
		Bo 1/15	**Bo 2/15**	**Bo 3/15**
Sadržaj sitnih čestica (<0,063 mm) (mas. %)		1,5	1,4	1,5
Prividna gustoća (Mg/m^3)		2,65-2,66	2,65-2,66	2,66-2,67
Gustoća osušenih zrna (Mg/m^3)		2,61	2,61	2,61-2,62
Gustoća zasićenih, površinski suhih zrna (Mg/m^3)		2,63	2,63	2,63
Upijanje vode (mas.%)		0,7	0,6-0,8	0,6-0,8
Sadržaj ukupnog sumpora (mas. %)		0,0	0,0	0,0
Sulfati topivi u kiselini (AS, %)		0,1	0,0	0,0
Oblik zrna – Indeks oblika (SI, %)		12	17	14
Određivanje otpornosti na zamrzavanje i odmrzavanje (gubitak mase nakon zamrzavanja F, %)	**2-4**	-	-	-
	4-8	0,2	0,5	0,3
	8-16	-	-	-
	16-31,5	-	-	-
Otpornost na drobljenje metodom „Los Angeles“ (koeficijent LA)	**„B“**	31	31	31
	„C“			
	„D“			
Otpornost protiv drobljenja agregata za beton (%)		16,8	16,1	17,5
Obavijenost s bitumenom		100%	100%	100%
Sadržaj muljevitih čestica (sito, mm, mas.%)	**0,02**	-	-	-
	0,063	-	-	-
	0,09	-	-	-
Udio trošnih zrna (mas.%)		0,0-4,4	0,0-12,5	2,0-13,1



Slika 2-3 Krivulja granulometrijskog sastava s prikazanom granicom vrste tla (Calx, 2016)

2.4 Geometrijske karakteristike radne i završne kosine

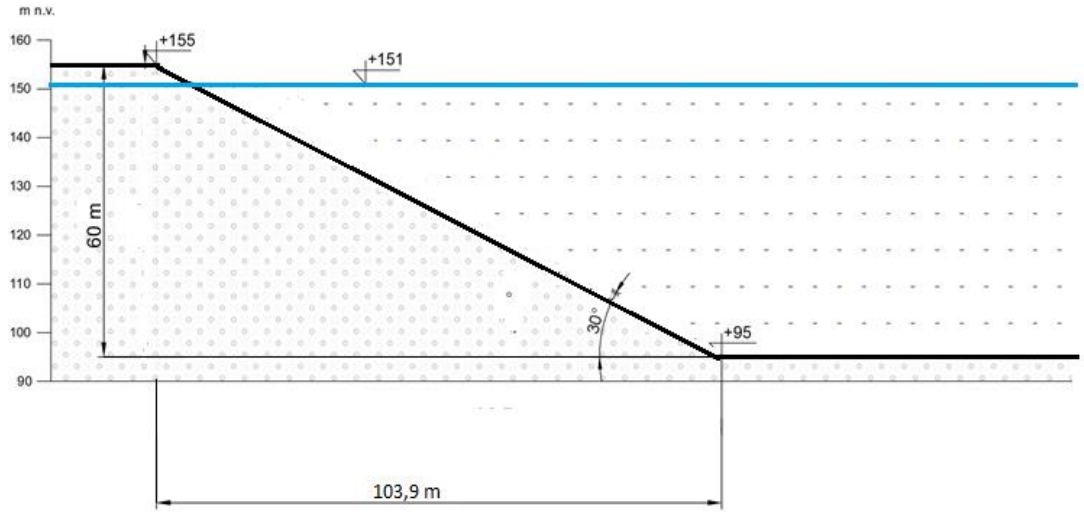
Radne kosine prema kojima će se orijentirati korištene metode, te koje se nalaze unutar promatranoga prostora imaju sljedeće parametre:

- kut nagiba radne kosine: 30°
- ukupna debljina pjeskovito-šljunkovitog sloja (od kote +95 do kote +155 m.n.v): 60 m
- ukupna širina radne kosine: X=103,9 m
- položaj razine podzemne vode: +151 m.n.v.

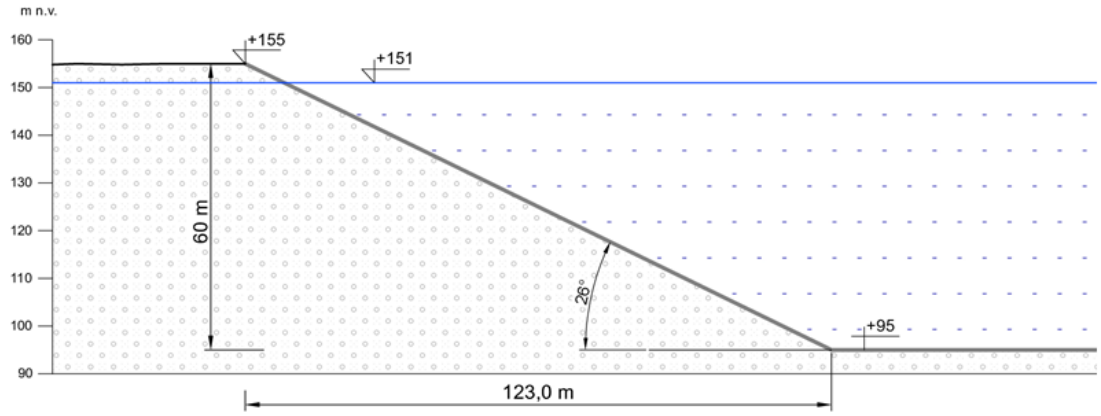
Slike 2-4 i 2-5 grafički prikazuju parametre i geometriju radne i završne kosine.

Promatrane završne kosine imaju sljedeće parametre:

- Kut nagiba kosine: 26°
- ukupna debljina pjeskovito-šljunkovitog sloja (od kote +95 do kote +155 m.n.v): 60 m
- ukupna širina radne kosine: X=123 m
- položaj razine podzemne vode: +151 m.n.v.



Slika 2-4 Prikaz planirane radne kosine (Calx, 2016)

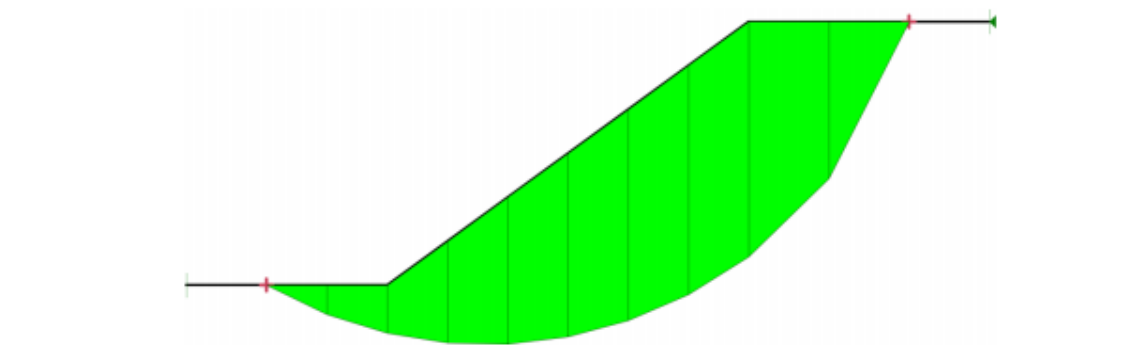


Slika 2-5 Prikaz planirane završne kosine (Calx, 2016)

3. METODE GRANIČNE RAVNOTEŽE

Teorijska pozadina metoda granične ravnoteže čini temelj analize provedene u ovome radu. Metode granične ravnoteže baziraju se na mehanici potpuno krutih tijela uz uvođenje više ili manje proizvoljnih pretpostavki kojima se uklanja statička neodređenost sustava (Albataineh, 2006). Služi za analiziranje stabilnosti stvarnog ili zamišljenoga kliznog tijela koje se nalazi u kontaktu s okolinom preko klizne plohe, pri čemu se klizno tijelo razdjeli na niz lamela na čijim se osnovicama računa veličina posmičnog i normalnog naprezanja kako bi se izračunalo ukupno naprezanje duž klizne plohe. Statička ravnoteža lamela postiže se zanemarivanjem djelovanja međulamelarnih sila kao i momenata. Također, krutost tla, tj. lamela se zanemaruje (Albataineh, 2006). Slika 3-1 prikazuje podjelu plohe na lamele.

Stabilnost pojedine lamele se utvrđuje omjerom efektivne posmične čvrstoće i efektivnog posmičnoga naprezanja duž klizne plohe, a predstavlja faktor sigurnosti F. Na kliznoj plohi nije došlo do sloma ako je F>1, dok slučaj F ≤1 predstavlja stanje sloma .



Slika 3-1 Prikaz lamela (Szavits-Nossan, 2015)

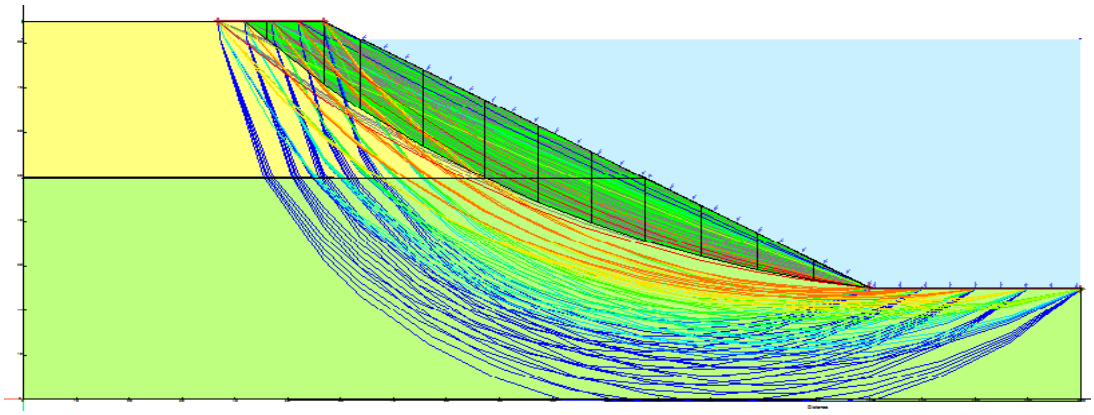
Bitna pretpostavka je pretpostavka o konstantnosti faktora sigurnosti, tj. faktor sigurnosti je jednak za svaku lamelu. U praksi ovo ne odgovara stvarnoj situaciji. Naime, slom tla događa se obično prvo lokalno u jednom elementu nakon čega dolazi do progresivnog sloma cijele klizne plohe (Juričić, 2017).

U slučaju kosina, potrebno je odrediti klizno tijelo s najmanjim faktorom sigurnosti, jer je jedino to tijelo mjerodavno za ocjenu stabilnosti cijele kosine, taj faktor predstavlja minimalni faktor sigurnosti koji kosina može imati, a klizna ploha takvoga kliznoga tijela se naziva *kritičnom kliznom plohom*. Metode granične ravnoteže, a time i Bishopova

pojednostavljena metoda služe, dakle, za pronalaženje kliznoga tijela s najmanjim faktorom sigurnosti.

3.1 Kritična klizna ploha

Teorijski gledano, za određivanje minimalnoga faktora sigurnosti potrebno je konstruirati beskonačan broj kliznih tijela, te za svako tijelo, metodom granične ravnoteže određivati faktor sigurnosti, te odabrati najmanji. Taj način podrazumijeva dobivanje beskonačnog broja faktora sigurnosti, što u praksi nema smisla. U stvarnosti se izabire konačan broj kliznih ploha koje najbolje opisuju moguće lomove u tlu. Danas se za to koriste komercijalni programi, koji taj proces uvelike olakšavaju i ubrzavaju. Na slici 3-2 prikazan je ograničeni broj potencijalnih kliznih ploha.



Slika 3-2 Prikaz mogućih kliznih ploha

3.2 2D metoda granične ravnoteže

Primjena 2D metode ovoga tipa je najraširenija način rješavanja geotehničkih zadataka zbog svoje jednostavnosti i opće prihvaćenosti. Više je korištena od 3D metoda koje, unatoč razvijenom stupnju računala i mogućnosti modeliranja, nisu u potpunosti prihvaćene. Kao i 3D metode, mogu se koristiti za sve oblike klizne plohe: i kružnog i nekružnog oblika.

Sve metode granične ravnoteže se smatraju točnima zbog mogućnosti generiranja relativno bliskog faktora sigurnosti. Kod 2D analiza, metoda Morgensterna i Pricea, kao i metoda

Spencera, omogućuju dobivanje bliskih rezultata za bilo koji oblik klizne plohe, no, Spencerova metoda se preferira jer metoda Morgensterna i Pricea zahtjeva odabir funkcije međulaminarnih sila (Reyes & Parra, 2014). Ostale metode, kao što je Bishopova i Janbuova metoda, također se mogu iskoristiti kod rutinskih analiza.

3.3 Metode granične ravnoteže

Metode granične ravnoteže moguće je podijeliti na više načina, od kojih su najrasprostranjenije podjele na temelju:

1. Različite metode koriste različite pretpostavke kako bi se izbalansirao broj nepoznanica i broj jednadžbi
2. Različite metode koriste različite pretpostavke vezane za orijentaciju međulaminarnih sila (Albataineh, 2006)

Danas najčešće korištene metode granične ravnoteže različite su: Felleniusova, Janbuova pojednostavljena, Bishopova pojednostavljena, Morgenstern-Priceaova (MP), te Spencerova metoda (tablica 3-1). Navedene metode različite su po karakteristikama i uvjetima statičke određenosti (Duncan, 1996).

Najveće ograničenje primjene metoda proizlazi iz oblika klizne plohe za koju se određena metoda može primijeniti. To se posebice odnosi na Felleniusovu i pojednostavljenu Bishopovu metodu koje se ograničavaju samo na kružni oblik klizne plohe, dok ostale metode podržavaju sve oblike koji se mogu pojaviti.

Također, neke metode uzimaju međudjelovanje laminarnih sila u oba smjera (vertikalnom i horizontalnom) što dodatno utječe na točnost rezultata. Primjer takve metode je MP metoda, korištena u ovome radu. Ta je metoda ujedno i jedina metoda za koju se proizvoljno zadava funkcija nagiba sile između lamela, dok kod svih ostalih metoda, ta je funkcija unaprijed zadana (Szavits-Nossan, 2015).

Kao što je navedeno i u početku ovoga poglavlja, metode se mogu podijeliti i na temelju statičke određenosti u x i y smjeru, pri čemu samo MP i Spencerova metoda predstavljaju statički određene sustave u oba smjera.

Tablica 3-1 Opis metoda granične ravnoteže (Szavits-Nossan, 2015)

Naziv varijante	Klizna ploha	Jednadžbe ravnoteže		Sile među lamelama		Funkcija nagiba sila među lamelama f(x)
		$\Sigma_x=0$	$\Sigma_m=0$	ΔX	ΔY	
Obična ili Felleniusova	kružna	Ne	Da	$= 0$	$= 0$	X=0 Y=0
Janbuova pojednostavljena	opća	Da	Ne	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Bishopova pojednostavljena	kružna	Ne	Da	$\neq 0$	$= 0$	$= 0$
Morgenstern – Priceova	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	zadaje korisnik
Spencerova	opća	Da	Da	$\neq 0$	$\neq 0$	$= 1$
*Napomena: $\Sigma_x=0 \rightarrow$ jednadžba ravnoteže u horizontalnom smjeu $\Sigma_m=0 \rightarrow$ jednadžba ravnoteže momenta sila						

3.4 Pojednostavljena Bishopova metoda

Pojednostavljena Bishopova metoda je najčešće korištena metoda od strane geotehničkih inženjera.

Metoda se temelji na nekoliko pretpostavki:

- Podrazumijeva se slom tla duž klizne plohe kružnoga oblika, te se ne može primijeniti za dobivanje faktora sigurnosti plohe drugoga oblika.
- Pretpostavlja se da su sile između lamela u y (vertikalnome) smjeru jednake 0, dok u x (horizontalnome) smjeru, sile između lamela postoje
- Ukupna normalna sila djeluje u središtu svake lamele, te se dobiva zbrajanjem sila koje djeluju u vertikalnome smjeru.

Za računanje faktora sigurnosti koristi se iteracijski postupak na način da se početni faktor sigurnosti proizvoljno zada, F_i (najčešće se kao početna vrijednost postavlja 1), te se pomoću njega dobiva izračunati faktor sigurnosti, F_{i-1}. Postupak se ponavlja sve dok razlika F_i-F_{i-1} ne postane dovoljno mala (maksimalna razlika definira se na početku procesa iteracije), gdje i označava redni broj iteracije.

Kao ulazni parametri metode koriste se:

- efektivni kut trenja materijala (φ, °),
- zapreminska težina materijala (γ, t/m^3),
- geometrijske značajke kosine,

- efektivna kohezija materijala (c, Pa).

Na slici 3-3 prikazan je skup sila koje se uzimaju u proračun prilikom primjene pojednostavljene Bishopove metode, te koje djeluju na lamelu kosine. Gdje je:

V – Težina,

H – horizontalna sila na lamelu, npr. sila potresa,

D – vanjsko opterećenje na lamelu

X_L – rezultanta normalnih naprezanja na lijevom boku lamele

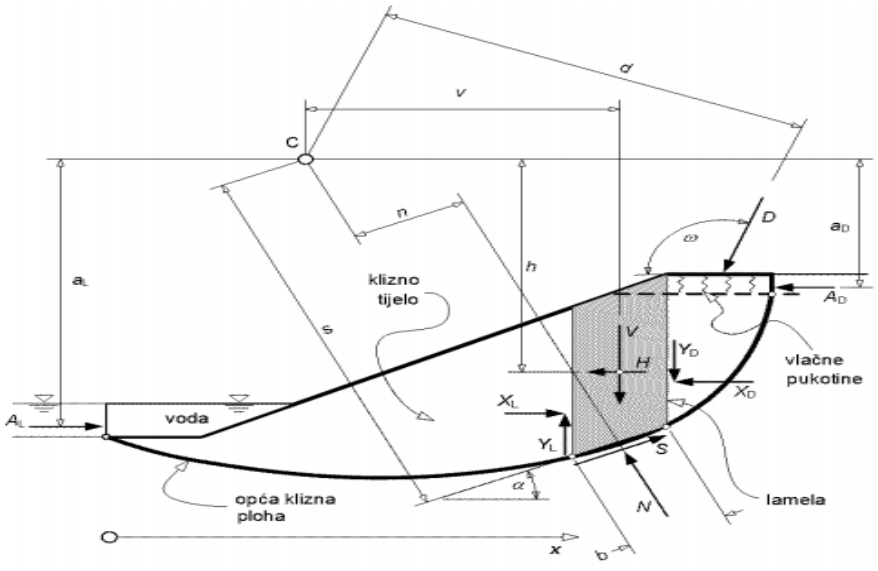
X_D – rezultanta normalnih naprezanja na desnom boku lamele

Y_L – rezultanta posmičnih naprezanja na lijevom boku lamele

Y_D – rezultanta posmičnih naprezanja na desnom boku lamele

S – rezultanta posmičnog naprezanja τ

N – rezultanta normalnog naprezanja σ.



Slika 3-3 Klizna ploha i sile koje djeluju na lamelu (Szavits-Nossan, 2015)

Rezultanta normalnog naprezanja je jednaka:

$$P = \frac{W - \frac{1}{F}(c`l * sin\alpha - ul * tan\theta' sin\alpha)}{m\alpha} \qquad 3\text{-}1$$

Pri čemu je:

$$m\alpha = cos\alpha + \frac{(sin\alpha * tan\theta')}{F} \qquad 3\text{-}2$$

Faktor sigurnosti je dobiven:

$$F = \frac{\sum\left[\frac{c'l*cos\alpha+(W-ul*cos\alpha*tan\theta}{cos\alpha+(sin\alpha*tan\theta')/F}\right]}{\sum W sin\alpha} \qquad 3\text{-}3$$

Ili

$$F = \frac{\Sigma\left[\frac{c'b+(W+Pcos\beta-ub)tan\varphi'}{m_\alpha}\right]}{\Sigma W sin\alpha - \frac{\Sigma M_p}{R}}, \qquad 3\text{-}4$$

Pri čemu je:

c' –kohezija, efektivna (za pijesak i šljunak c' = 0), Pa

φ' – kut unutrašnjeg trenja, efektivni, °

b – širina lamele (odsječka), m

W – težina lamele (odsječka), N

P – vanjska sila vode na površinu kosine

β – nagib lamele (odsječka) °

u – porni tlak vode, Pa

M_p – moment površinske vode, Nm

R – radijus kružnog loma, m.

3.5 Metoda Morgensterna i Pricea

Metoda Morgensterna i Pricea smatra se kao jedna od najdetaljnijih, a samim time i najtočnijih metoda prilikom proračunavanja stabilnosti kosina, te je uspješno implementirana u računalne programe kako bi se korisnicima omogućila jednostavna upotreba. Točnost ove metode se temelji na postojanosti sila između susjednih lamela i zadovoljava sve tri jednadžbe ravnoteže: jednadžbe sila u horizontalnome i vertikalnome smjeru, kao i jednadžbu ukupnoga momenta sile, te na taj način najrealnije opisuje stvarno stanje (Duncan & Wright, 2005).

Faktor sigurnosti se određuje na isti način kao i kod Bishopove pojednostavljene metode, iteracijskim postupkom.

Moguća je primjena metode za klizne plohe bilo kakvoga oblika, za razliku od pojednostavljene Bishopove metode koja se ograničava samo na klizne plohe kružnoga oblika.

Metoda uzima u obzir ne samo normalno i posmično stanje naprezanja, nego i moment sile, posebno za svaku lamelu u bilo kojoj kliznoj plohi. Povezanost između međulamelarne sile smicanja (X) i normalne sile (E) koja djeluje među lamelama može se opisati izrazom:

$$X = \lambda * f(x) * E, \qquad 3\text{-}5$$

gdje je

f(x) funkcija koja varira duž lamele i utječe na nagib međulamelarnih sila, a λ predstavlja nepoznati faktor skaliranja koji je potrebno izračunati jer predstavlja nepoznanicu.

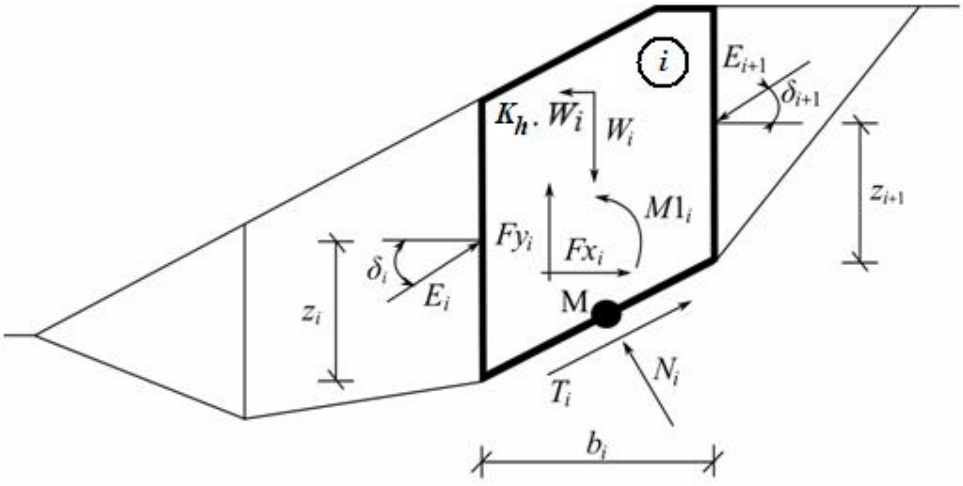
Nepoznanice koje je potrebno riješiti metodom Morgensterna i Pricea su: faktor sigurnosti (F), skalirajući faktor (λ), normalne sile koje djeluju na bazu lamele (P), horizontalne međulamelarne sile (E), te mjesto djelovanja tih sila. Tek kada su sve potrebne nepoznanice izračunate, moguće je izračunati međulamelarnu silu X.

Na slici 3-4 grafički su prikazani smjerovi i orijentacija djelovanja sila i momenta na plohu.

Kako bi se postigle sve tri jednadžbe ravnoteže, uvode se određene pretpostavke (Reyes & Parra, 2014):

1. Ravnine između lamela su uvijek vertikalne.

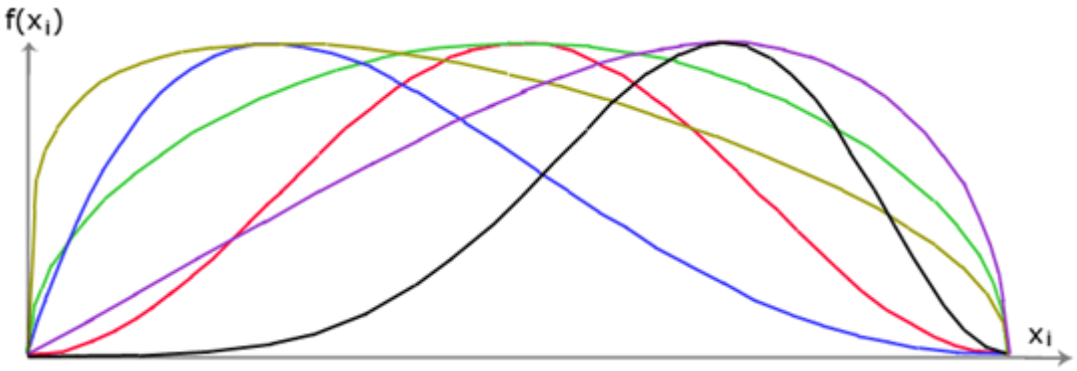
2. Orijentacija sile težine prolazi kroz centar pojedine lamele (M9+).
3. Normalna sila djeluje u točku centra iste lamele (M).
4. Međulamelarne sile (E) koje djeluju između lamela nemaju istu orijentaciju, odnosno nagib sile (δ_i) ovisi o položaju lamele u kružnom disku, primjerice nagib na krajnjim rubovima klizne plohe jednak 0.



Slika 3-4 Metoda Morgensterna i Pricea (Fine, 2007)

Wi - težina bloka
Kh*Wi - horizontalna sila inercije koja predstavlja djelovanje potresa
Kh - faktor horizontalne akceleracije tijekom potresa
Ni - normalna sila na kliznu plohu
Ti - sila smicanja na kliznu plohu
Ei, E_{i+1} - međulamilarne sile, ovise o kutu nagiba
Fxi, Fyi - ostale horizontalne i vertikalne sile koje djeluju na blok
M1 - moment sila Fx1 i Fx2 koje djeluju oko točke M koja predstavlja središte lamele
Ui - porni pritisak
Δ - nagib pod kojom djeluju sile između lamela.

Nagib kutova međulamelarnih sila Ei koje djeluju između lamela se odabire uz pomoć polusinusne funkcije f(x), prikazane na slici 3-5. Oblik funkcije nije bitan, tj. ne utječe na valjanost konačnog rezultata, ali točnijim izborom može se ubrzati proces konvergencije metode. Nagib sila koje djeluju između lamela dobiva se množenjem polusinusne funkcije f(x) s vrijednosti λ.



Slika 3-5 Polusinusne funkcije (Fine, 2007)

Primjenjujući prethodno navedene pretpostavke dolazi se do izraza pomoću kojega je moguće izračunati sve međulamelarne sile koje djeluju za sve moguće vrijednosti kutova δ_i i faktora sigurnosti SF.

$$, E_{i+1}= \frac{\lfloor (Wi-Fy)*cos\alpha i-(KkWi-Fxi)*sin\alpha-Ui+Eisin(\alpha i-\delta i)\rfloor \frac{tan\varphi i}{SF}+\frac{Ci}{SF}*\frac{bi}{COS\alpha i}-(Wi-Fyt)*sin\alpha i-(Kk*Wi-Fxi)*cos\alpha i+Eicos(\alpha i-\delta i)}{\sin(\alpha i-\delta i+1)\frac{tan\varphi i}{SF}+\cos(\alpha i-\delta i+1)} \quad 3\text{-}6$$

Određivanje faktora sigurnosti se provodi prateći iteracijski proces:

1. Početna vrijednost nagiba δ_i se određuje pomoću polusinusne funkcije ($\delta_i= \lambda*f(x_i)$).

2. Faktor sigurnost (FS) za dobivenu vrijednost δ_i se određuje pomoću gornje jednadžbe za E_{i+1}, pri čemu se pretpostavlja da je vrijednost $E_{i+1}=0$ na rubu klizne plohe.

3. Nova vrijednost δ (δ_i) se dobiva pomoću jednadžbe 3-6 koristeći veličine određene u koraku broj 1. Vrijednost veličine Z_{n+1} u jednadžbi je jednaka 0.

$$Z_{i+1}= \frac{\frac{bi}{2}*\lfloor Ei+1*(sin\delta i+1-cos\delta i+1*tan\alpha i)+Ei(sin\delta i-cos\delta i*tan\alpha i)\rfloor+Ei*Zi*cos\delta i-Mli+Kk*Wi(Ym-Ygi)}{Ei+1*cos\delta i+1} \quad 3\text{-}7$$

4. Koraci 2 i 3 se ponavljaju sve dok vrijednost razlike faktora sigurnosti između dva koraka ne bude zadovoljavajuće mala.

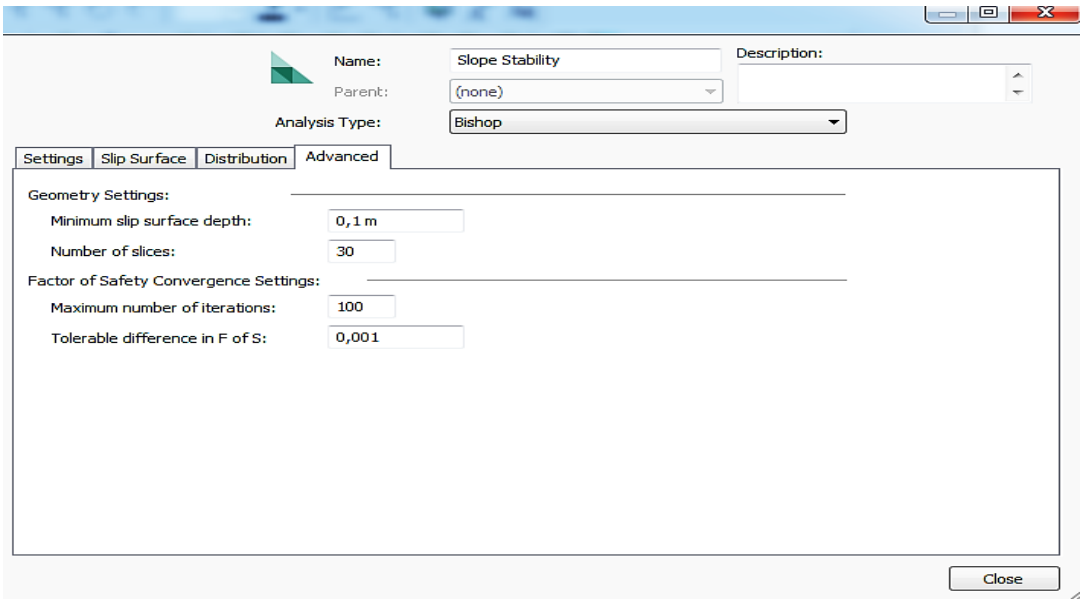
4. RAČUNALNI OBLIK BISHOPOVE POJEDNOSTAVLJENE METODE

Za razliku od ručnoga računanja faktora sigurnosti, primjena računalnih programa stabilnosti kosina nam omogućuje relativno brzo i precizno obrađivanje podataka i dobivanje rezultata primjenom metode granične ravnoteže .

Danas postoji veliki broj komercijalnih programa na tržištu primjenjiv za probleme vezane sa stabilnošću kosinama, te sam izbor programa ovisi o potrebama korisnika.

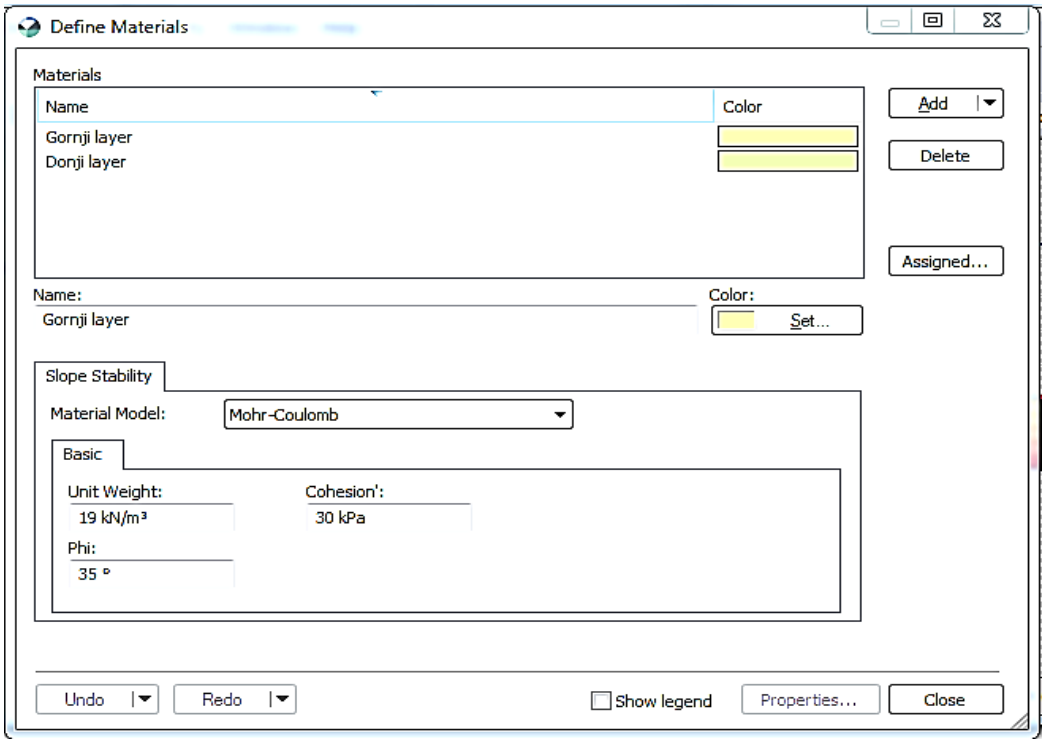
Također, postoje određena ograničenja programa, zbog nemogućnosti potpuno realne simulacije stvarnih uvjeta. Za razumijevanje je potrebno široko prethodno znanje o stabilnosti kosina. Na primjer, postojanje tvrdog kohezivnog gornjeg sloja ili postojanje donjega sloja velike gustoće može rezultirati kliznim površinama koje su skoro vertikalne orijentacije. U takvim slučajevima, rješavanje problema zahtjeva znanje inženjerske prakse i njezinu primjenu, pretpostavljanjem vlačnih pukotina na vrhu kosine kako bi se smanjio nagib klizne plohe.

U radu je za analize korišten program „*GeoStudio 2018, student license*“ pri čemu je prije početka definiranja geometrijskih karakteristika modela potrebno definirati ulazne parametre analize. U ulazne parametre analize svrstavaju se: minimalna dubina klizne plohe, broj lamela korišten u procesu, potreban broj ponavljanja iteracijskog postupka, te preciznost (razlika između faktora sigurnosti u dvije uzastopne iteracije). Navedeni parametri programa prikazani su na slici 4-1.



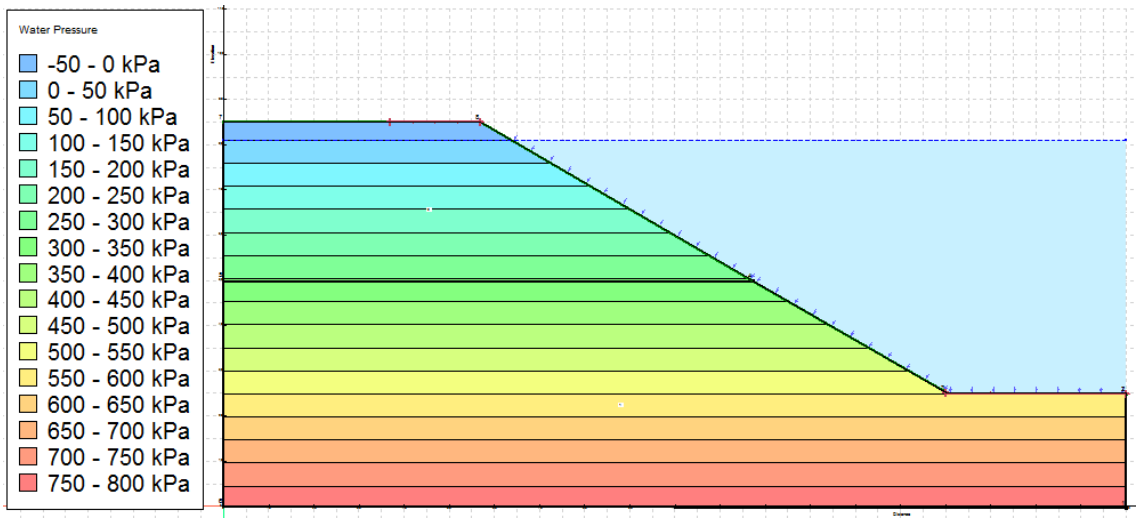
Slika 4-1 Ulazni parametri Bishopove metode

Nakon unošenja osnovnih parametara, program zahtjeva definiranje geometrijskih karakteristika modela: ucrtavanje kosine, kao i granice slojeva i liniju vodnog lica. Potrebno je definirati parametre slojeva pomoću tri veličine: volumna težina, kohezija i kut trenja i naznačiti koji se sloj gdje nalazi. Također, potrebno je odrediti da li sloj podliježe Mohr-Coulombovom zakonu čvrstoće ili sloj predstavlja temeljnu, ishodišnu stijenu. Slika 4-2 prikazuje postupak definiranja dodatnih veličina.



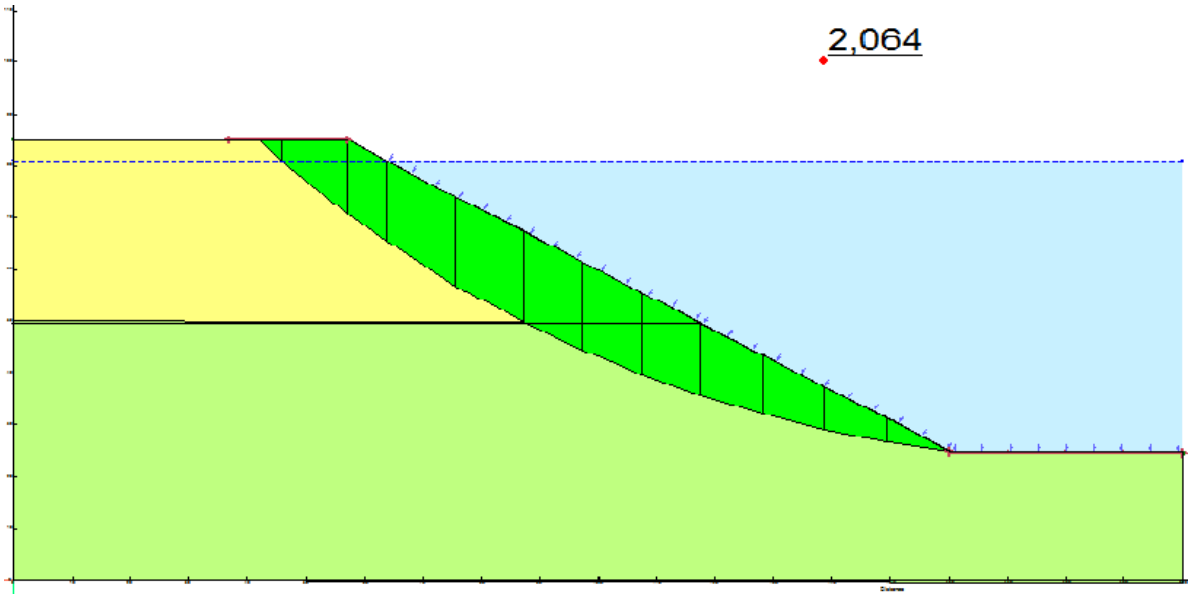
Slika 4-2 Određivanje karakteristika slojeva

Ovisno o ulaznim parametrima, kao i o postojanju piezometarske linije, moguće je prikazati raspodjelu pornih tlakova koja djeluju na kosini, kao što je i prikazano na slici 4-3.



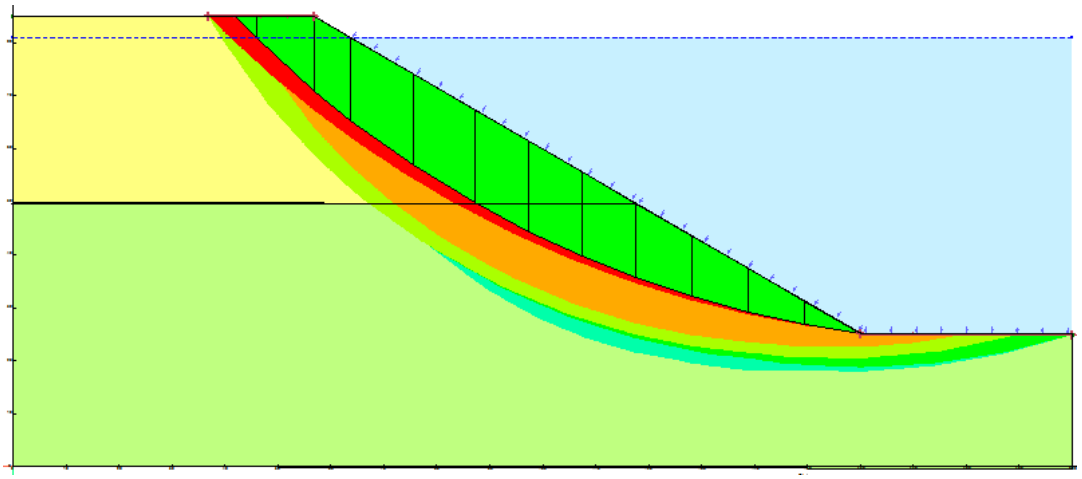
Slika 4-3 Raspodjela pornih tlakova na kosini

Kada su sve predradnje završene, program može započeti s iterativnim postupkom. Nakon kratkoga vremena, kao rezultat stvara se određen broj kliznih površina i njihovi pripadajući faktori sigurnosti. Kao reprezentativnu kliznu površinu uzima se ona s najmanjim faktorom sigurnosti, kao što je i u slučaju na slici 4-4 gdje faktor sigurnosti iznosi 2,064.



Slika 4-4 Prikaz rezultata iteracijskog postupka

Dodatna mogućnost programa je to što osim prikaza klizne plohe s najmanjim faktorom sigurnosti, može prikazati i potencijalne zone sloma čiji faktori sigurnosti su bliski kritičnome, a samim time predstavljaju moguće plohe loma (slika 4-5).



Slika 4-5 Prikaz zona sloma

5. ODREĐIVANJE FAKTORA SIGURNOSTI

Kosine, na kojima je provedeno istraživanje dio su potencijalnog eksploatacijskog polja koji se nalazi u Dravskome bazenu. Kako bi se osiguralo dobivanje mineralnih sirovina iz potencijalnog ležišta na siguran i ekonomski opravdan način potrebno je definirati optimalne nagibe kako radnih kosina tako i završnih kosina na eksploatacijskom polju. Također, u području eksploatacije su uočena potencijalno nestabilna i opasna područja u kojima se nalaze proslojci sitnozrnate gline. Ostatak materijala čini intaktni šljunak.

Sveukupno, četiri analize su provedene korištenjem **pojednostavljene Bishopove** metode:

1. Radna kosina sa šljunkovitim materijalom
2. Radna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline
3. Završna kosina sa šljunkovitim materijalom
4. Završna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline.

Zbog postojanja proslojnoga tijela, potrebno je provesti dodatne proračune stabilnosti završnih i radnih kosina za slučaj kada se proslojak gline nalazi u podini, te usporediti koliko se takav faktor sigurnosti razlikuje od slučaja u kojemu je šljunak jedina mineralna sirovina.

Analizom rezultata ispitivanja pojedinačnih uzoraka istražnih bušotina izbušenih jezgrovanjem, te iz profila istražnih bušotina, kao i daljnjim ispitivanjima određene su sljedeće karakteristike materijala i kosine (Calx, 2016):

- obujamna masa (intaktnog) šljunka u ležištu (γ = 1,98 t/m^3)

- obujamna masa neporemećenog građevnog pijeska i šljunka za sitnozrnu i krupniju mineralnu sirovinu približno je jednaka, tj. i za sitnozrnati materijal iznosi jednako (γ = 1,98 t/m^3)

- najveća visina kosine: 60 m

-kut unutarnjeg trenja za sitnozrnatu glinovitu sirovinu iznosi 24°, dok za šljunak iznosi 34 °

-kut radne kosine iznosi 30°, dok će planirani kut završne kosine iznositi 26°

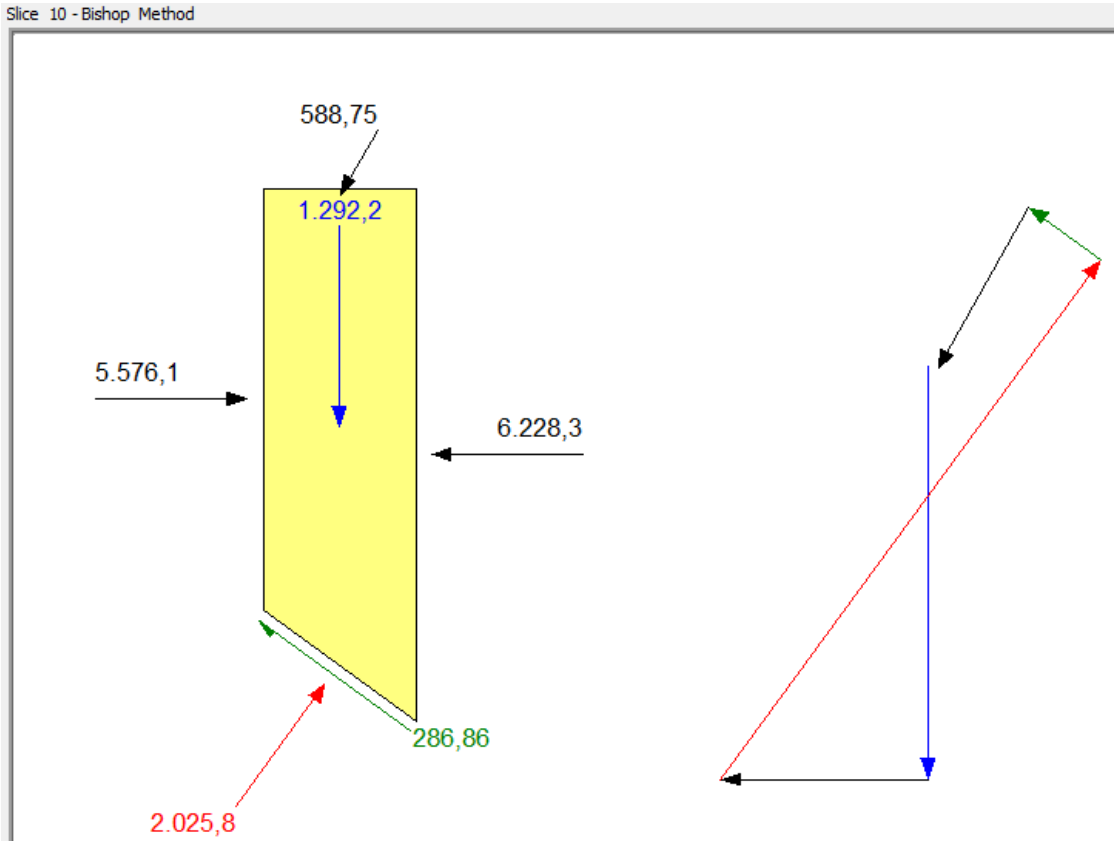
-postojanje vodnog lica koje se nalazi na visini od 56 m

-iznos kohezije za oba tipa materijala je uzet isti, 0 kPa.

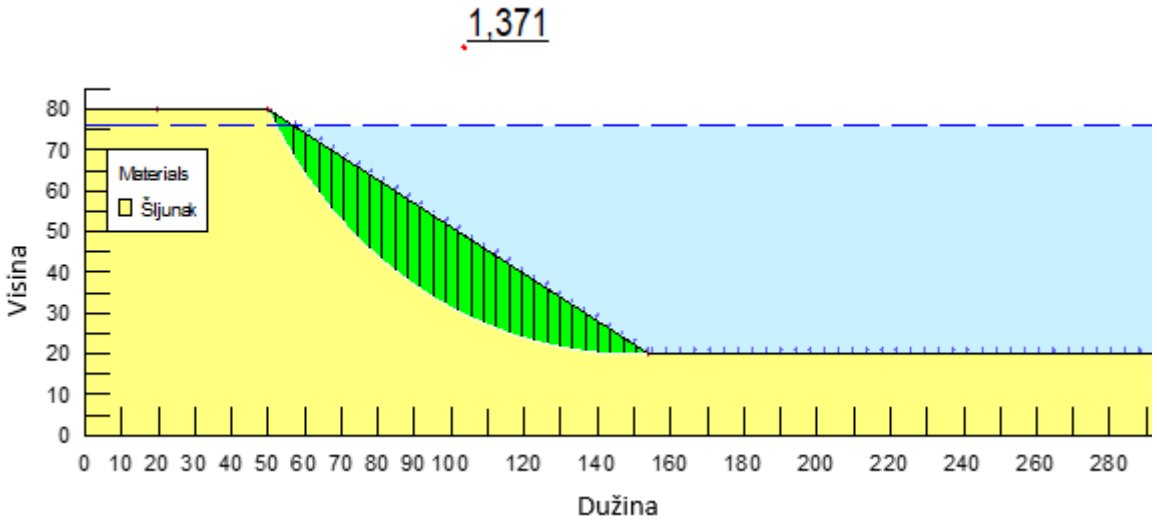
5.1 Radna kosina sa šljunkovitim materijalom

Na temelju prethodno navedenih veličina za ovaj tip kosine prikazanoj na slici 5-2, faktor sigurnosti (FS) iznosi 1,371. Dobiveni faktor sigurnosti je omjer posmične čvrstoće i posmičnoga naprezanja na kliznoj plohi, kao što je moguće i vidjeti na slikama 5-3 i 5-4. Omjer ove dvije veličine je veći od 1. Maksimalna vrijednost posmične čvrstoće iznosi oko 100 kPa, dok posmičnog naprezanja iznosi manje, oko 75 kPa. Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela prikazan je na slici 5-5.

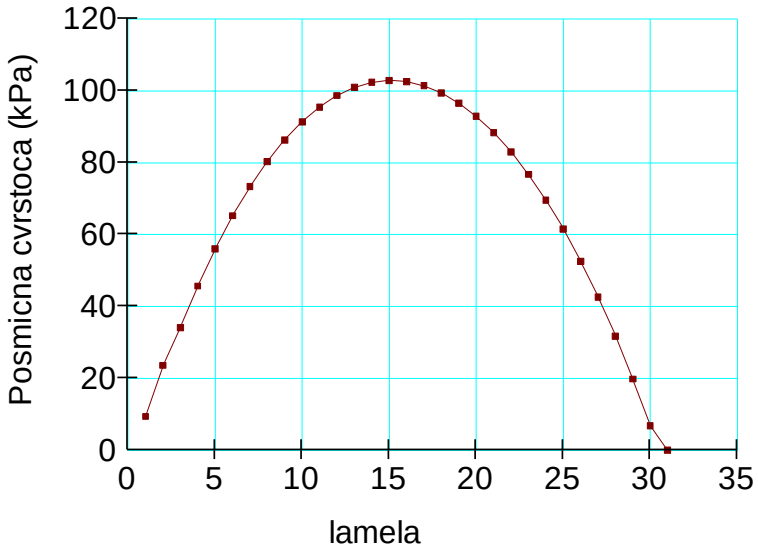
Moguće je i prikazati utjecaj svih sila, izraženih u kN, za definiranu lamelu, kao što je i prikazano na slici 5-1.



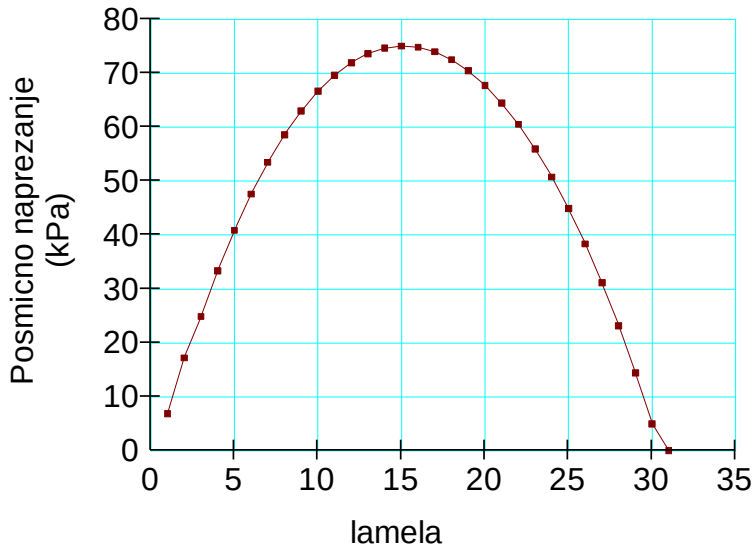
5-1 Prikaz sila na lamelu korištenjem pojednostavljene Bishopove metode



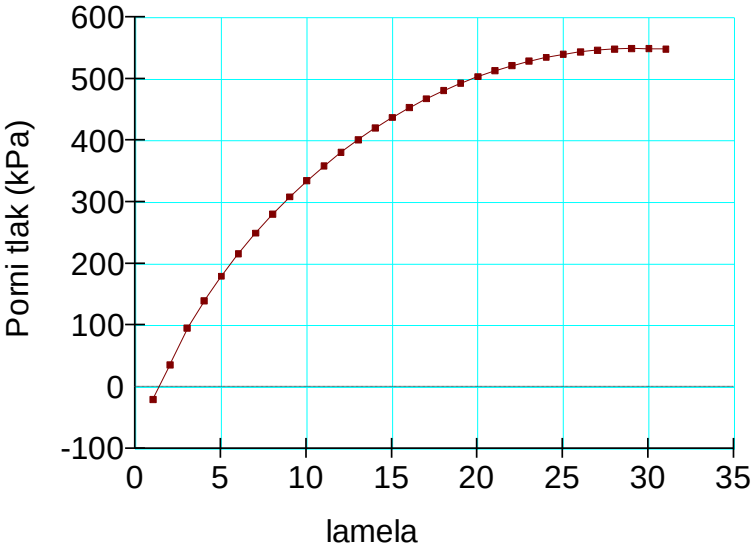
Slika 5-2 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine sa šljunkovitim materijalom



Slika 5-3 Posmična čvrstoća duž klizne plohe



Slika 5-4 Posmično naprezanje duž klizne plohe

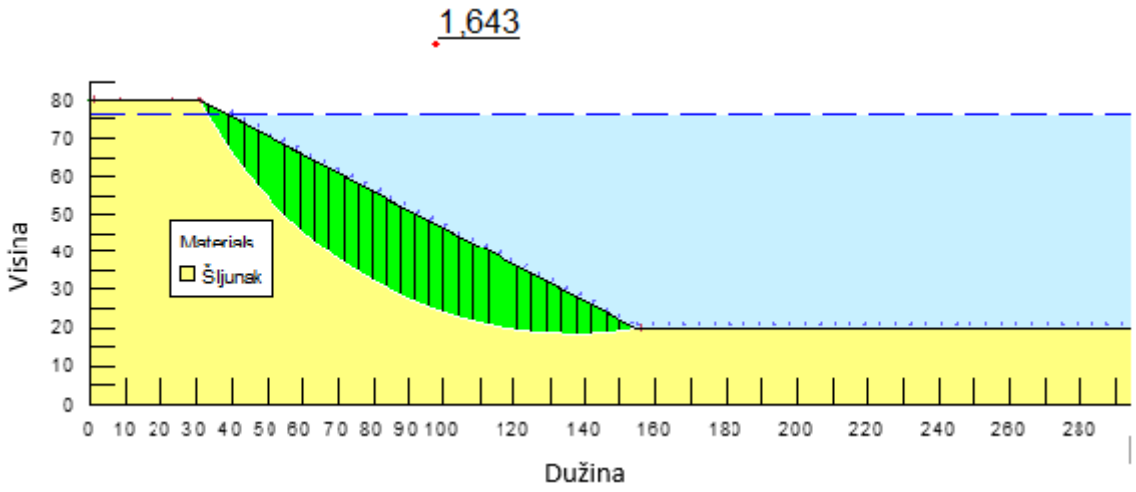


Slika 5-5 Tlak vode na osnovicama lamela

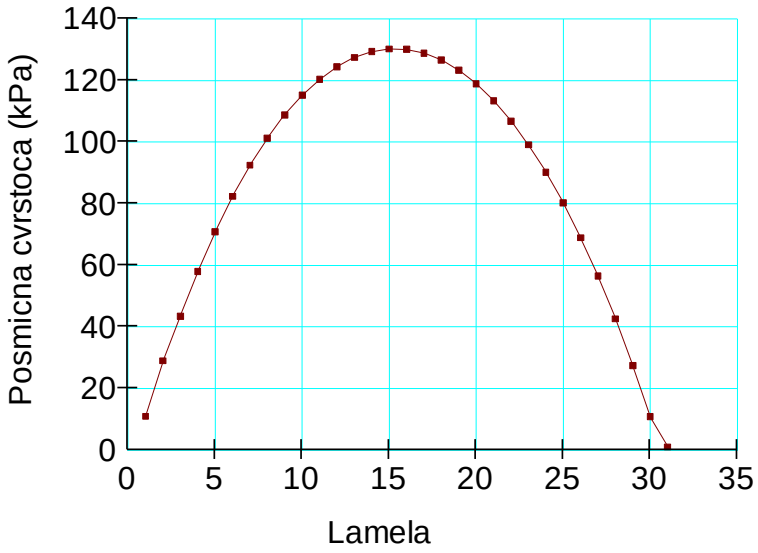
5.2 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom

Iz slike 5-6 vidljivo je da se smanjivanjem nagiba kosine, uz sve ostale parametre nepromijenjene, faktor sigurnosti se povećao na 1,643, što predstavlja povećanje

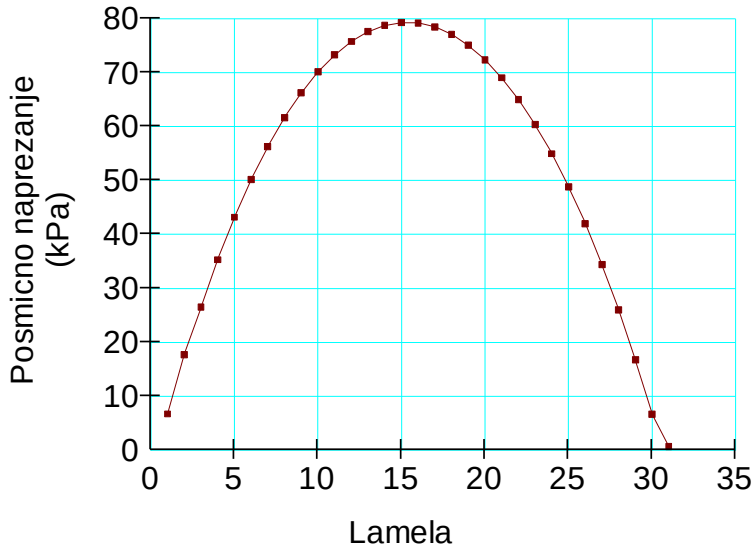
faktora sigurnosti od 19,8% u odnosu na radnu kosinu. Prema tome, veći je i omjer posmične čvrstoće i posmičnih naprezanja, kao što je i moguće vidjeti na slikama 5-7 i 5-8. Porni tlak duž osnovice lamela prikazan je na slici 5-9.



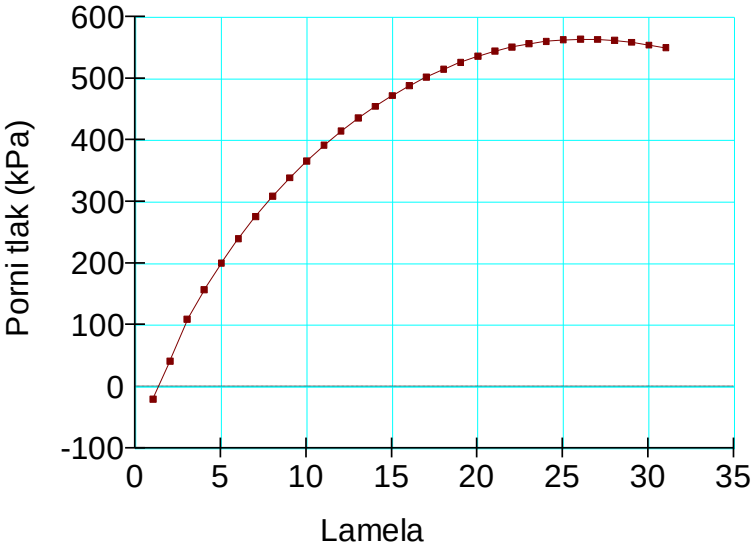
Slika 5-6 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine sa šljunkovitim materijalom



Slika 5-7 Posmična čvrstoća duž klizne plohe



Slika 5-8 Posmično naprezanje duž klizne plohe

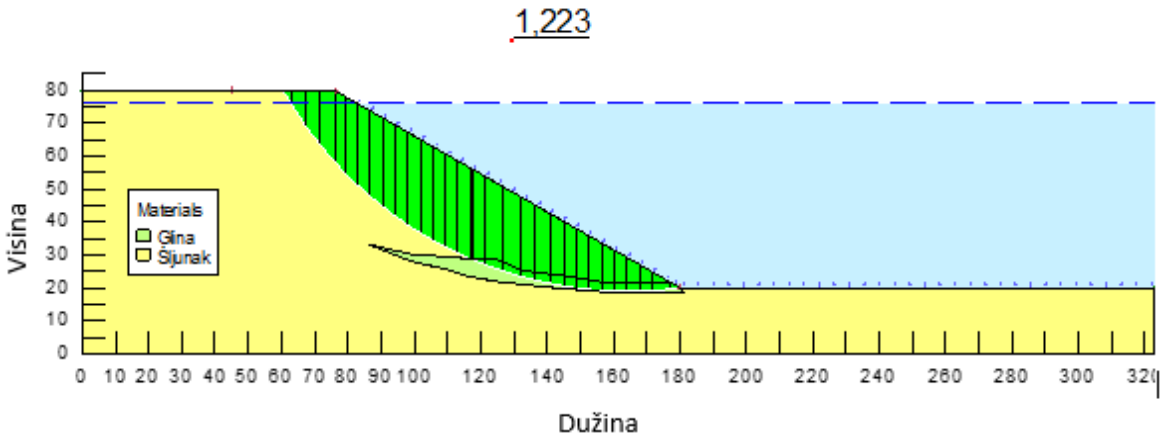


Slika 5-9 Porni tlakovi na osnovicama lamela

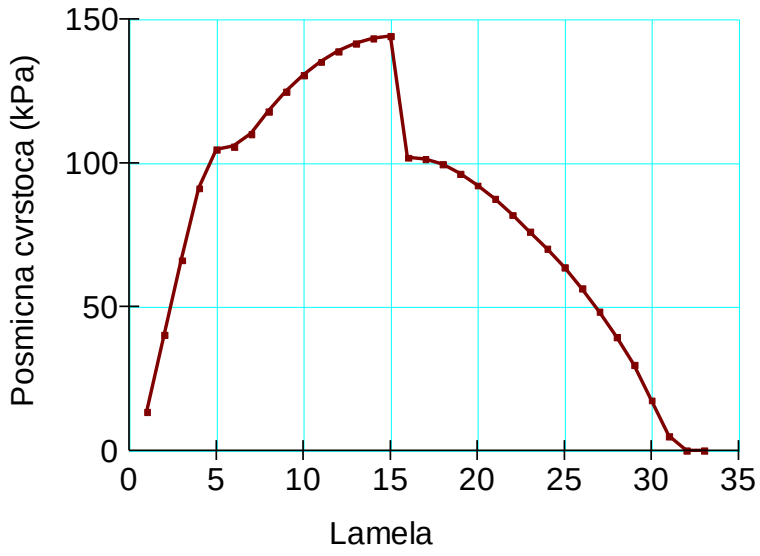
5.3 Radna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline

Iz slike 5-10 može se uočiti da je proslojak gline smanjio faktor sigurnosti (FS=1,223), ukoliko se promatra radna kosina koja sadrži samo šljunak, gdje je faktor sigurnosti bio veći. Na dijagramima posmične čvrstoće i naprezanja (slika 5-11 i 5-12) vidljiva je značajna

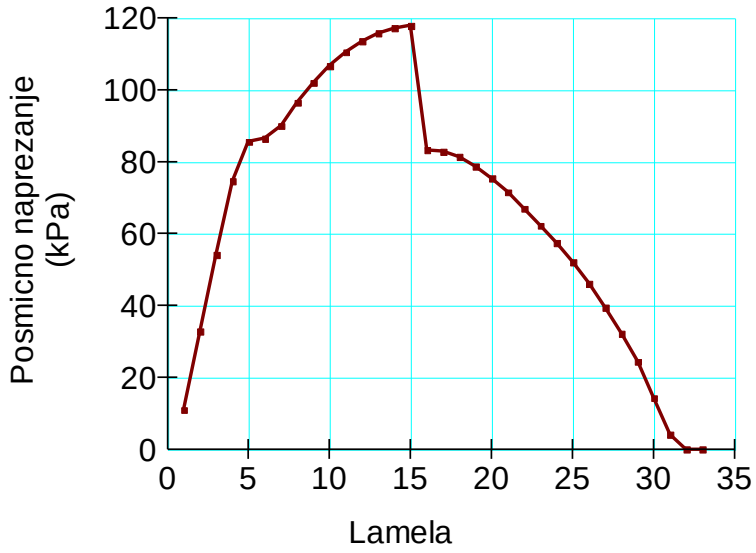
promjena (pad) ovih vrijednosti u zoni gdje se klizna ploha nalazi u proslojku gline. U ovom slučaju maksimalna posmična čvrstoća iznosila je oko 150 kPa, a posmično naprezanje oko 120 kPa. Porni tlak duž osnovice lamela prikazan je na slici 5-13.



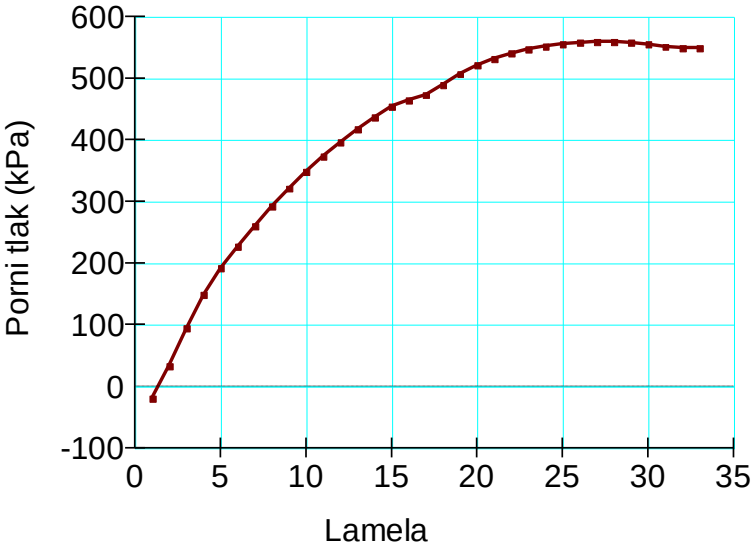
Slika 5-10 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine s proslojkom gline



Slika 5-11 Posmična čvrstoća duž klizne plohe



Slika 5-12 Posmično naprezanje duž klizne plohe

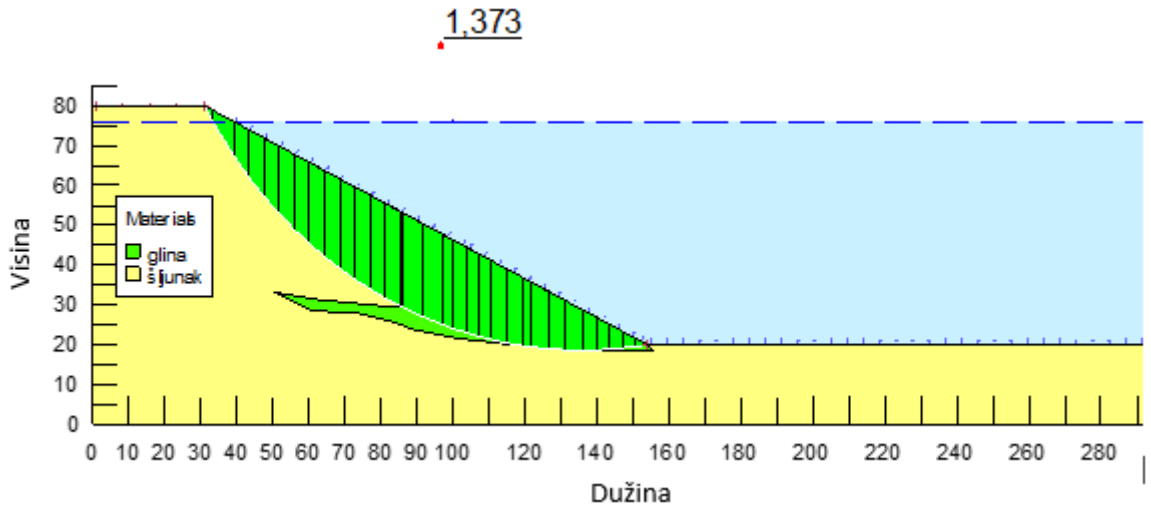


Slika 5-13 Porni tlak na osnovicama lamela

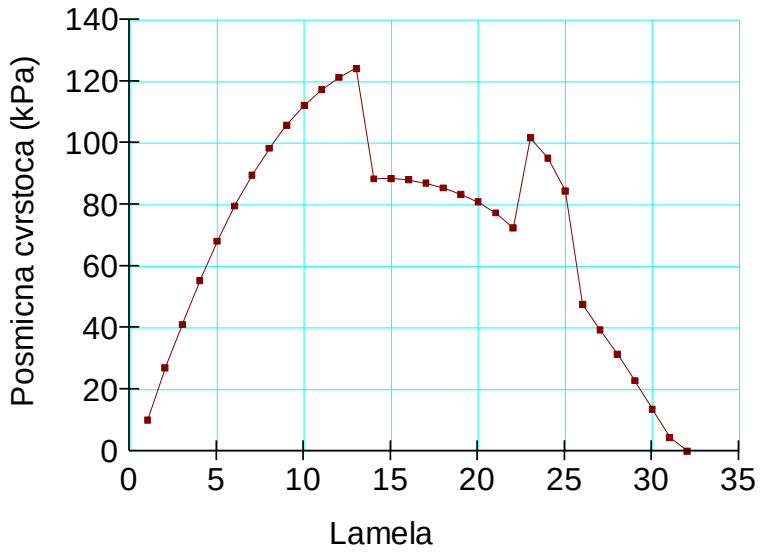
5.4 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom i proslojkom gline

Nagib kosine od 26° povećava faktor sigurnosti na 1,373. Na dijagramima posmične čvrstoće i naprezanja (slika 5-15 i 5-16) vidljiv je značajan pad (oko 30 kPa) ovih vrijednosti u zoni gdje se klizna ploha nalazi u proslojku gline. U ovom slučaju maksimalna posmična

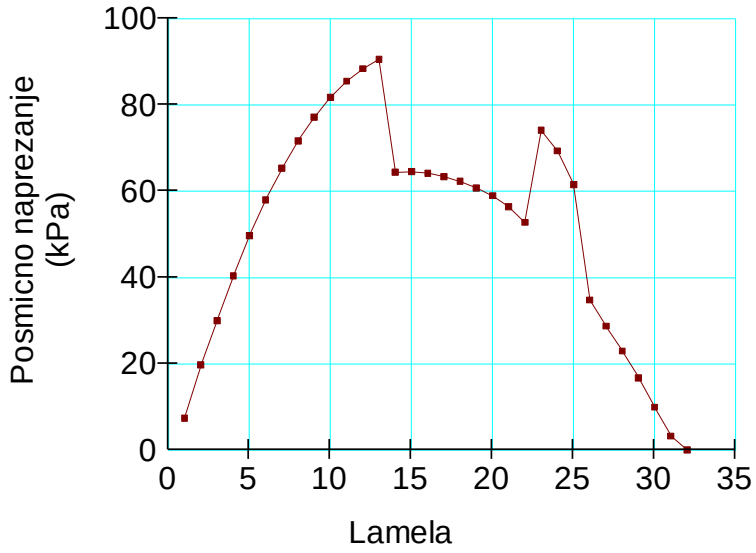
čvrstoća iznosila je oko 150 kPa, a posmično naprezanje oko 120 kPa. Porni tlak duž osnovice lamela prikazan je na slici 5-17.



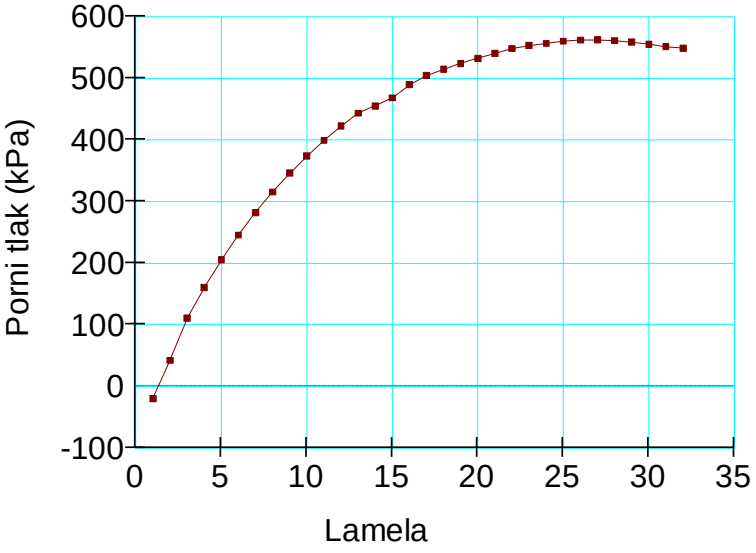
Slika 5-14 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine s proslojkom gline



Slika 5-15 Posmična čvrstoća duž klizne plohe



Slika 5-16 Posmično naprezanje duž klizne plohe



Slika 5-17 Porni tlak na osnovicama lamela

5.5 INTERPRETACIJA REZULTATA

Postojanje sitnozrnatog glinovitog tijela osjetno snižava faktore sigurnosti radnih i završnih kosina, posebice je vidljiva razlika kod slučaja radnih kosina gdje se za kosinu samo sa šljunkovitim materijalom dobiva FS od 1,371, dok za isti taj slučaj, samo s glinovitom komponentom, FS iznosi 1,223.

Završne kosine odstupaju u velikoj mjeri jedna od druge, FS od 1,643 za završnu kosinu sa šljunkom naspram FS od 1,373 za završnu kosinu s glinovitom komponentom.

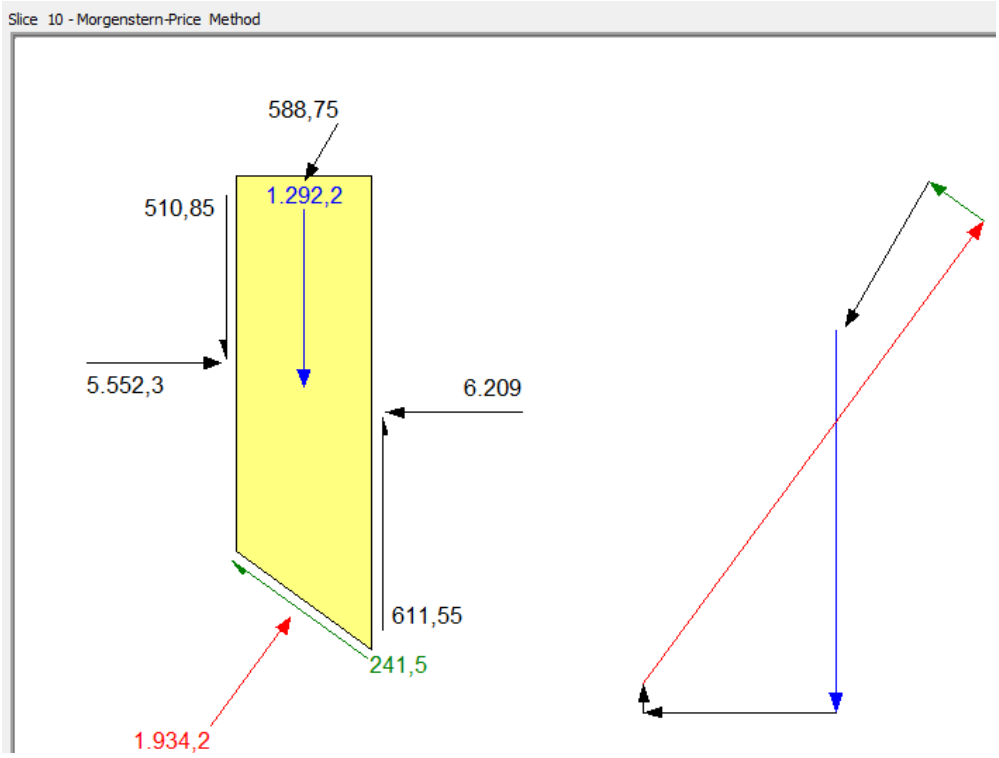
Gledajući širu sliku, postojanje glinovitog materijala smanjuje faktor sigurnosti, što može predstavljati problem kod radnih kosina prilikom eksploatacije.

6. RAČUNALNI OBLIK MORGENSTERN-PRICEOVE METODE

U ovom slučaju umjesto pojednostavljene Bishopove metode, korištena je metoda proračuna stabilnosti Morgenstern-Price (MP metoda). Pri tome su korišteni isti ulazni parametri materijala i geometrijske karakteristike problema.

Ispitivanje je provedeno za iste slučajeve prikazane u prethodnom primjeru kako bi se moglo usporediti njihove rezultate, tj. faktore sigurnosti. Slike 6-1, 6-2, 6-3 i 6-4 ilustriraju rezultate dobivene MP metodom.

Također, jednako kao i za Bishopovu metodu, moguće je grafički prikazati utjecaj sila koje djeluju na bilo koju od korištenih lamela, kao što je i prikazano na slici 6-1, gdje je prikazana lamela jednaka kao i za Bishopovu metodu kod radne kosine šljunka. Sve sile su izražene u kN.

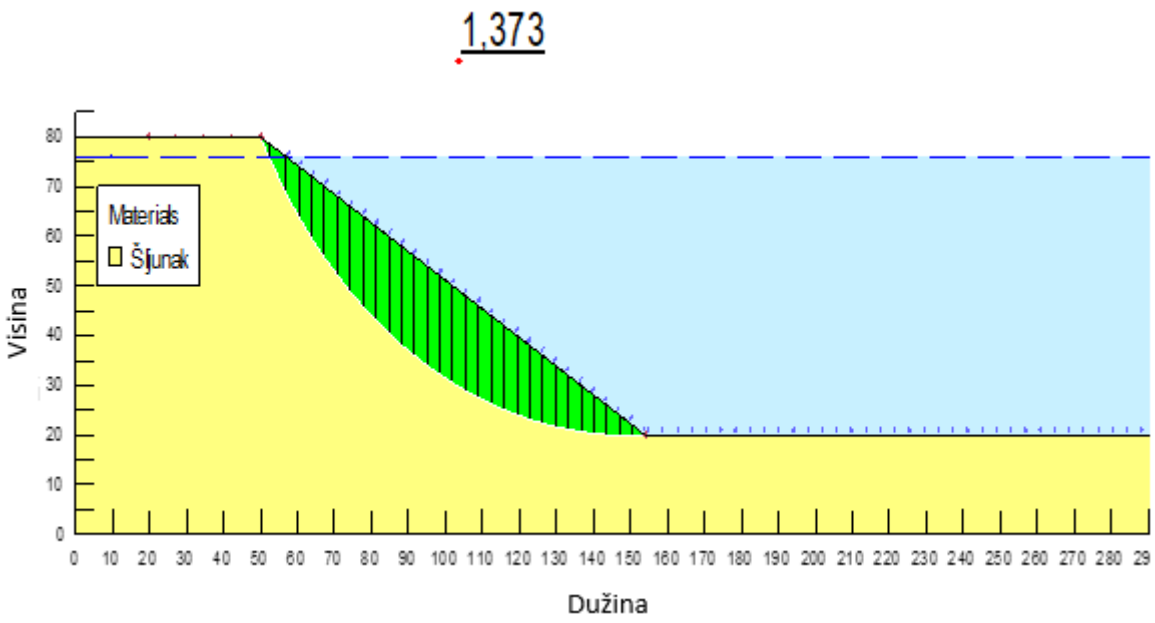


Slika 6-1 Prikaz sila na lamelu korištenjem MP metode

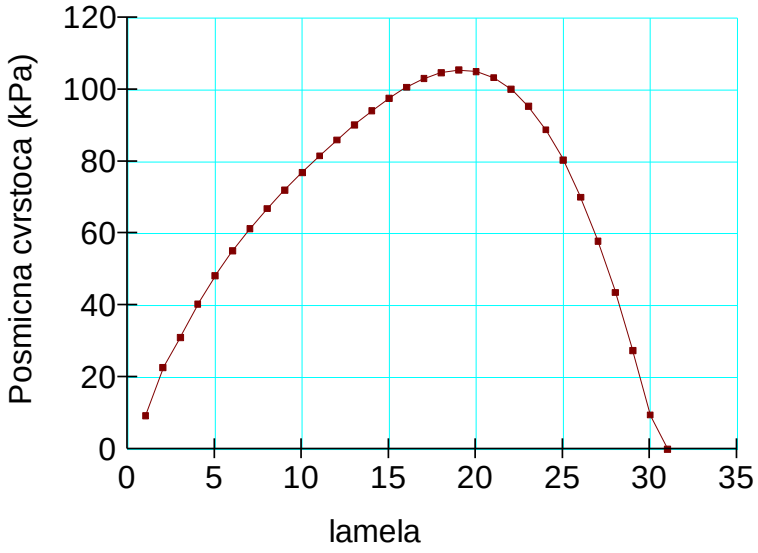
6.1 Radna kosina sa šljunkovitim materijalom

Dobiveni faktor sigurnosti od 1,373 prikazan je na slici 6-2, kao i posmična čvrstoća i naprezanje duž klizne plohe na slikama 6-3 i 6-4, pri čemu maksimalna vrijednost naprezanja

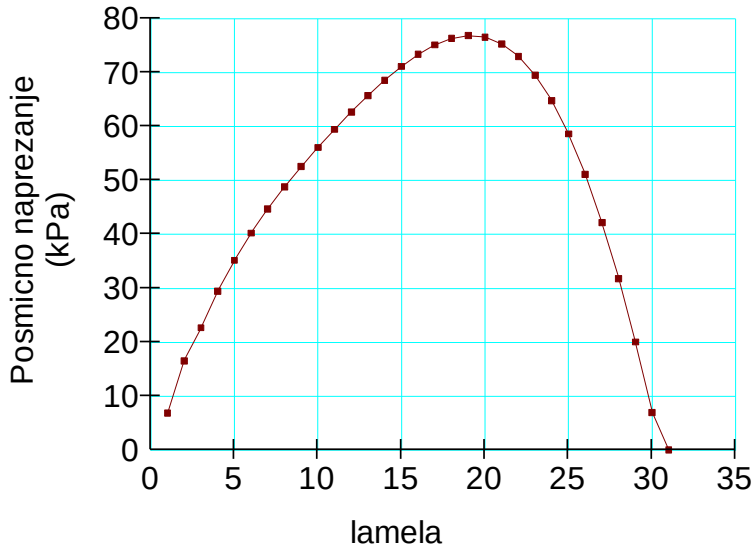
iznosi 76 kPa, a čvrstoće 104 kPa. Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela prikazan je na slici 6-5.



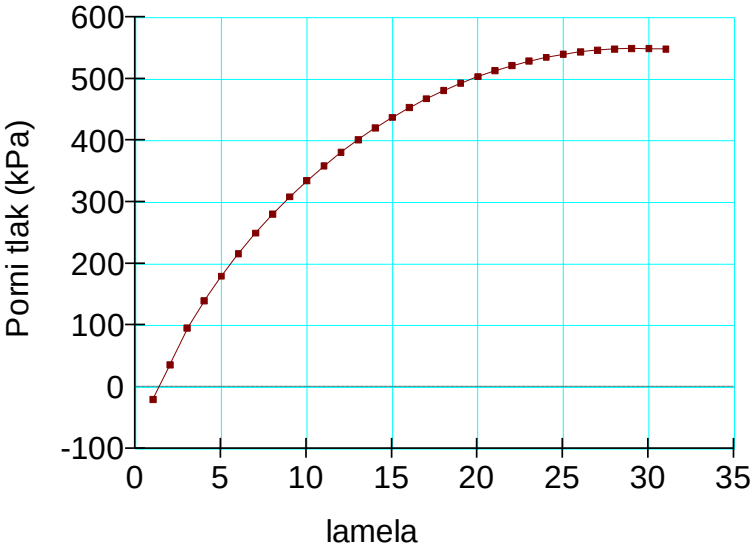
Slika 6-2 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine šljunkovitog materijala MP metodom



Slika 6-3 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom



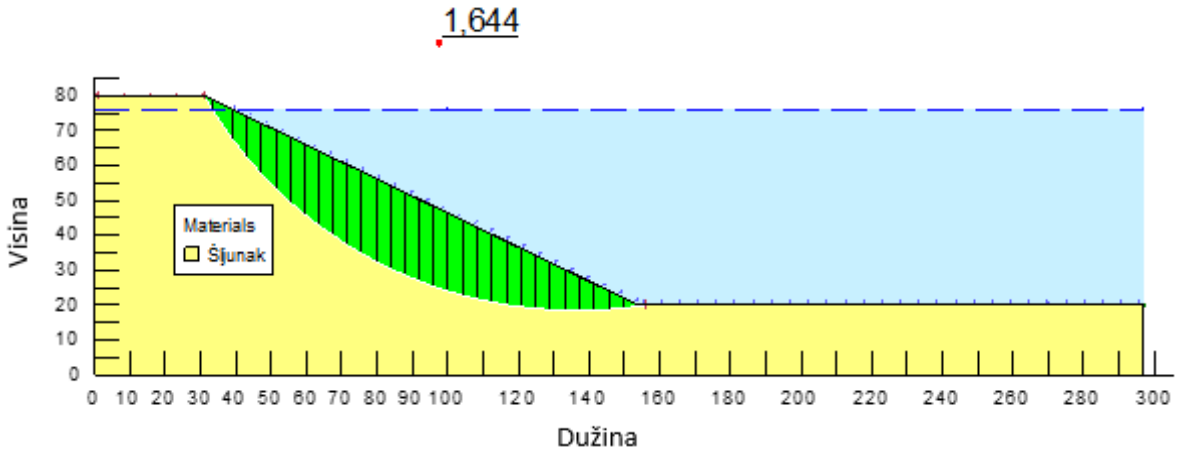
Slika 6-4 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom



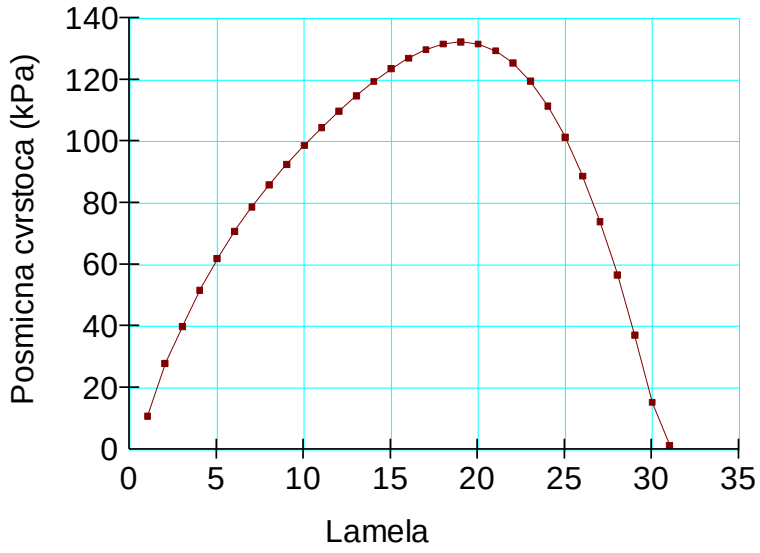
Slika 6-5 Porni tlak na osnovicama lamela dobiven MP metodom

6.2 Završna kosina sa šljunkovitim materijalom

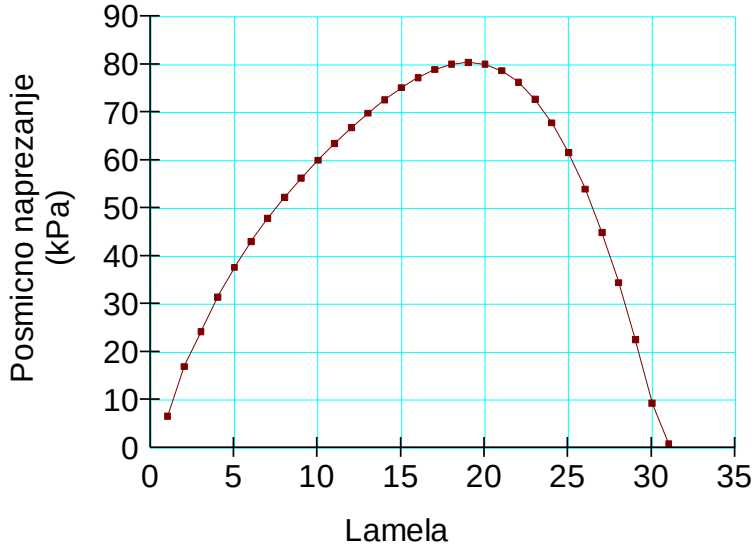
Faktor sigurnosti dobiven MP metodom za ovaj slučaj kosine iznosi 1,644, prikazan na slici 6-6. Krivulje Posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja (slika 6-7 i 6-8) su blago nagnute u odnosu na prethodne slučajeve obrade podataka metodom Bishopa, a iznose 80 kPa, odnosno 130 kPa. Porni tlak duž osnovica je prikazan na slici 6-9.



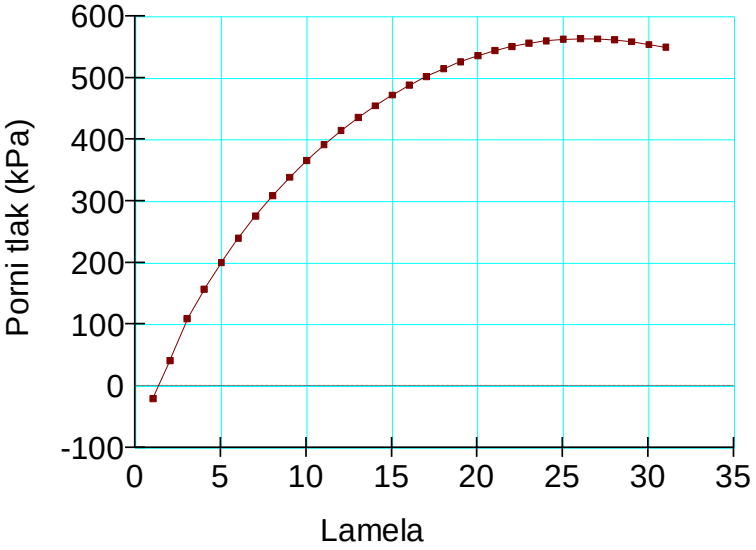
Slika 6-6 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine šljunkovitog materijala MP metodom



Slika 6-7 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom



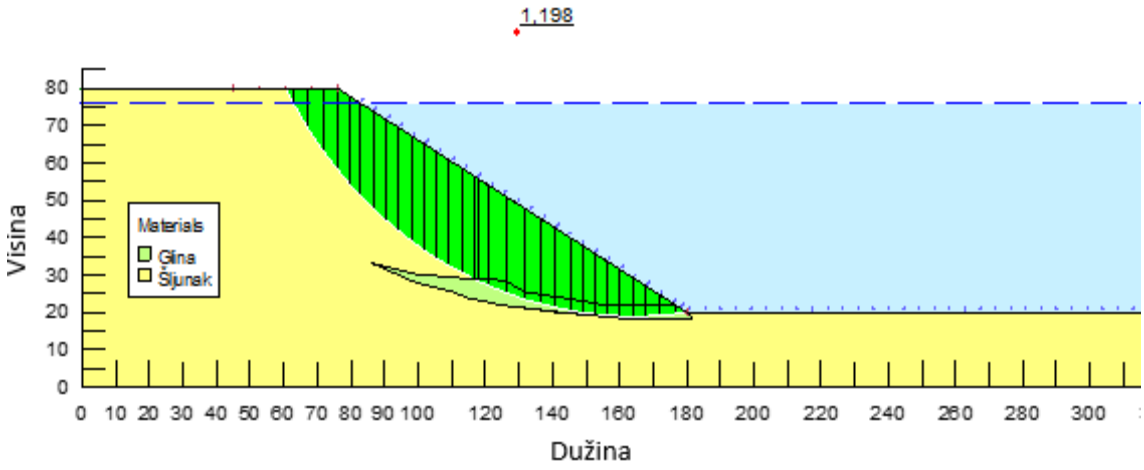
Slika 6-8 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom



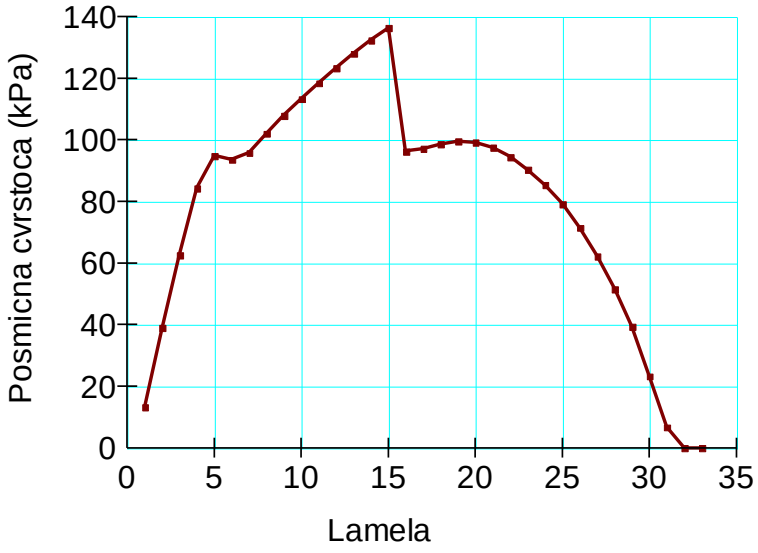
Slika 6-9 Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela dobiven MP metodom

6.3 Radna kosina sa proslojkom gline

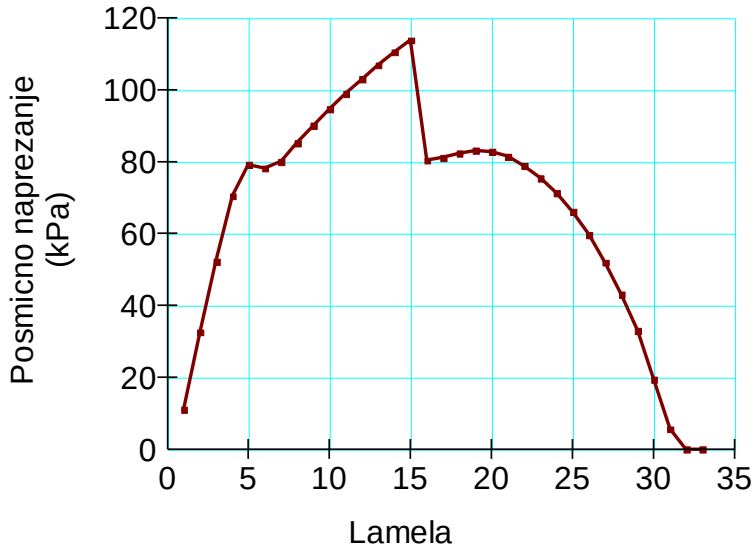
Krivulje posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja (slika 6-11 i 6-12) dobivene ovom metodom imaju relativno nepravilne oblike (vidljive su značajnije promijene vrijednosti kada klizna ploha ulazi u glineni proslojak) s vrijednostima 116 kPa za posmično naprezanje i 139 kPa za posmičnu čvrstoću. Dobiveni faktor sigurnosti prikazan na slici 6-10 iznosi 1,198. Također, na slici 6-13 je vidljivo da maksimalna vrijednost pornog tlaka iznosi oko 570 kPa.



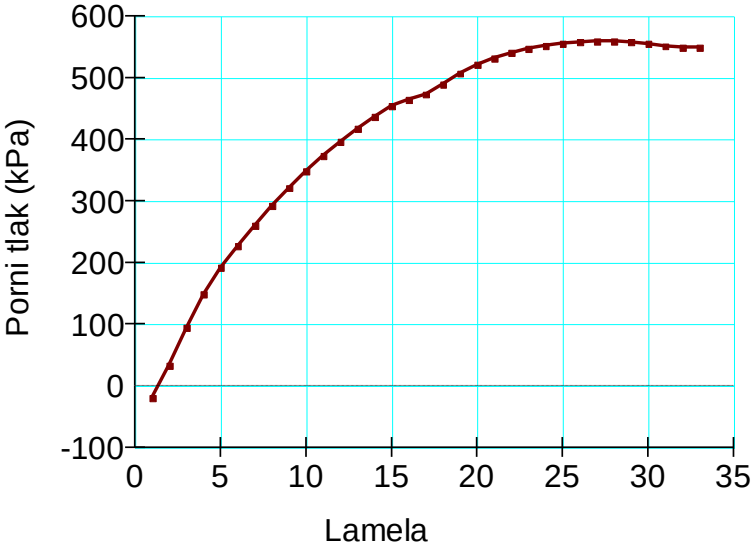
Slika 6-10 Određivanje faktora sigurnosti radne kosine s proslojkom gline MP metodom



Slika 6-11 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom



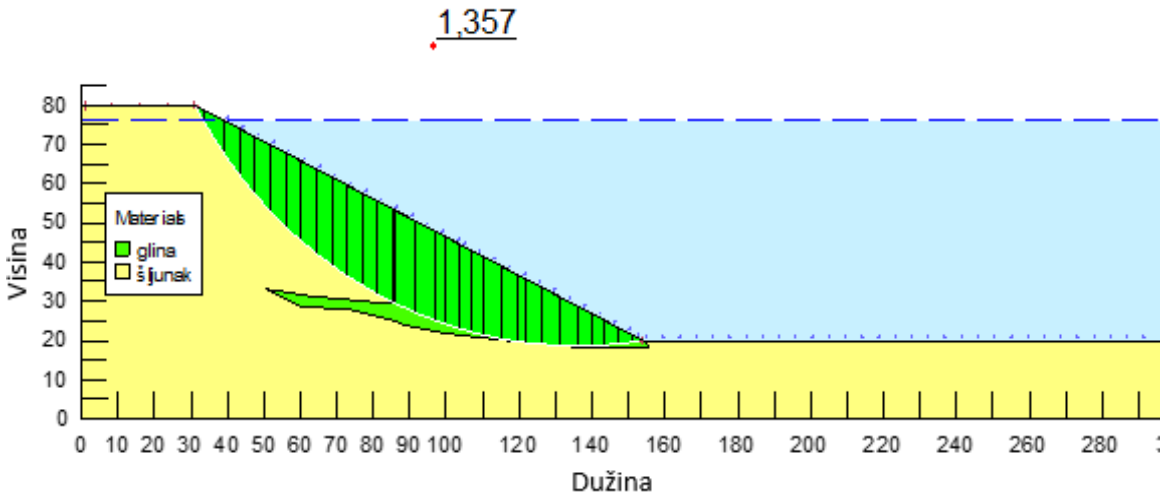
Slika 6-12 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom



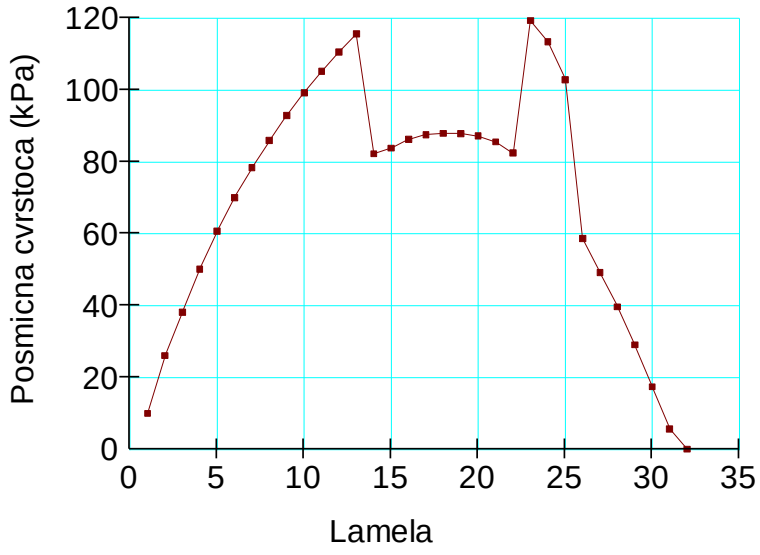
Slika 6-13 Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela dobiven MP metodom

6.4 Završna kosina s proslojkom gline

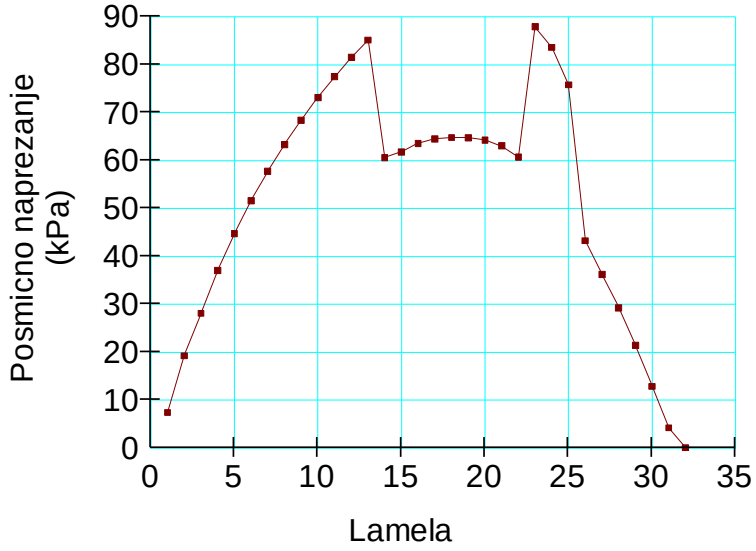
Slika 6-14 prikazuje oblik kosine kao i faktor sigurnosti od 1,357 dobiven MP metodom. Krivulje posmičnog naprezanja i posmične čvrstoće imaju maksimalne vrijednosti od 89 kPa i 120 kPa, a prikazane su slikama 6-15 i 6-16. Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela nalazi se na slici 6-17.



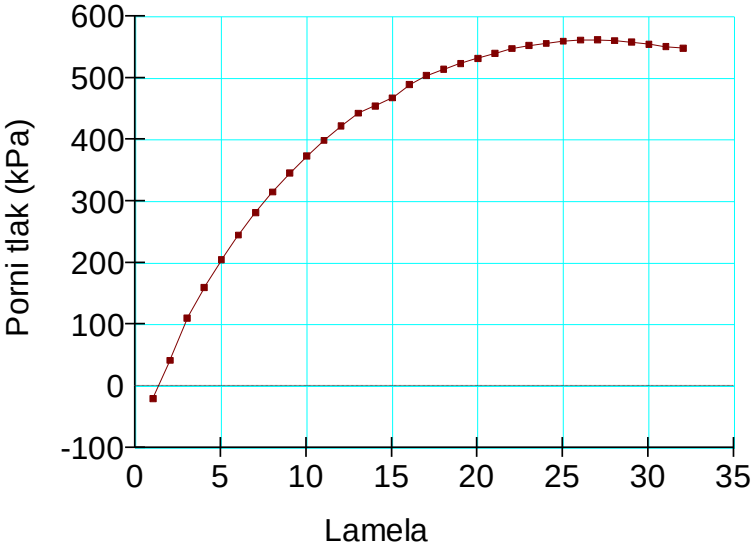
Slika 6-14 Određivanje faktora sigurnosti završne kosine s proslojkom gline MP metodom



Slika 6-15 Posmična čvrstoća duž klizne plohe dobivena MP metodom



Slika 6-16 Posmično naprezanje duž klizne plohe dobiveno MP metodom



Slika 6-17 Raspodjela pornih tlakova na osnovicama lamela dobiven MP metodom

6.5 Usporedba MP i pojednostavljene Bishopove metode

MP metoda, zbog svojih viših zahtjeva i pretpostavki, kao i zbog uzimanja u obzir međulamelarnih sila prethodno opisanih (u oba smjera, x i y), generira izlazna rješenja kvantitativno različita od pojednostavljene Bishopove metode. MP metoda, za razliku od pojednostavljene Bishopove metode definira ne samo iznos sila između lamela, nego i njihov nagib. Također, ravnoteža momenata kod MP metode je zadovoljena, za razliku od pojednostavljene Bishopove metode.

Faktori sigurnosti, dobiveni za kosine koje sadrže samo šljunkoviti materijal, ne razlikuju se mnogo, tj. za završne kosine oni su praktično potpuno jednaki (Fs=1,643, tj. 1,644), jednako kao i za radne kosine razlika je minimalna (1,371 za Bishopovu i 1,373 za MP metodu).

Vidljive razlike u rezultatima vezane su za kosine koje sadrže sitnozrnate proslojke gline. MP metoda dokazala se rigoroznijom, što se očituje u manjim vrijednostima faktora sigurnosti, samim time povećavajući potrebu za mjerama sigurnosti. Vrijednosti faktori sigurnosti su manji: 1,198 naspram 1,223 za radne kosine i 1,357 naspram 1,373 za završne kosine.

Osim faktora sigurnosti, metode se razlikuju i po rasponu silu na jednaku lamelu. Iz slika 5-1 i 6-1 uočljivo je da korištenje pojednostavljene Bishopove metode dovodi do generiranja većih naprezanja (posmičnoga naprezanja, normalne sile, te sila na lamelu) nego kod primjene MP metode.

7. TABLIČNA METODA

Tablična metoda se temelji na procesu iteracije, objašnjenom u početnim poglavljima, a rađena je u programu Microsoft Office Excel, tj. alat tabličnoga kalkulatora. Također, ulazni parametri materijala odgovaraju parametrima korištenima tijekom programskog izračunavanja faktora sigurnosti.

Tablični proces proračuna faktora sigurnosti se temelji na dva izraza:

$$m\alpha = \cos\alpha + \frac{\sin\alpha \cdot tg\varphi'}{F} \qquad 7\text{-}1$$

i

$$FS = \frac{\Sigma\left[\frac{c'\Delta x + (W + P\cos\beta - u\Delta x\sin\alpha)\tan\varphi'}{m_\alpha}\right]}{\Sigma W\sin\alpha - \frac{\Sigma M_p}{R}} \qquad 7\text{-}2$$

Bitno je naglasiti da je početni faktor sigurnosti s kojim se ″ulazi″ u proces iteracije jednak 1 (FS_0=1). S tom vrijednošću ulaznog faktora sigurnosti, izračunava se koeficijent sigurnosti m_α, koji nam služi za novi korak iteracije, tj. za izračunavanje novoga faktora sigurnosti pomoću jednadžbe 7-2. Proces se ponavlja sve dok razlika između dva faktora sigurnosti, dobivenih iz uzastopnih koraka nije manja od određene zadane vrijednosti. U ovome radu, maksimalna zadovoljavajuća razlika iznosi 0,01.

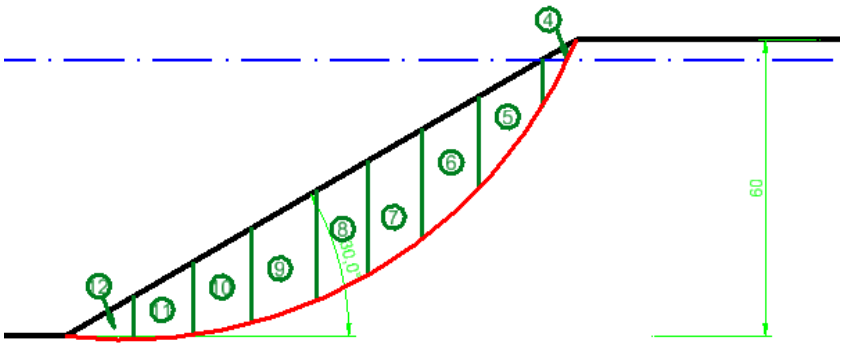
Sam postupak sličan je postupku koji koriste računalni programi. Za odabrani profil kosine definira se klizna ploha i raspored lamela (npr. u CAD programu) te se dobiju geometrijske karakteristike lamela. Nakon toga provodi se tablični izračun te dobije faktor sigurnosti. Ovakav postupak provodi se za više kliznih ploha te se odabere kritična.

Veličine korištene u jednadžbama opisane se u sljedećim poglavljima. Rezultati proračuna stabilnosti kosina tabličnom metodom temelje se na podacima koje je dobio Calx (2016).

7.1 Tablični izračun radne kosine sa šljunkovitim materijalom

Tablica 7-1 prikazuje tablični izračun kroz iterativni postupak. Kao mjerodavan rezultat u četvrtom iterativnom koraku dobiven je faktor sigurnosti u iznosu **1,40**. Raspored lamela i kritična klizna ploha predmetne kosine prethodno definirane u CAD programu prikazan je na slici 7-1.

Daljnji koraci iteracije nisu korišteni zbog dobivene razlike između zadnja dva koraka.



Slika 7-1 Profil radne kosine sa šljunkovitim materijalom

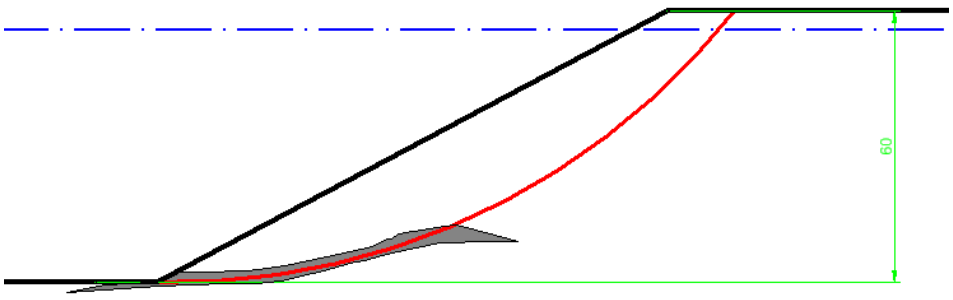
Tablica 7-1 Iterativni postupak za nagib radne kosine sa šljunkovitim materijalom (Calx, 2016)

Geometrijski ulazni parametri							Tlak površinske vode						
Broj odsječka	Horizontalna širina (b), m	Prosječna visina (h_{pr}), m	Površina (A), m^2	Težina (W), kN	Nagib baze odsječka (α),°	W sin α	Visina stupca vode (h_s), m	Prosječni pritisak stupca vode (P_{ov}), kPa	Nagib vrha odsječka (β)°	Vanjska sila vode na površinu (P), kPa	Horizontalni Krak sile (d $_h$), m	Vertikalni krak sile (d $_v$), m	Moment od površinske vode ($M_ϕ$), kNm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,0	0,00	0		0								
2	0,0	0,00	0		0								
3	0,0	0,00	0		0								
4	6,9	5,33	35	680	62	600							
5	12,9	14,93	188	3 652	52	2 878	4	39	30	585	-78	47	- 25 747
6	11,6	20,85	239	4 642	42	3 106	11	108	30	1 445	-66	54	- 43 590
7	11,2	23,00	256	4 972	33	2 708	17	167	30	2 157	-55	60	- 38 027
8	10,4	22,94	238	4 623	26	2 027	24	235	30	2 827	-44	66	- 14 434
9	13,1	21,04	238	4 623	19	1 505	30	294	30	4 452	-32	73	39 118
10	12,1	17,20	206	4 001	11	763	38	373	30	5 208	-20	80	118 125
11	11,9	11,95	142	2 758	5	240	45	441	30	6 066	-8	87	221 842
12	14,0	4,64	64	1 243	-3	- 65	52	510	30	8 247	5	95	427 417
					Σ W sin α =	**13 763**						**M_p=**	**684 704**

Tlak porne vode		Parametri č.		Iterativni proračun						
Piezometrijska visina (h_p), m	Tlak porne vode (u), Pa	Kohezija (c), kPa	Kut unutrašnjeg trenja (φ), °	cb + (W+Pcosβ-ub) tg φ	m_α (iteracija F_1)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_2)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_3)	Brojnik faktora sigurnosti
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
		0	34		1,00		1,00		1,00	
		0	34		1,00		1,00		1,00	
		0	34		1,00		1,00		1,00	
3	29	0	34	322	1,07	302	0,93	346	0,90	357
19	186	0	34	1 183	1,15	1 031	1,03	1 153	1,00	1 181
32	314	0	34	1 519	1,19	1 272	1,09	1 392	1,07	1 419
40	392	0	34	1 649	1,21	1 368	1,12	1 470	1,11	1 492
46	451	0	34	1 604	1,19	1 343	1,13	1 424	1,11	1 441
51	500	0	34	1 298	1,17	1 114	1,11	1 164	1,10	1 175
55	540	0	34	1 338	1,11	1 205	1,08	1 238	1,08	1 244
56	549	0	34	994	1,05	942	1,04	955	1,04	957
57	559	0	34	375	0,96	390	0,97	386	0,97	386
					Σ_1 =	**8 966**	Σ_2 =	**9 528**	Σ_3 =	**9 652**

7.2 Tablični izračun radne kosine s proslojkom gline

Tablica 7-2 prikazuje tablični izračun za radnu kosinu s proslojkom gline. Kao mjerodavan rezultat u trećem iterativnom koraku dobiven je faktor sigurnosti u iznosu **1,10**. Profil radne kosine i kritična klizna ploha prethodno su definirani u CAD programu te prikazani na slici 7-2.



Slika 7-2 Profil radne kosine s proslojkom gline

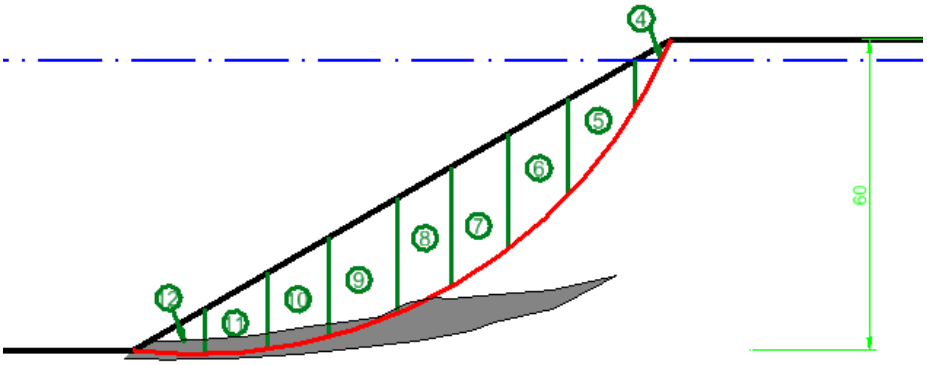
Tablica 7-2 Iterativni postupak za nagib radne kosine s proslojkom gline (Calx, 2016)

Geometrijski ulazni parametri							Tlak površinske vode						
Broj odsječka	Horizontalna širina (b), m	Prosječna visina (h_{pr}), m	Površina (A), m^2	Težina (W), kN	Nagib baze odsječka (α),°	W sin α	Visina stupca vode (h_s), m	Prosječni pritisak stupca vode (P_{ov}), kPa	Nagib vrha odsječka (β)°	Vanjska sila vode na površinu (P), kPa	Horizontalni Krak sile (d_h), m	Vertikalni krak sile (d_v), m	Moment od površinske vode (M_p), kNm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,0	0,00	0		0								
2	0,0	0,00	0		0								
3	0,0	0,00	0		0								
4	6,9	5,33	35	680	62	600							
5	12,9	14,93	188	3 652	52	2 878	4	39	30	585	-78	47	- 25 747
6	11,6	20,85	239	4 642	42	3 106	11	108	30	1 445	-66	54	- 43 590
7	11,2	23,00	256	4 972	33	2 708	17	167	30	2 157	-55	60	- 38 027
8	10,4	22,94	238	4 623	26	2 027	24	235	30	2 827	-44	66	- 14 434
9	13,1	21,04	238	4 623	19	1 505	30	294	30	4 452	-32	73	39 118
10	12,1	17,20	206	4 001	11	763	38	373	30	5 208	-20	80	118 125
11	11,9	11,95	142	2 758	5	240	45	441	30	6 066	-8	87	221 842
12	14,0	4,64	64	1 243	-3	- 65	52	510	30	8 247	5	95	427 417
					Σ W sin α =	**13 763**						**M_p=**	**684 704**

Tlak porne vode		Parametri č.		Iterativni proračun						
Piezometrijska visina (h_p), m	Tlak porne vode (u), Pa	Kohezija (c), kPa	Kut unutrašnjeg trenja (φ), °	cb + (W+Pcosβ-ub) tg φ	m_α (iteracija F_1)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_2)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_3)	Brojnik faktora sigurnosti
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
		0	34		1,00		1,00		1,00	
		0	34		1,00		1,00		1,00	
		0	34		1,00		1,00		1,00	
3	29	0	34	322	1,07	302	1,02	314	1,01	318
19	186	0	34	1 183	1,15	1 031	1,11	1 066	1,10	1 075
32	314	0	34	1 519	1,19	1 272	1,16	1 307	1,15	1 316
40	392	0	34	1 649	1,21	1 368	1,18	1 398	1,17	1 405
46	451	0	24	1 059	1,09	968	1,08	980	1,08	983
51	500	0	24	857	1,09	786	1,08	793	1,08	795
55	540	0	24	883	1,07	828	1,06	833	1,06	834
56	549	0	24	656	1,03	634	1,03	636	1,03	636
57	559	0	24	248	0,98	254	0,98	254	0,98	253
					Σ_1 =	**7 442**	Σ_2 =	**7 580**	Σ_3 =	**7 615**

7.3 Tablični izračun završne kosine s proslojkom gline

Tablica 7-3 prikazuje tablični izračun završne kosine s proslojkom gline. Kao mjerodavan rezultat u četvrtom iterativnom koraku dobiven je faktor sigurnosti u iznosu **1,42**. Raspored lamela i kritična klizna ploha predmetne kosine prethodno definirane u CAD programu prikazan je na slici 7-3.



Slika 7-3 Profil završne kosine s proslojkom gline

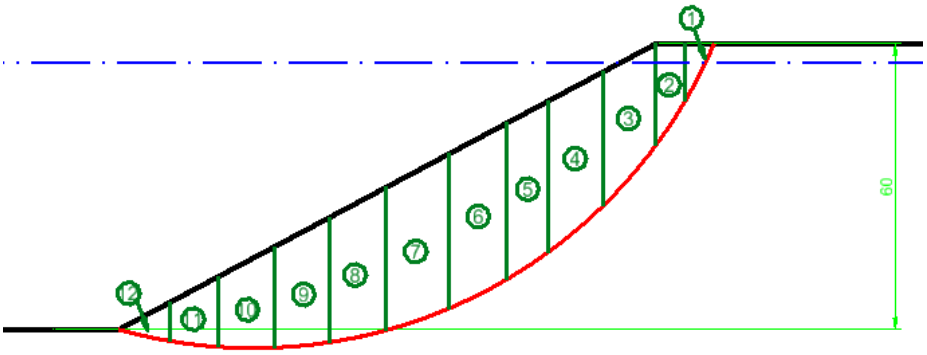
Tablica 7-3 Iterativni postupak za nagib završne kosine s proslojkom gline (Calx, 2016)

Geometrijski ulazni parametri							Tlak površinske vode						
Broj odsječka	Horizontalna širina (b), m	Prosječna visina (h_{pr}), m	Površina (A), m^2	Težina (W), kN	Nagib baze odsječka (α),°	W sin α	Visina stupca vode (h_t), m	Prosječni pritisak stupca vode (P_{ov}), kPa	Nagib vrha odsječka (β)°	Vanjska sila vode na površinu (P), kPa	Horizontalni Krak sile (d_h), m	Vertikalni krak sile (d_v), m	Moment od površinske vode (M_p), kNm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	7,4	4,49	33	641	49	484			0				
2	7,4	12,58	93	1 806	46	1 299			0				
3	7,5	17,87	134	2 603	42	1 742			26				
4	9,5	20,83	198	3 846	38	2 368	2	20	26	207	-97	104	- 8 625
5	11,5	23,21	267	5 186	33	2 825	7	69	26	879	-86	110	- 25 546
6	10,1	24,42	247	4 798	29	2 326	12	118	26	1 323	-75	116	- 21 904
7	8,2	24,58	200	3 885	25	1 642	17	167	26	1 521	-66	120	- 10 218
8	11,0	24,01	263	5 108	21	1 831	22	216	26	2 641	-57	126	10 575
9	10,9	22,49	244	4 739	17	1 386	27	265	26	3 212	-46	132	53 067
10	12,7	19,90	252	4 895	13	1 101	33	324	26	4 574	-34	138	136 938
11	13,0	16,00	207	4 021	8	560	39	383	26	5 534	-21	144	244 871
12	18,4	9,79	179	3 477	2	121	47	461	26	9 439	-5	153	590 661
13	10,1	2,81	28	544	-3	- 28	54	530	26	5 953	9	158	460 463
					Σ W sin α =	**17 655**						**M_p=**	**1 430 279**

Tlak porne vode		Parametri č.		Iterativni proračun						
Piezometrijska visina (hᵦ), m	Tlak porne vode (u), Pa	Kohezija (c), kPa	Kut unutrašnjeg trenja (φ), °	cb + (W+Pcosβ-ub) tg φ	m_α (iteracija F_1)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_2)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_3)	Brojnik faktora sigurnosti
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	10	0	34	383	1,17	329	1,04	369	1,02	377
9	88	0	34	778	1,18	659	1,06	734	1,04	748
16	157	0	34	962	1,19	805	1,08	888	1,06	904
23	226	0	34	1 274	1,20	1 059	1,10	1 157	1,08	1 176
30	294	0	34	1 748	1,21	1 449	1,12	1 567	1,10	1 589
37	363	0	34	1 565	1,20	1 303	1,12	1 396	1,11	1 414
41	402	0	34	1 318	1,19	1 106	1,12	1 176	1,11	1 188
46	451	0	24	1 121	1,09	1 026	1,05	1 064	1,05	1 071
49	481	0	24	1 063	1,09	978	1,05	1 008	1,05	1 013
52	510	0	24	1 125	1,07	1 047	1,05	1 072	1,05	1 076
55	540	0	24	882	1,05	838	1,04	850	1,03	852
56	549	0	24	825	1,01	813	1,01	816	1,01	816
56	549	0	24	154	0,98	158	0,98	157	0,98	157
					Σ_1 =	**11 570**	Σ_2 =	**12 254**	Σ_3 =	**12 381**

7.4 Tablični izračun završne kosine sa šljunkovitim materijalom

Tablica 7-4 prikazuje tablični izračun završne kosine u šljunkovitom materijalu. Kao mjerodavan rezultat u trećem iterativnom koraku dobiven je faktor sigurnosti u iznosu **1,02**. Raspored lamela i kritična klizna ploha predmetne kosine prethodno definirane u CAD programu prikazan je na slici 7-4.



Slika 7-4 Profil završne kosine sa šljunkovitim materijalom

Tablica 7-4 Iterativni postupak za nagib završne kosine sa šljunkovitim materijalom

Geometrijski ulazni parametri							Tlak površinske vode							Tlak porne vode	
Broj odsječka	Horizontalna širina (b), m	Prosječna visina (h_p), m	Površina (A), m^2	Težina (W), kN	Nagib baze odsječka (α), °	W sin α	Visina stupca vode (h_s), m	Prosječni pritisak stupca vode (P_{ov}), kPa	Nagib vrha odsječka (β) °	Vanjska sila vode na površinu (P), kPa	Horizontalni Krak sile (d_h), m	Vertikalni krak sile (d_v), m	Moment od površinske vode (M_p), kNm	Piezometrijska visina (h_p), m	Tlak porne vode (u), kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,0	0,00	0		0				0						
2	0,0	0,00	0		0				0						
3	0,0	0,00	0		0				0						
4	6,9	5,33	35	680	62	600			26					3	29
5	12,9	14,93	188	3 652	52	2 878	4	39	26	563	-78	47	- 27 880	19	186
6	11,6	20,85	239	4 642	42	3 106	11	108	26	1 393	-66	54	- 49 648	32	314
7	11,2	23,00	256	4 972	33	2 708	17	167	26	2 078	-55	60	- 48 070	40	392
8	10,4	22,94	238	4 623	26	2 027	24	235	26	2 724	-44	66	- 28 917	46	451
9	13,1	21,04	238	4 623	19	1 505	30	294	26	4 289	-32	73	13 896	51	500
10	12,1	17,20	206	4 001	11	763	38	373	26	5 019	-20	80	85 786	55	540
11	11,9	11,95	142	2 758	5	240	45	441	26	5 845	-8	87	180 884	56	549
12	14,0	4,64	64	1 243	-3	- 65	52	510	26	7 946	5	95	366 615	57	559
					Σ W sin α =	**13 763**						**M_p=**	**492 667**		

Parametri č.		Iterativni proračun						
Kohezija (c), kPa	Kut unutrašnjeg trenja (φ),	cb + (W+Pcosβ-ub) tg φ	m_α (iteracija F_1)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_2)	Brojnik faktora sigurnosti	m_α (iteracija F_3)	Brojnik faktora sigurnosti
17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	34		1,00		1,00		1,00	
0	34		1,00		1,00		1,00	
0	34		1,00		1,00		1,00	
0	34	322	1,07	302	1,06	304	1,05	305
0	34	1 183	1,15	1 031	1,14	1 038	1,14	1 040
0	34	1 519	1,19	1 272	1,19	1 279	1,19	1 281
0	34	1 649	1,21	1 368	1,20	1 374	1,20	1 375
0	34	1 604	1,19	1 343	1,19	1 348	1,19	1 349
0	34	1 298	1,17	1 114	1,16	1 117	1,16	1 118
0	34	1 338	1,11	1 205	1,11	1 207	1,11	1 207
0	34	994	1,05	942	1,05	943	1,05	943
0	34	375	0,96	390	0,96	389	0,96	389
			Σ_1 =	**8 966**	Σ_2 =	**9 000**	Σ_3 =	**9 008**

8. USPOREDBA REZULTATA

Rezultati, dobiveni prethodno obrađenom pojednostavljenom Bishopovom tabličnom i računalnom metodom, te metodom Morgenstern-Pricea sumarno su prikazani u tablici 8-1.

Tablica 8-1 Usporedba rezultata analiza stabilnosti kosina

	Faktori sigurnosti		
Tip kosine	**Bishopova tablična metoda**	**Bishopova računalna metoda**	**MP računalna metoda**
Radna kosina sa šljunkom	1,400	1,371	1,373
Radna kosina s proslojkom gline	1,100	1,223	1,198
Završna kosina sa šljunkom	-	1,643	1,644
Završna kosina s proslojkom gline	1,420	1,373	1,357

Uspoređujući analize pojednostavljenom Bishopovom metodom, može se primijetiti, u jednom slučaju (radna kosina s proslojkom gline) tablična metoda je generirala niže faktore sigurnosti, dok u ostala dva slučaja (radna kosina sa šljunkom i završna kosina s proslojkom gline), računalna metoda pokazuje manje vrijednosti faktora sigurnosti.

Rezultati dobiveni računalnim putem, i za MP i za pojednostavljenu Bishopovu metodu su međusobno bliži po vrijednostima u odnosu na tabličnu metodu koja pokazuje veća odstupanja

Također, na temelju *Pravilnika o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (Službeni list SFRJ, br. 38/77 i 11/80),* faktor sigurnosti radnih kosina bi trebao biti u granicama od 1,1 do 1,15, tj. ne manje od toga iznosa, dok za završne kosine faktor sigurnosti bi trebao iznositi ne manje od 1,30. Prema navedenom svi dobiveni faktori zadovoljavaju normu.

Gledajući širu sliku, računalne metode su u prosjeku pokazale više faktore sigurnosti, s prosječnim faktorom od 1,4025 za pojednostavljenu Bishopovu i 1,3930 za MP metodu, dok prosječna vrijednost faktora sigurnosti za tabličnu metodu iznosi 1,235.

9. ZAKLJUČAK

Bez obzira na tehnološki napredak analiza stabilnost kosina i dalje predstavlja jedan od većih izazova u rudarstvu i geotehnici. Danas su dostupne brojne metode i načini proračuna stabilnosti kosina što često može rezultirati i razlikama u faktorima sigurnosti. Usporedba faktora sigurnosti radnih i završnih kosina provedena je pomoću tri različite metode, dvije računalne, te jednu tabličnu. Pri tome su korištene pojednostavljena Bishopova metoda kroz računalnu i tabličnu obradu podataka, te Morgenstern-Priceova metoda kroz računalnu obradu podataka. Za računalnu obradu podataka korišten je program GeoStudio, Student licence a tablična obrada podataka provedena je u MS Excelu.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da se pojednostavljenom Bishopovom računalnom metodom u prikazanim primjerima prosječno generiraju nešto veće vrijednosti faktora sigurnosti za razliku od faktora sigurnosti dobivenih metodom Morgenstern-Pricea. Ta razlika nad danim primjerima nije vidljiva kod slučaja čisto šljunkovite radnih kosina, dok uvođenjem kosina s proslojkom sitnozrnatog materijala gline, kao i završnih kosina, razlika se povećava, te su očiti niži faktori sigurnosti kod MP metode, što ujedno i potvrđuje teorijsku osnovu same metode. Također, glineni materijal negativno utječe na stabilnost same kosine, smanjujući faktor sigurnosti u usporedbi sa kosinama sa šljunkom.

Računalni programi predstavljaju značajan napredak u sferi izračuna stabilnosti kosina, gdje srednje vrijednosti dobivenih rezultata ne odstupaju u velikoj mjeri od rezultata dobivenih tradicionalnim načinom. Osim toga, vrijeme generiranja računalnoga izlaza je neusporedivo kraće u odnosu na druge manualne postupke jednakih metoda što uvelike olakšava rad i obradu podataka.

10. LITERATURA

Albateineh, N.. 2006. Slope stability analysis using 2D and 3D methods. Master Thesis, The University of Akron.

Calx d.o.o, 2016. Idejni rudarski project eksploatacije građevnog pijeska i šljunka na eksplaotacijskom polju Hrastovljan.

Duncan, J., Wright, S.G. 2005. Soil Strength and Slope Stability, Wiley.

Duncan, J., M., 1996. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. Journal of Geotechnical Engineering, 122, 577-594.

Fine, 2007. Geo 5 User's Guide, Version 5.5., Fine Ltd.

IGH, 2016. Izvještaj o vrednovanju rezultata ispitivanja prirodnog pijeska i šljunka iz istražnog prostora Hrastovljan. Zagreb.

Juričić, K., 2017. Prikaz mjera sanacija klizišta, Diplomski rad, Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek.

Szavits-Nossan, V., 2015. Stabilnost kosina, Mehanika tla i stijena – predavanje, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet Zagreb

Službeni list SFRJ, br. 38/77 i 11/80. *Pravilnik o tehničkim normativima za površinsku eksploataciju mineralnih sirovina.* Zagreb: Narodne novine d.d.

U.S. Army Corps of Engineers, 2003. Slope stability, Engineer Manual.

Reyes, A., Parra, D. 2014. 3D slope stability analysis by the using limit equilibrium method analysis of a mine waste dump, Proceedings Tailings and Mine Waste, October 5-8, Keystone, Colorado.