

# Analize razvoja nestabilnosti u umanjenom fizičkom modelu kosine

---

Krstinić, Maja

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:604917>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Maja Krstinić**

**Analize razvoja nestabilnosti u umanjenom fizičkom modelu kosine**

**Završni rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Prijediplomski sveučilišni studij građevinarstva  
Građevinarstvo  
Mehanika tla i stijena**

**Maja Krstinić  
JMBAG: 0114035598**

**Analize razvoja nestabilnosti u umanjenom fizičkom modelu kosine**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2024.**

## **IZJAVA**

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s entorom/mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

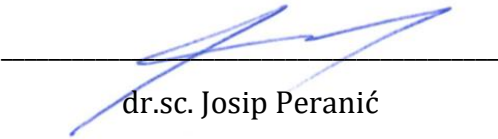
---

Maja Krstinić

U Rijeci, 16.09.2024.

## IZJAVA O PRIPADNOSTI ZNANSTVENOM PROJEKTU

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta **Hidraulička karakterizacija tla korištenjem fizičkih i numeričkih modela kosina (HCPNM)** (voditelj dr.sc. Josip Peranić) koji se realizira uz potporu Sveučilišta u Rijeci (uniri-iskusni-tehnic-23-240) i znanstvenog projekta **Investigation of landslide initiation caused by rainfall infiltration using small-scale physical and numerical modeling (ILIRIM)** (voditelj dr.sc. Josip Peranić) podržanog od strane Međunarodnog konzorcija za klizišta (IPL-256).



dr.sc. Josip Peranić

U Rijeci, 15. rujna 2024.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem svom mentoru i profesoru doc. dr. sc. Josipu Peraniću na nesebičnoj podršci, stručnim savjetima i neizmjernom strpljenju tijekom izrade ovog rada. Njegovo znanje, smjernice i posvećenost bili su ključni za uspješno dovršavanje ovog rada.

## SAŽETAK

Ovaj rad analizira razvoj nestabilnosti u nožici umanjenog fizičkog modela kosine izloženog infiltraciji simulirane oborine i porastu razine podzemne vode. Platforma korištena za provedbu pokusa na umanjenom fizičkom modelu kosine nalazi se u Laboratoriju za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Na temelju dobivenih rezultata definirana je geometrija klizne plohe te su provedene analize stabilnosti korištenjem pojednostavljene Bishopove metode, za različite uvjete razine podzemne vode i parametara čvrstoće tla. Budući da sama metoda podrazumijeva iterativni pristup za izračunavanje faktora sigurnosti, postupak proračuna implementiran je u programu Excel (Microsoft) a postupak i izrazi su detaljno prikazani u radu. Također, dana je teorijska osnova mogućih uzroka nastanka klizišta, neke osnovne klasifikacija klizišta, te kratak pregled metoda analize stabilnosti kosina. U praktičnom dijelu rada prikazane su osnovne karakteristike razmatranog pokusa u radu te su provedene analize stabilnosti s kratkom diskusijom i zaključcima.

**Ključne riječi:** stabilnost kosina, fizički model, klizišta, Bishopova metoda, Excel, faktor sigurnosti, pijesak.

## **SUMMARY**

This paper analyzes the development of instability in the slope of a reduced physical model exposed to infiltration from simulated rainfall and a rise in groundwater level. The platform used for conducting experiments on the reduced physical slope model is located at the Geotechnics Laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. Based on the obtained results, the geometry of the slip surface was defined, and stability analyses were carried out using the simplified Bishop's method, for various conditions of groundwater levels and soil strength parameters. Since the method itself involves an iterative approach to calculating the factor of safety, the calculation process was implemented in Excel (Microsoft), and the procedure and expressions are presented in detail in the paper. Additionally, the theoretical basis of possible causes of landslides, some basic landslide classifications, and a brief overview of slope stability analysis methods are provided. In the practical part of the paper, the basic characteristics of the experiment considered are presented, along with stability analyses, followed by a brief discussion and conclusions.

**Key words:** slope stability, physical model, landslides, Bishop's method, Excel, factor of safety, sand.



# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. KLIZIŠTA</b> .....	3
<b>2.1. Opće značajke klizišta</b> .....	3
<b>2.2. Aktivnost klizišta</b> .....	5
<b>2.3. Brzina klizanja</b> .....	6
<b>2.4. Analize stabilnosti kosina</b> .....	7
<b>2.4.1. Posmična čvrstoća i metode analize</b> .....	8
<b>2.4.2. Metoda lamela</b> .....	10
<b>2.4.3. Pojednostavljena Bishopova metoda</b> .....	12
<b>3. OPIS PROBLEMA</b> .....	14
<b>3.1. Opis proračuna</b> .....	16
<b>4. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJE</b> .....	21
<b>4.1. Analiza utjecaja RPV</b> .....	21
<b>4.2. Povratne analize - određivanje vrijednosti kuta unutarnjeg ternja pijeska</b> .....	25
<b>4.3. Analiza utjecaja <math>c</math> na <math>FS</math> za <math>\varphi = \text{const.}</math></b> .....	27
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	34
<b>6. LITERATURA</b> .....	35

## POPIS SLIKA

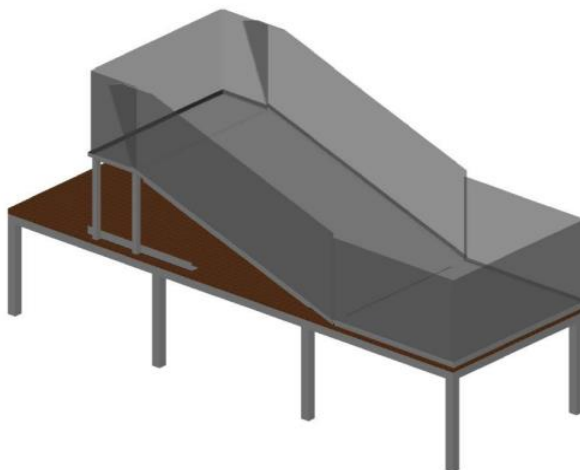
Slika 1: Shematski prikaz modela platforme za ispitivanje (preuzeto iz Priručnika za upotrebu platforme za fizički model ispitivanja klizišta, 2022) .....	1
Slika 2: Oblik rotacijskog klizišta i osnovni dijelovi klizišta (Nonveiller, 1979).....	4
Slika 3: Presjek profila s modificiranim stanjem aktivnosti klizišta (Raspini, F i ostali, 2019.)	5
Slika 4: Odnos između pomaka, brzine i faktora sigurnosti (Nonveiller, 1979).....	7
Slika 5: Porast pornog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina (Szavist-Nossan, 2024)...	8
Slika 6: Račun stalnosti djelomično uronjene kosine: (a) presjek segmenata s lamelama i razinom podzemne vode, (b) sile koje djeluju na granicama lamele i ; i verižni poligon kojim se ustanovljuje položaj sile na lameli, (c) poligon sila za lamelu I (Nonveiller, 1979).....	11
Slika 7: Prikaz fizičkog modela kosine .....	14
Slika 8: Razvoj nestabilnosti u modelu .....	15
Slika 9: Vidljiva nestabilnost tijekom pokusa .....	15
Slika 10: Grafički prikaz modela kosine s veličinama i stvarnim dimenzijama klizne plohe...	16
Slika 11: Snimka zaslona Excel tablice za pojednostavljenu Bishopovu metodu.....	18
Slika 12: Snimka zaslona Excel tablice za rezultat po pojednostavljenoj Bishopovoj metodi .	20
Slika 13: Prikaz tri slučaja razine podzemne vode razmatranih u provedenim analizama.....	21
Slika 14: Prikaz kosine za prvi slučaj razine podzemne vode.....	22
Slika 15: Prikaz kosine za drugi slučaj razine podzemne vode.....	23
Slika 16: Prikaz kosine za treći slučaj razine podzemne vode .....	24
Slika 17: Dijagram FS/ $\varphi$ za prvi slučaj razine podzemne vode.....	25
Slika 18: Dijagram FS/ $\varphi$ za drugi slučaj razine podzemne vode.....	26
Slika 19: Dijagram FS/ $\varphi$ za trećii slučaj razine podzemne vode.....	27
Slika 20: Dijagram FS/ c za prvi slučaj razine podzemne vode .....	29
Slika 21: Dijagram FS/ c za drugii slučaj razine podzemne vode .....	31
Slika 22: Dijagram FS/ c za trećoi slučaj razine podzemne vode .....	33

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Ulazni podaci za provedbu proračuna prema grafičkom prikazu.....	17
Tablica 2: Parametri potrebni za računski postupak.....	17
Tablica 3: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za prvi slučaj razine podzemne vode .....	22
Tablica 4: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za drugi slučaj razine podzemne vode .....	23
Tablica 5: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za treći slučaj razine podzemne vode.....	24
Tablica 6: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za prvi slučaj razine podzemne vode pri vrijednosti $\varphi=36,9^\circ$ .....	25
Tablica 7: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za drugi slučaj razine podzemne vode pri vrijednosti $\varphi=41,4^\circ$ .....	26
Tablica 8: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za treći slučaj razine podzemne vode pri vrijednosti $\varphi=54,1^\circ$ .....	26
Tablica 9: Rezultati izračunatih vrijednosti faktora sigurnosti za vrijednost C u rasponu od 0.25 do 2 za prvi slučaj razine podzemne vode.....	27
Tablica 10: Rezultati izračunatih vrijednosti faktora sigurnosti za vrijednost C u rasponu od 0.25 do 2 za drugi slučaj razine podzemne vode.....	29
Tablica 11: Rezultati izračunatih vrijednosti faktora sigurnosti za vrijednost C u rasponu od 0.25 do 2 za treći slučaj razine podzemne vode .....	31

## 1. UVOD

U ovom istraživanju analizirana je stabilnost fizičkog modela kosine. Platforma za ispitivanje fizičkih model razvijena je na temelju uspješnih praksi iz znanstvene literature, u sklopu znanstvenog projekta HRZZ-IP-2018-01-1503: *Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja*, voditelja prof. dr. sc. Željka Arbanasa. Projektiranje i izradu platforme realizirali su članovi projektnog tima i tehničko osoblje Laboratorija za geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Platforme su prilagođene ispitivanjima u statičkim i dinamičkim uvjetima opterećenja. Platforma za ispitivanje fizičkih modela kosina pri statičkim uvjetima opterećenja sastoji se od čelične nosive konstrukcije i pleksiglasa (slika 1). Radni stol, na kojem se nalazi platforma, izrađen je od čeličnih elemenata i vodootporne šperploče što omogućava fiksiranje platforme pod različitim geometrijskim uvjetima (Arbanas i ostali, 2022).



Slika 1: Shematski prikaz modela platforme za ispitivanje (preuzeto iz Priručnika za upotrebu platforme za fizički model ispitivanja klizišta, 2022)

Analiza stabilnosti kosina uključuje procjenu otpornosti tla na smicanje pod utjecajem gravitacije i drugih opterećenja. Pojednostavljena Bishopova metoda koristi iterativni pristup za izračunavanje faktora sigurnosti (FS). Ova metoda uzima u obzir sile koje djeluju na kosinu, uključujući posmične otpore i normalne sile koje djeluju na potencijalnu kliznu plohu. Povećanje kuta trenja ( $\varphi$ ) tla rezultira povećanom otpornošću tla na smicanje, što povećava

faktor sigurnosti. Faktori sigurnosti izračunavaju se pomoću iterativnog procesa, pri čemu se probna vrijednost faktora sigurnosti kontinuirano podešava dok se ne postigne stabilna i točna vrijednost (Szavist-Nossan, 2024).

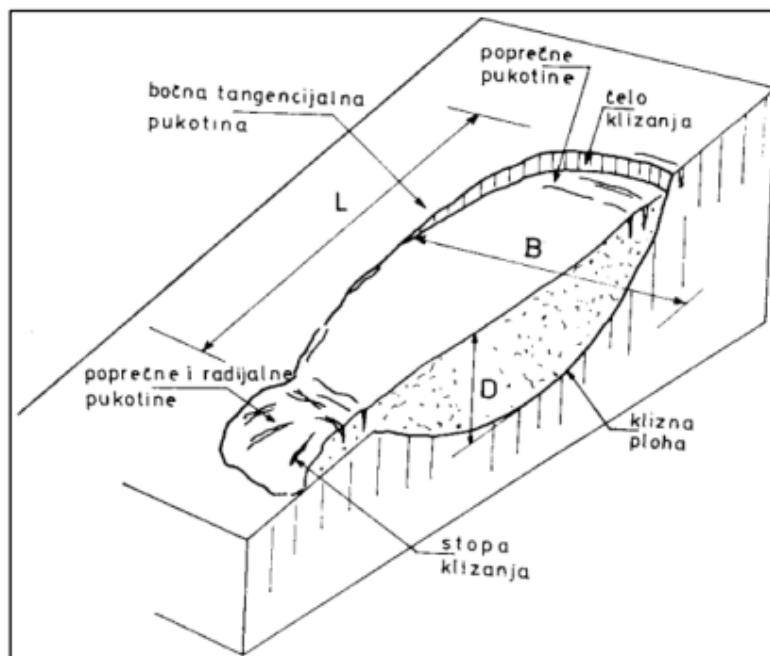
## 2. KLIZIŠTA

Geološki procesi koji nastaju kad se materijal, uključujući tlo, stijene ili njihovu kombinaciju, pomakne niz padinu uslijed djelovanja gravitacije nazivaju se klizišta (Dearman, 1991). Postoje različiti mogući uzroci nastanka klizišta na prirodnim i umjetnim kosinama, uključujući velike količine kiše koje mijenjaju uvjete vlažnosti i pomnih pritisaka u tlu, promjene u razini podzemne vode, oštećenje korijenja drveća, seizmička djelovanja, antropogene aktivnosti kao što su iskopi ili građevinski radovi općenito, kao i geološke karakteristike tla i stijena. Klizišta su često rezultat složene interakcije između različitih čimbenika prisutnih na kosini (Cruden, 1991). Čimbenici koji utječu na tu interakciju su karakteristike tla i/ili stijena u koje ubrajamo koheziju tla, kut unutarnjeg trenja, hidrauličke značajke, porozitet, značajke čvrstoće (Dearman, 1991).

### 2.1. Opće značajke klizišta

Postoje različite vrste klizišta, kategorizirane prema materijalu, načinu i brzini kretanja. Varnesova klasifikacija (1978.) identificira nekoliko tipova: odron, odvala, klizanje, pomaci blokova i tok. Odroni se najprije javljaju kada se tlo ili stijene odvoje s strmih padina duž površina gdje je posmični pomak minimalan ili gotovo nepostojeći. Nakon odvajanja, materijal se obično kreće niz padinu kroz pad, odskakivanje ili kotrljanje. Prevrtnje se očituje kao rotacija mase tla ili stijena prema naprijed oko osi ili točke ispod težišta pomaknute mase. Gravitacija, naročito težina materijala na višim dijelovima padine, često uzrokuje prevrtanje, dok ga voda ili led unutar pukotina mogu dodatno potaknuti. Prevrtnja mogu uključivati različite vrste materijala, poput stijena, krupnog materijala ili finih zemljanih slojeva, i često su složena, s više različitih procesa. Klizanje se odnosi na kretanje mase tla ili stijena niz padinu duž površina loma ili zona intenzivnog posmičnog deformiranja, gdje se pokretanje započinje lokalno, a zatim se širi iz početnog područja otkazivanja. Tokovi, s druge strane, karakteriziraju kontinuirano kretanje s kratkotrajnim, gusto raspoređenim posmičnim površinama koje često nestaju, a brzine unutar pomaknute mase podsjećaju na one u viskozim tekućinama. Između klizanja i toka postoji postupni prijelaz, koji ovisi o količini vode, pokretljivosti mase i dinamici kretanja. Širenje je proces rastezanja koherentne mase tla ili stijena, praćen općim slijeganjem

napuknute mase koherentnog materijala u mekši podložni sloj. Širenje može nastati uslijed likvefakcije ili tečenja (i istiskivanja) mekšeg podložnog materijala. Tipovi širenja uključuju širenja blokova, likvefakcijska širenja i lateralna širenja (Highland L.M., Bobrowsky P., 2008). Na slici 2 prikazan je oblik rotacijskog klizišta i njegovi osnovni dijelovi.

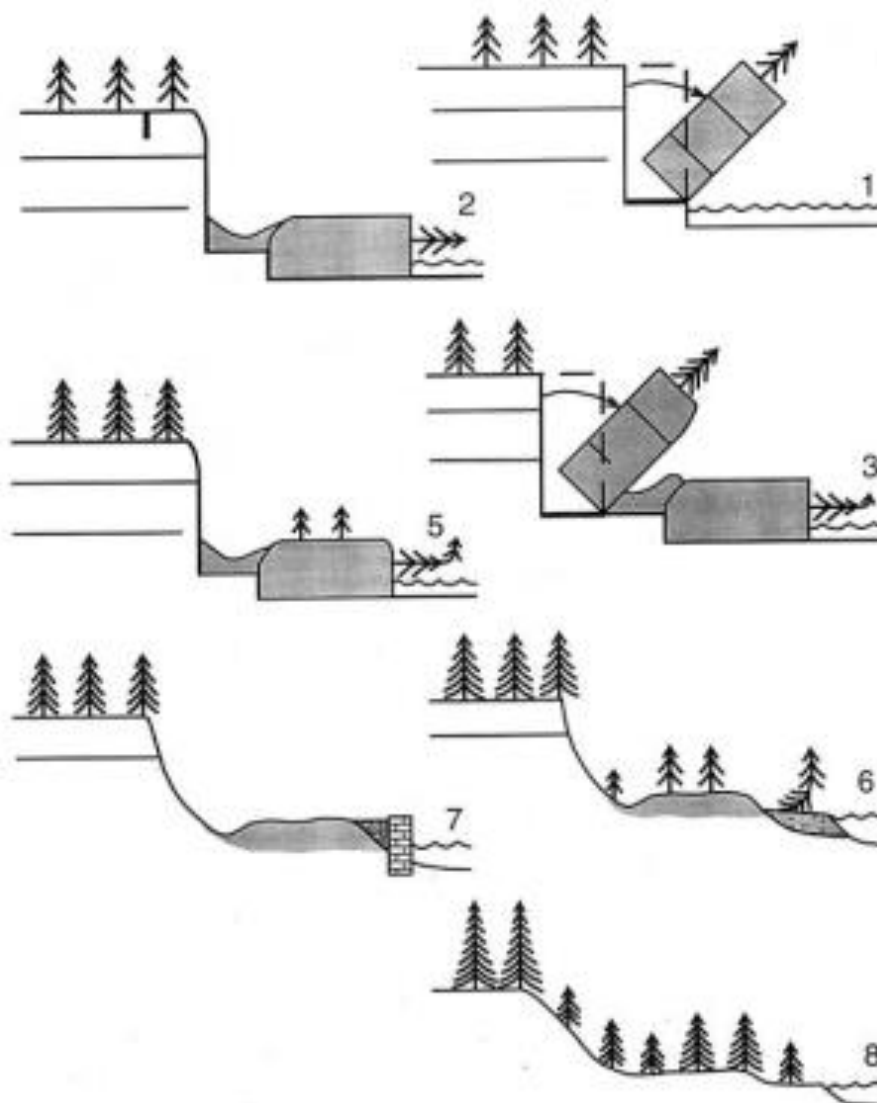


Slika 2: Oblik rotacijskog klizišta i osnovni dijelovi klizišta (Nonveiller, 1979)

Aksonometrijski presjek klizne kosine pruža trodimenzionalni prikaz klizišta, omogućujući detaljan uvid u njegove ključne dijelove i strukturu. Klizna ploha se jasno vidi kao donja granica pokrenutog materijala, smještena ispod neporemećene kosine. Čelo klizanja označava nepomični materijal na vrhu glavne pukotine, na početku klizne plohe. Stopa klizanja predstavlja pokretni dio klizišta i nalazi se dalje od završetka plohe sloma. Dimenzije poremećene mase tla – duljina (L), širina (B) i dubina (D) – također su prikazane, omogućujući uvid u prostorni raspored i veličinu klizišta. Ovaj presjek pomaže u razumijevanju dinamike klizišta, promjena koje se događaju tokom vremena, kao i u planiranju potencijalnih stabilizacijskih mjera ili sanacija. Sve ove informacije pružaju sveobuhvatan pogled na geometriju i razvoj klizišta, što je ključno za inženjerske analize i intervencije (Nonveiller, 1979.).

## 2.2. Aktivnost klizišta

Aktivnost klizišta može varirati od sporog pomicanja tla do naglih i destruktivnih klizanja, ovisno o uvjetima i vrsti materijala koji su uključeni u proces. Praćenje i analiza aktivnosti klizišta ključni su za sprječavanje šteta i zaštitu infrastrukture i ljudskih života. Stanje aktivnosti klizišta opisuje se terminologijom prikazanom na slici 3. Na primjer, tip klizišta zvan prevrtanje uključuje pomicanje mase tla ili stijena koje se okreće oko točke ili osi ispod mase, često zbog destabilizacije baze (Raspini, F i ostali, 2019.).



Slika 3: Presjek profila s modificiranim stanjem aktivnosti klizišta (Raspini, F i ostali, 2019.)



Na slici su prikazani slijedeći profili klizišta:

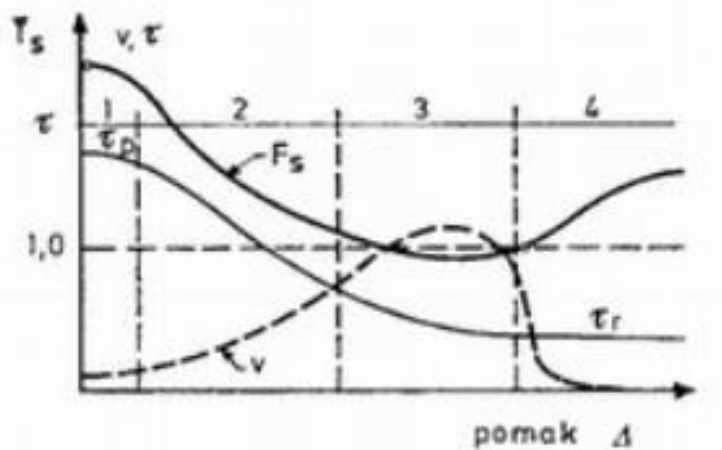
1. Aktivno - klizište u pokretu
2. Trenutačno neaktivno - klizište koje se kretalo u posljednjih 12 mjeseci, ali se trenutačno ne kreće
3. Reaktivirano – aktivno klizište koje je prije bilo neaktivno
4. Neaktivno - klizište koje se nije pokretalo posljednjih 12 mjeseci
5. Privremeno umireno – neaktivno klizište koje se može reaktivirati zbog istih ili nekih drugih uzorka
6. Trajno umireno – neaktivno klizište koje više nije pod utjecajem uzorka klizanja
7. Stabilizirano – neaktivno klizište zaštićeno mjerama sanacije
8. Reliktno – neaktivno klizište koje je bilo aktivno u klimatskim i geomorfološkim uvjetima koji više ne vladaju svugdje ; ili samo “,” I na kraju ide točka.

Ova terminologija omogućuje precizniji opis i klasifikaciju različitih vrsta kretanja tla u područjima sklonim klizištima (Raspini, F i ostali, 2019.).

### **2.3. Brzina klizanja**

Tlo ostaje stabilno kada je njegova čvrstoća na smicanje veća od posmičnog naprezanja. Različiti materijali utječu na nagib kosina: glina i prah uzrokuju blaže nagibe, dok čvršći materijali stvaraju strme kosine. Uslijed narušavanja prirodne ravnoteže, posmična naprezanja mogu nadmašiti čvrstoću na smicanje, što dovodi do sloma kosine i nastanka pomaka materijala niz kosinu, čime se mijenja geometrija klizišta. Brzina klizanja i njen razvoj tijekom vremena su ključni za klasifikaciju klizišta. Terzaghi (1950) razlikuje nekoliko faza klizanja na osnovu razvoja brzine, kako je prikazano na slici 4. Prva faza je puzanje, karakterizirano vrlo malom i približno konstantnom brzinom. U ovoj fazi su posmična naprezanja manja od čvrstoće, pa je faktor sigurnosti veći od 1. Puzanje traje sve dok destabilizirajuće sile ili deformacije ne počnu umanjivati stabilnost kosine. Zatim dolazi do pretklizanja, gdje pad faktora sigurnosti uzrokuje povećanje brzine i postepeni rast deformacija, što vodi do faze sloma, u kojoj je kretanje najbrže. Na kraju faze sloma dolazi do stabilizacije, kada promijenjeni uvjeti ili ljudske intervencije

zmanjuju posmične, povećavajući faktor sigurnosti i smanjujući brzinu klizanja (Nonveiller, 1979).



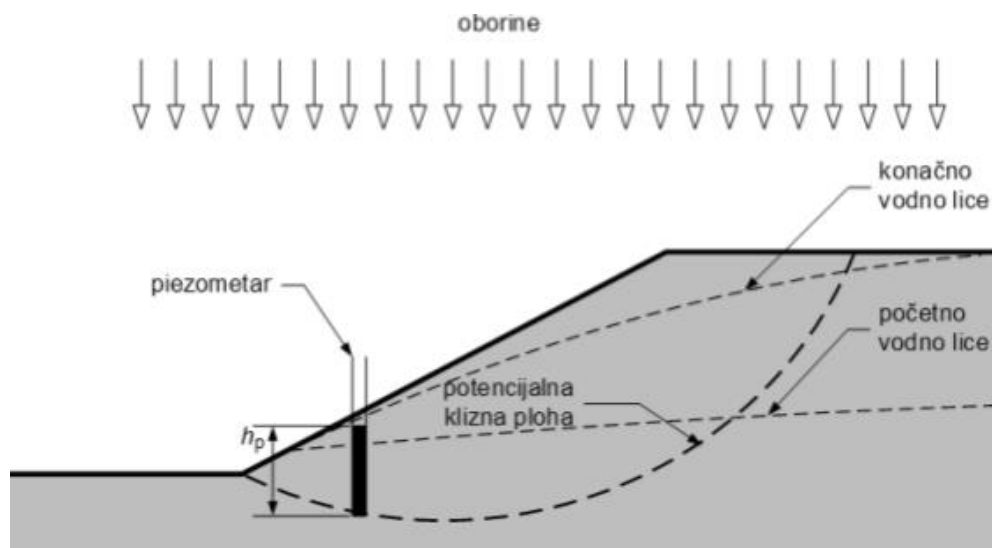
Slika 4: Odnos između pomaka, brzine i faktora sigurnosti (Nonveiller, 1979)

Klasifikaciju nestabilnosti u zavisnosti o brzini pomaka dao je Varnes (1978) na slijedeći način: Vrlo velike brzine klizanja javljaju se kada je materijal izuzetno osjetljiv na poremećaje. Male deformacije i lokalni poremećaji mogu izazvati progresivan pad čvrstoće, što dovodi do značajnog ubrzanja klizanja, naglog širenja zahvaćenog područja i vrlo velike konačne brzine.

#### 2.4. Analize stabilnosti kosina

Osnovni uvjet za stabilnost kosina je da materijal ima veću čvrstoću od posmičnog naprezanja koje je potrebno da bi se održala ravnoteža potencijalnog kliznog tijela. Nestabilnost kosina obično proizlazi iz nedovoljne posmične čvrstoće tla da se suprotstavi posmičnom naprezanju koje je potrebno za održavanje stabilnih uvjeta. To može biti posljedica smanjenja čvrstoće tla ili povećanja posmičnog naprezanja, ili njihove kombinacije. Glavni uzrok smanjenja čvrstoće može biti porast poroznog pritiska unutar kosine. Na primjer, slika 5 prikazuje kosinu izloženu oborinama koje podižu nivo vode prema površini tla, što dovodi do povećanja poroznog pritiska unutar kosine. Iako se ukupno normalno naprezanje duž potencijalne klizne plohe može održati konstantnim, porast poroznog pritiska smanjuje efektivno normalno naprezanje i time čvrstoću

tla. Drugi faktor koji može dovesti do nestabilnosti kosina je povećanje posmičnog naprezanja duž potencijalne klizne plohe (Szavist-Nossan, 2024).



Slika 5: Porast poreznog tlaka i pada čvrstoće u kosini uslijed oborina (Szavist-Nossan, 2024)

#### 2.4.1. Posmična čvrstoća i metode analize

Ako je materijal klizišta nehomogen, na različitim dijelovima plohe sloma dolazi do prekoračenja čvrstoće tla, što rezultira progresivnim slomom uz smanjenje prosječne čvrstoće. Naprezanja koja se javljaju u tlu u graničnom stanju ravnoteže nisu dovoljno velika da bi uzrokovala drobljenje zrna tla. Deformacije u graničnoj ravnoteži nastaju uslijed rotacije i klizanja zrna tla, a da bi ti procesi uopće započeli potrebno je da sile otpora među zrnima budu prekoračene. Manje čestice tla imaju više dodirnih točaka, što povećava sile otpora. Granična linija čvrstoće definirana je odnosom između normalnih napona  $\sigma$  i posmične čvrstoće  $\tau_f$ . Naponsko stanje u tlu prikazano je kružnicom koja se nalazi ispod granične linije definirane Mohr-ovom teorijom sloma. Kako naponi rastu, kružnica se povećava, a u trenutku kada dotakne graničnu liniju čvrstoće, dolazi do sloma tla. Pravac linije čvrstoće određen je Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće (1):

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

gde su:

$\tau_f$  - posmična čvrstoća tla (kPa),

$c$  – kohezija (kPa),

$\varphi$  – kut unutarnjeg trenja ( $^\circ$ ),

$\sigma$  – normalno efektivno naprezanje (kPa).

Klasične metode za analizu stabilnosti kosina temelje se na pretpostavci da je materijal idealno plastičan prema Mohr-Coulombovoj teoriji. Pristupa se graničnom stanju plastične ravnoteže, slično kao i pri proračunu napona sloma tla ispod temelja ili pritiska na potporne konstrukcije. Pretpostavlja se da u materijalu nema deformacija sve dok naprezanja na određenoj plohi ili u zoni ne dođu do granice sloma, nakon čega dolazi do značajnih deformacija klizanjem duž tih površina ili zona. Stabilnost kosina može se alternativno istražiti analizom naprezanja u relevantnim područjima kosine ili analizom ravnoteže sila.

Metode granične ravnoteže procjenjuju stabilnost kosina analizirajući kako se sile raspoređuju na svakom segmentu kliznog tijela koje je u kontaktu s okolnim tlama preko klizne plohe. Bez dodatnih pretpostavki o krutosti lamela, sustav ovih vertikalnih lamela je statički neodređen. Posmična i normalna naprezanja duž klizne plohe, kao i na osnovici svake lamele, procjenjuju se primjenom pretpostavki radi rješavanja statičke neodređenosti. Stupanj stabilnosti prema metodama granične ravnoteže utvrđuje se usporedbom posmične čvrstoće materijala i posmičnog naprezanja duž klizne plohe. Kao indikator stabilnosti često se koristi faktor sigurnosti, koji je definiran kao omjer posmične čvrstoće i posmičnog naprezanja prikazano izrazom (2) preuzetom iz [5]. Jedna od pretpostavki koja se koristi za rješavanje statičke neodređenosti u sustavu lamela, što je zajedničko svim varijantama metoda granične ravnoteže, je pretpostavka da je faktor sigurnosti konstantan duž klizne plohe svakog kliznog tijela, odnosno za svaku lamelu (Szavist-Nossan, 2024).

$$F_s = \frac{\tau_f}{F} \quad (2)$$

Gdje su:

- $F_s$  – Faktor sigurnosti (/),
- $\tau_f$  – posmična čvrstoća (kPa),
- $F$  – posmično naprezanje (kPa).

Pritom vrijedi:

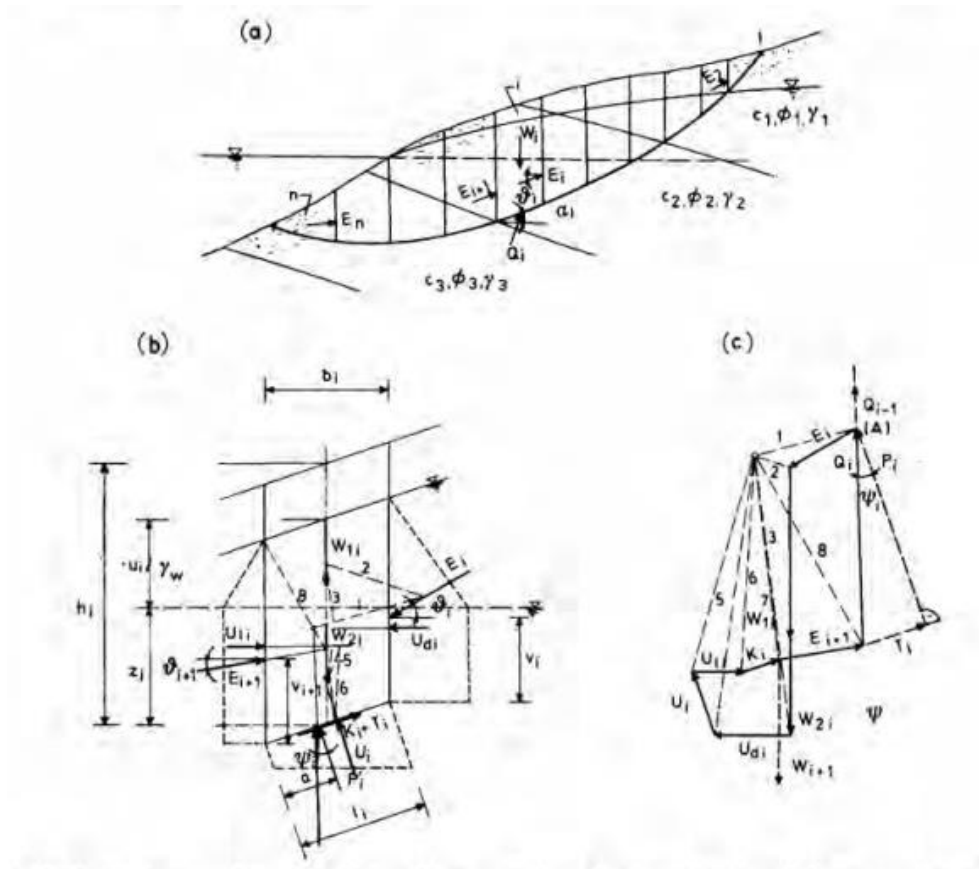
- $F > 1$        $\longrightarrow$       stabilno stanje,
- $F = 1$        $\longrightarrow$       stanje sloma; nestabilno stanje,
- $0 \leq F < 1$        $\longrightarrow$       neravnotežno stanje.

Faktor sigurnosti koristi se za utvrđivanje stabilnosti zamišljenog ili stvarnog kliznog tijela. Kod projektiranja kosina, klizno tijelo nije unaprijed određeno, već se mora pronaći ono koje ima najmanji faktor sigurnosti (Szavist-Nossan, 2024).

#### **2.4.2. Metoda lamela**

Metoda lamela je pristup analizi stabilnosti kosina u geotehničkom inženjerstvu. Ona podrazumijeva podjelu kosine na segmente ili lamele koje se zatim analiziraju pojedinačno. Svaka lamela se tretira kao ravna površina koja se može pomicati duž ravnotežne linije, uzimajući u obzir faktore poput geometrije terena, svojstava tla i opterećenja. Analiza stabilnosti kosina pomoću metode lamela obično uključuje izračunavanje rezultirajućih sila i momenta na svakoj lameli te provjeru jesu li te sile unutar granica stabilnosti. Metoda lamela nudi dva ključna benefita u usporedbi s grafičkom metodom. Prvo, raspodjela normalnih naprezanja može se jednostavno izračunati iz samog opterećenja lamele, za razliku od grafičke metode koja zahtijeva uvođenje pretpostavki. Drugo, metoda lamela omogućuje jednostavno uključivanje složenijih geometrijskih uvjeta kao što su nagibi terena, podzemne vode i različiti slojevi tla, što je dodatni razlog za njezinu primjenu. Faktor sigurnosti za kružnu plohu sloma dobivamo

projiciranjem sila na lamelu u smjeru normalnom na plohu sloma, a zatim izračunavanjem odgovarajućeg omjera.



Slika 6: Račun stailnosti djelomično uronjene kosine: (a) presjek segmenata s lamelama i razinom podzemne vode, (b) sile koje djeluju na granicama lamela  $i$  ;  $i$  verižni poligon kojim se ustanovljuje položaj sile na lameli, (c) poligon sila za lamelu I (Nonveiller, 1979)

Metoda lamela je statički neodređena, što znači da se rješava eliminacijom suvišnih nepoznanica uz pretpostavke o poziciji i smjeru sila na svakoj lameli. Konačni rezultat ovisi o tim pretpostavkama, a ključni je cilj osigurati logičnu raspodjelu naprezanja unutar tla. Postoji niz različitih pretpostavki koje mogu zadovoljiti tu raspodjelu, što može rezultirati različitim vrijednostima faktora sigurnosti (Gidak i Šamec, 2022).

### ***2.4.3. Pojednostavljena Bishopova metoda***

Metoda lamela i Bishopova metoda predstavljaju dvije često korištene tehnike u analizi stabilnosti kosina, posebno u geotehničkim proračunima vezanim za klizanje tla. Obje metode temelje se na diskretizaciji kosine na vertikalne segmente ili "lamele", kako bi se proučila stabilnost pojedinih dijelova unutar cjelokupnog sustava. Unatoč zajedničkoj osnovi, postoje ključne razlike u načinu na koji ove metode pristupaju analizi sila i stabilnosti.

Prije svega, obje metode dijele sličnost u tome što uzimaju u obzir sile koje djeluju na lamele, poput njihove vlastite težine, sila trenja te otpornih sila unutar kosine. Njihov zajednički cilj je utvrditi faktor sigurnosti kosine, odnosno kvantificirati odnos između sila koje potiču klizanje i otpornih sila koje sprječavaju pokretanje mase. Obje metode koriste ove principe kako bi procijenile stabilnost kosina pod različitim uvjetima (Ajmera i Tiwari, 2018).

Međutim, metoda lamela oslanja se na jednostavniji proračun pri čemu se pretpostavlja da su sile između lamela prenesene isključivo horizontalno. Ona zanemaruje vertikalne interakcije među lamelama što rezultira manje preciznim rezultatima u složenijim geometrijskim i geotehničkim uvjetima. Bishopova metoda proširuje analizu uključivanjem vertikalnih komponenti sile što omogućuje detaljniji uvid u interakcije između lamela. Na taj način Bishopova metoda pruža točniju procjenu faktora sigurnosti kosin, iako zahtijeva iterativni proračun zbog složenije matematičke formulacije.

Iako su obje metode primjenjive u praksi, Bishopova metoda se češće koristi u inženjerskim projektima, osobito kada se zahtijevaju precizniji rezultati. Njena sposobnost da integrira vertikalne i horizontalne sile čini je pogodnijom za analizu stabilnosti u slučajevima s kompleksnijim geološkim uvjetima. S druge strane, metoda lamela ostaje korisna u situacijama kada je potrebna brža procjena stabilnosti, s obzirom na njezinu jednostavniju strukturu i lakši proračun.

Pojednostavljena Bishopova metoda, razvijena od strane A.W. Bishopa 1955. godine, jedna je od najčešće korištenih metoda za analizu stabilnosti kosina i klizišta. Ova metoda omogućuje izračunavanje faktora sigurnosti za potencijalne klizne površine kroz podjelu kosine na vertikalne segmente, pri čemu se pretpostavlja kružna klizna površina i horizontalne reakcijske sile između segmenata, dok se sila smicanja definira prema Mohr-Coulomb kriteriju (Szavist-

Nossan, 2024). Faktor sigurnosti izračunava se kao omjer između momenta koji održava stabilnost kosine i momenta koji potiče klizanje, koristeći formulu (3) preuzetu iz (5) koja uključuje efektivnu koheziju.

$$FS = \frac{\sum(c'l + (W - ul)\tan\phi')}{\sum(W\sin\alpha)} \quad (3)$$

Gdje su:

- $c'$  - efektivna kohezija (kPa),
- $l$  - širina segmenta (cm),
- $W$  - težina segmenta (kN),
- $u$  - porni pritisak (kPa),
- $\phi'$  - efektivni kut trenja ( $^\circ$ ),
- $\alpha$  - kut nagiba baze površine segmenta ( $^\circ$ ).

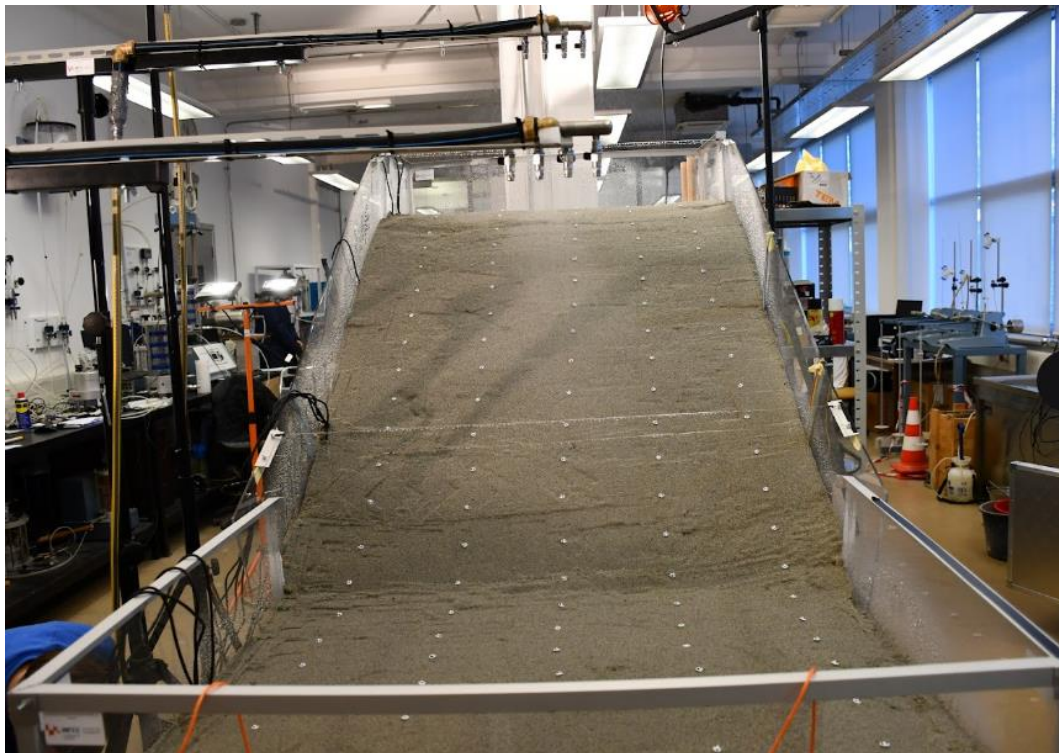
Koraci metode uključuju identifikaciju klizne površine, diskretizaciju kosine na segmente, izračunavanje normalnih i tangencijalnih sila te iterativni proces za određivanje horizontalnih sila sve dok se ne postigne konvergencija. Pojednostavljena Bishopova metoda nudi relativno jednostavan način za analizu stabilnosti, široko je prihvaćena i primijenjena u inženjerskoj praksi, unatoč određenim ograničenjima poput pretpostavke o horizontalnim silama između segmenata. Primjenjuje se u projektiranju kosina, procjeni stabilnosti brana, nasipa i drugih građevinskih objekata te u analizi klizišta u prirodnom i urbanom okruženju, pružajući uravnotežen pristup između jednostavnosti i točnosti.

Kod proračuna pojednostavljene Bishopove metode, veliki dio početnih izračuna identičan je onima korištenim u metodi lamela. Ova metoda je prikladna za nehomogene padine i tla s neodređenom drenažom, gdje se površina sloma može aproksimirati kružnicom; vrlo je pogodna za ručne proračune, ali je manje točna za analizu efektivnog naprezanja u uvjetima visokih pornih pritisaka. Pretpostavlja se kružna površina sloma uz zanemarivanje sila na bočnim stranama lamela (Szavist-Nossan, 2024).



### 3. OPIS PROBLEMA

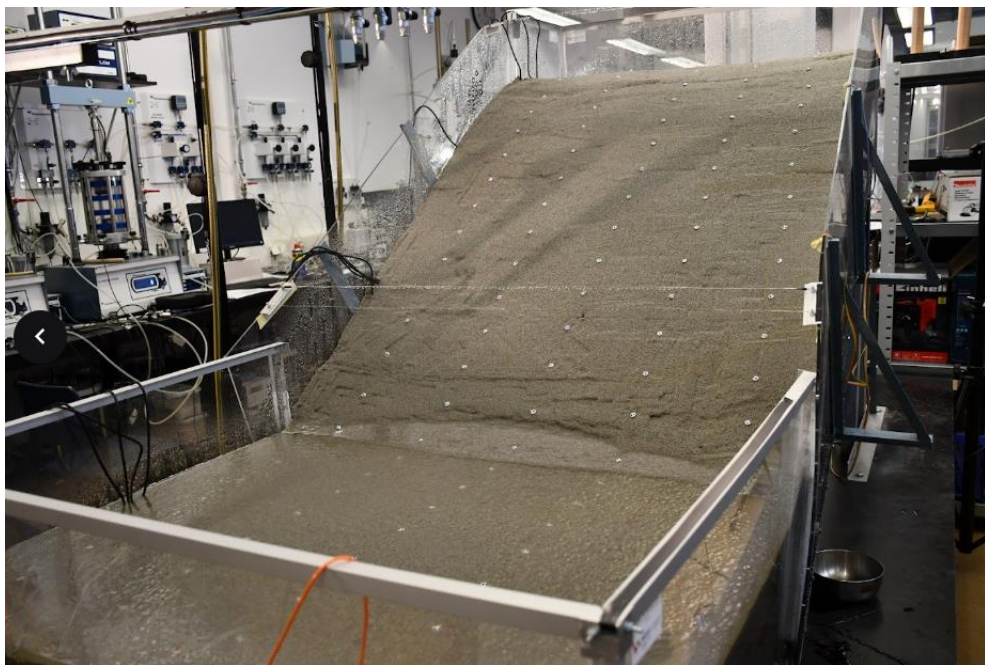
Pokus razmatran u ovom radu proveden je na umanjenom modelu kosine izgrađenom od čistog pijeska pod kutom od 35 stupnjeva, bez ugrađenih mjera sanacije i izložen uvjetima infiltracije simulirane kiše. U pokusu je korištena platforma, simulator oborina i mjerna oprema za praćenje pomaka, vlažnosti tla, naprezanja i površnih pritisaka. Materijal je ugrađivan i zbijan u slojevima, a mjerni uređaji su postavljeni na definirane pozicije i dubine. Prije pokusa izvršena je kalibracija opreme, definirani su mjerni intervali i pokrenuto je snimanje podataka. Simulirana kiša osigurana je ujednačenim rasporedom mlaznica, reguliranjem protoka i tlaka, te odzračivanjem sustava za postizanje jednakog mlaza. Intenzitet i karakteristike oborine definirani su prije pokosa (Arbanas, 2022). Detalj razvoja prvih nestabilnosti u modelu u području nožice kosine prikazan je na slici 7. Slike 8 i 9 prikazuju razvoj nestabilnosti i model na kraju pokusa u statičkim uvjetima opterećenja.



Slika 7: Prikaz fizičkog modela kosine



Slika 8: Razvoj nestabilnosti u modelu

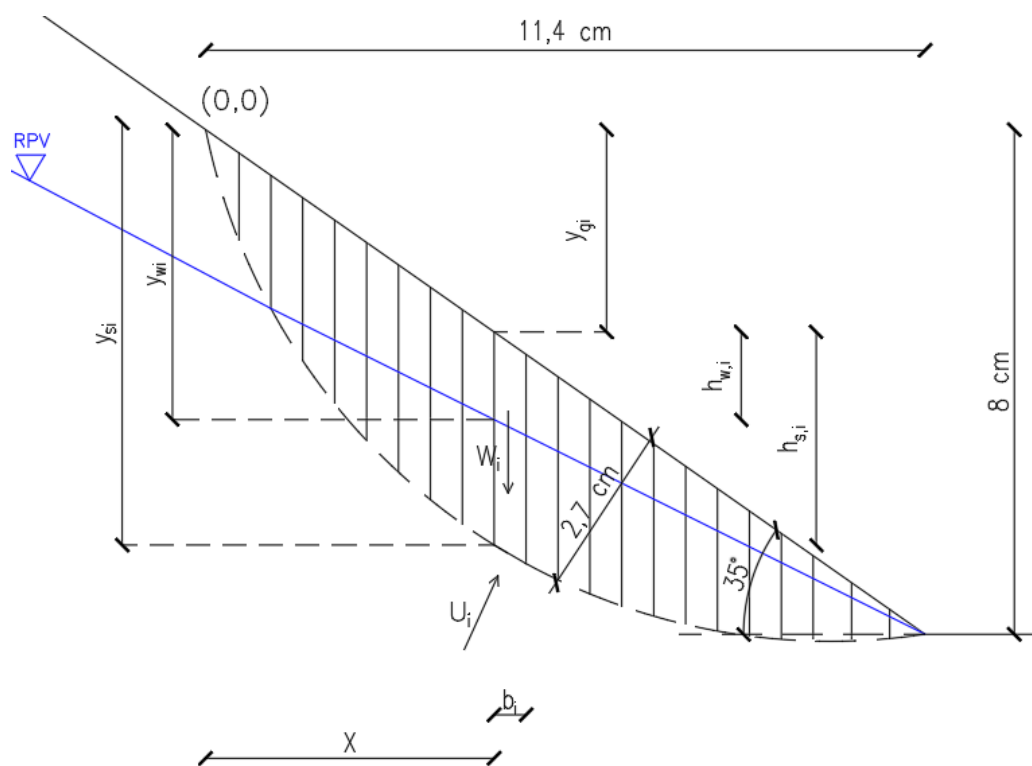


Slika 9: Vidljiva nestabilnost tijekom pokusa

Analiza stabilnosti provedena je pojednostavljenom Bishopovom metodom, pri čemu su pomoću automatizirane Excel tablice dobiveni podatci o faktoru sigurnosti. Izračun je proveden za tri razine podzemne vode kako bi se usporedio njezin utjecaj na faktor sigurnosti te je analiziran utjecaj vrijednosti kuta trenja na rezultate proračuna.

### 3.1. Opis proračuna

Proračun stabilnosti kosine proveo se pomoću automatizirane Excel tablice. U tablicu unijeti su podatci o y-koordinatama klizne površine ( $y_s$ ), razini podzemne vode ( $y_w$ ) i površini tla ( $y_g$ ) na odgovarajućim x-koordinatama, prema shemi na slici 10.



Slika 10: Grafički prikaz modela kosine s veličinama i stvarnim dimenzijama klizne plohe

Informacije sadržane u navedenim redovima i stupcima bile su nužne za provođenje daljnjih proračuna potrebnih za utvrđivanje faktora sigurnosti. Širina svakog presjeka izračunava se u stupcu F kao razlika x-koordinata lijeve i desne strane svakog presjeka. Uz ove podatke, unesene su i vrijednosti kuta unutarnjeg trenja ispitivanog tla ( $\varphi = 35^\circ$ ) i kohezije tla ( $c = 0 \text{ kPa}$ ).

*Tablica 1: Ulazni podaci za provedbu proračuna prema grafičkom prikazu*

lamela	$y_s$	$y_w$	$y_g$	x
1	0	29	0	0
2	17	38	4	0,5
3	28	34	7	1
4	36	36	11	1,5
5	43	38	14	2
6	49	41	18	2,5
7	54	43	21	3
8	58	45	25	3,5
9	62	47	28	4
10	65	49	32	4,5
11	68	52	35	5
12	70	55	39	5,5
13	73	56	42	6
14	75	58	46	6,5
15	76	60	49	7
16	77	62	53	7,5
17	78	65	57	8
18	79	67	60	8,5
19	80	69	63	9
20	80	71	67	9,5
21	80	74	71	10,1
22	80	77	75	10,7

*Tablica 2: Parametri potrebni za računski postupak*

Kohezija, $c$ (kPa)	0
Kut unutarnjeg trenja, $\varphi$ ( $^\circ$ )	35
Zapremninska težina tla, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.15
Zapremninska težina vode, $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.81

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
	lamela	$m\alpha$	$y_s$	$y_w$	$y_g$	$x$	$h_s$ [cm]	$h_w$ [cm]	$b$ [cm]	$h_{s,ave}$ [cm]	$h_{w,ave}$ [cm]	$W$ [kN]	$\alpha$ [°]	$W\cos\alpha$	$W\sin\alpha$	$W \cdot U$	$L$ [cm]	$u$ [Pa]	$u$ [Pa]	$WCOS\alpha \cdot U$	$N$	
5																						
6	1		0	29	0	0	0	0														
7	2	1,002	17	38	4	0,5	13	0	5	6,5	0	622,375	73,610	175,613	597,085	622,375	17,720	0	0	175,613	886,775	
8	3	1,097	28	34	7	1	21	0	5	17	0	1627,750	65,556	673,568	1481,85	1627,75	12,083	0	0	673,568	2118,753	
9	4	1,167	36	36	11	1,5	25	0	5	23	0	2202,250	57,995	1167,19	1867,5	2202,25	9,434	0	0	1167,190	2696,068	
10	5	1,192	43	38	14	2	29	5	5	27	2,5	2585,250	54,462	1502,65	2103,7	2374,28	8,602	24,53	210,972	1291,674	2844,450	
11	6	1,217	49	41	18	2,5	31	8	5	30	6,5	2872,500	50,194	1838,93	2206,72	2374,48	7,810	63,77	498,021	1340,909	2786,759	
12	7	1,238	54	43	21	3	33	11	5	32	9,5	3064,000	45,000	2166,58	2166,58	2405,01	7,071	93,2	658,988	1507,587	2774,606	
13	8	1,250	58	45	25	3,5	33	13	5	33	12	3159,750	38,660	2467,35	1973,88	2405,97	6,403	117,7	753,776	1713,574	2749,292	
14	9	1,250	62	47	28	4	34	15	5	33,5	14	3207,625	38,660	2504,73	2003,79	2328,22	6,403	137,3	879,405	1625,329	2660,443	
15	10	1,244	65	49	32	4,5	33	16	5	33,5	15,5	3207,625	30,964	2750,52	1650,31	2321	5,831	152,1	886,625	1863,890	2665,198	
16	11	1,244	68	52	35	5	33	16	5	33	16	3159,750	30,964	2709,46	1625,68	2244,52	5,831	157	915,226	1794,237	2577,381	
17	12	1,207	70	55	39	5,5	31	15	5	32	15,5	3064,000	21,801	2844,85	1137,94	2245,16	5,385	152,1	818,841	2026,011	2655,929	
18	13	1,244	73	56	42	6	31	17	5	31	16	2968,250	30,964	2545,25	1527,15	2053,02	5,831	157	915,226	1630,027	2357,482	
19	14	1,207	75	58	46	6,5	29	17	5	30	17	2872,500	21,801	2667,05	1066,82	1974,42	5,385	166,8	898,084	1768,965	2335,652	
20	15	1,128	76	60	49	7	27	16	5	28	16,5	2681,000	11,310	2628,94	525,787	1855,65	5,099	161,9	825,353	1803,584	2349,833	
21	16	1,128	77	62	53	7,5	24	15	5	25,5	15,5	2441,625	11,310	2394,21	478,842	1666,29	5,099	152,1	775,331	1618,879	2110,051	
22	17	1,128	78	65	57	8	21	13	5	22,5	14	2154,375	11,310	2112,54	422,508	1454,08	5,099	137,3	700,299	1412,239	1841,317	
23	18	1,128	79	67	60	8,5	19	12	5	20	12,5	1915,000	11,310	1877,81	375,562	1289,73	5,099	122,6	625,267	1252,545	1633,207	
24	19	1,128	80	69	63	9	17	11	5	18	11,5	1723,500	11,310	1690,03	338,006	1148,25	5,099	112,8	575,246	1114,785	1454,051	
25	20	1	80	71	67	9,5	13	9	5	15	10	1436,250	0,000	1436,25	0	945,75	5	98,1	490,500	945,750	1350,671	
26	21	1	80	74	71	10,1	9	6	6	11	7,5	1263,900	0,000	1263,9	0	822,45	6	73,58	441,450	822,450	1174,580	
27	22	1	80	77	75	10,7	5	3	6	7	4,5	804,300	0,000	804,3	0	539,43	6	44,15	264,870	539,430	770,386	

Slika 11: Snimka zaslona Excel tablice za pojednostavljenu Bishopovu metodu.

Visina tla iznad klizne površine ( $h_s$ ) prikazana je u stupcu H i izračunava se za i-ti presjek prema sljedećoj jednadžbi:

$$h_{s,i} = y_{g,i} - y_{s,i} \quad (4)$$

U skladu s time, u ćeliji H7 nalazi se formula "=F7-D7". Na sličan način, visina vodenog stupca ( $h_w$ ) iznad klizne površine prikazana je u stupcu I. Ova se vrijednost za i-ti presjek određuje prema sljedećoj jednadžbi:

$$h_{w,i} = y_{w,i} - y_{s,i} \quad (5)$$

ako se podzemna voda nalazi iznad klizne površine. U slučaju da je razina podzemne vode ispod klizne površine, ta vrijednost iznosi nula. To se ostvaruje korištenjem IF naredbe u Excelu koja negativne vrijednosti pretvara u nulu. U tom slučaju, ćelija I7 sadrži formulu "=IF(D7-E7 < 0,0,D7-E7)". S obzirom na to da vrijednosti u stupcima H i I predstavljaju visine  $h_s$  i  $h_w$  na lijevoj strani i-tog presjeka, prosječne vrijednosti  $h_s$  i  $h_w$  za svaki presjek, označene kao  $h_{s,ave}$  i  $h_{w,ave}$ , izračunavaju se u stupcima K i L. Konkretno, formule u ćelijama K7 i L7 su "=AVERAGE(H6)" i "=AVERAGE(I6)".

Stupac M prikazuje težinu lamele ( $W$ ) koja se za i-ti presjek izračunava pomoću sljedeće jednadžbe:

$$W_i = \gamma * b_i * h_{s,ave,i} \quad (6)$$

Budući da se težina smatra konstantnom za sav materijal iznad klizne površine, ta se ćelija fiksira. Stoga formula u ćeliji M7 glasi " $=K7 * J7 * \$Y\$9$ ". Nagib baze presjeka,  $\alpha$ , određuje se pomoću razlike y-koordinata lijeve i desne strane presjeka te širine presjeka, a rezultat se upisuje u stupac N. Formula u ćeliji N7 glasi " $=DEGREES(ATAN((D7-D6)/J7))$ ". Stupac S prikazuje tlak porne vode ( $u$ ) koji djeluje na dno presjeka, a izračunava se za i-ti presjek prema sljedećoj jednadžbi:

$$u_i = \gamma_w * h_{w,ave,i} \quad (7)$$

Ovo odgovara formuli " $=\$Y\$10 * L7$ " u ćeliji S7. Stupci O i P razlažu težinu presjeka na njezine normalne ( $W * \cos a$ ) i tangencijalne ( $W * \sin a$ ) komponente u odnosu na bazu presjeka. Tako, formule u ćelijama O7 i P7 glase " $=M7 * \cos(\text{RADIANS}(N7))$ " i " $=M7 * \sin(\text{RADIANS}(N7))$ ". Duljina klizne površine ( $L$ ) za i-ti presjek izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$L_i = b_i / \cos \alpha_i \quad (8)$$

Ova se vrijednost računa u stupcu R, pri čemu formula u ćeliji R7 glasi " $=J7/\cos(\text{RADIANS}(N7))$ ". Težina vode ( $U$ ) u stupcu T izračunava se za i-ti presjek prema sljedećoj jednadžbi:

$$U_i = u_i * L_i \quad (9)$$

To znači da ćelija T7 sadrži formulu " $=S7 * R7$ ". Na kraju, stupac U prikazuje zbroj normalnih sila na dnu presjeka ( $W \cos a - U$ ). Tako, ćelija U7 sadrži formulu " $=O7-T7$ ". Stupac Q prikazuje razliku između težine presjeka i težine vode. Formula koja to izražava u ćeliji Q7 glasi " $=M7-T7$ ".

Informacije i proračuni prikazani u stupcima od D do T isti su kao za uobičajenu metodu lamela. Stupac C sadrži vrijednosti  $m\alpha$ , koje se za i-ti presjek izračunavaju prema sljedećoj formuli:

$$m\alpha_i = \cos \alpha_i + (\tan \varphi * \sin \alpha_i) / FS \quad (10)$$

Važno je napomenuti da je za izračunavanje vrijednosti  $m\alpha$  potrebno unaprijed znati faktor sigurnosti. Pojednostavljena Bishopova metoda postaje iterativni proces koji se može riješiti pomoću tablice, ali uz stvaranje ćelije s probnom vrijednošću faktora sigurnosti. U ovom primjeru prikazanom na slici 9, to odgovara ćeliji AB8. Dakle, formula za  $m\alpha$  unosi se u ćeliju C7 i glasi " $=\text{COS}(\text{RADIANS}(N7)) + ((\text{TAN}(\text{RADIANS}(\$Y\$6)) * \text{SIN}(\text{RADIANS}(N7)))/\$AB\$8)$ ". Stupac V sadrži vrijednost brojnika u jednadžbi za izračunavanje faktora sigurnosti prema pojednostavljenoj Bishopovoj metodi, koja se računa prema sljedećoj formuli:

$$FS = \frac{\Sigma(cL + (W - U) * \tan \varphi / m\alpha)}{\Sigma(W \sin \alpha)} \quad (11)$$

Formula u ćeliji V7 je stoga " $=((\$X\$6 * J7) + Q7 * \text{TAN}(\text{RADIANS}(\$Y\$6)))/C7$ ". Ćelije AB5, AB6 i AB7 sadrže zbroj vrijednosti iz stupaca P, R i V. Koristeći te informacije, faktor sigurnosti izračunava se u ćeliji AB9 pomoću formule " $=AB7/AB5$ ". Da bi se dobio točan faktor sigurnosti, vrijednost probnog faktora sigurnosti u ćeliji AB8 treba mijenjati dok ne postane jednaka izračunatom faktoru sigurnosti u ćeliji AB9.

AA	AB
$\Sigma(W \sin \alpha)$	23549,70715
$\Sigma I$	146,2852463
$\Sigma N$	44792,88503
PROBNA VRIJEDNOST	1,9025
<b>FS</b>	1,9021

Slika 12: Snimka zaslona Excel tablice za rezultat po pojednostavljenoj Bishopovoj metodi

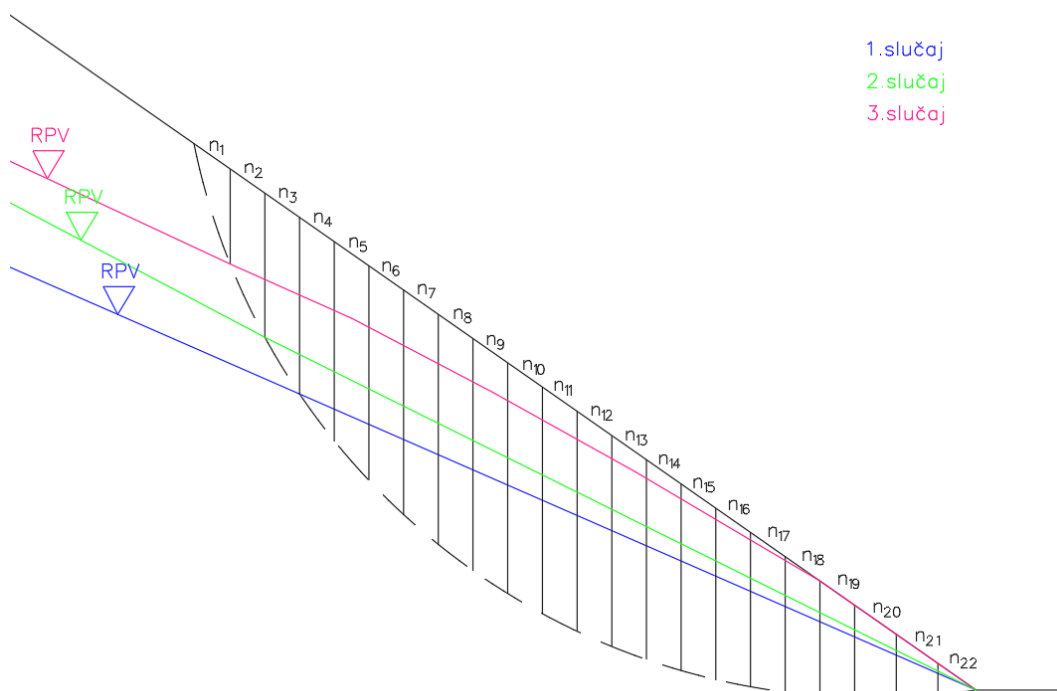
Faktor sigurnosti ( $FS$ ) dobiven je iterativnim postupkom. Ovaj postupak uključuje početno postavljanje probne vrijednosti faktora sigurnosti, nakon čega se iterativno prilagođava dok izračunata vrijednost ne postane stabilna i zadovoljavajuća.

## 4. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJE

U ovome dijelu rada prikazani su rezultati analize utjecaja razine podzemne vode, kuta trenja i kohezije na faktor sigurnosti. Klizna ploha dobivena je vizualnim zapažanjem te mjerenjem dobivenih rezultata na modelu kosine.

### 4.1. Analiza utjecaja RPV

U prvoj analizi dobivene su vrijednosti faktora sigurnosti za tri različite razine podzemne vode gdje kut trenja iznosi  $35^\circ$  dok je kohezija jednaka nuli.



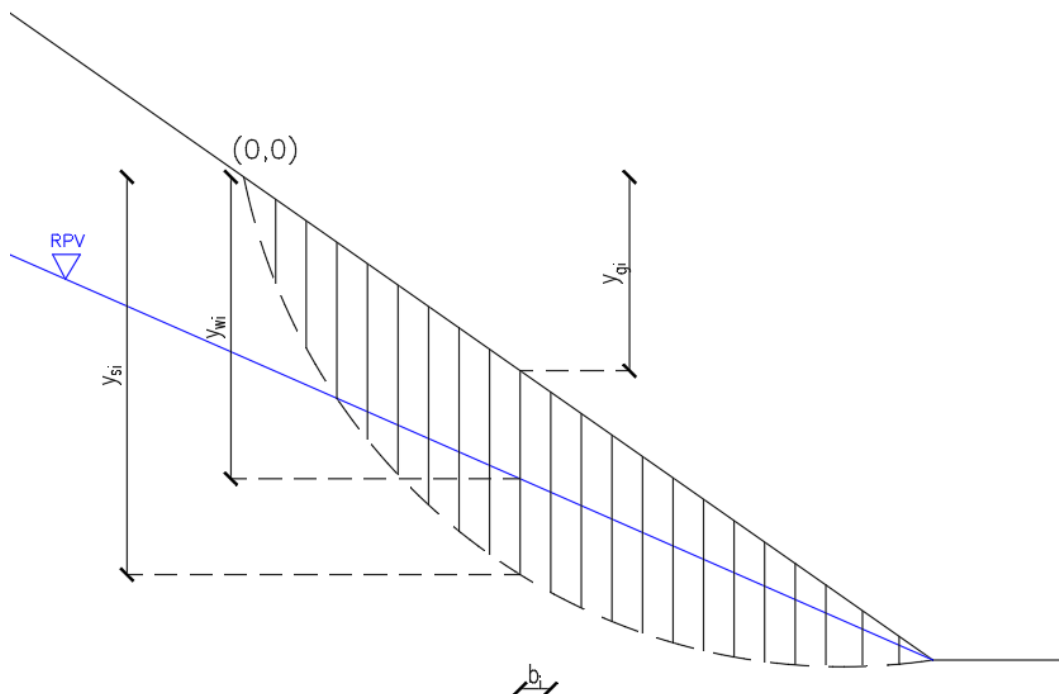
Slika 13: Prikaz tri slučaja razine podzemne vode razmatranih u provedenim analizama

Na slici su prikazana tri različita slučaja stabilnosti kosine, označena različitim bojama: plavom (1. slučaj), zelenom (2. slučaj) i crvenom (3. slučaj). Na slici su također prikazane vertikalne linije koje predstavljaju podjelu kosine na nekoliko presjeka tj. lamela ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , itd.). Svaka od ovih linija je okomita na kliznu površinu i prikazuje silu koja djeluje na taj dio kosine. Broj lamela značajno utječe na preciznost izračuna faktora sigurnosti u analizi stabilnosti kosina. Povećanjem broja lamela poboljšava se aproksimacija raspodjele naprezanja i deformacija



unutar tla, što rezultira točnijim faktorom sigurnosti. S manjim brojem lamela, aproksimacija je manje precizna, što može dovesti do odstupanja u rezultatu. Ipak, nakon određenog broja lamela, daljnje povećanje broja lamela daje samo minimalno poboljšanje točnosti, dok istovremeno znatno povećava složenost i trajanje proračuna.

Dobiveni rezultati za prvi slučaj razine podzemne vode:



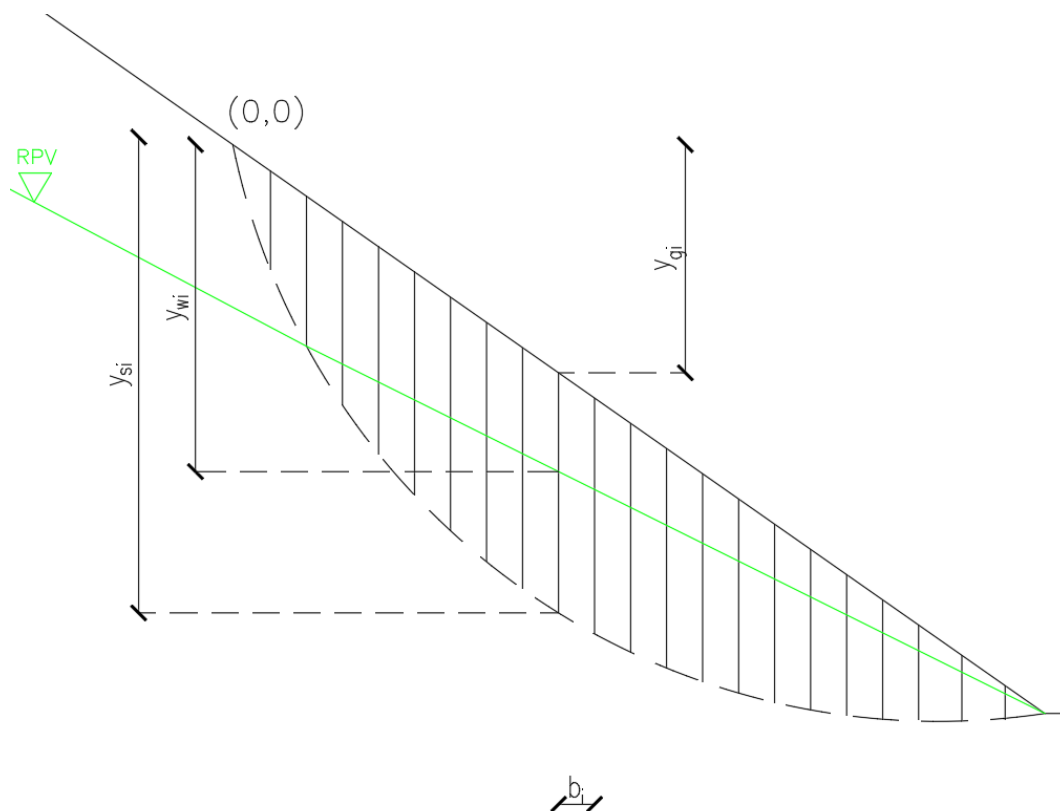
Slika 14: Prikaz kosine za prvi slučaj razine podzemne vode

Za vrijednosti kuta trenja  $35^\circ$  i kohezije 0, iteracijskim postupkom uz pomoć proračunske tablice u excelu za slučaj 1 dobivena je vrijednost faktora sigurnosti 0,932.

Tablica 3: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za prvi slučaj razine podzemne vode

$\Sigma(Ws\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma I$	146,2852463
$\Sigma N$	21955,73637
PROBNA VRIJEDNOST	0,932
<b>FS</b>	<b>0,932</b>

Dobiveni rezultati za drugi slučaj razine podzemne vode:



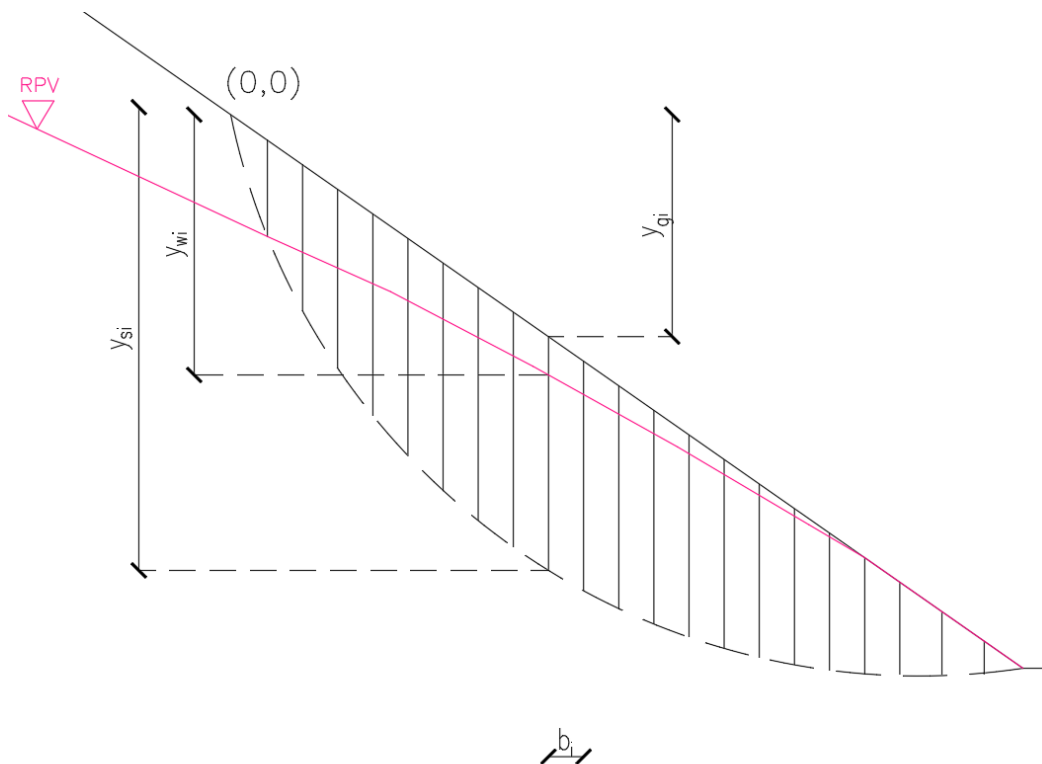
Slika 15: Prikaz kosine za drugi slučaj razine podzemne vode

Za vrijednosti kuta trenja  $35^\circ$  i kohezije 0, iteracijskim postupkom uz pomoć proračunske tablice u excelu za slučaj 2 dobivena je vrijednost faktora sigurnosti 0,793.

Tablica 4: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za drugi slučaj razine podzemne vode

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma I$	146,2852463
$\Sigma N$	18675,8306
PROBNA VRIJEDNOST	0,793
<b>FS</b>	<b>0,793</b>

Dobiveni rezultati za treći slučaj razine podzemne vode:



Slika 16: Prikaz kosine za treći slučaj razine podzemne vode

Za vrijednosti kuta trenja  $35^\circ$  i kohezije 0, iteracijskim postupkom uz pomoć proračunske tablice u excelu za slučaj 3 dobivena je vrijednost faktora sigurnosti 0,507.

Tablica 5: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za treći slučaj razine podzemne vode

$\Sigma(W\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	11939,85307
PROBNA VRIJEDNOST	0,5079
FS	0,507

Povećanje razine podzemne vode uzrokuje rast pornih tlakova unutar tla, što smanjuje efektivna normalna naprezanja, a time i posmičnu otpornost tla prema Mohr-Coulombovom kriteriju. Smanjenjem efektivnog naprezanja dolazi do smanjenja trenja između čestica tla, što rezultira

nižom otpornošću na posmične sile. Kombinirani učinak smanjenja otpornosti i povećanja pokretačkih sila značajno snižava faktor sigurnosti, čime se povećava rizik od klizanja i destabilizacije konstrukcija, posebno u kosinama i nasipima.

#### 4.2. Povratne analize - određivanje vrijednosti kuta unutarnjeg trenja pijeska

U drugoj analizi dobivene su vrijednosti  $\varphi$  za tri različite razine podzemne vode gdje je kohezija  $[c]$  jednaka nuli a faktor sigurnosti jednak 0,999.

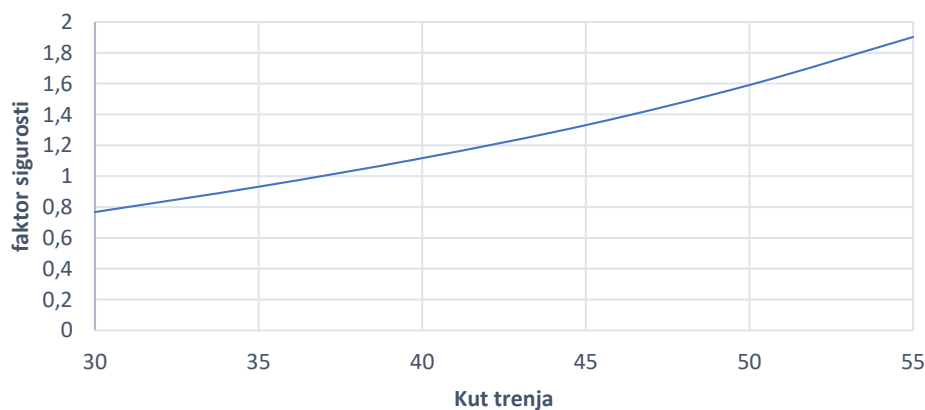
Slučaj 1:

Za vrijednosti faktora sigurnosti 0,999 i kohezije 0, iteracijskim postupkom uz pomoć proračunske tablice u excelu za slučaj 1 dobivena je vrijednost kut trenja  $36,9^\circ$ .

Tablica 6: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za prvi slučaj razine podzemne vode pri vrijednosti  $\varphi=36,9^\circ$

$\Sigma(Ws\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	23545,88414
PROBNA VRIJEDNOST	0,999
<b>FS</b>	0,9998

dijagram FS/ $\phi$



Slika 17: Dijagram  $FS/\varphi$  za prvi slučaj razine podzemne vode

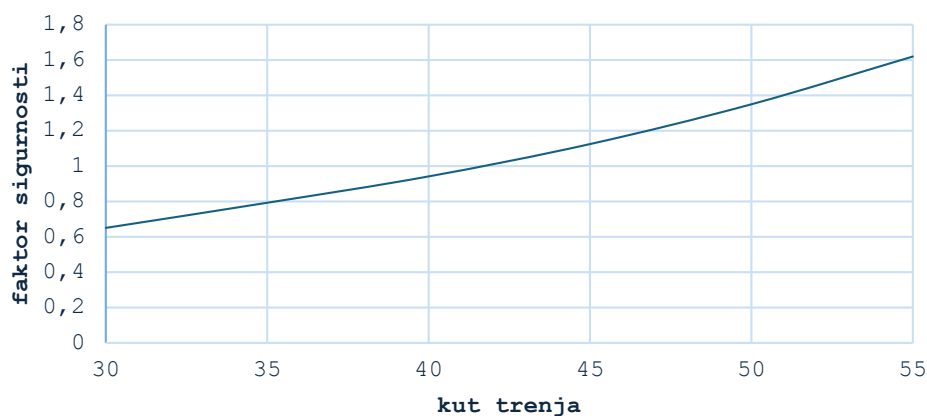
Slučaj 2:

Za vrijednosti faktora sigurnosti 0,999 i kohezije 0, iteracijskim postupkom uz pomoć proračunske tablice u excelu za slučaj 2 dobivena je vrijednost kut trenja  $41,4^\circ$ .

Tablica 7: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za drugi slučaj razine podzemne vode pri vrijednosti  $\varphi=41,4^\circ$

$\Sigma(W\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	23531,19217
PROBNA VRIJEDNOST	0,999
<b>FS</b>	0,999

### diagram FS/ $\varphi$



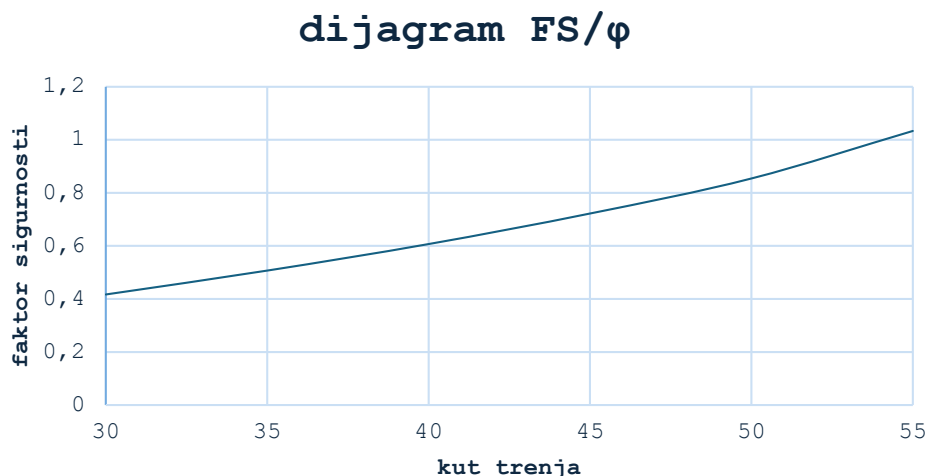
Slika 18: Dijagram FS/  $\varphi$  za drugi slučaj razine podzemne vode

Slučaj 3:

Za vrijednosti faktora sigurnosti 0,999 i kohezije 0, iteracijskim postupkom uz pomoć proračunske tablice u excelu za slučaj 3 dobivena je vrijednost kut trenja  $54,1^\circ$ .

Tablica 8: Rezultati proračuna za faktor sigurnosti za treći slučaj razine podzemne vode pri vrijednosti  $\varphi=54,1^\circ$

$\Sigma(W\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	23527,36739
PROBNA VRIJEDNOST	0,999
<b>FS</b>	0,999



Slika 19: Dijagram  $FS/\varphi$  za trećii slučaj razine podzemne vode

Kut trenja predstavlja unutarnju otpornost tla na klizanje zbog trenja između čestica tla. Veći kut trenja znači da je tlo otpornije na klizanje, što povećava otpornost na smične sile stoga povećanje kuta trenja povećava tangencijalni dio otpornosti na smicanje. To izravno povećava faktor sigurnosti, jer se povećava ukupna otpornost tla na klizanje, stoga veći kut trenja obično rezultira većim faktorom sigurnosti.

#### 4.3. Analiza utjecaja $c$ na $FS$ za $\varphi = \text{const.}$

U trećoj analizi dobivene su vrijednosti  $FS$  za različite vrijednosti  $c$  gdje je  $\varphi = \text{const.}$  Analiza je provedena za tri slučaja različite razine vode.

Slučaj 1:

Tablica 9: Rezultati izračunatih vrijednosti faktora sigurnosti za vrijednost  $C$  u rasponu od 0,25 do 2 za prvi slučaj razine podzemne vode

$c$	$\varphi$
0,25	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	21992,5639
PROBNA VRIJEDNOST	0,934
<b>FS</b>	<b>0,934</b>

c	$\varphi$
0,5	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22024,92517
PROBNA VRIJEDNOST	0,935
<b>FS</b>	0,935

c	$\varphi$
0,75	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22061,74857
PROBNA VRIJEDNOST	0,937
<b>FS</b>	0,937

c	$\varphi$
1	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22094,11408
PROBNA VRIJEDNOST	0,938
<b>FS</b>	0,938

c	$\varphi$
1,25	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22131,67482
PROBNA VRIJEDNOST	0,940
<b>FS</b>	0,940

c	$\varphi$
1,5	35,0

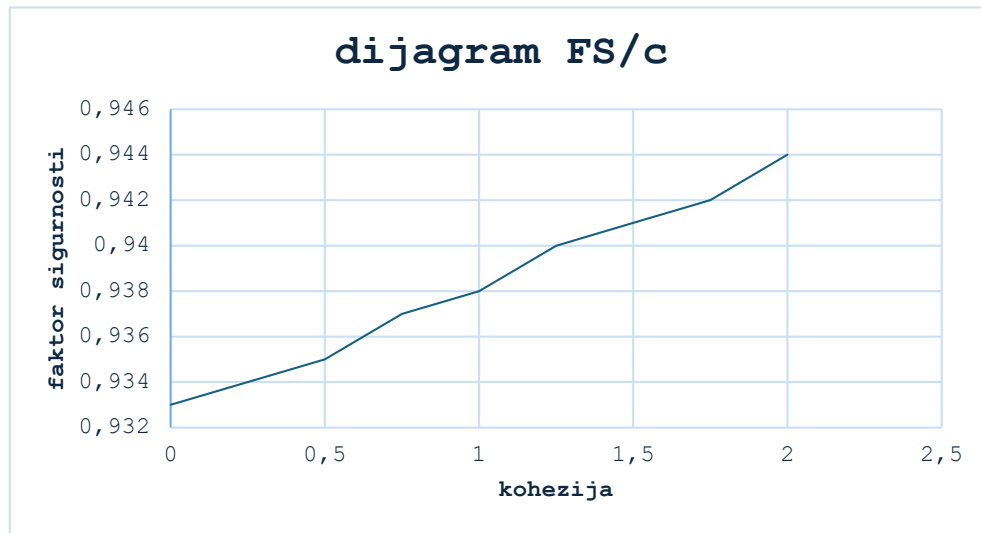
$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22161,82088
PROBNA VRIJEDNOST	0,941
<b>FS</b>	0,941

c	$\varphi$
1,75	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22193,45396
PROBNA VRIJEDNOST	0,942
<b>FS</b>	0,942

c	$\varphi$
2	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	22232,49246
PROBNA VRIJEDNOST	0,944
<b>FS</b>	0,944



Slika 20: Dijagram  $FS/c$  za prvi slučaj razine podzemne vode

Slučaj 2:

Tablica 10: Rezultati izračunatih vrijednosti faktora sigurnosti za vrijednost  $C$  u rasponu od 0.25 do 2 za drugi slučaj razine podzemne vode

c	$\varphi$
0,25	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18710,90578
PROBNA VRIJEDNOST	0,795
<b>FS</b>	0,795

c	$\varphi$
0,5	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18733,2739
PROBNA VRIJEDNOST	0,795
<b>FS</b>	0,795



c	$\varphi$
0,75	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18771,53592
PROBNA VRIJEDNOST	0,797
<b>FS</b>	0,797

c	$\varphi$
1	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18801,85934
PROBNA VRIJEDNOST	0,798
<b>FS</b>	0,798

c	$\varphi$
1,25	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18840,11314
PROBNA VRIJEDNOST	0,800
<b>FS</b>	0,800

c	$\varphi$
1,5	35,0

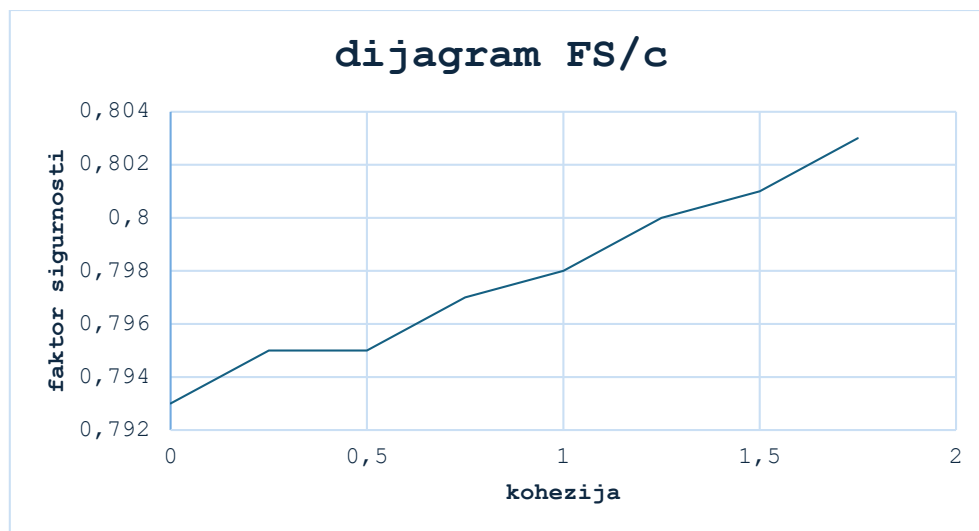
$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18870,44492
PROBNA VRIJEDNOST	0,801
<b>FS</b>	0,801

c	$\varphi$
1,75	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18908,69057
PROBNA VRIJEDNOST	0,803
<b>FS</b>	0,803

c	$\varphi$
2	35,0

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	18939,03071
PROBNA VRIJEDNOST	0,804
<b>FS</b>	0,804



Slika 21: Dijagram  $FS/c$  za drugi slučaj razine podzemne vode

Slučaj 3:

Tablica 11: Rezultati izračunatih vrijednosti faktora sigurnosti za vrijednost  $C$  u rasponu od 0,25 do 2 za treći slučaj razine podzemne vode

c	$\varphi$
0,25	35

$\Sigma(Ws\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	11950,55658
<b>PROBNA VRIJEDNOST</b>	<b>0,507</b>
<b>FS</b>	<b>0,507</b>

c	$\varphi$
0,5	35

$\Sigma(Ws\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	11988,57283
<b>PROBNA VRIJEDNOST</b>	<b>0,509</b>
<b>FS</b>	<b>0,509</b>

c	$\varphi$
0,75	35

$\Sigma(Ws\sin\alpha)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	12017,27453
<b>PROBNA VRIJEDNOST</b>	<b>0,510</b>
<b>FS</b>	<b>0,510</b>

c	$\varphi$
1	35

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	12055,27533
PROBNA VRIJEDNOST	0,512
FS	0,512

c	$\varphi$
1,25	35

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	12093,2573
PROBNA VRIJEDNOST	0,514
FS	0,514

c	$\varphi$
1,5	35

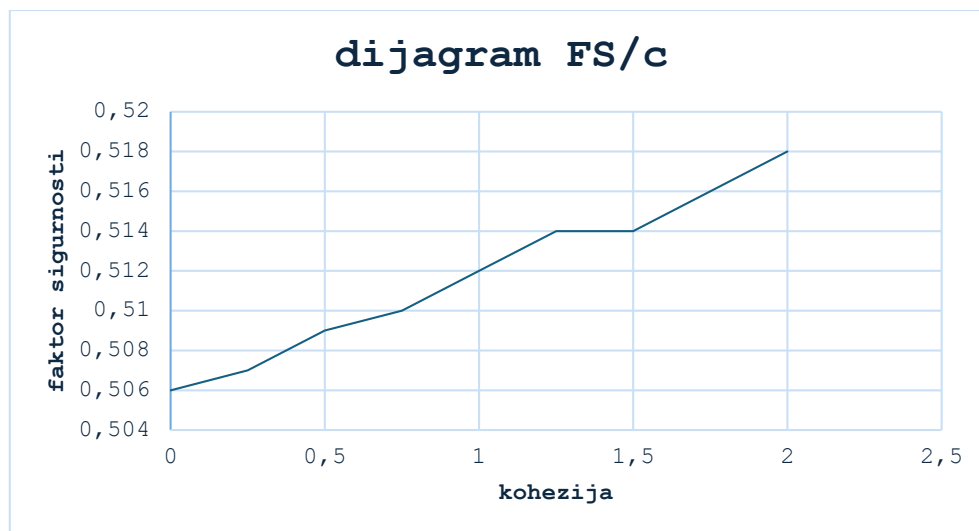
$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	12112,71084
PROBNA VRIJEDNOST	0,514
FS	0,514

c	$\varphi$
1,75	35

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	12150,70005
PROBNA VRIJEDNOST	0,516
FS	0,516

c	$\varphi$
2	35

$\Sigma(Wsina)$	23549,70715
$\Sigma L$	146,2852463
$\Sigma N$	12188,67065
PROBNA VRIJEDNOST	0,518
FS	0,518



Slika 22: Dijagram  $FS/c$  za treći slučaj razine podzemne vode

U sva tri slučaja možemo vidjeti da se povećanjem kohezije ( $c$ ), faktor sigurnosti općenito povećava. Linija na grafu pokazuje kako se faktor sigurnosti mijenja s promjenom kohezije. Postoji pozitivan linearan trend, što znači da s povećanjem kohezije raste i faktor sigurnosti. Razlog za to leži u osnovnom principu stabilnosti tla ili materijala. Faktor sigurnosti ( $FS$ ) definira se kao omjer između otpornosti materijala na klizanje, koja se povećava s kohezijom, i sila koje uzrokuju klizanje, a koje ovise o opterećenju, težini, nagibu i sličnim čimbenicima. Kohezija predstavlja unutarnju snagu materijala koja se opire klizanju ili deformaciji. Povećanje kohezije dovodi do povećanja faktora sigurnosti jer materijal postaje otporniji na klizanje ili proklizavanje.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad uspješno je ostvario postavljeni cilj istraživanja, koji je bio analizirati stabilnost kosine pod utjecajem različitih razina podzemne vode i promjenjivih parametara tla koristeći pojednostavljenu Bishopovu metodu u Excelu. Provedenim eksperimentom na umanjenom modelu kosine podvrgnutom simuliranoj kiši, demonstrirana je nestabilnost kosine i klizanje materijala. Dobiveni rezultati jasno pokazuju da razina podzemne vode ima značajan utjecaj na faktor sigurnosti, pri čemu povećanje razine podzemne vode značajno snižava faktor sigurnosti uslijed povećanja poreznih tlakova i smanjenja efektivnog naprezanja u tlu.

Usporedba teorijskih i eksperimentalnih rezultata potvrđuje hipotezu da smanjenje efektivnog naprezanja i povećanje težine tla iznad klizne ravnine, kao posljedica visokih razina podzemne vode, dovodi do destabilizacije kosine. Također, analize su pokazale da veći kut trenja i viša kohezija rezultiraju povećanjem faktora sigurnosti, što potvrđuje osnovne geotehničke principe. Rezultati dobiveni iterativnim proračunom ukazuju na to da su teorijske vrijednosti konzistentne s očekivanjima, te praksa potvrđuje predviđeni utjecaj pojedinih parametara na stabilnost kosine.

Doprinos ovog rada leži u detaljnoj kvantitativnoj analizi utjecaja razine podzemne vode, kuta trenja i kohezije na faktor sigurnosti kosine. Takva analiza omogućava preciznije planiranje i dizajn geotehničkih projekata, posebice u uvjetima gdje su promjene razine podzemne vode ključne za stabilnost konstrukcija. Rad također naglašava važnost korištenja odgovarajućih metoda sanacije i kontrole razine podzemne vode kako bi se smanjio rizik od klizanja. U budućim istraživanjima preporučuje se dodatna analiza utjecaja promjenjivih hidrauličkih uvjeta i detaljnija evaluacija metoda stabilizacije kosina u stvarnim uvjetima.

## 6. LITERATURA

1. Ajmera, B., Tiwari, B. (2018). TXT-tool 3.001-1.4: Using Excel Tools for Slope Stability Analysis. In: Sassa, K., Tiwari, B., Liu, KF., McSaveney, M., Strom, A., Setiawan, H. (eds) Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools . Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57777-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57777-7_23)
2. Arbanas, Ž., Priručnik za upotrebu platforme za fizički model ispitivanja klizišta, Rijeka, 2022.
3. Arbanas, Ž., Mehanika tla i stijena – predavanja, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2006.
4. Cruden, D.M., Bulletin of the international Association of Engineering geology, 43, Paris, 1991.
5. Dearman, W. R., Engineering geological mapping . Butterworth-Heinemann, 1991.
6. Gidak P, Šamec E, Statički neodređeni sistemi, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2022.
7. Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia, CO: U.S. Geological Survey (USGS) National Landslide Information Center (NLIC). <https://doi.org/10.3133/cir1325>
8. Nonveiller, Ervin, Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
9. Raspini, F., Bianchini, S., Ciampalini, A. et al. Persistent Scatterers continuous streaming for landslide monitoring and mapping: the case of the Tuscany region (Italy). Landslides 16, 2033–2044 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01249-w>
10. Szavits-Nossan, V.: Mehanika tla i stijena, [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/13.Predavanje MT.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/13.Predavanje_MT.pdf), pristup 10.07.2024.
11. Zlatović, Sonja, Uvod u mehaniku tla, Udžbenik Tehničkog veleučilišta u Zagrebu, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2006.