Proračun stabilnosti pokosa programskim paketom Slope/W

Debeljak, Darko

Master's thesis / Diplomski rad

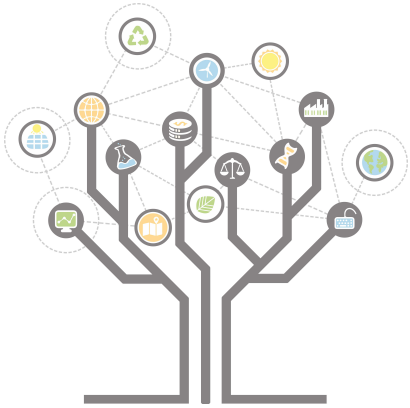
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:751341

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DARKO DEBELJAK

PRORAČUN STABILNOSTI POKOSA PROGRAMSKIM PAKETOM SLOPE/W

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2020

Sazivam članove ispitnog povjerenstva za
16.07.2020. u _____ sati.

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim povjerenstvom u Varaždinu.

Varaždin, 02.07.2020

Predsjednik ispitnog
povjerenstva:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

1) Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović _____
2) Izv.prof.dr.sc. Boris Kovačić _____
3) Dr.sc. Vitomir Premur, v.pred _____
4) _____ _____

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

PRORAČUN STABILNOSTI POKOSA PROGRAMSKIM PAKETOM SLOPE/W

KANDIDAT:
DARKO DEBELJAK, univ.bacc.ing.amb.

MENTOR:
Izv.prof.dr.sc. IGOR PETROVIĆ



VARAŽDIN, 2020

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: DARKO DEBELJAK

Matični broj: 225 - 2018./2019.

Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

PRORAČUN STABILNOSTI POKOSA PROGRAMSKIM PAKETOM SLOPE/W

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Stabilnost i slom kosina
3. Bishop-ova metoda
4. Proračun i parametarska analiza
5. Zaključak
6. Literatura

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 18.03.2020.

Rok predaje: 02.07.2020.

Mentor:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

REPUBLIKA HRVATSKA - GEOTEHNIČKI FAKULTET - SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - VARAŽDIN

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

PRORAČUN STABILNOSTI POKOSA PROGRAMSKIM PAKETOM SLOPE/W

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom

Izv.prof.dr.sc. Igora Petrovića

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 30. 06. 2020.

Darko Debeljak

(Ime i prezime)

(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

PRORAČUN STABILNOSTI POKOSA PROGRAMSKIM PAKETOM SLOPE/W

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 30. 06. 2020.

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

Sažetak rada: S geotehničkog gledišta, kao osnovni problem kod projektiranja odlagališta otpada, može se navesti statička i seizmička stabilnost tijela odlagališta. Proračun stabilnosti odlagališta otpada složen je i važan postupak za koji je presudno poznavanje parametara čvrstoće koji se koriste u analizi stabilnosti. U ovom radu obrađuju se opći pojmovi stabilnosti i sloma kosina, opisuje se numerička (*Bishopova*) metoda za proračun stabilnosti kosina te je provedena parametarska analiza parametara čvrstoće na primjeru odlagališta Jakuševac. Za potrebe proračuna stabilnosti i parametarske analize korišten je program GeoStudio i njegov programski paket SLOPE/W. Cilj ovog diplomskog rada jest prikazati rezultate analize osjetljivosti faktora sigurnosti kosine u ovisnosti o varijaciji ulaznih parametara čvrstoće. Ovim analizama željelo se ustanoviti koliko promjena pojedinog parametra utječe na faktor sigurnosti kosine odlagališta te kako međusobno promjena pojedinih parametara utječe na promjenu faktora sigurnosti.

Ključne riječi: stabilnost kosina, slom, GeoStudio, odlagalište otpada

Abstract: From a geotechnical point of view, the basic problem in a landfill design can be the static and seismic stability of a landfill body. The calculation of landfill stability is a complex and important procedure for which it is crucial to know the strength parameters used in a stability analysis. This paper presents the general concepts of slope stability and failure. It also describes the numerical (*Bishop's*) method for calculating slope stability as well as a parametric analysis of strength parameters on the example of the Jakuševac landfill. For the purposes of stability calculation and parametric analysis, the GeoStudio program and its SLOPE/W software package are used. The aim of this thesis is to present the results of the analysis of the sensitivity of the slope safety factor depending on the variation of the input strength parameters. The aim of these analyses is to establish how much the change of an individual parameter affects the safety factor of the landfill slope and how the mutual change of individual parameters affects the change of the safety factor.

Keywords: slope stability, collapse, GeoStudio, landfill

SADRŽAJ

stranica

1. UVOD ... 1

2. STABILNOST I SLOM KOSINA ... 2

2.1. Kosine (*prirodne i umjetne*) ... 2

2.2. Stabilnost kosine ... 5

2.3. Posmična čvrstoća ... 9

2.4. Stabilnost i slom na odlagalištu ... 10

2.5. Mehanizam sloma ... 12

2.6. Mehanika otpada ... 14

3. BISHOP - OVA METODA ... 16

4. PORAČUN I PARAMETARSKA ANALIZA ... 19

4.1. Klizna ploha ... 19

4.2. GeoStudio ... 22

4.3. PARAMETARSKA ANALIZA ... 23

4.3.1. Analiza 1 – promjena kohezije [c'] ... 25

4.3.2. Analiza 2 – promjena kuta unutrašnjeg trenja [φ'] ... 26

4.3.3. Analiza 3 – promjena zapreminske težine [γ] ... 28

4.3.4. Analiza 4 – promjena geometrije odlagališta ... 30

4.3.5. Rasprava ... 32

5. ZAKLJUČAK ... 34

5.1. ZAKLJUČAK ANALIZE ... 34

6. LITERATURA ... 38

POPIS SLIKA ... 39

POPIS TABLICA ... 40

1. UVOD

Proračun stabilnosti kosina je složen i važan postupak za koji su potrebni pouzdani podatci koji se koriste u analizi. Za potrebe izrade ovog diplomskog rada i proračun stabilnosti korišten je program GeoStudio i njegov programski paket SLOPE/W. Proračun je rađen u dvodimenzionalnom [2D] modelu iako se u geotehničkoj praksi u posljednje vrijeme sve više koriste i trodimenzionalni [3D] modeli. Za potrebe izrade ovog diplomskog rada kao referentni model korišteno je odlagalište otpada Jakuševac, Zagreb. S građevinskog i okolišnog gledišta kao problem kod projektiranja odlagališta otpada može se navesti statička i seizmička stabilnost tijela odlagališta.

Odlagalište otpada predstavlja objekt koji služi za trajno, kontrolirano i sigurno odlaganje otpada. Promjena svojstava otpada tijekom vremena utječe na kompleksnost projektiranja samog odlagališta. Zbog sigurnosti, zdravlja ljudi i zaštite okoliša ne smije doći do nastanka sloma na privremenim i trajnim pokosima odlagališta otpada. Sam proračun stabilnosti pokosa uglavnom se provodi numeričkim metodama. Jedna od najčešće korištenih metoda je Bishopova metoda opće granične ravnoteže koja pronalazi kritičnu kliznu plohu s najmanjim faktorom sigurnosti [F.S.] na temelju statičke ravnoteže.

Zadatak ovog diplomskog rada bio je provesti analize osjetljivosti faktora sigurnosti s obzirom na varijaciju ulaznih parametara. Ovim analizama željelo se ustanoviti koliko promjena pojedinog parametra utječe na faktor sigurnosti kosine odlagališta te kako međusobno promjena pojedinih parametara utječe na promjenu faktora sigurnosti. Parametri koji su se mijenjali za potrebe izračuna su: kohezija [c'], kut unutrašnjeg trenja [φ'], zapreminska težina otpada [γ] te geometrija odlagališta.

Analize su prikazale da promjena kut unutrašnjeg trenja otpada i kut unutrašnjeg trenja brtvenog sloja ima najveći utjecaj na promjenu faktor sigurnosti odlagališta. Tokom projektiranja odlagališta najviše pažnje prilikom određivanja vrijednosti parametara trebalo bi se posvetiti određivanju kuta unutrašnjeg trenja otpada i kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja. Analize su pokazale da promjena zapreminske težine otpada i zapreminske težine brtvenog sloja daje najmanji utjecaj na promjenu faktora sigurnosti.

2. STABILNOST I SLOM KOSINA

Neizostavna i nezaobilazna stvar u geotehnici je analiza stabilnosti kosina. Cilj analize stabilnosti kosine je procjena sigurnosti same kosine i određivanje uvjeta koji dovode i mogu dovesti do samog njenog sloma. Otpor kosine prema klizanju ili slomu predstavlja stabilnost kosine. Za samo uspješno projektiranje kosina potrebno je poznavanje geoloških uvjeta, parametara tla (*zapreminska težina, kohezija, kut unutrašnjeg trenja*), razina podzemne vode kosine za koju se želi utvrditi faktor sigurnosti.

S građevinskog gledišta utvrđivanje stabilnosti kosine izazovan je pothvat zbog složenog mehaničkog ponašanja tla, ekonomičnog projektiranja i sigurnosti ljudi. S geotehničkog stajališta potrebno je osigurati trajnu statičku i dinamičku stabilnost samog objekta i svih njegovih sastavnih elemenata.

Okolišno gledište kao jedan od glavnih problema pri projektiranju odlagališta otpada ističe globalnu statičku i seizmičku stabilnost tijela odlagališta. Kvalitetna izgradnja samog odlagališta otpada vrlo je važna zbog zdravlja, sigurnosti ljudi i zaštite okoliša.

2.1. Kosine (*prirodne i umjetne*)

Kosina se može opisati kao nagnuta ravna ploha, odnosno uzbrdica ili nizbrdica. Kosina može biti prirodna, vidljiva na slici 1., ili umjetna vidljiva na slici 2.



Slika 1. Primjer prirodne kosine [12]

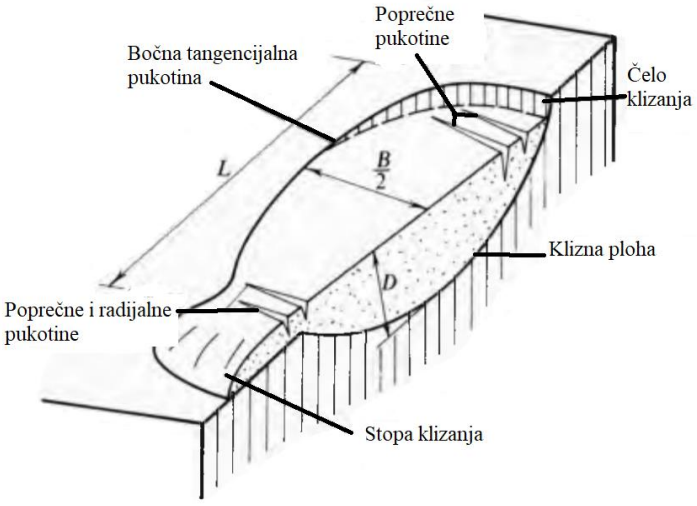


Slika 2. Umjetno izgrađena kosina [12]

Prirodno nagnute površine terena, prirodne kosine stalno se pomiču brže ili sporije. Prirodni procesi koji dovode do samog kretanja kosina su sezonske promjene vlažnosti, vjetar, promjene razine podzemne vode [RPV], promjena temperature, geološko-kemijski procesi, tektonski procesi, opterećenje te ostali utjecaji koje dovode do promjene strukture i karakteristika tla od koje se sastoji kosina. Umjetni zahvati na kosinama, kao što je podsjecanje kosina, građenje nasipa i građevina, iskapanje usjeka, česti su uzroci klizanja slojeva tla na kosini. Osim što se promjenom raspodjele mase može neposredno narušiti postojeća ravnoteža na kosini, mogu nastati i promjene u svojstvima tla zbog naknadnog opterećenja, odnosno rasterećenja slojeva tla na prirodnim ili umjetnim kosinama [10].

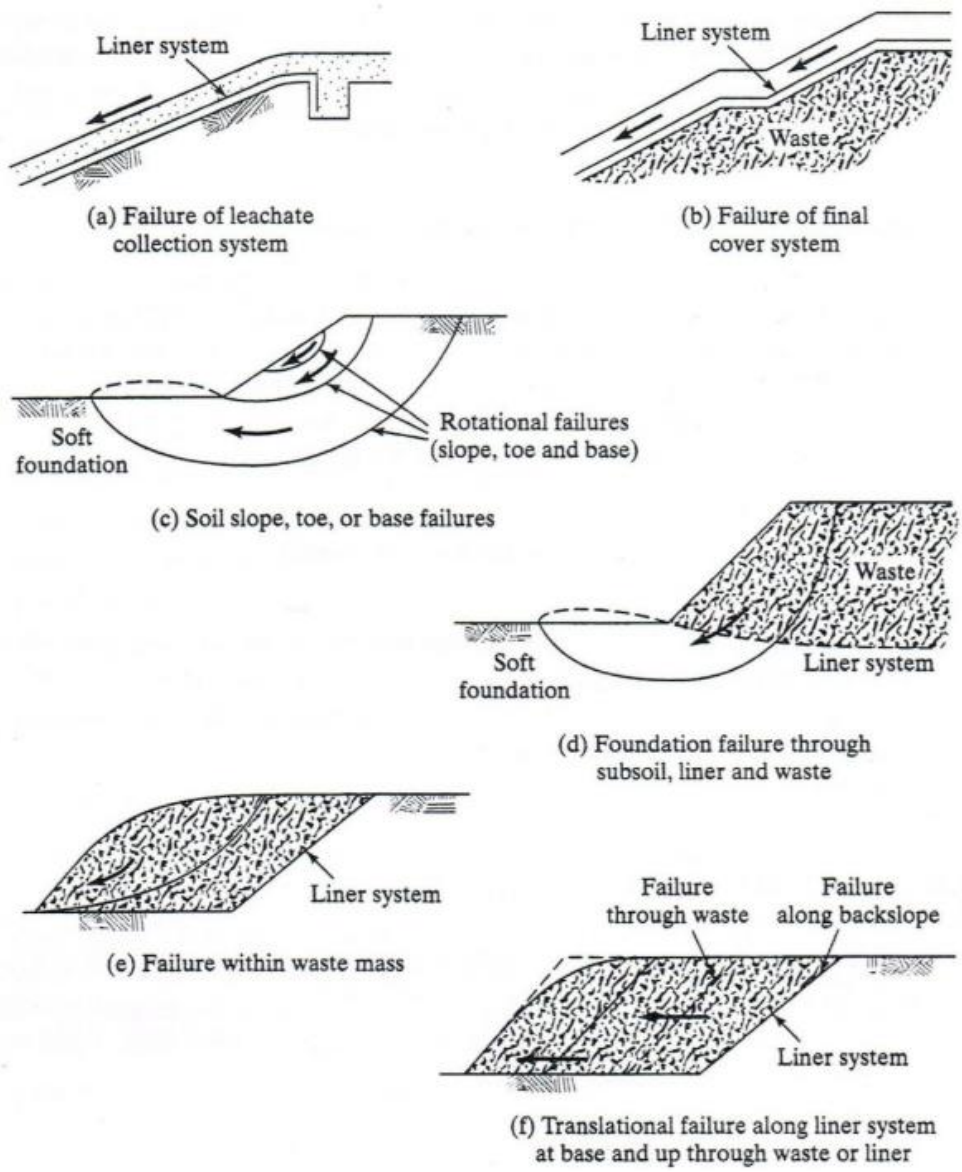
Posljedice mogu biti puzanje koje se odvija polaganim kretanjem površinskog sloja tla niz kosinu ili klizanje tla koje se odvija brzo velikim pokretima debljih slojeva tla niz kosinu. Kad govorimo o puzanju, brzine puzanja su konstante i male svega do 30 mm godišnje, a kod klizanja tla o brzini klizanja ovisi nekoliko parametara (*deformacijske karakteristike tla, morfologija, nagib*), što dovodi do brzine klizanja tla između 30 cm/dan do 400 m/min. Analizom klizanja i uzroka koji su doveli do klizanja zaključuje se da su to isključivo dugotrajni geološko-kemijski procesi u tlu, a najčešći uzroci su voda bila ona površinska ili podzemna i umjetni zahvati koji dovode do poremećaja ravnoteže na kosini [10].

Slika 3. prikazuje glavne elemente klizišta, a to su: poprečne pukotine, priljubljene pukotine pomaka na bočnim granicama između klizišta i stabilne zone kosine te poprečno i radijalno raspucani materijal na stopi pokrenute mase tla.



Slika 3. Presjek kroz klizište [4]

Kada govorimo o kosinama na odlagalištu otpada, do sloma može doći na više mjesta kao što je prikazano na slici 4., a uzroci nestabilnosti vezani su većinom uz lošu pripremu i izvedbu tijekom gradnje.



a) Pojava nestabilnosti drenažnog sloja pokrova odlagališta

b) Klizanje završnog pokrova

c) Rotacijsko klizanje – različiti položaji klizne plohe

d) Rotacijsko klizanje – klizna ploha prolazi kroz tijelo odlagališta, a donji brtveni sloj i temeljno tlo

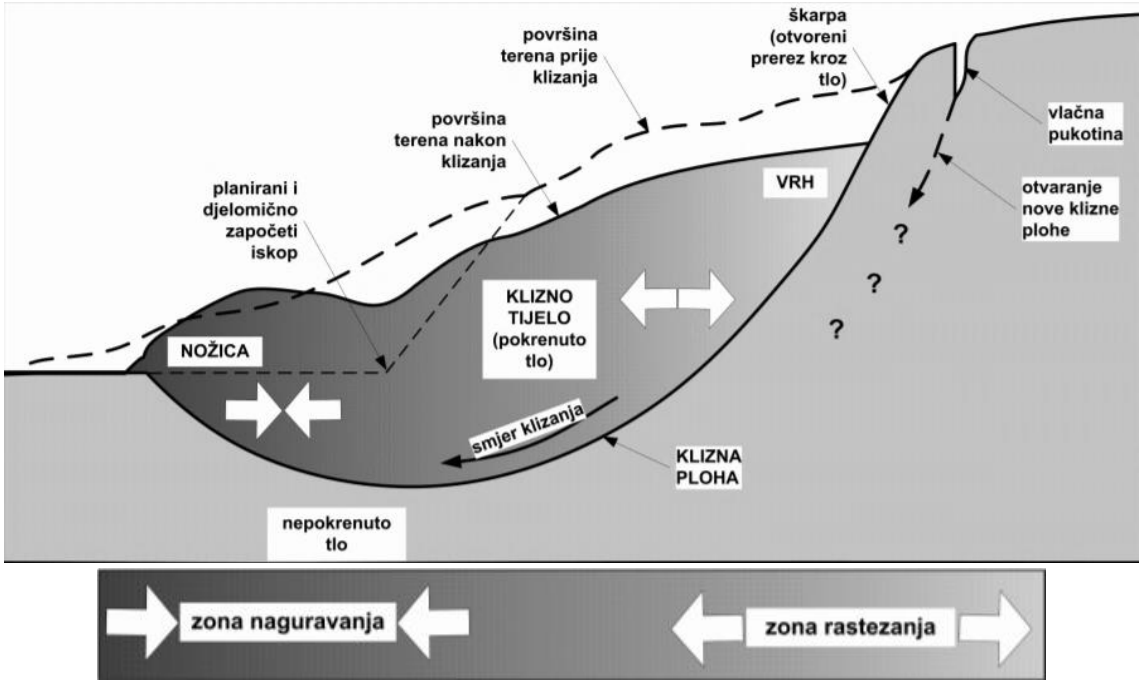
e) Rotacijsko klizanje u tijelu odlagališta uzrokovano vlastitom težinom otpada

f) Translacijsko klizanje kroz donji brtveni sloj i tijelo odlagališta

Slika 4. Klizišta na odlagalištu otpada [1]

2.2. Stabilnost kosine

Nestabilnost kosina u velikom broju slučajeva vezana je uz klizanje dijela tla, to jest kliznog tijela koje se giba po zakrivljenoj ili ravnoj plohi kako je prikazano na slici 5.



Slika 5. Segmenti nestabilnosti na kosini [12]

Pri nožici, to jest donjem dijelu klizišta, tlo se zbija naguravanjem (*zona naguravanja*). Na vrhu, to jest gornjem dijelu klizišta, ono se odvaja (*zona rastezanja*). Kod sitnozrnatog tla, zbog vlačnih naprezanja i zanemarive vlačne čvrstoće tla, na vrhu klizišta obično nastaje vlačna pukotina koja se kasnije može otkriti kao škrapa. Kad se tako nešto pojavi to je jasan znak rane faze nestabilnosti kosine koja se može ostvariti. Pojavom vlačne pukotine ostvaruje se stvaranje nove klizne plohe, a područje samog kliznog tijela i okolina oko toga naziva se klizištem. Na slici 5. prikazano je jednostavno klizište, ali moguće su i druge vrste i oblici klizanja ovisno o vrsti tla, a to su [4]:

- **A.** Translacijsko klizanje
- **B.** Plitko rotacijsko klizanje
- **C.** Duboko rotacijsko klizanje
- **D.** Podnožno rotacijsko klizanje
- **E.** Složeno klizanje

Polazeći od analize opterećenja koja djeluju na klizno tijelo ili potencijalno klizno tijelo određuje se uzrok nastanka ili uvjeti koji se moraju ispuniti da bi došlo do pojave klizanja tla. Kod rješavanja takvih problema podilazi se pojednostavljenju problema tako da se trodimenzionalna [3D] geometrija klizišta zamjenjuje onom dvodimenzionalnom [2D] u vertikalnom presjeku kosine u smjeru klizanja. Model uključuje uvjet ravninskog stanja deformacije to jest klizanje se odvija u ravnini vertikalnog presjeka.

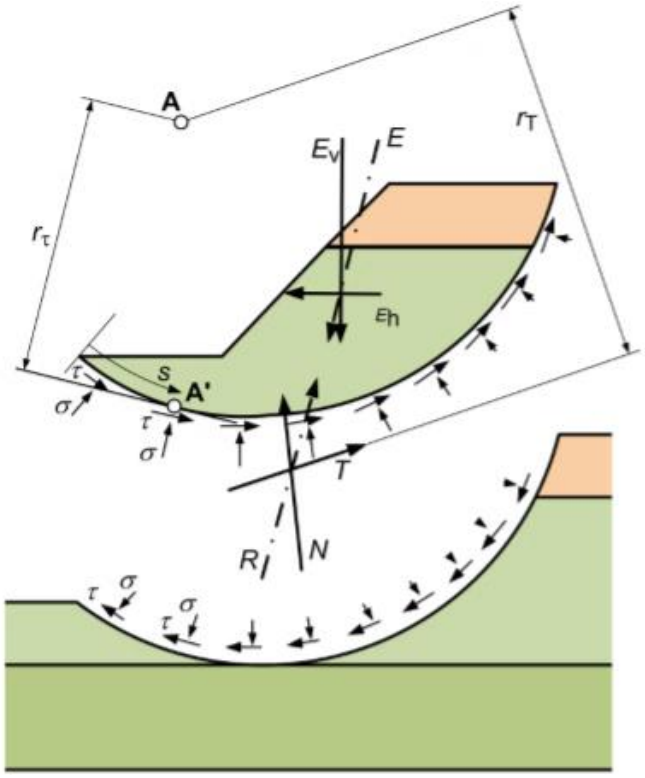
Klizno tijelo opterećeno je s jedne strane silom [$\vec{E}$] koja predstavlja težinu kliznog tijela, vertikalna sila, zajedno sa svim ostalim opterećenjima na vrhu kosine, kao što je na primjer neka građevina. Dodatno se još uključuju sile od građevinskih elemenata kao što su potporne konstrukcije, sidra, piloti i ostalo. Zatim moguće opterećenje od potresa, horizontalna sila, a s druge strane djeluje sila otpora reakcije [$\vec{R}$] koja je rezultanta naprezanja koja djeluje duž klizne plohe, a to je sve prikazano na slici 6 [4].

Zakon mehanike kaže da su akcija i reakcija jednake, ali suprotnog smjera (*izražene kao vektor*).

$$\vec{E} = -\vec{R}$$

Potrebno je silu reakcije [$\vec{R}$] rastaviti na dvije komponente koje su: normalna sila [$\vec{N}$] i sila trenja [$\vec{T}$].

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}$$



Slika 6. Opterećenja na klizno tijelo [12]

Iz geometrije koja je poznata i jedinične težine tla [γ] moguće je odrediti silu [E]. Na temelju poznate krutosti materijala koja čini klizno tijelo i okolinu oko kliznog tijela određuje se raspodjela i veličina posmičnih i normalnih naprezanja duž klizne plohe. Bez uzimanja u obzir krutosti kliznog tijela i krutosti podloge rješenje raspodjele naprezanja duž klizne plohe nema jednoznačno rješenje.

Da bi se postigla stabilnost kosine potrebna je veća čvrstoća tla od posmičnog naprezanja koje je potrebno za održavanje ravnoteže tog kliznog tijela. Glavni uzrok stvaranja nestabilnosti kosine je nedovoljna posmična čvrstoća tla koja je manja iz nekog razloga od posmičnog naprezanja koje je potrebno za održavanje ravnoteže kliznog tijela. Postoje dva razloga ili kombinacija istih zbog kojih se to može dogoditi, a to su:

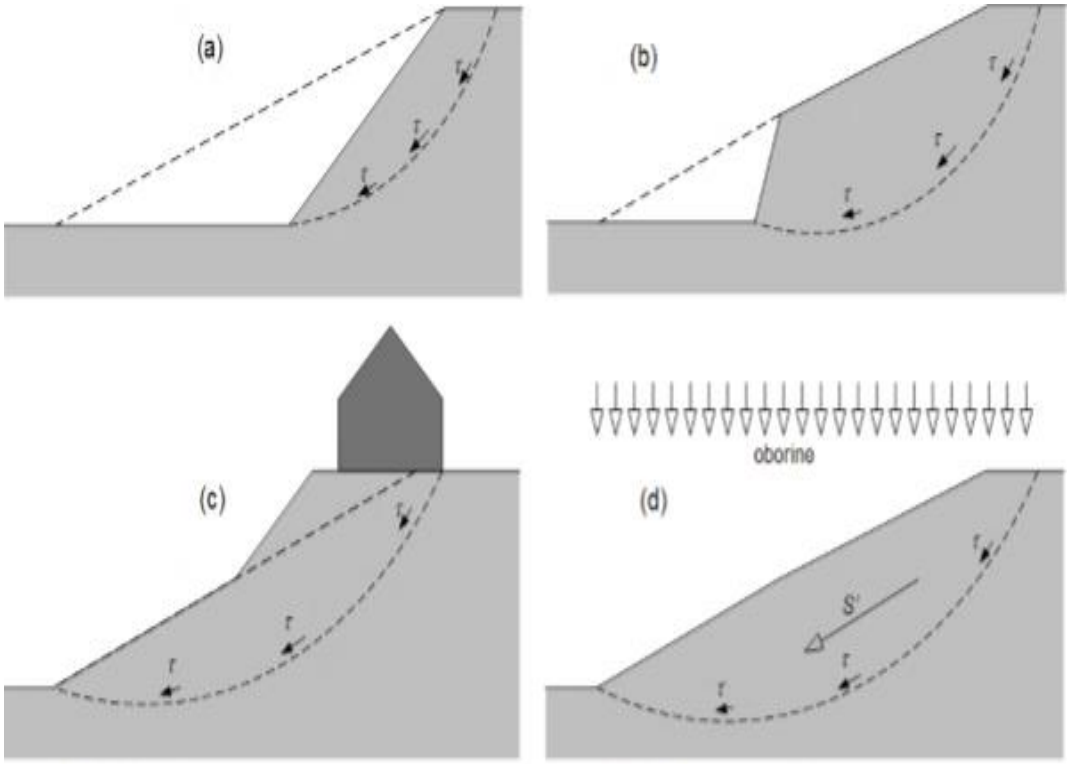
- **<u>Pad čvrstoće</u>**

Najčešće do pada čvrstoće dolazi zbog porasta pornog tlaka u tlu kosine. Oborine su najčešći uzrok podizanja razine vodnog lica, ili razine podzemne vode te time povećanja pornih tlakova u kosini. Porast pornih tlakova izaziva pad efektivnih naprezanja, što dovodi do smanjenja posmične čvrstoće.

- **<u>Porast posmičnog naprezanja</u>**

Tipični slučajevi nestabilnosti kosina vezani uz porast posmičnog naprezanja prikazani su na slici 7., a to su:

a) povećanje nagiba kosine
b) iskop u podnožju kosine
c) dodatno opterećenje
d) porast razine podzemne vode



Slika 7. Uzroci povećanja posmičnih naprezanja na kliznom tijelu [1]

Svi navedeni primjeri ukazuju na problematiku i složenost uzorka koji dovode do nestabilnosti ili klizanja kosine zbog kojih u praksi nastaju problemi kod projektiranja kosina koji se rješavaju istraživanjem i preciznim utvrđivanjem svih parametara kosine.

2.3. Posmična čvrstoća

Do klizanja slojeva tla na kosinama dolazi zbog sloma na određenim plohama ili određenim zonama. Do klizanja tla dolazi zbog promjene opterećenja, slijedom čega posmična naprezanja postanu veća od posmične čvrstoće tla. Posmična čvrstoća opisana je Morh-Coulombovim zakonom:

$$\tau_f = c' + \sigma' \, tan \, \varphi'$$

Kohezija $[c']$ i kut unutarnjeg trenja $[\varphi']$ su parametri čvrstoće za efektivno naprezanje $[\sigma']$.

Kohezija $[c']$ se javlja u sitnozrnatim koherentnim tlima i ovisi o poroznosti, a kut unutarnjeg trenja $[\varphi']$ ovisi o granulometrijskom sastavu kad govorimo o krupnozrnim nekoherentnim tlima, a kad govorimo o sitnozrnatim tlima onda ovisi o mineraloškom sastavu i poroznosti. Propusnost kod krupnozrnatog tla je veća od propusnosti sitnozrnatog tla. Tek nakon izlaska vode iz pora do koje dolazi nakon promjene opterećenja slijedi i promjena obujma tla. Izlazak vode iz pora kod krupnozrnatog tla je u nekoliko minuta ili sati, a proces izlaska vode u sitnozrnatom tlu je puno duži i može trajati više desetaka godina [10].

Posmična čvrstoća djelomično je ovisna o normalnom naprezanju, u veoma propusnom tla ta će čvrstoća rasti proporcionalno porastu opterećenja, dok će se u malo propusnom tlu zbog porasta tlaka u porama smanjiti efektivno naprezanje, pa će se smanjiti i posmična čvrstoća. Rasterećenjem uz smanjeno naprezanje postepeno se povećava obujam i poroznost tla, što utječe i na porast vlažnosti. Kut trenja $[\varphi']$ manje je osjetljiv na te promjene, ali se vrijednost kohezije $[c']$ može znatno smanjiti [13].

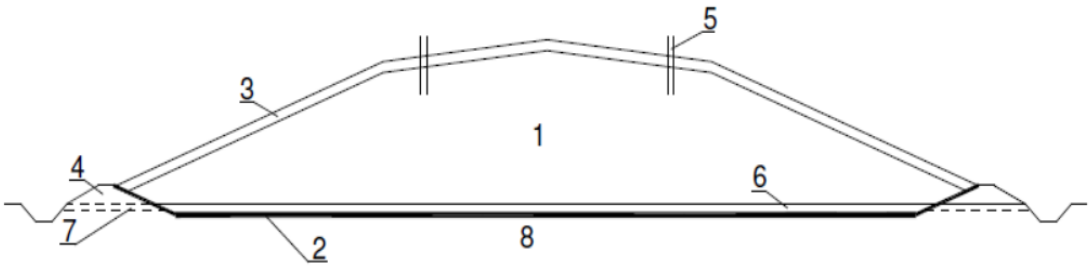
Razlikujemo nekoliko vrsta klizanja kao što su: rotacijsko klizanje, klizanje proizvoljnog oblika, složeno klizanje, translatorno klizanje te kompleksna klizanja.

Kako bi se smanjio rizik od pojave klizanja kosina podilazi se rješenjima kao što su ispitivanje karakteristika tla te određivanje uvjeta ravnoteže materijala. U ovom dijelu provedbe ispitivanja sudjeluje građevinska struka i inženjeri inženjerstva okoliša.

2.4. Stabilnost i slom na odlagalištu

Građevina izgrađena za trajno odlaganje otpada vezanih u sklopu organizirane komunalne djelatnosti naziva se sanitarno odlagalište otpada. Uz samo odlagalište mogu biti i građevine namijenjene za obrađivanje i skladištenje otpada. Odlagališta se dijele prema kategorijama, veličini, vrstama odloženog otpada, stanju aktivnosti i utjecaju na okoliš. Odlagalište za komunalni otpad je građevina čija gradnja zahtijeva niz rješenja vezanih uz sanitarno-epidemiološke, hidrološke, građevinske, ekološke, urbanističke te geotehničke probleme.

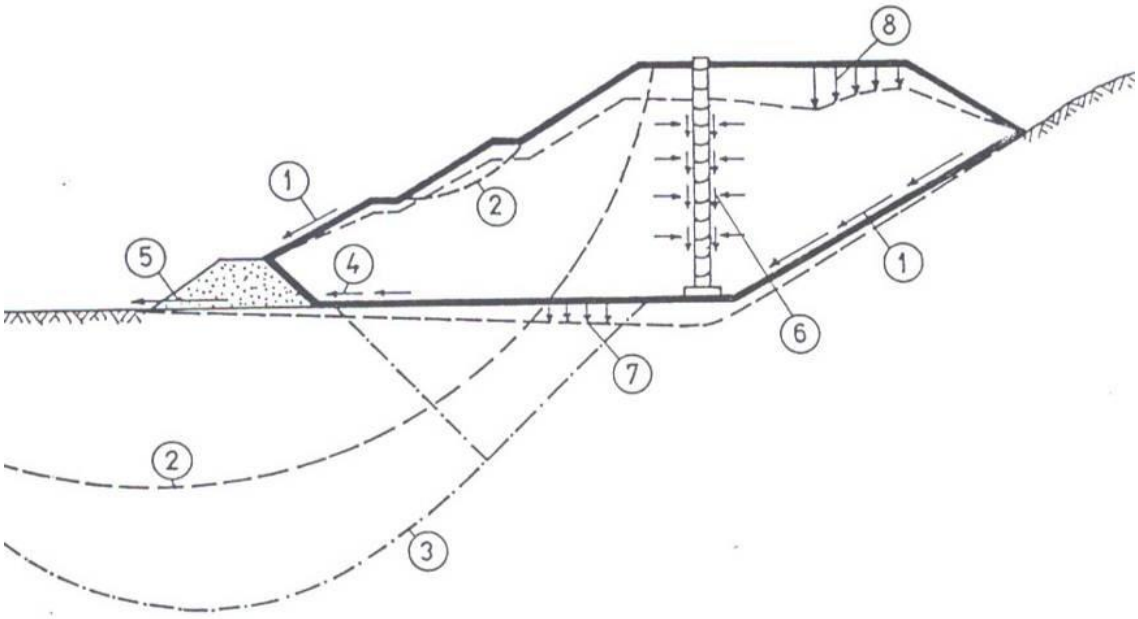
Sastavni dijelovi odlagališta su: otpad [1], donji brtveni sloj [2], pokrov [3], obodni nasip [4], zdenci za otplinjavanje [5], drenažni sloj [6], odvodnja [7], te temeljno tlo [8], a svi dijelovi prikazani su na slici 8.



Slika 8. Sastavni dijelovi odlagališta [2]

Kako bi se izgradilo odlagalište komunalnog otpada potrebna su velika novčana sredstava za samu pripremu izgradnje kao što je potrebna dokumentacija i istražni radovi. Nakon toga i za samu izgradnju odlagališta i svih potrebnih sustava i objekata. Pravilno projektirana i izgrađena odlagališta otpada predstavljaju građevine koje daju najveću sigurnost glede štetnog utjecaja na okoliš.

Dominantan problem gledan s geotehničkog aspekta kod projektiranja odlagališta otpada je globalna statička i seizmička stabilnost odlagališta. U samoj izgradnji postoje faze, a to su izbor lokacije, projektiranje odlagališta, gradnja, upotreba i samo zatvaranje odlagališta. Sa stajališta stabilnosti tijela odlagališta potencijalna klizna ploha može proći kroz tijelo odlagališta, kroz brtveni sustav, a u iznimnim slučajevima i kroz temeljno tlo [2].



***Slika 9. Geotehnički problemi odlagališta otpada* [2]**

Na slici 9., prikazani su geotehnički problemi koji se mogu pojaviti na odlagalištu otpada, a to su: otpornost na klizanje pokrovnog sloja [1], globalni slom kroz tijelo odlagališta [2], nosivost temeljnog tla [3], otpornost na klizanje između brtvenog sloja i temeljnog tla [4], stabilnost berme [5], stabilnost konstrukcije [6], slijeganje temeljnog tla [7] i pomaci samog tijela odlagališta [8].

Mjere za stabilnost kosina na odlagalištima su odabir odgovarajućeg nagiba, dobra ugradnja otpada i odvodnja, a veliki utjecaj na stabilnost još pridonosi oborinska voda i sastav otpada.

Postoje dvije mogućnosti položaja odlagališta u odnosu na teren a to su [2]:

a) nasipavanje otpada iznad prirodnog terena
b) zatrpavanje prirodnog ili umjetnog terena otpadom

2.5. Mehanizam sloma

Rješenje problema stabilnosti kosina statički je neodređen problem. Za rješenje tog problema potrebno je riješiti zadovoljavajuće uvijete, a to su [4]:

a) U svakoj točki mora biti ispunjen uvjet sloma

$$\tau \leq c' + \sigma' tan\varphi'$$

b) Diferencijalne jednadžbe ravnoteže moraju biti zadovoljene

$$\frac{\partial \sigma_v}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{vh}}{\partial_X} - \gamma - \gamma wi(z) - pq(z) = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_h}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{vh}}{\partial_Z} - \gamma wi(X) - pq(X) = 0$$

c) Naprezanja unutar mase tla moraju biti u ravnoteži s vanjskim silama što na nju djeluju

d) Odnos između deformacija i naprezanja u svakoj točki mora biti vezan konstitucijskom jednadžbom

e) Jednadžbe kompatibilnosti moraju biti zadovoljene u svakoj točki

Postoje četiri najčešća uzroka sloma a to su [6]:

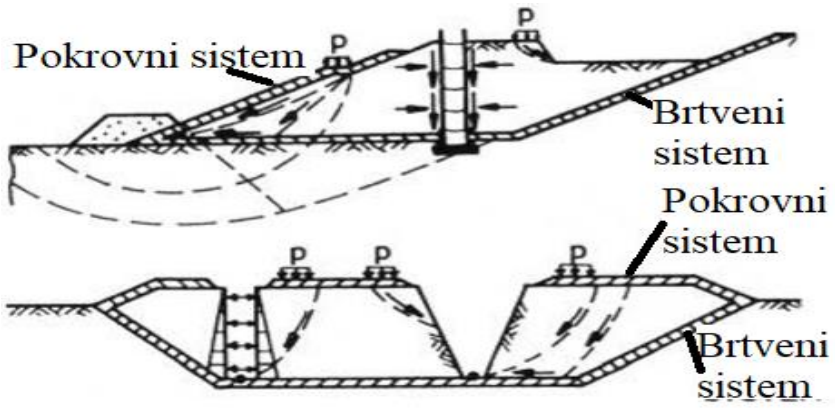
1) Porast razine filtrata u tijelu odlagališta

2) Porast vlažnosti brtvenog sloja

3) Odstupanje od projektiranog rješenja pri izgradnji odlagališta

4) Radovi na samom odlagalištu koji nisu po standardima građevinske struke

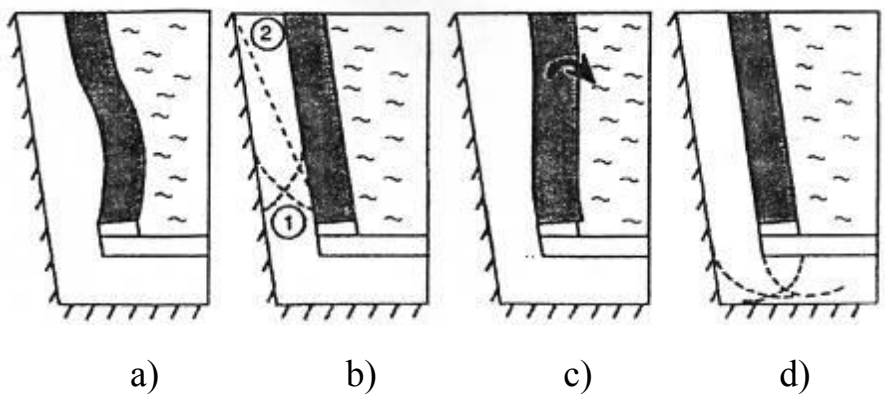
Na slici 10., prikazan je mehanizam sloma koji može nastati sa plohama sloma koje prolaze kroz otpad.



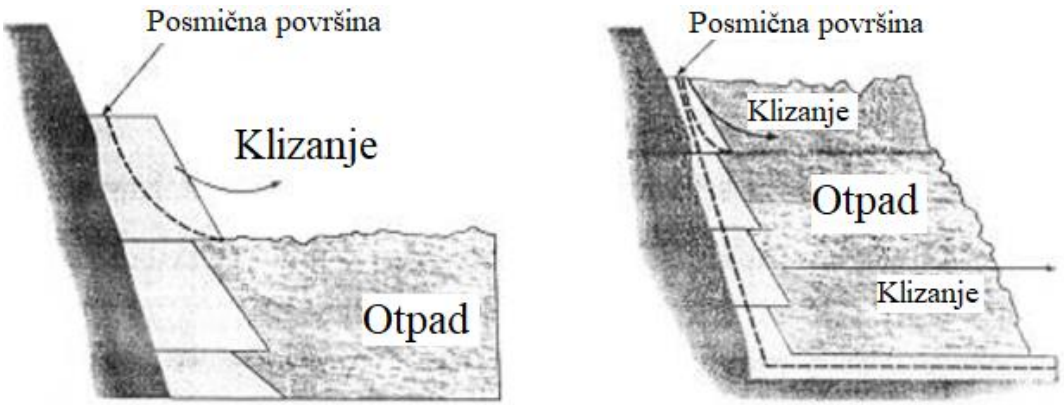
Slika 10. Mehanizmi sloma sa plohom sloma koja prolazi kroz otpad [6]

Postoji još nekolicina mogućih varijanti slomova na odlagalištu. Na slici 11., prikazani su mogući mehanizmi sloma na odlagalištima otpada sa strmim obodnim nasipom, a na slici 12., sa strmim brtvenim slojevima, koji može nastati prije ili poslije postavljanja otpada:

a) Izvijanje
b) Smicanje
c) Prevrtanje
d) Slom tla



Slika 11. Mehanizmi sloma na odlagalištima otpada sa strmim obodnim nasipima [5]



Slika 12. Mogući mehanizmi sloma na strmim brtvenim slojevima [5]

2.6. Mehanika otpada

Ispravan odabir inženjerskih parametara otpada imaju ključnu ulogu u analizi i projektiranju dugoročne stabilnosti i sigurnosti odlagališta. Promjenjivost tih parametara može imati značajan utjecaj na zahtijevanu stabilnost i troškove u gradnji odlagališta. Izrazita heterogenost otpada, kao i promjena parametara otpada s vremenom čini određivanje ovih parametara teškim zadatkom. U području mehanike otpada mogu se navesti sljedeći problemi [7]:

- Statička i dinamička stabilnost odlagališta
- Deformacije i slijeganje odlagališta
- Stabilnost popratnih objekata izgrađenih u odloženom otpadu (*npr. zdenci za otplinjavanje*)
- Stabilnost popratnih objekata izgrađenih na površini odlagališta

Mehanički parametri otpada imaju utjecaj kako na stabilnost tako i na ekonomsku izvedbu odlagališta. Mehanički parametri otpada su: posmična čvrstoća, stišljivost i bočna krutost. Od ostalih parametara valja izdvojiti zapreminsku težinu i gustoću, propusnost, vlažnost i granulometrijski sastav otpada.

Prvi korak u određivanju mehaničkih parametara otpada je klasifikacija otpada. Kao i u mehanici tla i kod otpada je nužno utvrditi različite vrste otpada. Tako se otpad klasificira po mjestu nastanka (*komunalni i tehnološki otpad*) te po svojstvima (*opasni, neopasni i inertni otpad*). Za potrebe određivanja mehaničkih parametara otpada najrelevantnija je geotehnička klasifikacija otpada. Prema geotehničkoj klasifikaciji otpada, otpad se dijeli na [14]:

1. Otpad koji se ponaša kao tlo, otpad na kojeg je moguće primijeniti zakone mehanike tla
2. Otpad koji se ne ponaša kao tlo, otpad na kojeg nije moguće primijeniti zakone mehanike tla

U opisivanju svojstava otpada, jedan od glavnih parametara jest čvrstoća otpada. Zbog heterogenosti otpada i razgradnje organske komponente otpada tijekom vremena parametri čvrstoće mogu varirati u znatnim granicama. Analogno geološkim i drugim zrnatim materijalima, čvrstoća komunalnog otpada koji se stavlja na odlagalište otpada opisujemo pomoću modela kruto plastičnog materijala, pa posmičnu čvrstoću definiramo pomoću Mohr-Columbova kriterija loma. Posmična čvrstoća u komunalnom otpadu ovisi o samom sastavu otpada i sastavnicama to jest o vlaknastoj komponenti komunalnog otpada. Posmična čvrstoća kod otpada ostvaruje se pri većim deformacijama [3][13].

$$\tau_f = c + \sigma_n * tg\,\emptyset$$

τ_f – posmična čvrstoća

c – kohezija

σ_n – normalno naprezanje na ravnini sloma

$\emptyset$ - kut unutrašnjeg trenja

Postoje tri različite metode za određivanje parametara koji se odnose na posmičnu čvrstoću otpada, a oni su:

1. Ispitivanje uzorka otpada u laboratoriju
2. Povratna analiza
3. In-situ (*terensko*) ispitivanje

Uzorke otpada u većini slučajeva ispituje se u dva uređaja, a to su:

- Uređaj za direktan posmik
- Trijaksijalni uređaj

Čimbenici koji otežavaju određivanje mehaničkih parametara otpada su:

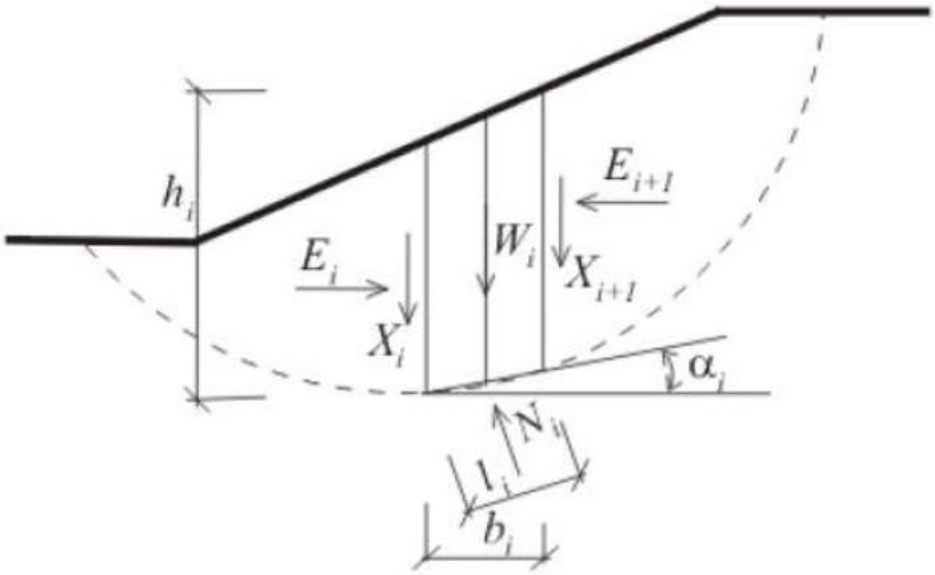
- Nekonzistentan i heterogen sastav otpada
- Teškoća pri dobivanju uzoraka dovoljnih dimenzija koji dobro reprezentira in situ uvjete
- Ne postoji standardizirana procedura za uzorkovanje i ispitivanje otpada
- Parametri otpada mijenjaju se s vremenom, dubinom i mjestom

3. BISHOP - OVA METODA

Vrlo popularna i jedna od najčešće korištenih metoda granične ravnoteže od strane geotehničkih inženjera je Bishopova metoda. Bishopova metoda je jedna od tipičnih metoda koja se zasniva na teoriji granične ravnoteže, a prikaz podjele lamela i sila koje djeluju vidljivo na slici 13. Ova metoda primjenjuje se za proračun faktora sigurnosti klizne plohe.

Metoda je temeljena na nekoliko pretpostavki, kao što su [8]:

- Slom tla se podrazumijeva duž klizne plohe kružnog oblika te je primjenjiva i za izračun faktora sigurnosti za druge oblike ploha
- Sile između lamela u vertikalnom smjeru jednake su 0
- Sile između lamela u horizontalnom smjeru postoje
- U središtu svake lamele djeluje ukupna normalna sila i ona se dobiva zbrajanjem sila koje djeluju u vertikalnom smjeru



Slika 13. Bishopova metoda [8]

Posmična naprezanja između lamela prikazana su oznakom [X_i], a oznakom [N_i] su prikazana normalna naprezanja te sa oznakom [W_i] prikazana težina pojedine lamele. Duljina baze lamele prikazana je oznakom [l_i], a širina lamele [b_i]. Nagib baze lamele prema horizontali prikazana je oznakom [a_i], a visina lamele prikazana je oznakom [h_i].

Bishopova metoda zasniva se na provjeri momentne ravnoteže potencijalno nestabilnog tla ili otpada, a ploha klizanja pretpostavljena je kao cilindrična površina kružne baze. Tako pretpostavljena klizna ploha vrlo dobro se podudara sa opažanjima na terenu jer se klizanja najčešće pojavljuju po plohama koje se mogu dobro aproksimirati dijelom kružnice. Postupak određivanja faktora sigurnosti [F_s] se po ovoj metodi provodi tako da se segment iznad klizne plohe podijeli na lamele. Izdvajanjem jedne lamele i analizom svih sila koje djeluju na pojedinu lamelu mogu se postaviti dvije momentne jednadžbe oko centra kružne klizne plohe. Jedna jednadžba predstavlja moment koji se odupire proklizavanju [M_0], dok druga jednadžba predstavlja moment koji uzrokuje klizanje [M_k]. Omjerom ova dva momenta definiran je faktor sigurnosti protiv klizanja.

$$F_s = \frac{\Sigma\ sile\ otpora}{\Sigma\ sile\ klizanja} = \frac{M_0}{M_k}$$

Uvrštavanjem odgovarajućih izraza umjesto M_0 i M_k dobije se konačan izraz za izračun faktora sigurnosti za Bishopovu metodu:

$$F_s = \frac{\Sigma\ [c' \cdot b + (W_1 + W_2 + \Delta x_n - u_S \cdot b) \cdot tg\varphi'] \cdot \frac{1}{m_\alpha}}{\sum (W_1 + W_2) \cdot sin\,\alpha}$$

Iz gore navedenog izraza je:

c'- Kohezija

u_S- Porni tlak

b - Širina lamele

φ'- Kut unutrašnjeg trenja

W_1- Težina tla iznad razine vode

W_2-Težina tla ispod razine vode

Δx_n- Međulamelarni utjecaj (zanemaruje se)

α - Nagib baze lamele u odnosu na horizontalnu os

Ovo je simplifikacija analize graničnih stanja te je najprimjenjivanija metoda proračuna stabilnosti kosina. Da bi se došlo do rješenja potrebno je pretpostaviti kliznu plohu, a posmična čvrstoća tla definirana je Mohr-Coulombovim kriterijem. Deformacije su ovom metodom potpuno zanemarene, dok se promatra samo ravnoteža sila. Ovom metodom faktor sigurnosti se može izraziti i kao omjer stvarne kohezije i kuta trenja u odnosu na koheziju i kut trenja za $[F_s = 1]$, ili kao omjer momenata koji se opiru klizanju i momenata koji uzrokuju klizanje.

Iz izraza za m_α:

$$m_\alpha = cos\,\alpha + \frac{tg\,\varphi' \cdot sin\,\alpha}{F_s}$$

vidljivo je da se u gornjem izrazu F_s nalazi na obje strane jednadžbe, odnosno ovakav izraz moguće je riješiti jedino iteracijskim postupkom. Prvi F_s se pretpostavlja i računa se $F_{s računski}$. Iteracija se provodi tako dugo dok nije zadovoljen uvjet da je:

$$F_{s,pretpostavljeni} - F_{s,računski} < \mu$$

Gdje je:

μ – po volji odabrana točnost

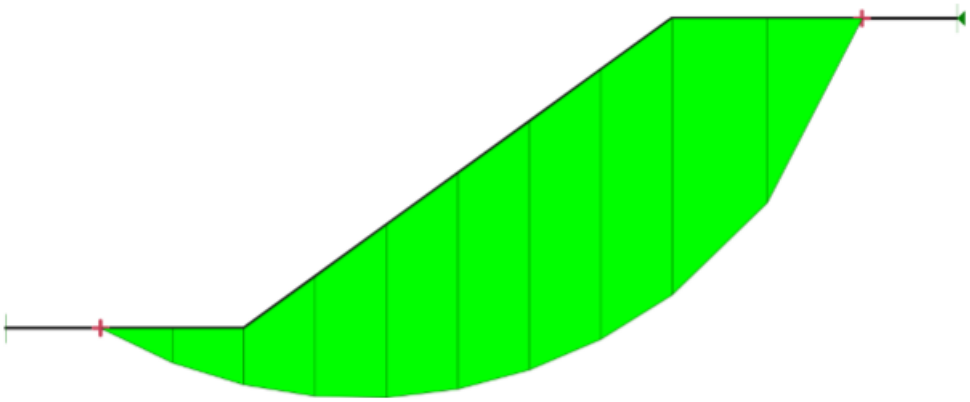
4. PORAČUN I PARAMETARSKA ANALIZA

U ovom dijelu bit će prikazani rezultati provedenih analiza osjetljivosti na ulazne parametre. Cilj ove analize bio je ustanoviti koliko promjena pojedinog parametra utječe na faktor sigurnosti kosine odlagališta te kako međusobno promjena pojedinih parametara utječe na promjenu faktora sigurnosti. U analize parametara čvrstoće uvrštene su analize u kojima su promjenljivi parametri bili kohezija [c'], kut unutrašnjeg trenja [φ'] i zapreminska težina [γ]. U analize geometrijskih parametara uvrštene su analize u kojima se promjenljiv parametar odnosio na geometrijske karakteristike odlagališta otpada.

Sve provedene analize obrađuju probleme unutrašnje stabilnosti na odlagalištima, odnosno probleme stabilnosti koji se mogu javiti u samom tijelu odlagališta.

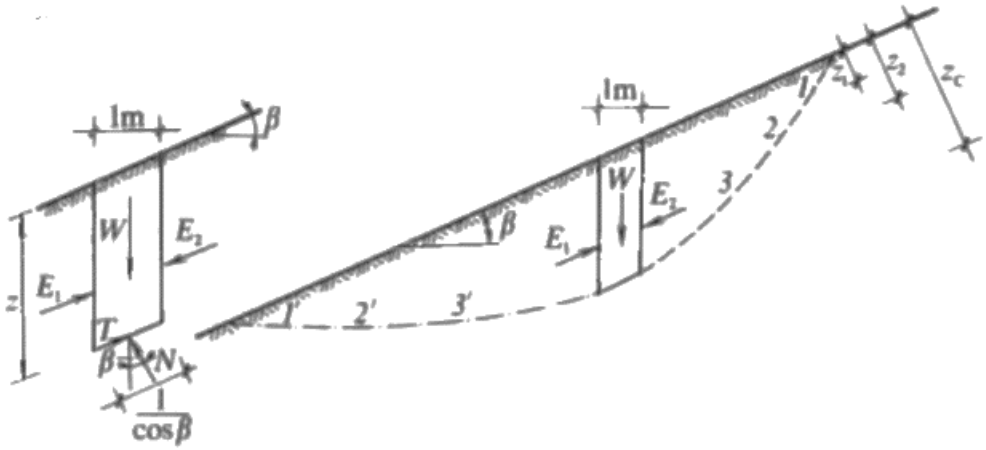
4.1. Klizna ploha

Stabilnost stvarnog ili zamišljenog kliznog tijela koje je povezano u području s okolnim tlom preko klizne plohe analizira se metodom granične ravnoteže. Klizno tijelo se podjeli na neodređen broj vertikalnih lamela kao što je vidljivo na slici 14. Analizirajući uvjete ravnoteže svih sila koje djeluju na svaku od podijeljenih lamela određuje se veličina normalnog i posmičnog naprezanja duž klizne plohe, odnosno na osnovici pojedine lamele.



Slika 14. Prikaz kosine podijeljene na lamele [11]

Tamo gdje posmična naprezanja premaše posmičnu čvrstoću nastaje velika deformacija i dolazi do sloma kao što je vidljivo na slici 15. Sve točke u kojima se pojavio slom čine kliznu plohu. Obično je to poligonska linija, koja se može aproksimirati krivuljom. U praksi najčešće se složena krivulja zamjenjuje cilindričnim plohama, s pomoću kojih se jednostavno proračunavaju uvjeti ravnoteže i sloma. Klizne plohe u nehomogenim materijalima imaju složeniji oblik koji ovisi o slijedu promjene svojstava materijala na različitim mjestima kosine [10].



Slika 15. Nagib klizne plohe i naprezanja na različitim dubinama [4]

Na kosinama izgrađenih od prirodnoga, umjetno nasutoga ili zbijenog materijala neće se pojaviti deformacije i klizanje pod uvjetom da mobilizirana posmična naprezanja [τ_m] na bilo kojoj plohi kroz kosinu ne premaše posmičnu čvrstoću materijala [τ_f]. Stabilnost kosine izražava se sa navedenim faktorom sigurnosti:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_m}$$

Iz navedene formule za faktor sigurnosti zaključuje se da je slom nastupio u slučaju kad je faktor sigurnosti jednak 1 [$F_s = 1$] (*nestabilno stanje, stanje sloma*), a do sloma tla nije došlo ako je faktor sigurnosti veći od 1 [$F_s > 1$] (*stabilno stanje*).

Faktor sigurnosti za projektiranje kosina, nasipa, usjeka ili asanacije klizanja uzima se od 1,2 do 2,0.

Projektiranjem kosina moguća klizna ploha nije unaprijed zadana, već se traži ona klizna ploha s najmanjim faktorom sigurnosti. Klizna ploha sa najmanjim faktorom sigurnosti najbliže je nestabilnom stanju ili slomu pa je mjerodavna za ocjenu stabilnosti. Taj faktor sigurnosti te klizne plohe postavlja se kao faktor sigurnosti čitave projektirane kosine. Metoda granične ravnoteže sastoji se od pronalaženja klizne plohe s najmanjim faktorom sigurnosti. Kritičnom kliznom plohom naziva se najčešće ona klizna ploha kojoj pripada klizna ploha s najmanjim faktorom sigurnosti [4].

Kod dimenzioniranja kosina ponajviše je potrebno odrediti njen nagib, koji kod izgradnji i samog korištenja neće izazvati nestabilnost ili slom kosine. Osim nagiba kosine potrebno je odrediti još i oblik kosine. Ako ne postoji klizna ploha sa faktorom sigurnosti jednakim ili manjim od 1, kosina će biti stabilna. Za stabilnost kosine mjerodavna je ona kritična klizna ploha koja ima najmanji faktor sigurnosti. Mjera za stabilnost kosine je upravo taj faktor sigurnosti koji odgovara kritičnoj kliznoj plohi [4].

U praksi kritična klizna ploha pronalazi se utvrđivanjem faktora sigurnosti na većem, beskonačnom broju izabranih kliznih ploha i izborom one klizne plohe koja daje najmanji faktor sigurnosti. U osnovnom principu moguće je primijeniti beskonačan broj kliznih ploha i beskonačan broj faktora sigurnosti za pronalaženje kritične klizne plohe. Praktički je nemoguće izabrati toliko velik broj kliznih ploha pa se izabere konačan broj probnih kliznih ploha, a iskustvo u ovom djelu značajno pomaže da se s velikom sigurnošću barem približno pronađe kritična klizna ploha. U ovom djelu uvelike pomažu programski paketi kao što je GeoStudio s kojim je u praksi pronalaženje kritične klizne plohe jednostavno, brzo i ne predstavlja problem inženjerima.

4.2. GeoStudio

Za potrebe izrade ovog diplomskog rada i provedbe proračunske analize zadanih parametara korišten je programski paket GeoStudio 2012. Iz područja geotehnike velik broj programskih paketa oslanja se na metodu konačnih elemenata, a osobito u analizama naprezanja i deformacija te procjeđivanja vode kroz tlo/otpad. GeoStudio omogućuje rad i rješenje problema u širem rasponu inženjerskih problema. Programski paket GeoStudio je razvijen od strane kanadske tvrtke GeoSlope International te pripada skupini veoma često korištenih programskih paketa posebice zbog jednostavnosti korištenja. Koristi se u rješavanju mnogih geotehničkih problema, a osobito određivanja naprezanja, deformacija te slijeganja tla kod izvedbe različitih zahvata u tlu i tečenja vode kroz tlo. Gotehnički zahvati modeliraju se kao ravninski ili osnosimetrični problem, koristeći metodu konačnih elemenata (*naprezanja, deformacije, procjeđivanje*) ili metodu granične ravnoteže (*analize stabilnosti*). Program uključuje programske pakete kojima se može vršiti dinamička analiza utjecaja potresa.

Program GeoStudio sastoji se od nekoliko programskih paketa, a to su: SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W i VADOSE/W.

Sljedeće opisani programski paketi najčešće su korišteni u programu GeoStudio. Programski paket SLOPE/W koristi se za proračun stabilnosti kosina. Programski paket SEEP/W koristi se rješavanje probleme strujanja vode kroz tlo te programski paket SIGMA/W koristi se za analizu odnosa naprezanja i deformacija. Programski paketi SEEP/W i SIGMA/W koriste metodu konačnih elemenata, a programski paketi SLOPE/W koristi se metodom granične ravnoteže. Ovi se programi, mogu kombinirati zajedno, rezultati programa SEEP/W mogu biti korišteni u programskom paketu SIGMA/W ili SLOPE/W. Budući da se u programima GeoStudio ne naznačuju jedinice pojedinih veličina, pri unosu podataka ni pri prikazu rezultata, treba zadati veličine koje imaju konzistentne mjerne jedinice [9].

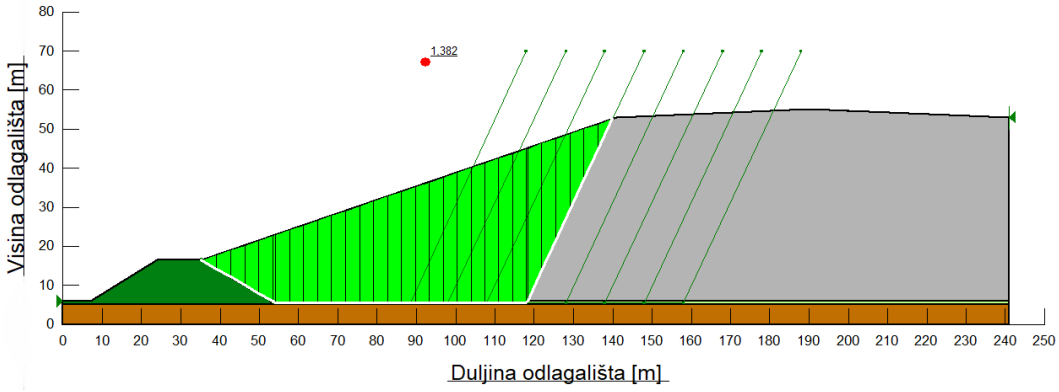
4.3. PARAMETARSKA ANALIZA

U ovom djelu bit će prikazani dobiveni rezultati analize iz GeoStudia za odlagalište Jakuševac. Kao referentna geometrija odlagališta usvojena je geometrija odlagališta otpada Jakuševec te odabrani parametri također dobro reprezentiraju prosječne i preporučene vrijednosti pojedinih parametara. Za proračun korišten je programski paket SLOPE/W, a za pojedine slojeve odlagališta usvojene su slijedeće vrijednosti parametara čvrstoće koji su prikazani u tablici 1. Za potrebe ove analize usvojena poligonalna klizna ploha koja svojim gornjim dijelom prolazi kroz otpad, a donjim dijelom prolazi kroz sredinu brtvenog sloja. Analize koje bi obuhvatile stabilnost temeljnog tla i berme (*problemi vanjske stabilnosti*) nisu bile provedene.

Tablica 1. Referentni parametri pojedinih slojeva odlagališta

	Kohezija [kPa]	**Kut unutrašnjeg trenja [°]**	**Zapreminska težina [kN/m^3]**
Otpad	19	24	13
Brtveni sloj	0	12	20
Berma	10	24	20
Temeljno tlo	0	34	20

Faktor sigurnosti za kritičnu poligonalnu kliznu plohu sa parametrima navedenim u tablici 1., iznosi 1,382. Za referentno stanje kritična klizna ploha je pod rednim brojem 4. Slika 16., prikazuje rezultat dobiven u programu GeoStudio. Postavljeni tip analize u programu za proračun parametarske analize i dobivanje rezultata bio je Bishop. U programu za parcijalni faktor korišten je treći pristup Eurokoda 7.

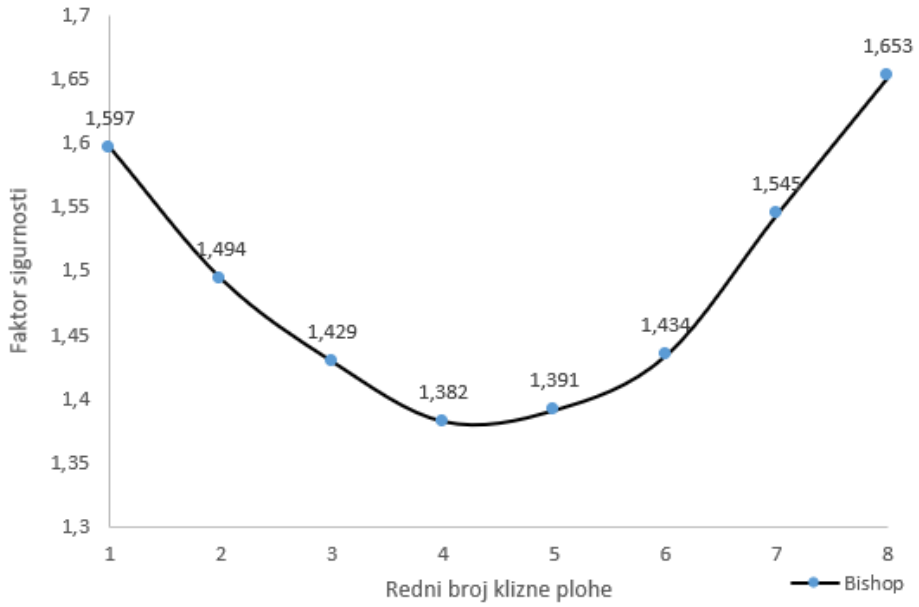


Slika 16. Faktor sigurnosti referentnog stanja [11]

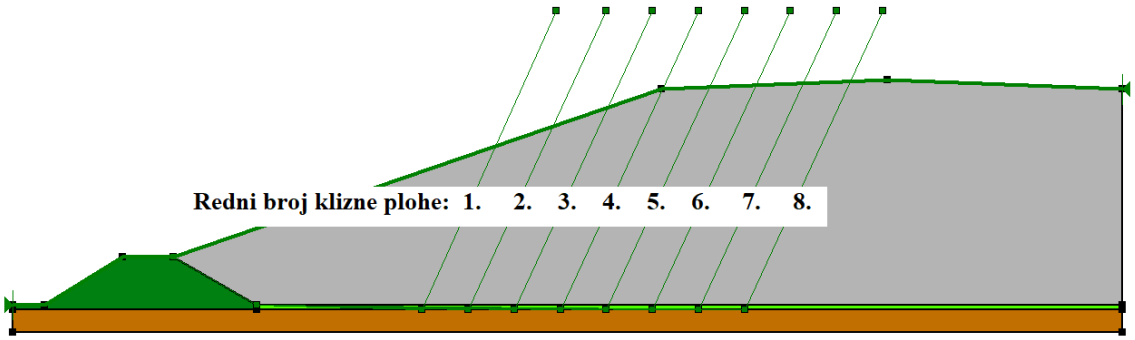
Dobiveni faktori sigurnosti za postavljenih osam kliznih ploha su navedeni u tablici 2. i prikazani na slici 17., a na slici 18., prikazan je položaj pojedinih kliznih ploha.

Tablica 2. Dobiveni faktori sigurnosti po pojedinim kliznim plohama

Redni broj klizne ploha	1	2	3	4	5	6	7	8
Faktor sigurnosti	1,597	1,494	1,429	1,382	1,391	1,434	1,545	1,653



Slika 17. Prikaz dobivenih faktora sigurnosti kroz klizne plohe [11]



Slika 18. Prikaz rednih brojeva kliznih ploha [11]

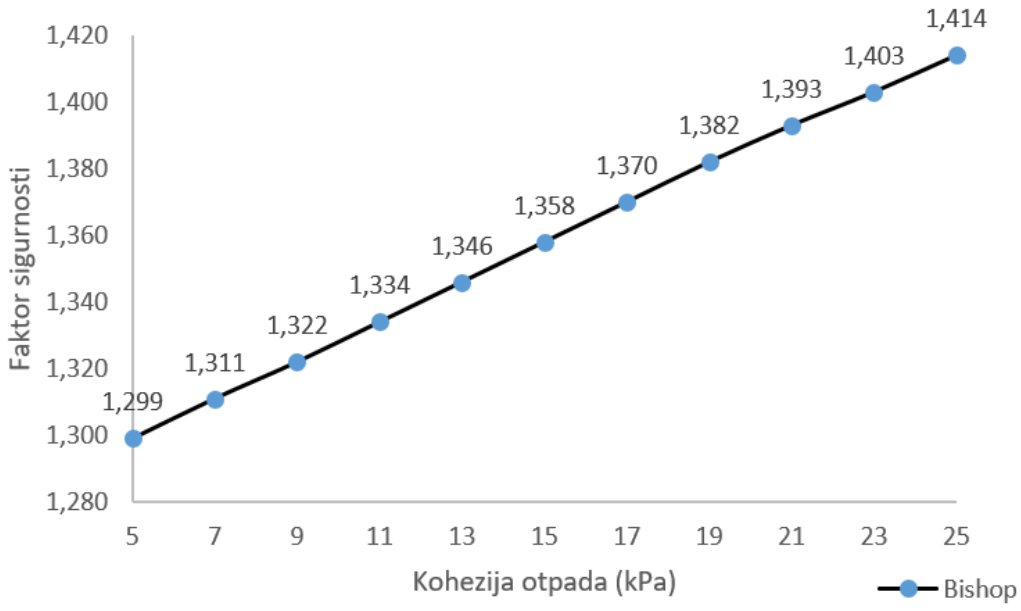
4.3.1. Analiza 1 – promjena kohezije [c']

- **Promjena kohezije [c'] otpada**

Određivanje promjene faktora sigurnosti za kritičnu poligonalnu kliznu plohu uz promjenljiv parametar čvrstoće otpada - kohezija. Kohezija otpada varirala je u rasponu od $c' = 5 - 25$ kPa. Inkrement promjene kohezije otpada iznosio je 2 kPa. Pri varijaciji kohezije kut unutrašnjeg trenja otpada bio je fiksiran na $\varphi' = 24°$, dok je zapreminska težina otpada bila fiksirana na $\gamma = 13$ kN/m^3. Parametri čvrstoće donjeg brtvenog sloja odlagališta fiksirani su na referentne vrijednosti koje iznose $c' = 0$ i $\varphi' = 12°$, dok je zapreminska težina donjeg brtvenog sloja iznosila $\gamma = 20$ kN/m^3. Ovom analizom željelo se ispitati koliko promjena kohezije otpada utječe na stabilnost odlagališta. U tablici 3., prikazan je raspon vrijednosti kohezije i pripadajući faktor sigurnosti. Na slici 19., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu kohezije otpada.

Tablica 3. Faktor sigurnosti za promjenu kohezije otpada

c′	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
F.S.	1,299	1,311	1,322	1,334	1,346	1,358	1,370	1,382	1,393	1,403	1,414



Slika 19. Utjecaj promjene kohezije otpada na faktor sigurnosti [11]

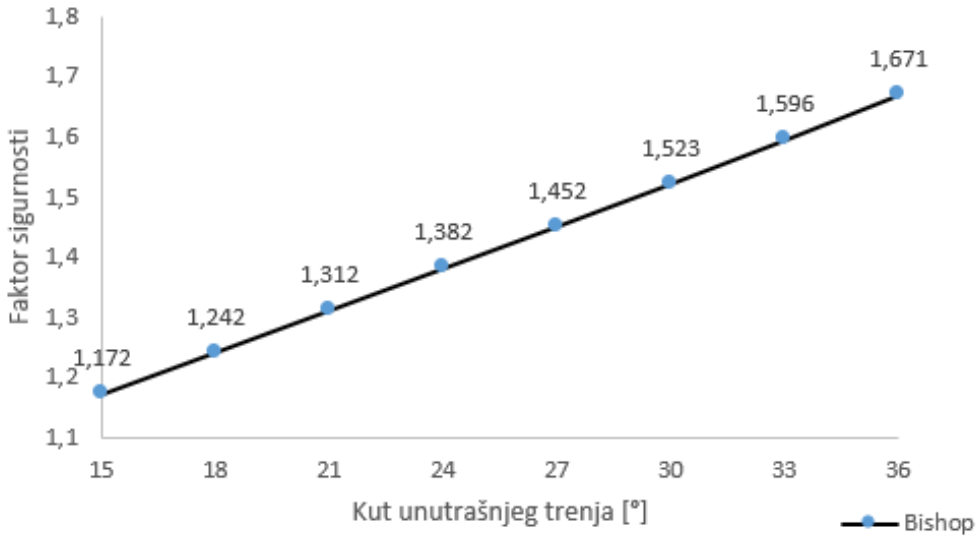
4.3.2. Analiza 2 – promjena kuta unutrašnjeg trenja [φ']

- **Promjena kuta unutrašnjeg trenja [φ′] otpada**

Određivanje promjene faktora sigurnosti za kritičnu poligonalnu kliznu plohu uz promjenljiv parametar čvrstoće otpada – kut unutrašnjeg trenja. Kut unutrašnjeg trenja otpada varirao je u rasponu od $\varphi' = 15 - 36°$. Inkrement promjene kuta unutrašnjeg trenja otpada iznosio je 3°. Pri varijaciji kuta unutrašnjeg trenja kohezija otpada bila je fiksirana na $c' = 19$ kPa, dok je zapreminska težina otpada bila fiksirana na $\gamma = 13$ kN/m^3. Parametri čvrstoće donjeg brtvenog sloja odlagališta fiksirani su na referentne vrijednosti koje iznose $c' = 0$ i $\varphi' = 12°$, dok je zapreminska težina donjeg brtvenog sloja iznosila $\gamma = 20$ kN/m^3. Ovom analizom željelo se ispitati koliko promjena kuta unutrašnjeg trenja otpada utječe na stabilnost odlagališta. U tablici 4., prikazan je raspon vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja i pripadajući faktor sigurnosti. Na slici 20., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu kuta unutrašnjeg trenja otpada.

Tablica 4. Faktor sigurnosti za promjenu kuta unutrašnjeg trenja otpada

φ′	15	18	21	24	27	30	33	36
F.S.	1,172	1,242	1,312	1,382	1,452	1,523	1,596	1,671



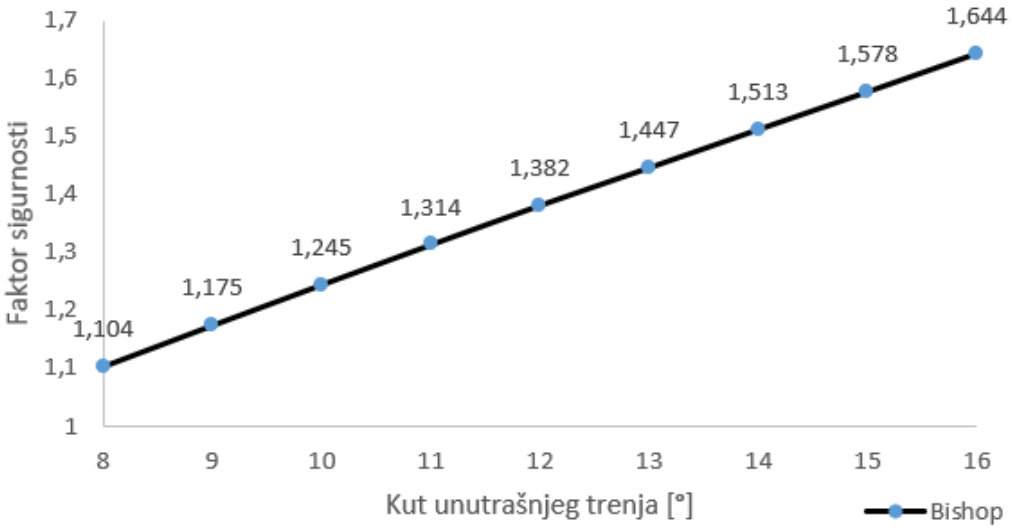
Slika 20. Utjecaj promjene kuta unutrašnjeg trenja otpada na faktor sigurnosti [11]

- **Promjena kuta unutrašnjeg trenja [φ'] brtvenog sloja**

Određivanje promjene faktora sigurnosti za kritičnu poligonalnu kliznu plohu uz promjenljiv parametar čvrstoće donjeg brtvenog sloja – kut unutrašnjeg trenja. Kut unutrašnjeg trenja brtvenog sloja varirao je u rasponu od $\varphi' = 8 - 16°$. Inkrement promjene kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja iznosio je 1°. Pri varijaciji kuta unutrašnjeg trenja kohezija brtvenog sloja bila je fiksirana na $c' = 0$ kPa, dok je zapreminska težina brtvenog sloja bila fiksirana na $\gamma = 20$ kN/m^3. Parametri čvrstoće otpada odlagališta fiksirani su na referentne vrijednosti koje iznose $c' = 19$ i $\varphi' = 24°$, dok je zapreminska težina otpada iznosila $\gamma = 13$ kN/m^3. Ovom analizom željelo se ispitati koliko promjena kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja utječe na stabilnost odlagališta. U tablici 5., prikazan je raspon vrijednosti kuta unutrašnjeg trenja i pripadajući faktor sigurnosti. Na slici 21., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja.

Tablica 5. Faktor sigurnosti za promjenu kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja

φ′	8	9	10	11	12	13	14	15	16
F.S.	1,104	1,175	1,245	1,314	1,382	1,447	1,513	1,578	1,644



Slika 21. Utjecaj promjene kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja na faktor sigurnosti [11]

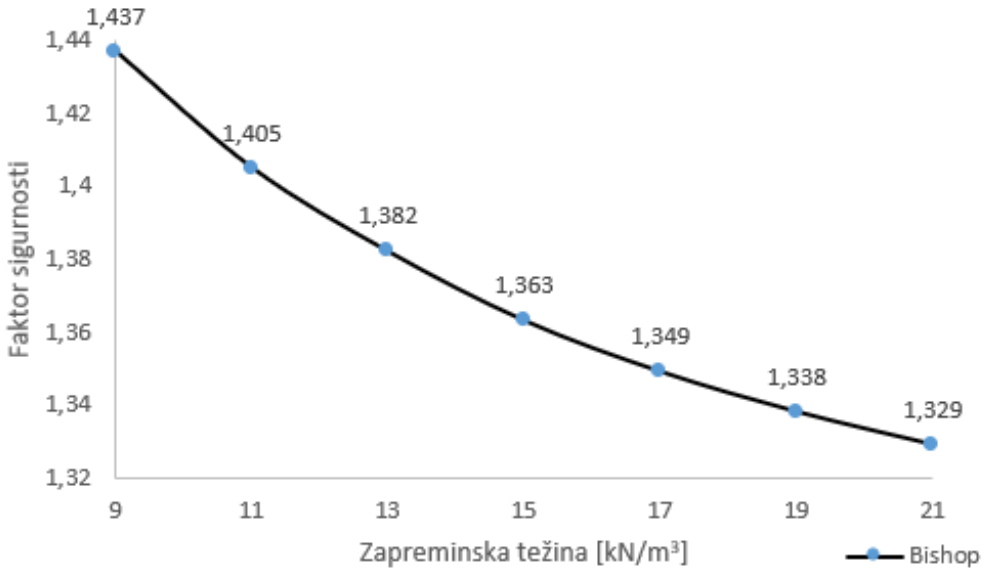
4.3.3. Analiza 3 – promjena zapreminske težine [γ]

- **Promjena zapreminske težine [γ] otpada**

Određivanje promjene faktora sigurnosti za kritičnu poligonalnu kliznu plohu uz promjenljivu zapreminsku težinu otpada. Zapreminska težina otpada varirala je u rasponu od $\gamma = 9 - 21$ kN/m^3. Inkrement promjene zapreminske težine otpada iznosio je 2 kN/m^3. Pri varijaciji zapreminske težine kohezija je bila fiksirana na $c' = 19$ kPa, dok je kut unutrašnjeg trenja bio fiksiran na $\varphi' = 24°$. Parametri čvrstoće donjeg brtvenog sloja odlagališta fiksirani su na referentne vrijednosti koje iznose $c' = 0$ i $\varphi' = 12°$, dok je zapreminska težina donjeg brtvenog sloja iznosila $\gamma = 20$ kN/m^3. Ovom analizom željelo se ispitati koliko promjena zapreminske težine otpada utječe na stabilnost odlagališta. U tablici 6., prikazan je raspon vrijednosti zapreminske težine i pripadajući faktor sigurnosti. Na slici 22., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu zapreminske težine otpada.

Tablica 6. Faktor sigurnosti za promjenu zapreminske težine otpada

γ	9	11	13	15	17	19	21
F.S.	1,437	1,405	1,382	1,363	1,349	1,338	1,329



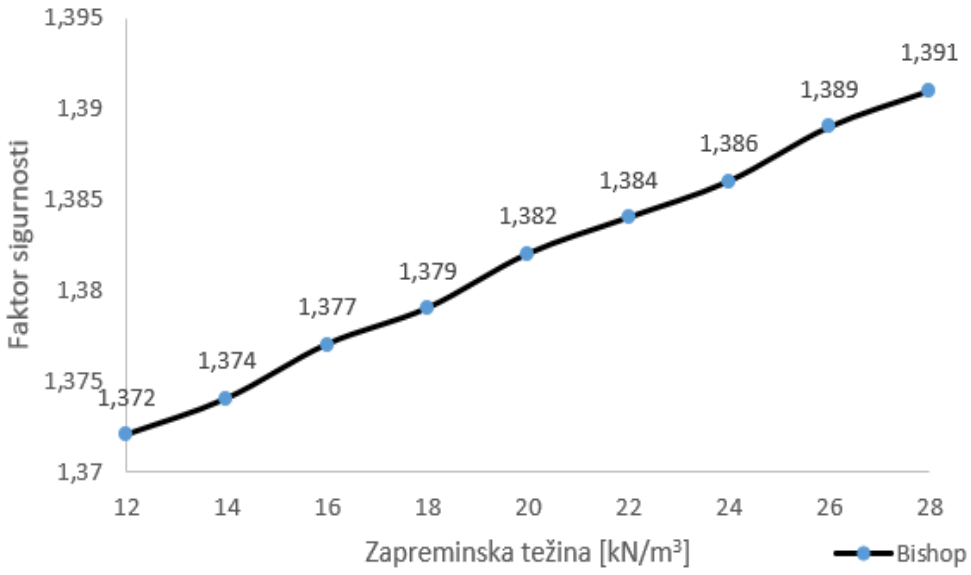
Slika 22. Utjecaj promjene zapreminske težine otpada na faktor sigurnosti [11]

- **Promjena zapreminske težine [γ] brtvenog sloja**

Određivanje promjene faktora sigurnosti za kritičnu poligonalnu kliznu plohu uz promjenljive parametre čvrstoće donjeg brtvenog sloja. Zapreminska težina brtvenog sloja varirala je u rasponu od $\gamma = 12 - 28\ \mathrm{kN/m^3}$. Inkrement promjene zapreminske težine otpada iznosio je 2 $\mathrm{kN/m^3}$. Pri varijaciji zapreminske težine kohezija je bila fiksirana na $c' = 0$ kPa, dok je kut unutrašnjeg trenja bio fiksiran na $\varphi' = 12°$. Parametri čvrstoće otpada odlagališta fiksirani su na referentne vrijednosti koje iznose $c' = 19$ i $\varphi' = 24°$, dok je zapreminska težina otpada iznosila $\gamma = 13\ \mathrm{kN/m^3}$. Ovom analizom željelo se ispitati koliko promjena zapreminske težine brtvenog sloja utječe na stabilnost odlagališta. U tablici 7., prikazan je raspon vrijednosti zapreminske težine i pripadajući faktor sigurnosti. Na slici 23., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu zapreminske težine brtvenog sloja.

Tablica 7. Faktor sigurnosti za promjenu zapreminske težine brtvenog sloja

γ	12	14	16	18	20	22	24	26	28
F.S.	1,372	1,374	1,377	1,379	1,382	1,384	1,386	1,389	1,391



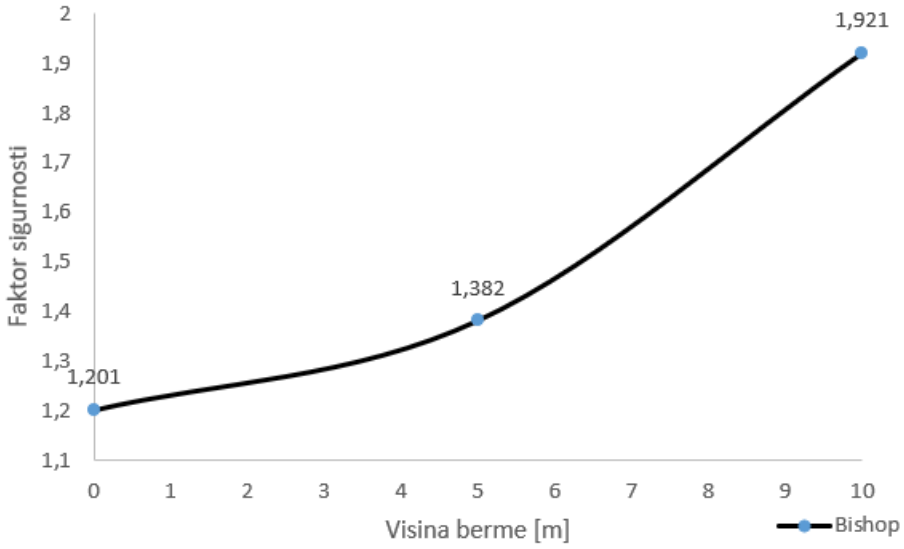
Slika 23. Utjecaj promjene zapreminske težine brtvenog sloja na faktor sigurnosti [11]

4.3.4. Analiza 4 – promjena geometrije odlagališta

Berma u funkciji potporne konstrukcije ima povoljan učinak na stabilnost kosina odlagališta otpada. Stoga je u ovoj analizi varirana visina berme kako bi se mogao procijeniti utjecaj promjene visine berme na promjenu faktora sigurnosti odlagališta. Visina berme varirana je u granicama od 0 – 10 metara [m]. Inkrement promjene visine berme iznosio je 5 m. Parametri čvrstoće otpada fiksirani su na referentnu vrijednost koje iznose $c' = 19$ kPa, $\varphi' = 24°$, $\gamma = 13\ \mathrm{kN/m^3}$. Parametri čvrstoće brtvenog sloja fiksirani su na referentne vrijednosti koje iznose $c' = 0$ kPa, $\varphi' = 12°$, $\gamma = 20\ \mathrm{kN/m^3}$. Ovom analizom želio se ispitati koliki je utjecaj izgradnje berme na ukupnu stabilnosti odlagališta. U tablici 8., prikazan je raspon vrijednosti visine berme i pripadajući faktor sigurnosti. Na slici 24., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu visine berme.

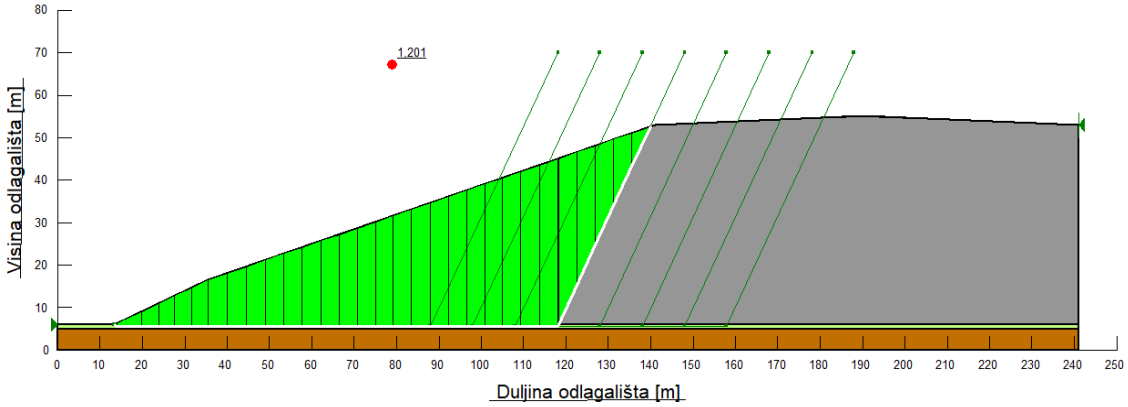
Tablica 8. Faktor sigurnosti za promjenu visine berme

m	0	5	10
F.S.	1,201	1,382	1,921



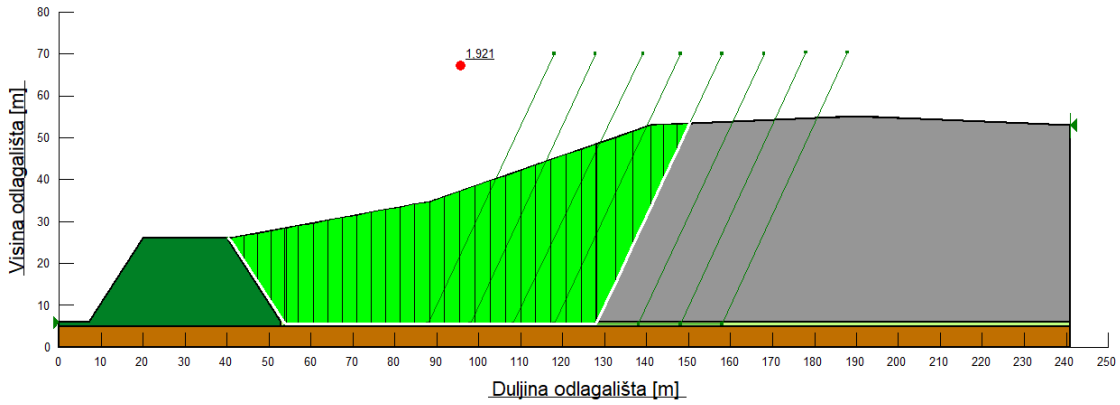
Slika 24. Utjecaj promjene visine berme na faktor sigurnosti [11]

Promjenom visine berme odlagališta mijenjao se i nagib odloženog otpada budući da se u svim analizama dodirna točka otpada i berme nalazila na vrhu berme. Redni broj kliznih ploha bio je isti kao i na slici 18. Na slici 25., prikazana je geometrija odlagališta bez berme. Geometrija sa slike korištena je za Analizu 4., a vrijednosti parametara čvrstoće bili su postavljeni na referentne vrijednosti.



Slika 25. Faktor sigurnosti odlagališta bez berme [11]

Na slici 26., prikazana je geometrija odlagališta sa dvostruko višom bermom. Geometrija sa slike korištena je za Analizu 4., a vrijednosti parametara čvrstoće bili su postavljeni na referentne vrijednosti.



Slika 26. Faktor sigurnosti odlagališta sa dvostruko višom bermom [11]

4.3.5. Rasprava

- **Analiza 1**

Iz slike 19., je vidljivo da za minimalni iznos kohezije otpada od 5 kPa (*F.S.=1,299*) u odnosnu na referentnu vrijednost kohezije otpada od 19 kPa (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti opada za 6%. Za maksimalni iznos kohezije otpada od 25 kPa (*F.S.=1,414*) u odnosu na referentnu vrijednost kohezije otpada od 19 kPa (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti raste za 2%. Porastom kohezije otpada faktor sigurnosti kosine odlagališta raste. Smanjenjem kohezije otpada dolazi do pada čvrstoće pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti pada. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da promjena parametra kohezije nema značajan utjecaj na promjenu faktora sigurnosti.

- **Analiza 2**

Iz slike 20., je vidljivo da za minimalni iznos kuta unutrašnjeg trenja otpada od 15° (*F.S.=1,172*) u odnosnu na referentnu vrijednost kuta unutrašnjeg trenja otpada od 24° (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti opada za 18%. Za maksimalni iznos kuta unutrašnjeg trenja otpada od 36° (*F.S.=1,671*) u odnosu na referentnu vrijednost kuta unutrašnjeg trenja otpada od 24° (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti raste za 21%. Porastom kuta unutrašnjeg trenja otpada faktor sigurnosti kosine odlagališta raste jer se povećala čvrstoća pojedinih elemenata odlagališta. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da promjena kuta unutrašnjeg trenja otpada ima značajan utjecaj na promjenu faktora sigurnosti .

Iz slike 21., je vidljivo da za minimalni iznos kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja od 8° (*F.S.=1.,104*) u odnosnu na referentnu vrijednost kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja od 12° (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti opada za 25%. Za maksimalni iznos kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja od 16° (*F.S.=1,644*) u odnosu na referentnu vrijednost kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja od 12° (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti raste za 18%. Porastom kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja faktor sigurnosti kosine odlagališta raste jer se povećala čvrstoća pojedinih elemenata odlagališta. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da promjena kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja ima značajan utjecaj na promjenu faktora sigurnosti. Faktor sigurnosti najosjetljiviji je na promjene kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja te kod projektiranja odlagališta trebalo bi posvetiti više pažnje kod određivanja vrijednosti tog parametra.

- **Analiza 3**

Iz slike 22., je vidljivo da za minimalni iznos zapreminske težine otpada od 9 kN/m^3 (*F.S.=1,437*) u odnosnu na referentnu vrijednost zapreminske težine otpada od 13 kN/m^3 (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti raste za 4%. Za maksimalni iznos zapreminske težine otpada od 21 kN/m^3 (*F.S.=1,329*) u odnosu na referentnu vrijednost zapreminske težine otpada od 13 kN/m^3 (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti opada za 4%. Smanjenjem zapreminske težine otpada faktor sigurnosti kosine odlagališta raste. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da promjena zapreminske težine otpada nema značajan utjecaj na promjenu faktora sigurnosti.

Iz slike 23., je vidljivo da za minimalni iznos zapreminske težine brtvenog sloja od 12 kN/m^3 (*F.S.=1,371*) u odnosnu na referentnu vrijednost zapreminske težine brtvenog sloja od 20 kN/m^3 (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti opada za 1%. Za maksimalni iznos zapreminske težine brtvenog sloja od 28 kN/m^3 (*F.S.=1,391*) u odnosu na referentnu vrijednost zapreminske težine brtvenog sloja od 20 kN/m^3 (*F.S.=1,382*) faktor sigurnosti raste za 1%. Povećanjem zapreminske težine brtvenog sloja faktor sigurnosti kosine odlagališta raste. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da promjena zapreminske težine brtvenog sloja nema značajan utjecaj na promjenu faktora sigurnosti.

- **Analiza 4**

Iz slike 24., je vidljivo da za slučaj sa duplo većom bermom (*F.S.=1,921*) u odnosu na slučaj bez berme (*F.S.=1,201*) faktor sigurnosti raste za 60%. Porastom visine obodnog nasipa raste i faktor sigurnosti, što je posljedica povoljnog djelovanja težine lamela na dijelu klizne plohe koji se nalazi na obodnom nasipu. Porastom visine nasipa, zbog promjene kuta nagiba lamele, raste i doprinos vlastite težine lamela mobiliziranoj posmičnoj sili koja se odupire klizanju. Izgradnja berme i njena visina ima značajan utjecaj na faktor sigurnosti.

5. ZAKLJUČAK

Problematiku odlagališta otpada kao specifičnog objekta za gradnju jedino je moguće riješiti interdisciplinarnim pristupom različitih struka. Geoinženjerstvo okoliša ima ulogu kroz razmatranje mehaničkih problema stabilnosti odlagališta otpada. Osiguravanjem stabilnosti na odlagalištu stvaraju se uvjeti sigurnog rada svih dijelova odlagališta. Mehanička svojstva komunalnog otpada kao i sastavnice tijekom vremena se mijenjaju i to u velikom rasponu što otežava samo projektiranje i stabilnost odlagališta otpada. Analiza stabilnosti kosina je složen proces koji zahtijeva točnost ulaznih parametara i posebnu pažnju kod projektiranja. Cilj analize je procijeniti sigurnost kosina kao i uvjete koji mogu dovesti do njezina sloma. Za stabilnost odlagališta bitan je oprezan izbor mjerodavnih parametara otpada i dijelova koje čine odlagalište otpada jednom cjelinom sigurnom kako za zdravlje ljudi tako i za zaštitu okoliša. Kod projektiranja odlagališta otpada preporuča se upotreba numeričkih modela procjene stabilnosti kosina te da se pretpostave poligonalne klizne plohe koje jednim dijelom prolaze kroz sredinu donjeg brtvenog sloja.

5.1. ZAKLJUČAK ANALIZE

- **Analiza 1**

U ovoj analizi razmatran je utjecaj promjene kohezije otpada na promjenu faktora sigurnosti kosine odlagališta.

Promjena kohezije otpada – kohezija otpada varirala je u rasponu od 5 kPa do 25 kPa u inkrementima od 2 kPa. Na slici 19., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu kohezije otpada za Bishopovu metodu. Na slici se može vidjeti da sa porastom kohezije otpada, čime je povećana čvrstoća pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti raste. Smanjenjem kohezije otpada dolazi do pada čvrstoće pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti pada. Promjena faktora sigurnosti za Bishopovu metodu daje linearnu promjenu faktora sigurnosti. Kritična klizna ploha za iznose kohezije otpada između 5 kPa i 21 kPa bila je klizna ploha pod rednim brojem 4, a za koheziju otpada od 25 kPa, kritična klizna ploha bila je klizna ploha pod rednim brojem 5. Za analizu uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 16.

- **Analiza 2**

U ovoj analizi razmatran je utjecaj promjene kuta unutrašnjeg trenja otpada i kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja na promjenu faktora sigurnosti kosine odlagališta.

Promjena kuta unutrašnjeg trenja otpada – kut unutrašnjeg trenja otpada varirao je u rasponu od 15° do 36° u inkrementu od 3°. Na slici 20., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu kuta unutrašnjeg trenja otpada za Bishopovu metodu. Na slici se može vidjeti da sa porastom kuta unutrašnjeg trenja otpada, čime je povećana čvrstoća pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti raste za 21%. Smanjenjem unutrašnjeg trenja otpada dolazi do pada čvrstoće pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti pada za 18%. Promjena faktora sigurnosti za Bishopovu metodu daje linearnu promjenu faktora sigurnosti. Kritična klizna ploha za iznose kuta unutrašnjeg trenja otpada između 15° i 24° bila je klizna ploha pod rednim brojem 4, a za kut unutrašnjeg trenja otpada između 27° i 36°, kritična klizna ploha bila je klizna ploha pod rednim brojem 5. Za analizu uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 16.

Promjena kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja – kut unutrašnjeg trenja brtvenog sloja varirao je u rasponu od 8° do 16° u inkrementu od 1°. Na slici 21., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja za Bishopovu metodu. Na slici se može vidjeti da sa porastom kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja, čime je povećana čvrstoća pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti raste za 18%. Smanjenjem kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja dolazi do pada čvrstoće pojedinih elemenata odlagališta, faktor sigurnosti pada za 25%. Promjena faktora sigurnosti za Bishopovu metodu daje linearnu promjenu faktora sigurnosti. Kritična klizna ploha za iznose kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja između 12° i 16° bila je klizna ploha pod rednim brojem 4, a za kut unutrašnjeg trenja brtvenog sloja između 8° i 11°, kritična klizna ploha bila je klizna ploha pod rednim brojem 5. Također se pokazalo da donji brtveni sloj, iako ima relativno mali kut unutrašnjeg trenja, značajno doprinosi ukupnoj stabilnosti odlagališta. Za analizu uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 16.

- **Analiza 3**

U ovoj analizi razmatran je utjecaj promjene zapreminske težine otpada i zapreminske težine brtvenog sloja na promjenu faktora sigurnosti kosine odlagališta.

Promjena zapreminske težine otpada – zapreminska težina otpada varirala je u rasponu od 9 kN/m^3 do 21 kN/m^3 u inkrementu od 2 kN/m^3. Na slici 22., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu zapreminske težine otpada za Bishopovu metodu. Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da promjena zapreminske težine otpada nema znatniji utjecaj na promjenu faktora sigurnosti kosine jer se promjene kreću u rasponu od svega 1%. Kritična klizna ploha je za sve iznose zapreminske težine otpada bila klizna ploha pod rednim brojem 4. Za analizu uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 16..

Promjena zapreminske težine brtvenog sloja – zapreminska težina brtvenog sloja varirala je u rasponu od 12 kN/m^3 do 28 kN/m^3 u inkrementu od 2 kN/m^3. Na slici 23., prikazana je krivulja promjene faktora sigurnosti kosine odlagališta uz promjenu zapreminske težine brtvenog sloja za Bishopovu metodu. Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da promjena zapreminske težine brtvenog sloja nema znatniji utjecaj na promjenu faktora sigurnosti kosine jer se promjena kreće u rasponu od svega 1%. Kritična klizna ploha je za sve iznose zapreminske težine brtvenog sloja bila klizna ploha pod rednim brojem 4. Za analizu uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 16.

- **Analiza 4**

Porastom visine obodnog nasipa raste i faktor sigurnosti, što je posljedica povoljnog djelovanja težine lamela na dijelu klizne plohe koji se nalazi na obodnom nasipu. Porastom visine nasipa, zbog promjene kuta nagiba lamele, raste i doprinos vlastite težine lamela mobiliziranoj posmičnoj sili koja se odupire klizanju. Povećanje visine obodnog nasipa na 10 metara, a u odnosu na slučaj bez nasipa, uzrokovalo je porast faktora sigurnosti za 60% iz čega se može zaključiti da obodni nasip značajno doprinosi ukupnoj stabilnosti odlagališta.

Sa slike 24., može se uočiti da je promjena faktora sigurnosti nelinearna funkcija visine berme. Porastom visine berme raste i faktor sigurnosti što je posljedica povoljnog djelovanja težine lamela na dijelu klizne plohe koji se nalazi na obodnom nasipu. Porastom visine nasipa raste i doprinos težine lamela koje se odupiru klizanju. Kritična klizna ploha za slučaj bez berme bila je klizna ploha pod rednim brojem 4, a za slučaj sa dvostruko višom bermom kritična klizna ploha bila je klizna ploha pod rednim brojem 5. Za analizu bez berme uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 25, a za analizu sa dvostruko većom bermom uzeta je geometrija odlagališta prikazana na slici 26.

6. LITERATURA

[1] Budhu, M.: Soil Mechanics & Foundations, John Wiley & Sons, New York, 2000

[2] Verić, F.; Ivšić, T.; Ivandić, K.: Geotehnički aspekti odlagališta otpada, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Zagreb

[3] Van Impe, W.F.: Environmental geotechnics – ITC5 – reports and future goals, Geotechnical Hazards – proceedings of the XIth Danube – European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Poreč, Croatia, 25-29 May 1998, pp. 127-15

[4] Nonveiller, E.: Kliženje i stabilizacija kosina, Školska knjiga, Zagreb, 1987

[5] Jones, D.R.V.; Dixon, N.: Stability of Landfill Lining Systems: Report No. 1 – Literature Review" (R&D Technical Report P1-385/TR1), Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, almondsbury, Bristol, BS32 4UD, 2003

[6] Jessberger, H.L.: TC5 activities – Technical Committee on Environmental Geotechnics, ISSMFE, Proceedings of the second international congres on environmental geotechnics, Osaka, Japan, 5 – 8 November, 1996, pp. 1227 – 1254

[7] König, D.; Jessberger, H.L.: Waste Mechanics, ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, 1997., pp. 35-76, 1997

[8] FINE Ltd., 2007. Geo 5 – User's Guide. Version 5.5.

[9] Tutorial GeoStudio, Nama : Fachruddin ; Nrp : f451020111, 2004

[10] Tehnička enciklopedija I-XIII, JLZ/LZ Miroslav Krleža, Zagreb, 1963/97

[11] Slika iz vlastitog izvora: GeoStudio 2012, 2020

[12] Vlasta Szavits-Nossan, Mehanika tla i stijena , predavanje, građevinski fakultet

[13.] Z.Berisavljević, D. Berisavljević, V.Čebaček, D.Rakić, Analiza stabilnosti pokosa metodama granične ravnoteže i smanjenja parametara čvrstoće, Građevinar, Vol. 67 No. 10., 2015

[14] Solid Waste Technology & Managment, Ed. Thomas H. Christensen,Blackwell Publishing Ltd., 2011

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer prirodne kosine
Slika 2. Umjetno izgrađena kosina
Slika 3. Presjek kroz klizište
Slika 4. Klizište na odlagalištu otpada
Slika 5. Segmenti nestabilnosti na kosini
Slika 6. Opterećenja na klizno tijelo
Slika 7. Uzroci povećanja posmičnih naprezanja na kliznom tijelu
Slika 8. Sastavni dijelovi odlagališta
Slika 9. Geotehnički problemi odlagališta otpada
Slika 10. Mehanizmi sloma sa plohama sloma koja prolazi kroz otpad
Slika 11. Mehanizmi sloma na odlagalištima otpada sa strmim obodnim nasipima
Slika 12. Mogući mehanizmi sloma na strmim brtvenim slojevima
Slika 13. Bishopova metoda
Slika 14. Prikaz kosine podijeljene na lamele
Slika 15. Nagib klizne plohe i naprezanja na različitim dubinama
Slika 16. Faktor sigurnosti referentnog stanja
Slika 17. Prikaz dobivenih faktora sigurnosti kroz klizne plohe
Slika 18. Prikaz rednih brojeva kliznih ploha
Slika 19. Utjecaj promjene kohezije otpada na faktor sigurnosti
Slika 20. Utjecaj promjene kuta unutrašnjeg trenja otpada na faktor sigurnosti
Slika 21. Utjecaj promjene kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja na faktor sigurnosti
Slika 22. Utjecaj zapreminske težine otpada na faktor sigurnosti
Slika 23. Utjecaj promjene zapreminske brtvenog sloja na faktor sigurnosti
Slika 24. Utjecaj promjene visine berme na faktor sigurnosti
Slika 25. Faktor sigurnosti odlagališta bez berme
Slika 26. Faktor sigurnosti odlagališta za dvostruko višom bermom

POPIS TABLICA

Tablica 1. Referentni parametri pojedinih slojeva odlagališta
Tablica 2. Dobiveni faktori sigurnosti po pojedinim kliznim plohama
Tablica 3. Faktor sigurnosti za promjenu kohezije otpada
Tablica 4. Faktor sigurnosti za promjenu kuta unutrašnjeg trenja otpada
Tablica 5. Faktor sigurnosti za promjenu kuta unutrašnjeg trenja brtvenog sloja
Tablica 6. Faktor sigurnosti za promjenu zapreminske težine otpada
Tablica 7. Faktor sigurnosti za promjenu zapreminske težine brtvenog sloja
Tablica 8. Faktor sigurnosti za promjenu visine berme