

OPTIMIZIRANJE PILOTSKE KONSTRUKCIJE ZA SANACIJU KLIZIŠTA ŠTEFANIĆI U ISTRI

PILE CONSTRUCTION OPTIMIZATION FOR THE ŠTEFANIĆI LANDSLIDE REMEDIATION IN ISTRIA

Martina Vivoda Prodan*, Marijana Prša*

Sažetak

Članak opisuje postupak odabira konstrukcije za sanaciju klizišta Štefanići u Istri primjenom parametarskih analiza pilotske konstrukcije. Varirani parametri su promjer i osni razmak pilota, čime je u konačnici analizirano šest varijanti rješenja pilotske konstrukcije. Analize stabilnosti te analize stanja naprezanja i deformacija izrađene su programskim paketom Rocscience. Na temelju rezultata provedenih analiza odabrana je optimalna pilotska konstrukcija za koju je izrađen projekt sanacije klizišta. Radom se analizira utjecaj variranja parametara pilota na ponašanje pilotske konstrukcije na primjeru sanacije klizišta Štefanići.

Ključne riječi: klizište, sanacija, pilotska konstrukcija, parametarske analize

Abstract

The article describes the process of structure selection for the remediation of the Štefanići landslide in Istria based on parametric analyzes of the pile construction. The varied parameters are the diameter and the axial spacing of piles, so that ultimately six variants of pile constructions were analyzed. Stability analyzes as well as stress deformation analyzes were carried out using the Rocscience software package. Based on the results of the performed analyzes, the optimal pile construction was selected for which the landslide remediation project was developed. The article analyzes influence of the pile parameter variation on the behavior of the pile construction using the example of the Štefanići landslide remediation.

Key words: landslide, remediation, pile construction, parametric analyzes

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: martina.vivoda@gradri.uniri.hr

1. Uvod

Klizanje je svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz padinu [1,2], a klizišta predstavljaju najčešći oblik nestabilnosti u tlu. Kao nepredvidive pojave, često predstavljaju velike opasnosti za uobičajeno odvijanje ljudskih aktivnosti. Da bi se takve posljedice izbjegle, važno je pravovremeno uočiti indikatore pojave moguće nestabilnosti te isto tako pravovremeno reagirati kako bi se ista spriječila. Uočavanjem indikatora moguće je pravovremeno spriječiti nastanak klizišta, no ukoliko ipak dođe do pojave klizanja koji uzrokuju socijalne ili ekonomske gubitke, važno je čim prije pristupiti sanaciji istog. Projektiranju mjera sanacije klizišta prethode geotehnički istražni radovi i inženjerskogeološka interpretacija kako bi se utvrdili uzrok nastanka klizišta, tip klizišta, vrste materijala tla i stijena u klizištu i ispod klizišta, kao i definirala njihova prostorna distribucija. Mjere sanacije mogu uključivati razne zahvate na klizištu kao što je promjena geometrije kosine, dreniranje, ugradnja potpornih konstrukcija i unutarnje ojačanje kosine [3]. Navedene mjere se najčešće kombiniraju, a jedna od mjera koja je gotovo uvijek zastupljena je ugradnja potpornih konstrukcija.

Upravo je za mjeru sanacije klizišta Štefanići, obrađenog u ovom članku, odabrana ugradnja potporne konstrukcije u obliku pilotske stijene. Predmetno klizište Štefanići nalazi se na lokalnoj cesti LC50059 u blizini mjesta Kaldir. Područje kojem pripada navedeno klizište smješteno je u središnjem dijelu Istarskog poluotoka kojeg karakteriziraju flišne naslage. Središnji dio Istre, poznatiji kao Siva Istra, najpodložniji je pojavama nestabilnosti upravo zbog trošenja flišne stijenske mase u podlozi. Trošenje flišne stijenske mase u kombinaciji s drugim faktorima dovelo je do pokretanja predmetnog klizišta.

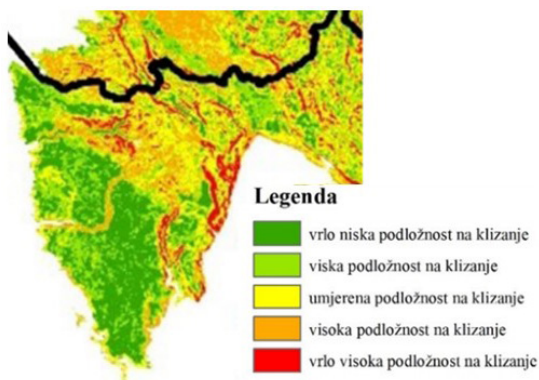
U ovom radu bit će prikazani rezultati geostatičkih analiza i analiza stanja naprezanja i deformacija kako bi se odabrala optimalna pilotska konstrukcija za sanaciju klizišta Štefanići. Analize će obuhvatiti dvije varijante pilotske konstrukcije s obzirom na promjer pilota te tri varijante s obzirom na osni razmak pilota. Analizirat će se utjecaj varijacije parametara pilota na stabilnost kosine te stanje naprezanja i deformacija u konstrukciji. Na temelju rezultata navedenih analiza odabrat će se optimalna pilotska konstrukcija za koju će se izraditi projekt sanacije klizišta Štefanići u Istri.

2. 2. Klizišta u Istri

Istarski poluotok smješten je na sjevernom dijelu Jadranskog mora, a geološki se dijeli na tri područja: (i) Crvena Istra: jursko-kredno-paleogenska zaravan zapadne i južne Istre; (ii) Bijela Istra: kredno-

paleogenski karbonatno-klastični pojas na istočnoj i sjeveroistočnoj strani Istre; (iii) Siva Istra: paleogenski flišni dio srednje Istre [4].

Slika 1 prikazuje isječak ELSUS - Europske karte podložnosti na klizanje[5] istarskog poluotoka. Na karti je jasno vidljivo da je klizanjima najpodložniji središnji dio Istre, odnosno dio Sive Istre koju izgrađuju naslage flišne stijenske mase.



Slika 1. Isječak Istre s ELSUS - europske karte podložnosti na klizanje [5]

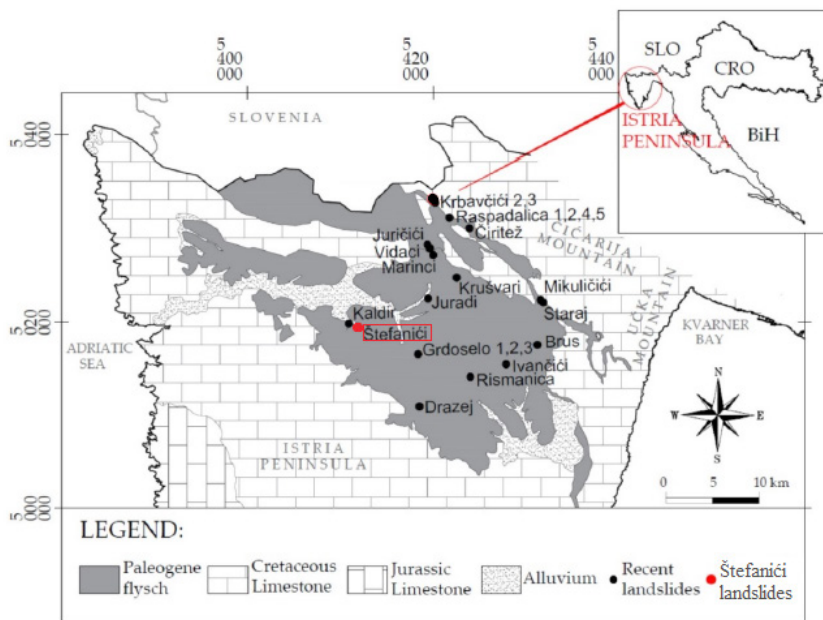
Na području Sive Istre zabilježeni su mnogobrojni slučajevi klizanja (Slika 2). U većini slučajeva radi se o rotacijskim klizištima, dok su druge vrste nestabilnosti rjeđe. Klizna ploha obično je formirana unutar sloja trošne stijenske mase, tj. između pokrivača i svježije stijenske podloge [6]. Nestabilnost je najčešće uzrokovana trošenjem površinskih flišnih naslaga pod utjecajem atmosferilija i nepovoljnih hidroloških uvjeta – infiltracija vode i podizanje razine podzemne vode [7]. Predmetno klizište Štefanići se nalazi na području Sive Istre, što jasno ukazuje da je jedan od uzroka njegovog nastanka upravo proces trošenja u flišnoj stijenskoj masi.

2.1. Flišna stijenska masa i njeno trošenje

Fliš predstavlja opisni termin za kompleks litološki heterogenih klastičnih sedimentnih stijena nastalih turbiditnim tokovima, odnosno podmorskim klizanjima sedimenata. Ti sedimenti su prethodno nastali kao posljedica brze erozije okolnog uzdignutog gorja. Za flišni kompleks karakteristična je sukcesivna izmjena sitnozrnastih (pelitnih) sedimenata kao što su prahoviti i glinoviti šejl, siltit i lapor te pješčenjak. Fliš može sadržavati i breče, konglomerate i vapnence [8]. Površinu flišne stijenske mase gotovo u potpunosti prekriva trošni stijenski materijal sastavljen od mješavine gline, praha, pijeska i odlomaka blokova pješčenjaka [9]. Razlog tomu je slaba vodopropusnost te podložnost stijenske mase trošenju i

eroziji. Još jedna od karakteristika flišne stijenske mase je i raščlanjenost zbog različite otpornosti njenih pojedinih dijelova.

S obzirom na značajke kao što su vrlo složen geološki sastav, niska čvrstoća, raspadanje, usitnjavanje, plastično ponašanje, kalavost i brzo trošenje tijekom izloženosti atmosferilijima [10], flišna stijenska masa pripada vrsti mekih stijena. Flišna stijenska masa može imati značajno različite fizičko-mehaničke značajke ovisno o litologiji i stupnju trošenja [11,12]. Sitnozrnaste stijene su, kao nekompetentni članovi flišnog stijenskog kompleksa, izrazito podložne trošenju pod djelovanjem atmosferilijских uvjeta te značajno mijenjaju fizičko-mehaničke značajke u relativno kratkom vremenskom intervalu trošenja. Međutim, pješčenjaci, vapnenci i konglomerati su, kao litološki kompetentni članovi fliša, značajno otporniji na utjecaje egzodinamičkih sila [13].

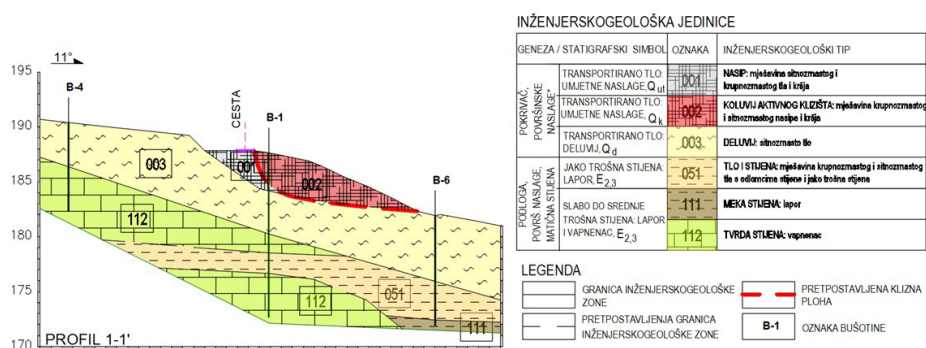


Slika 2. Klizišta na području Sive Istre (modificirano prema [14])

2.2. Klizište Štefanići

Klizište Štefanići nalazi se na lokalnoj cesti LC50059 u blizini mjesta Kaldir u Istri. Geotehnička istraživanja na lokaciji klizišta sastojala su se od detaljnog inženjerskeološkog kartiranja, istraživačkog bušenja, identifikacije i inženjerskog opisa jezgre bušotine te laboratorijskih ispitivanja uzoraka tla, a opisana su u Geotehničkom elaboratu [15].

Laboratorijska ispitivanja provedena su na reprezentativnim poremećenim uzorcima tla, a uključila su ispitivanje fizičkih svojstava te ispitivanje parametara čvrstoće tla izravnim smicanjem na tri uzorka deluvija. Inženjerskogeološkom determinacijom i interpretacijom obuhvaćeno je osam istraživačkih bušotina na temelju čega je utvrđena detaljna geološka građa na predmetnoj lokaciji. Istraživano područje podijeljeno je na šest inženjerskogeoloških jedinica. Matičnu stijenu čine vapnenac i lapor te naslage jako trošnog lapora, a pokrivačem se smatraju padinske i/ili koluvijalne naslage te nasip. Slika 3 prikazuje inženjerskogeološki profil 1-1' koji je poslužio kao podloga za definiranje modela za provedbu analiza.



Slika 3. Inženjerskogeološki profil 1-1' [15]



Slika 4. Oštećenje prometnice LC50059 uslijed klizanja [15]

Na klizištu je jasno definirana čeona pukotina i bokovi klizišta, zona usjedanja i zona akumulacije te nožica klizišta (Slika 4). Klizište je, s obzirom na distribuciju aktivnosti, progresivno jer se ploha sloma proširuje u smjeru kretanja. Materijal zahvaćen klizanjem je nasip ceste kojeg čine mješavina krupnozrnastog, sitnozrnastog tla i kršja. S obzirom na mehanizam pokreta, klizište se definira kao plitko rotacijsko klizanje u nasipu, čija duljina iznosi približno 19 m. Širina pokrenute mase je 16 m, a dubina pokrenute mase i dubina klizne plohe iznose približno 3,5 m.

Preduvjeti klizanja (faktori koji su kosinu doveli u stanje granične ravnoteže) su morfologija kosine; trošni materijali matične stijene, umjetne naslage i opterećenje kosine prometnicom. Važan preduvjet klizanja je povećani dotok vode iz hipsometrijski viših dijelova u zoni iznad klizišta. Naime, konfiguracija terena je takva da se oborinska voda slijevala s ceste iznad klizišta i natapala površinske umjetne naslage te se zbog loše prirodne drenaže površinska voda intenzivnije drenirala u podzemlje u zoni klizišta.

3. Optimiziranje pilotske konstrukcije za sanaciju klizišta Štefanići

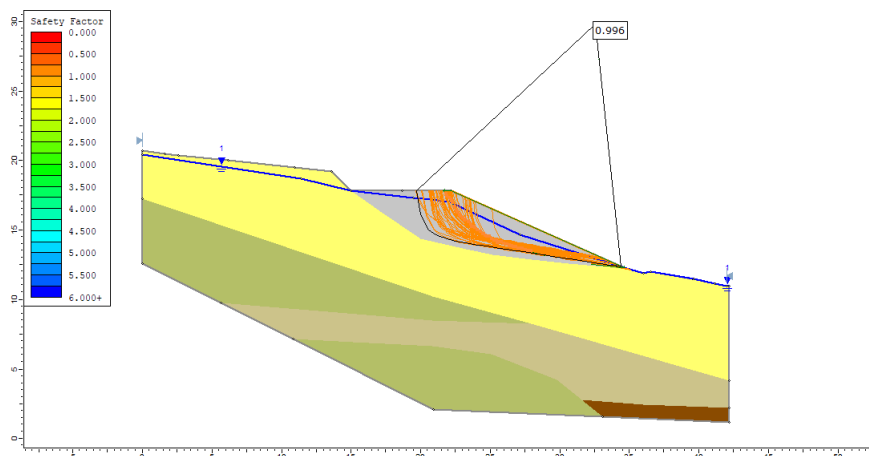
U ovom članku, sanacija klizišta Štefanići u Istri podrazumijeva izvedbu pilotske konstrukcije u kombinaciji sa sniženjem razine podzemne vode. Optimiziranje pilotske konstrukcije proizlazi iz usporedbe tri varijante pilotske konstrukcije s obzirom na osni razmak (sekantni, tangentni i razmaknuti), za dvije varijante promjera pilota. Varirani promjeri pilota su $D = 50$ cm i $D = 100$ cm, a osni razmaci iznosili su 80 % ($S = 0.8D$), 100 % ($S = D$) i 200 % ($S = 2D$) promjera pilota.

Geostatičke analize te analize stanja naprezanja i deformacija provedene su za ukupno šest varijanti rješenja pilotskih konstrukcija u programskom paketu *Rocscience* tvrtke Rocscience Inc. sa sjedištem u Torontu u Kanadi: programom *Slide 2018* za povratne analize stabilnosti kosine i geostatičke analize stabilnosti sanirane kosine te programom *RS2 10.0.* za analize stanja naprezanja i deformacija sanirane kosine.

3.1. Povratne analize stabilnosti kosine

Cilj povratnih analiza stabilnosti kosine je utvrditi uvjete na lokaciji u trenutku klizanja, odnosno Mohr-Coulombove parametre čvrstoće materijala (Tablica 1) i razinu podzemne vode. Variranjem razine podzemne vode i parametara čvrstoće materijala u modelu, povratnom analizom dobivena vrijednost faktora sigurnosti iznosi 0,996 (Slika 5). Dobivena klizna ploha približno odgovara položaju klizne plohe definirane u inženjerskogeološkom profilu 1-1' (Slika 3). Karakteristike tla i stijene korištene u analizama definirane su na temelju rezultata laboratorijskih

ispitivanja danih u Goetehničkom elaboratu [15], kao i usporedivog iskustva o parametrima materijala u pokrivaču te stijenske mase u podlozi na sličnim materijalima na susjednim lokacijama [16]. Programom *RocData* iz istoimenog programskog paketa *Rocscience* dobiveni su Mohr-Coulombovi parametri čvrstoće lapora i vapnenca.



Slika 5. Kriticna klizna ploha dobivena povratnom analizom

Tablica 1. Karakteristike tla i stijene korištene u analizama

Naziv materijala	Nasip	Deluvij	Tlo i stijena	Lapor	Vapnenac
Zapremninska težina, γ (kN/m ³)*	19	18,5	20	22	25
Poissonov koeficijent, ν	0,3	0,3	0,3	0,33	0,3
Young-ov modul elastičnosti, E (kPa)	30000	50000	100000	396925	1,89*10 ⁶
Kriterij čvrstoće	Mohr-Coulomb				
Kut unutarnjeg trenja, ϕ (°)*	24	22,5	30	23	23,58
Kohezija, c (kPa)*	0	24	20	684	2350,5

* zapremninska težina i Mohr-Coulombovi parametri čvrstoće dobiveni povratnim analizama

3.2. Geostatičke analize stabilnosti sanirane kosine

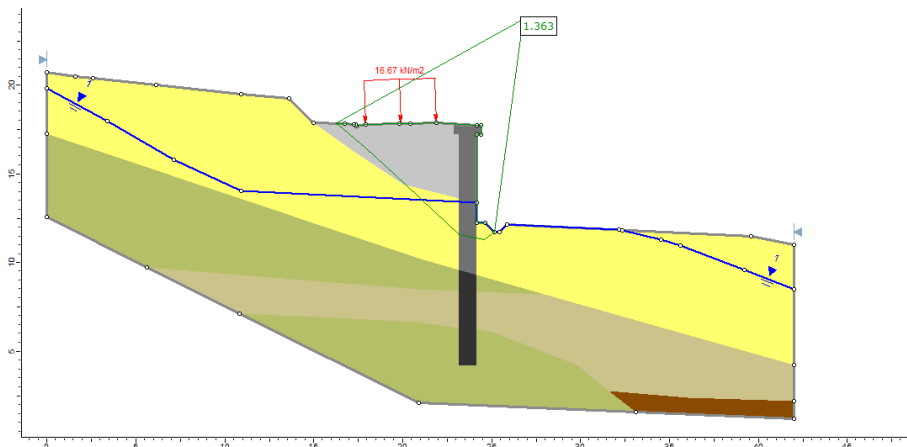
Mjere sanacije podrazumijevaju izvedbu pilotske konstrukcije uz promjenu geometrije kosine iskopom u fazama te sniženje razine podzemne vode. Geostatičke analize stabilnosti provedene su za posljednju fazu sanacije klizišta – dvije ovisno o promjeru pilota i dvije ovisno o osnom razmaku između pilota. Analize su provedene prema projektnom pristupu 3 norme Eurocode 7 na temelju karakterističnih značajki tla i stijene usvojenih povratnom analizom (Tablica 1). No, uz parametre tla i stijene, potrebno je definirati i parametre pilotske konstrukcije koji se razlikuju s obzirom na osni razmak pilota.

Pilot duljine 12,5 m definiran je Mohr-Coulombovim parametrima čvrstoće armiranog betona klase C 30/37 [17] prilikom proračuna stabilnosti sekantne i tangentne pilotske stijene. Međutim, kod pilotske stijene s razmaknutim pilotima potrebno je uzeti u obzir i tlo koje se nalazi između pilota. Stoga je pilotska stijena s razmaknutim pilotima modelirana na način da je 3D efekt razmaknutih pilota normaliziran za ravninsko stanje. Parametri čvrstoće pilota korišteni u analizama prikazani su Tablicom 2.

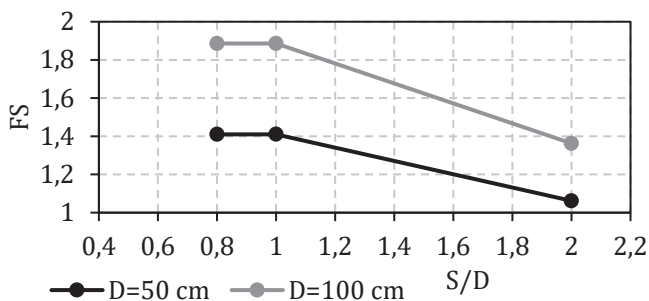
Tablica 2. Karakteristike pilota u pilotskoj stijeni

Vrsta pilota	Sekantni i tangentni pilot	Razmaknuti pilot	
		u pokrivaču	u stijeni
Zapremninska težina, γ (kN/m ³)	25	19	21
Kriterij čvrstoće	Mohr-Coulomb		
Kut unutarnjeg trenja, ϕ (°)	9	16	17
Kohezija, c (kPa)	608,28	245	832

Primjer rezultata geostatičke analize sanirane kosine pilotskom stijenom s razmaknutim pilotima promjera $D = 100$ cm s faktorom sigurnosti $FS = 1,363$ dan je na Slici 6. Usporedba faktora sigurnosti za sve vrste pilotske konstrukcije dana je dijagramom na Slici 7. Kako je u analizama stabilnosti za sekantne i tangentne pilotske stijene korištena ista čvrstoća pilota, vrijednosti faktora sigurnosti su jednaka za obje varijante rješenja. No, uzimanjem u obzir utjecaj tla između pilota za pilotsku stijenu sa razmaknutim pilotima, faktor sigurnosti se smanjuje za oba promjera pilota. Faktor sigurnosti je zadovoljavajući za sve vrste pilotskih stijena, osim za pilotsku stijenu s razmaknutim pilotima promjera 50 cm.



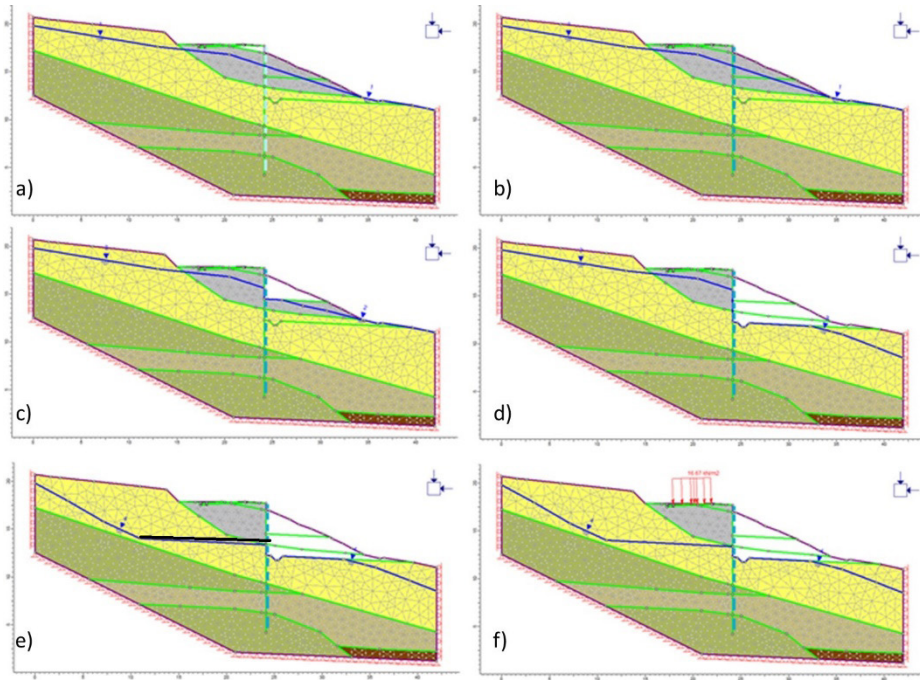
Slika 6. Faktor sigurnosti za pilotsku stijenu s razmaknutim pilotima promjera $D = 100$ cm



Slika 7. Utjecaj razmaka pilota S/D za pilot promjera $D = 50$ cm i $D = 100$ cm na vrijednost faktora sigurnosti sanirane kosine FS

3.3. Analize stanja naprezanja i deformacija sanirane kosine

Provođenje analiza naprezanja i deformacija korištenjem programa RS2 nudi uvid u sile, naprezanja i deformacije planirane mjere sanacije klizišta, a čiji su rezultati prikazani u nastavku. Program radi na principu metode konačnih elemenata, gdje je model diskretiziran mrežom 1004 6-čvrornih trokutastih elemenata uniformne veličine. Model sanacije izrađen je prema inženjerskogeološkom profilu 1-1' i značajkama tla i stijene iz Tablice 1, za šest faza: 1. faza – *in-situ* (Slika 8a), 2. faza – izvedba pilota (Slika 8b), 3. faza – iskop prve kampade ($H_1 = 2.2$ m) (Slika 8c), 4. faza – iskop druge kampade ($H_2 = 2.2$ m) (Slika 8d), 5. faza – ugradnja drena (Slika 8e), 6. faza – prometno opterećenje (Slika 8f).



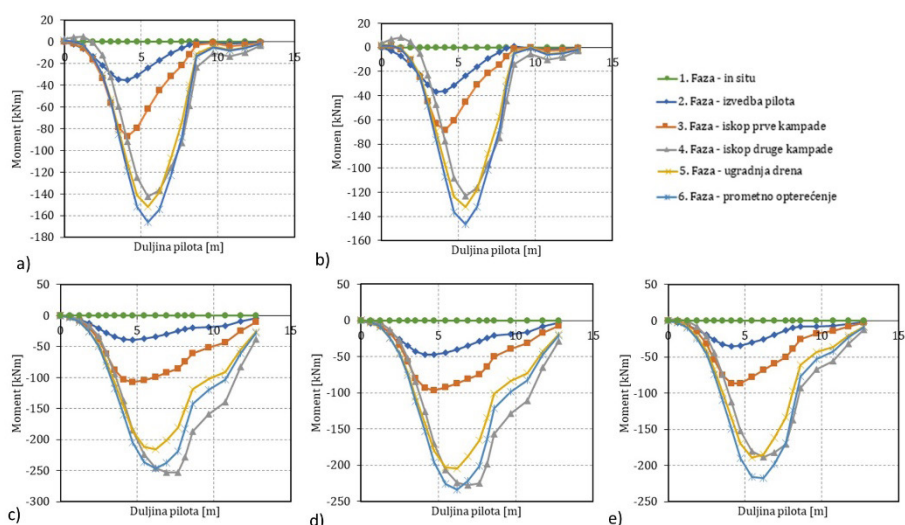
Slika 8. Faze sanacije klizišta Štefanići u programu RS2: a) *in-situ*; b) izvedbe pilota; c) iskop prve kampade; d) iskop druge kampade; e) ugradnja drena; f) prometno opterećenje

Pilot je u ovim analizama definiran kao linijski element – standardna Timoshenkova greda, definirana elastičnim karakteristikama i geometrijom. Elastične karakteristike definirane su Youngovim modulom elastičnosti i Poissonovim koeficijentom, a geometrija površinom poprečnog presjeka i momentom inercije. Redukcijom momenta inercije presjeka prilikom definiranja geometrije pilota smanjena je njegova krutost, čime je modeliran osni razmak između pilota. Tablica 3 prikazuje karakteristike pilota primijenjene u analizama stanja naprezanja i deformacija s obzirom na promjer i osni razmak pilota. Na temelju rezultata geostatičkih analiza stabilnosti zaključeno je da pilotska stijena s razmaknutim pilotima promjera 50 cm nema zadovoljavajuću vrijednost faktora sigurnosti te stoga navedena pilotska stijena nije uzeta u razmatranje prilikom analiza stanja naprezanja i deformacija.

U nastavku su za svih pet varijanti pilotskih stijena prikazani moment savijanja (Slika 9) i horizontalni pomak (Slika 10) po duljini pilota, za sve faze sanacije klizišta.

Tablica 3. Karakteristike pilota za provedbu analiza stanja naprezanja i deformacija

Promjer pilota, D (cm)	50		100		
Razmak pilota, S	$S = 0,8D$	$S = D$	$S = 0,8D$	$S = D$	$S = 2D$
Površina poprečnog presjeka pilota, A (m ²)	0,196	0,196	0,785	0,785	0,785
Reducirani moment inercije, I (m ⁴)	0,0076	0,0061	0,061	0,049	0,025
Modul elastičnosti, E (GPa)	33				
Poissonov koeficijent, ν	0,2				

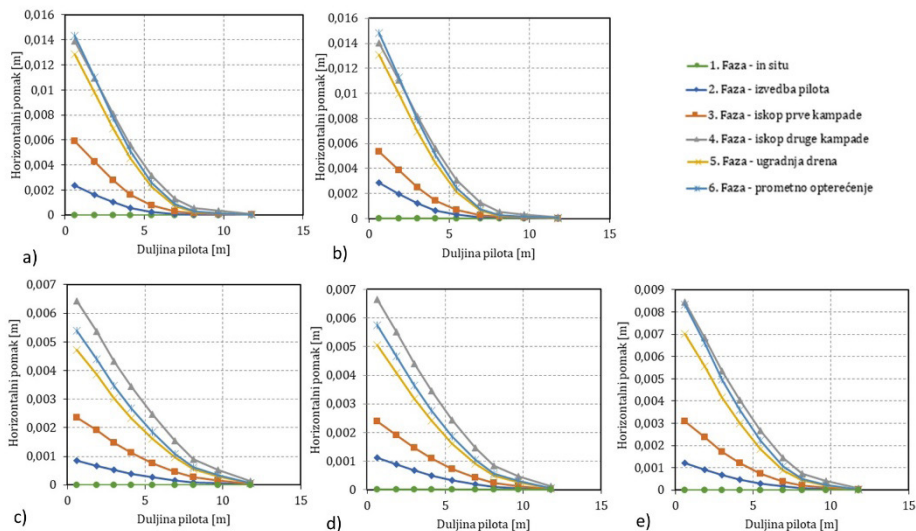


Slika 9. Dijagram momenata savijanja pilotske konstrukcije promjera pilota $D = 50$ cm za osni razmak: a) $S = 0,8D$; b) $S = D$ te promjera pilota $D = 100$ cm za osni razmak: c) $S = 0,8D$; d) $S = D$; e) $S = 2D$

Za pilotsku stijenu promjera pilota $D=50$ cm je iz dijagram momenata savijanja vidljivo je da se maksimalna vrijednost momenta savijanja javlja u posljednjoj fazi sanacije na dubini pilota od 5,5 m, odnosno na razini platoa. Vrijednost maksimalnog momenta za sekantnu pilotsku stijenu ($S = 0,8D$), prikazanog Slikom 9a, iznosi 166,12 kNm, dok je kod tangentne pilotske stijene na Slici 9b ta vrijednost nešto manja, 146,79 kNm. Najveća vrijednost pomaka zabilježena je u fazi prometnog opterećenja na vrhu pilotske stijene. Vrijednost maksimalnog horizontalnog pomaka za osni razmak $S=0,8D$ iznosi 14,3 mm (Slika 10a), a za $S=D$ pomak iznosi 14,8 mm (Slika 10b). Dijagram momenata savijanja bilježi veći skok

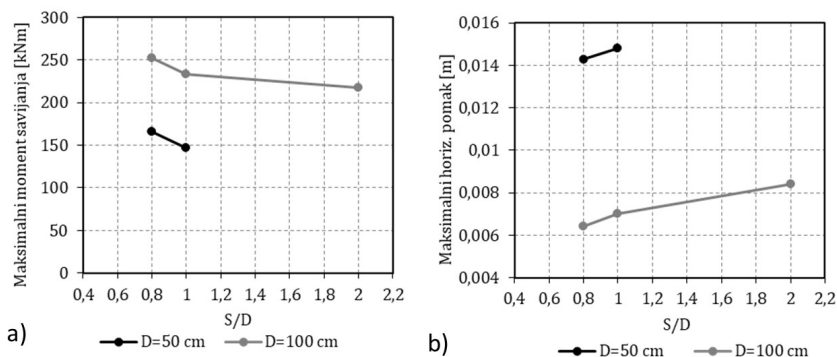
vrijednosti nakon druge faze iskopa, što se poklapa sa skokom vrijednosti kod horizontalnog pomaka.

Za pilotsku stijenu promjera pilota $D = 100$ cm su maksimalne vrijednosti momenata savijanja zabilježene na dubini pilota od 6,2 m. Najveći moment savijanja kod sekantne pilotske stijene ($S = 0,8D$) zabilježen je u fazi iskopa druge kampade i iznosi 252,83 kNm (Slika 9c). U preostala dvije varijante rješenja pilotske stijene maksimalni moment savijanja zabilježen je u posljednjoj fazi, odnosno fazi uvođenja prometnog opterećenja. Najveća vrijednost momenta savijanja za tangentnu pilotsku stijenu ($S = D$) iznosi 233,59 kNm (Slika 9d), dok kod pilotske stijene s razmaknutim pilotima ($S = 2D$), maksimalna vrijednost momenta savijanja iznosi 217,89 kNm (Slika 9e). Iz dijagrama horizontalnog pomaka za sve tri varijante rješenja pilotske stijene vidljivo je da je najveći pomak zabilježen na vrhu pilota u fazi iskopa druge kampade. U slučaju sekantne pilotske stijene, maksimalni horizontalni pomak iznosi 6,4 mm (Slika 10c). Razvoj horizontalnih pomaka po fazama kod tangentne pilotske stijene (Slika 10d) jednak je kao i u slučaju $S = 0,8D$, dok su vrijednosti nešto veće. Najveća vrijednost pomaka iznosi 6,7 mm u fazi iskopa druge kampade. Maksimalna vrijednost horizontalnih pomaka kod pilotske stijene s razmaknutim pilotima iznosi 8,4 mm (Slika 10e). Također, kao i kod pilotske stijene promjera pilota $D = 50$ cm, zabilježen je nagli rast pomaka između dviju faza iskopa za sve tri varijante rješenja pilotske stijene.



Slika 10. Dijagram horizontalnih pomaka pilotske konstrukcije promjera pilota $D = 50$ cm za osni razmak: a) $S = 0,8D$; b) $S = D$ te promjera pilota $D = 100$ cm za osni razmak: c) $S = 0,8D$; d) $S = D$; e) $S = 2D$

Dijagramima na Slici 11 prikazane su maksimalne vrijednosti momenta savijanja i horizontalnog pomaka za oba promjera pilota i različite osne razmaka pilota. Vidljivo je da se kod oba promjera pilota horizontalni pomak povećava s povećanjem razmaka pilota. Vrijednosti momenta savijanja se smanjuju povećanjem razmaka pilota za oba promjera pilota.



Slika 11. Utjecaj razmaka pilota S/D na pilot promjera $D = 50$ cm i $D = 100$ cm na vrijednost: a) maksimalnog momenta savijanja, b) maksimalnog horizontalnog pomaka

3.4. Odabir optimalne konstrukcije za sanaciju klizišta Štefanići

Na temelju rezultata analiza za optimalnu pilotsku konstrukciju odabrana je pilotska konstrukcija sa razmaknutim pilotima promjera $D=100$ cm. Razlog odabira ove pilotske konstrukcije proizlazi iz zadovoljavanja stabilnosti kosine u pogledu zadovoljavajućeg faktora sigurnosti i maksimalnog horizontalnog pomaka, bez dobivanja rezultata koji upućuju na predimezionirane elemente konstrukcije, poput jako velikog faktora sigurnosti ili jako malih horizontalnih pomaka. Također, pilotska konstrukcija s razmaknutim pilotima je, u odnosu na sekantnu i tangentnu pilotsku stijenu, primjenjivija u praksi zbog jednostavnosti i ekonomičnosti. Optimalna pilotska konstrukcija dimenzionirana je na maksimalni moment savijanja (217,89 kNm) i poprečnu silu (70,05 kN) dobivenih iz analiza stanja naprezanja i deformacija.

U sklopu sanacije klizišta Štefanići na lokalnoj cesti LC50059 u Istri predviđeni su radovi u fazama koji podrazumijevaju osiguranje stabilnosti prometnice i sniženje razine podzemne vode u svrhu povećanja globalne stabilnosti kosine. Osiguranje stabilnosti klizišta podrazumijeva projektiranje i izvedbu pilotske konstrukcije od armiranobetonskih bušenih pilota promjera 100 cm i prosječne duljine 12,5 m, na međusobnom osnom

razmaku od 2,0 m, povezanih u jedinstvenu cjelinu naglavnom gredom poprečnog presjeka 1,5 x 1,0 m i duljine 32 m. Armiranobetonski bušeni piloti izvode se minimalno 2,0 m unutar stijenske podloge. Minimalni razred tlačne čvrstoće betona za izvedbu pilota i naglavne grede jest C 30/37. Izvedba pilota predviđena je u prvoj fazi sanacije. Slijedeće dvije faze podrazumijevaju iskop materijala ispred pilotske stijene u dva koraka u visini od 2,2 m. Kako bi se osigurala stabilnost tla, prostor između pilota torkretira se mlaznim betonom debljine 10 cm u dva sloja između kojih se postavlja armaturna mreža Q-131. U posljednjoj fazi predviđeno je snižavanje razine podzemne vode izvedbom samobušivih drenova između pojedinih pilota, na međusobnom razmaku od 4,0 m. Drenovi su duljine 12,5 m, nagiba 5 %, a izvode se 1,1 m iznad uređenog platoa. Sva voda prikupljena iz drenova skuplja se u betonske kanalice duž pilotske stijene. Sanacijom klizišta na lokalnoj cesti LC50059 predviđa se i rekonstrukcija dijela prometnice, koja obuhvaća uklanjanje postojeće kolničke konstrukcije te izvedbu nove kolničke konstrukcije uz izvedbu drenažnog sustava odvodnje sa prometnice. Tijekom i nakon sanacije klizišta predviđena je provedba monitoringa koji podrazumijeva ugradnju 3 inklinometra i 4 pijezometra te je za svaku mjernu opremu potrebno definirati njihov raspored i broj mjerenja.

4. Zaključak

Predmetno klizište Štefanići rezultat je kombinacije nekoliko uzročnika. Konfiguracija terena te trošnost matične stijene jedni su od preduvjeta nastanka istog. Uz navedene preduvjete, povećani dotok vode sa viših dijelova terena uzrokovao je pokretanje klizne mase u dijelu nasipa prometnice. Na temelju definiranih uzroka, kao mjera sanacije klizišta u ovom radu odabrana je pilotska konstrukcija u kombinaciji sa sniženjem razine podzemne vode.

Odabir optimalne pilotske konstrukcije je rezultat provedenih geostatičkih analiza te analiza stanja naprezanja i deformacija sanirane kosine. Analize su provedene na dvije varijante pilotske stijene s obzirom na promjer pilota (50 cm i 100 cm) te tri varijante s obzirom na osni razmak pilota (sekantni, tangenti i razmaknuti). Ukupno je analizirano šest varijanti rješenja pilotske konstrukcije. Odabranu optimalnu pilotsku konstrukciju čini pilotska stijena sa razmaknutim pilotima promjera 100 cm.

Analiziranjem nekoliko varijanti rješenja pilotske konstrukcije s obzirom na razmak i promjer pilota dobiven je uvid u utjecaj varijacije navedenih parametara na sveukupnu stabilnost kosine. Rezultat geostatičkih analiza, odnosno analiza stabilnosti je vrijednost faktora

sigurnosti, dok se analizama stanja naprezanja i deformacija dobiva uvid u navedene veličine. Prilikom provođenja geostatičkih analiza utvrđeno je da sanacija koja podrazumijeva pilotsku konstrukciju s razmaknutim pilotima promjera 50 cm ne zadovoljava traženu stabilnost kosine. Isto tako, na temelju navedene analize može se zaključiti da se povećanjem osnog razmaka pilota smanjuje faktor sigurnosti, dok se povećanjem promjera pilota faktor sigurnosti povećava. Analizama stanja naprezanja i deformacija razmatran je utjecaj varijacije parametara na horizontalni pomak i moment savijanja u pilotu. Na temelju rezultata zaključeno je da povećanje razmaka pilota povećava horizontalni pomak, a smanjuje moment savijanja. Povećanje promjera pilota rezultira smanjenjem horizontalnog pomaka, ali povećanjem momenta savijanja u pilotu.

Iz svega navedenog, vidljivo je da varijacija parametara pilota značajno utječe na stabilnost kosine i ponašanje pilotske konstrukcije. Stoga je vrlo važno prilikom odabira i projektiranja iste obratiti pažnju upravo na njene parametre. Odabir optimalne i prihvatljive mjere sanacije klizišta uvelike ovisi o iskustvu i dostupnoj tehnologiji izvođenja, a sam rezultat je veliki utjecaj na okoliš i sigurnost ljudi.

Literatura

- [1] Cruden, D. M. (1991). Definition of a Landslide, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 43, 27–29
- [2] Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996). Landslide Type and Processes. *Landslides: Investigation and Mitigation*, A. K. Turner; R. L. Schuster (Eds.), Special Report 247, 36–75
- [3] Popescu, M.; International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, C. on L. R. (Chairman: M. P. (2001). A Suggested Method for Reporting Landslide Remedial Measures, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 60, No. 1, 69–74. doi:10.1007/s100640000084
- [4] Velić, I.; Tišljarić, J.; Matičec, D.; Vlahović, I. (1995). Opći prikaz geološke građe Istre, *Vodič Ekskurzije 1. Hrvatskog Geološkog Kongresa*, 5–30
- [5] Wilde, M.; Günther, A.; Reichenbach, P.; Malet, J.-P.; Hervás, J. (2018). Pan-European Landslide Susceptibility Mapping: ELSUS Version 2, *Journal of Maps*, Vol. 14, No. 2, 97–104. doi:10.1080/17445647.2018.1432511
- [6] Vivoda Prodan, M.; Mileusnić, M.; Mihalić Arbanas, S.; Arbanas, Ž. (2016). Influence of Weathering Processes on the Shear Strength of Siltstones from a Flysch Rock Mass along the North Croatian Adriatic Coast, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. in press
- [7] Dugonjić Jovančević, S.; Arbanas, Ž. (2012). Recent Landslides on the Istrian Peninsula, Croatia, *Natural Hazards*, Vol. 62, No. 3, 1323–1338. doi:10.1007/s11069-012-0150-4

- [8] Benac, Č. (2016). Rječnik Pojmova u Općoj i Primijenjenoj Geologiji, (M. Juračić, R. Buljan, & D. Pollak, Eds.), Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci
- [9] Benac, Č.; Arbanas, Ž.; Jurak, V.; Oštrić, M.; Ožanić, N. (2005). Complex Landslide in the Rječina Valley (Croatia): Origin and Sliding Mechanism, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 64, No. 4, 361–371
- [10] Kanji, M. A. (2014). Critical Issues in Soft Rocks, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 6, No. 3, 186–195. doi:10.1016/j.jrmge.2014.04.002
- [11] Vivoda Prodan, M. (2016). The Influence of Weathering Process on Residual Shear Strength of Fine Grained Lithological Flysch Components (Dissertation) Dissertation, University of Rijeka
- [12] Prodan, M. V.; Arbanas, Z. (2022). Weathering Characteristics of Flysch Rock Mass in Istria Peninsula, Croatia, *Research Developments in Science and Technology* Vol. 8, 137–156. doi:10.9734/bpi/rdst/v8/16262D
- [13] Benac, Č. (1994). Inženjerskogeološke osobitosti obalnog pojasa i podmorja Riječkog zaljeva, Dissertation, University of Zagreb
- [14] Vivoda Prodan, M.; Arbanas, Ž. (2020). Analysis of the Possible Reactivation of the Krbavčići Landslide in Northern Istria, Croatia, *Geosciences* . doi:10.3390/geosciences10080294
- [15] Geolog savjetovanje d.o.o. Geotehnički elaborat: Lokalna dionica Štefanići - klizište (2017)
- [16] Građevinski Fakultet u Rijeci. Projekt sanacije klizišta Štefanići u Istri (2017)
- [17] Ardiaca, D. H. (2009). Mohr-Coulomb Parameters for Modelling of Concrete Structures