

UTICAJ ZEMLJOTRESA NA VISOKE NASIPE

Dragan Lukić¹, Nenad Milosavljević², Elefterija Zlatanović³, Nazim Manić⁴

¹Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet u Subotici, email: drlukic.lukic@gmail.com

²Exting d.o.o., Beograd, email: nenmil@yahoo.com

³Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, email: elefterija2006@yahoo.com

⁴Državni univerzitet Novi Pazar, email: nazimmanic@hotmail.com

Rezime: *Intenzivna izgradnja autoputeva, sa primenom većih radijusa, uslovila je izgradnju većeg broja visokih nasipa. Visoki nasipi mogu prouzrokovati više problema vezanih za stabilnost kosina, sleganje, nosivost tla i dr. Jedan od značajnijih problema koji se mogu javiti kod ovih nasipa su oštećenja izazvana dejstvom zemljotresa. U okviru ovog rada, pored analize uticaja zemljotresa na nasipe, razmatra se stabilnost kosina nasipa pri uticajima zemljotresa. Analiziran je uticaj visine nasipa na vrednosti koeficijenata sigurnosti za stabilnost kosine nasipa.*

Ključne reči: *zemljotres, autoput, visoki nasip, kosine nasipa, koeficijent sigurnosti*

INFLUENCE OF EARTHQUAKES ON HIGH EMBANKMENTS

Dragan Lukic¹, Nenad Milosavljevic², Elefterija Zlatanovic³, Nazim Manic⁴

¹ University of Novi Sad, Faculty of civil Engineering Subotica, email: drlukic.lukic@gmail.com

² Exting d.o.o. Belgrade, email: nenmil@yahoo.com

³ University of Nis, Faculty of Civil Engineering and Architecture, email: elefterija2006@yahoo.com

⁴ State University of Novi Pazar, email: nazimmanic@hotmail.com

Abstract: *The intensive construction of highways, with the use of larger radii, has led to the construction of a number of high embankments. High embankments can cause many problems related to slope stability, settlement, bearing capacity of soil, etc. One of the major problems that can occur in case of high embankments is the damage caused by an earthquake excitation. In addition to analyzing the influence of earthquakes upon embankments, the paper deals with the stability of embankment slopes considering the effects of earthquakes, whereby the influence of the height of the embankment on the values of the safety factors for the stability of the slope of the embankment was analyzed.*

Keywords: *earthquake, highway, high embankment, slopes of embankments, safety factor*

1. UVOD

Savremene saobraćajnice, pored aspekta ekonomičnosti, treba da zadovolje i uslove sigurne i udobne vožnje. Sigurna i udobna vožnja, sa aspekta projektovanja saobraćajnica, može se ostvariti samo ako projektni elementi saobraćajnice ispunjavaju uslove stabilnosti i bezbednosti. Nasipi, kao elementi saobraćajnica, se mogu svrstati u najnebezbednije elemente. Na stabilnost nasipa utiču mnogi faktori: temeljno tlo nasipa, materijal od koga se gradi nasip, visina podzemne vode, blizina raseda i dr. Pri normalnim vremenskim uslovima stabilnost nasipa se analizira pri raznim faktorima izazvanim dejstvom čoveka i dejstvom vremenskih prilika-nepriklada, smrzavanje, kiša i slično. Saobraćajnica je linijski objekat u tesnoj interakciji sa terenom. Sam teren koji je zastupljen na prostoru zauzetom saobraćajnicom je definisan pri njenoj izgradnji. Teren je izložen promenama usled uticaja inženjersko - geoloških procesa koji dovode do različitog tipa inženjersko - geoloških pojava. Zato, kada govorimo o uticaju zemljotresa na saobraćajnice, potrebno je uvažiti i njegov uticaj na teren na kome je izgrađena saobraćajnica. Posebnu pažnju treba posvetiti stabilnosti nasipa pri dejstvu zemljotresa. Pri tome na prvom mestu uzeti u obzir vrednost magnitude zemljotresa i udaljenosti nasipa od raseda.

Uticaj seizmičkog dejstva na nasip puta može se razmatrati sa nekoliko aspekata: uticaja na podtlo, uticaja na kosine nasipa i mogućnosti pojave likvefakcije. Na podtlo puta dominantan uticaj je u podužnom pravcu, tj. kada se pravci rasprostiranja talasa i puta poklapaju (ili sa malim uglom odstupanja). U tom slučaju može doći do pojave deformacija u posteljici koje se prenose na gornji stroj saobraćajnice. Imajući napred navedeno u vidu, projektanti budućih saobraćajnica, posebno autoputeva, u obavezi su da, pored standardnog projektnog zadatka, izvrše i ocenu osetljivosti donjeg stroja na seizmička dejstva. Ovo je od vitalnog uticaja na funkcionisanje putne mreže posle dejstva zemljotresa i obezbeđenje redukovano saobraćaja za normalizaciju života ljudi.

¹Dragan Lukić: drlukic.lukic@gmail.com

Drugi značajan uticaj zemljotresa je na stabilnost kosina nasipa. Pri tome treba naglasiti da je visina nasipa, pored ostalih karakteristika nasipa, dominantna za ovaj uticaj. Imajući to u vidu, pri projektovanju treba izbegavati visoke nasipe.

Nije retka pojava da se kod saobraćajnica, posebno značajnijih puteva, trasa projektuje u blizini rečnih korita, često i uz samo korito, gde je zbog geotehničkih karakteristika tla moguća pojava likvefakcije usled dejstva zemljotresa. Pri istraživanju (izradi elaborata) i projektovanju ovo treba imati u vidu.

U okviru ovog rada prikazan je uticaj zemljotresa na stabilnost kosine nasipa puta, kao i pojava likvefakcije usled dejstva zemljotresa. Pored toga, u radu je analiziran uticaj visine nasipa na stabilnost kosine nasipa pri dejstvu zemljotresa.

2. UTICAJ ZEMLJOTRESA NA NASIPE PUTEVA

Nasipi koji su stabilni pod dejstvom statičkih sila, pod dejstvom dinamičkih sila mogu izgubiti svoju stabilnost. Bilo da se radi o stabilnosti kosina pod dejstvom statičkih ili dinamičkih sila kao što je zemljotres, stanje se može analizirati zajedno sa osobinama tla. Ciklična smičuća naprezanja nastala kao rezultat dejstva zemljotresa, dovode do deformacija tla, promene fizičkih i mehaničkih karakteristika tla i može da dođe do rušenja nasipa koji je pod uticajem statičkih sila stabilan. Tokom dejstva zemljotresa nastaju ciklična smičuća naprezanja čiji je rezultat gubitak otpornosti tla usled naglog povećanja pornog pritiska vode. U prvom delu ovog poglavlja prikazuje se uticaj zemljotresa na stabilnost kosina nasipa, sa praktičnim primerima analize kosina dva nasipa. Drugi deo ovog poglavlja posvećen je likvefakciji tla usled dejstva zemljotresa.

2.1. Stabilnost kosine nasipa usled dejstva zemljotresa

Ponašanje kosina i potencijalno rušenje kosina dejstvom zemljotresa zavisi od magnitude zemljotresa i položaja njegovog epicentra. Najvažniji parametri za stabilnost kosina su ugao nagiba kosina, maksimalno ubrzanje tla, dominantan period oscilovanja tla. Usled cikličnih smičućih napona dolazi do smanjenja smičućih otpora i to je razlog zbog čega kod proračuna stabilnosti kosina zemljotres treba uzeti u obzir. Gubitak smičućih otpora može biti iz dva razloga: prvi je da usled cikličnih opterećenja dolazi do povećanja pornog pritiska vode i smanjenja efektivnog napona, drugi je da usled cikličnih napona dolazi do promene strukture i zamora materijala. Smičući napon konsolidovanog tla može se dati u obliku:

$$\tau' = (\sigma - u) \times \tan \phi' + c' \quad (1)$$

gde je:

τ' - efektivni smičući napon,

σ - ukupni normalni napon,

u - porni pritisak vode,

ϕ' - ugao unutrašnjeg trenja i

c' - efektivna kohezija.

Smanjenje smičućih otpora matematički se može objasniti i kao smanjenje ugla unutrašnjeg trenja. Ciklični smičući naponi izazvani zemljotresom, u slučaju zasićenog tla, zbog nedreniranja porne vode do kraja opterećenja, dovode do povećanja pornog pritiska vode. Veličina povećanja pornog pritiska vode zavisi od karakteristika podtla, geometrije kosine i od karakteristika materijala nasipa.

Tokom dejstva zemljotresa, dolazi do određene promene pornog pritiska vode (u) usled dodatnog pornog pritiska od dejstva dinamičkog opterećenja. Ova vrednost linearno se povećava kao odnos cikličnih smičućih napona i statičkih smičućih napona (τ_c / τ_{fs}). Takođe, promena pornog pritiska zavisi od povratnog perioda zemljotresa (N) i data je na osnovu izraza (Olgun i Acar, 2009):

$$u = (0.915 \log N + 0.108) \times (\tau_c / \tau_{fs}) \quad (2)$$

Smičući naponi koji nastaju tokom dejstva zemljotresa na kosinu visine H su proporcionalni ekstremnom ubrzanju zemljotresa (a_p), pri čemu je odnos cikličnih smičućih napona i statičkih smičućih napona (τ_c / τ_{fs}) dat na sledeći način (Olgun i Acar, 2009):

$$(\tau_c / \tau_{fs}) = 0.65 \times a_p \times (1 - 0.0075 \times H) \times \text{ctg} \varphi \quad (3)$$

Na osnovu jednačina (2) i (3) sledi:

$$u_{\text{dodatno}} = (0.915 \log N + 0.108) \times 0.65 \times a_p \times (1 - 0.0075 \times H) \times \text{ctg} \varphi \quad (4)$$

Na osnovu prethodnih jednačina dobija se:

$$u_{\text{konacno}} = u_{\text{pocetno}} + u_{\text{dodatno}} \quad (5)$$

gde je:

u_{pocetno} ($\gamma_w \cdot h_w$) – porni pritisak pre zemljotresa (kN/m^2);

u_{dodatno} – dodatni porni pritisak nastao dejstvom zemljotresa (kN/m^2);

a_p – ubrzanje zemljotresa (m/s^2);

N – povratni period zemljotresa;

γ_w – zapreminska težina vode (kN/m^3);

h_w – visina podzemne vode (m).

Vrednosti ubrzanja u zavisnosti od rastojanja kosine od raseda i magnitude mogu se iskazati u obliku:

$$a_p = 0,0159 \cdot e^{0,868M} (R + 0,0606 \times e^{0,7M})^{-1,09} \quad (6)$$

gde je:

M – magnituda zemljotresa;

R – rastojanje nasipa od raseda (km).

Na osnovu navedenih relacija može se izračunati povratni period zemljotresa (N) u zavisnosti od magnitude (M) (Tabela1).

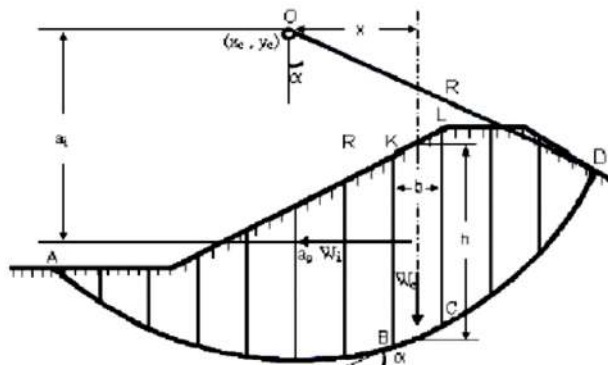
Tabela 1. Odnos magnitude (M) i povratnog perioda (N) zemljotresa.

Magnituda (M)	Povratni period zemljotresa (N)
7.0	10
7.5	20
8.0	30

Izvor: (Olgun i Acar, 2009; Manić, 2013)

U toku dejstva zemljotresa, u zavisnosti od amplitude, smanjuje se krutost tla. Da bi se korektno izvršilo modeliranje smanjenja smičućih napona posle cikličnih opterećenja tokom zemljotresa, fiktivni ugao unutrašnjeg trenja posle zemljotresa može se izračunati na osnovu ugla unutrašnjeg trenja pre zemljotresa, magnitude zemljotresa i rastojanja kosine od raseda.

Koeficijent sigurnosti se može dobiti na osnovu relacije (7) (Bišopova uprošćena metoda (Slika 1)):



Slika 1. Pojednostavljena metoda za analizu stabilnosti

Izvor (Olgun i Acar, 2009).

$$F_s = \frac{\sum (c_i' b_i + (w_i - u_{\text{konacno}}) b_i) \tan(\varphi_i')}{\sum w_i \sin \alpha_i + \sum a_p w_i} \quad (7)$$

gde je:

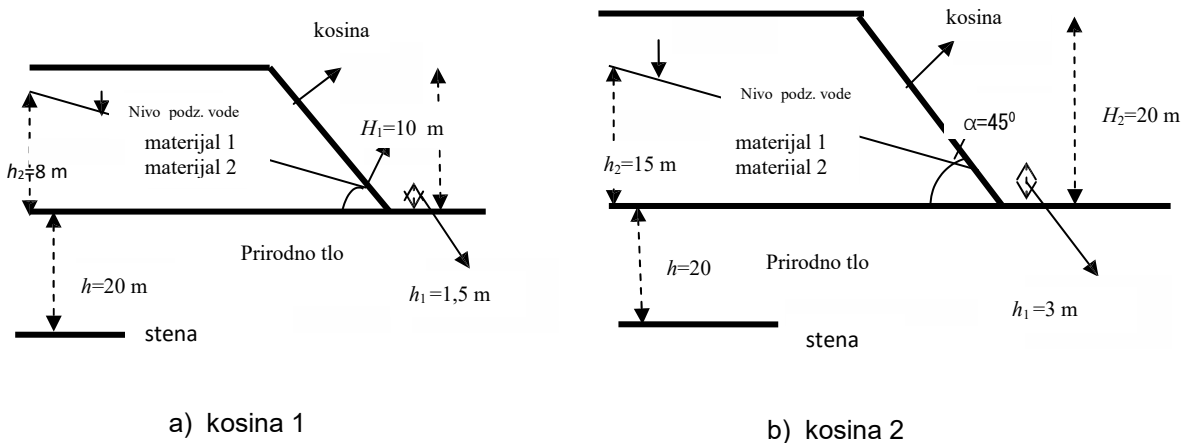
- b_i – širina lamele (m);
- w_i – težina i-te lamele (kN);
- $u_{konacno}$ – konačni porni pritisak (kN/m²);
- φ_i' – ugao unutrašnjeg trenja (°);
- c_i' – efektivna kohezija (kN/m²);
- α_i – ugao centra klizne ravni i težišta lamele;
- a_p – ubrzanje zemljotresa (m/s²).

Za izračunavanje F_s u relaciji (7) potreban je iteracijski postupak, jer je izraz implicitna jednačina za faktor sigurnosti usled zavisnosti m_{α_i} od F_s ($m_{\alpha_i} = \cos \alpha_i + (\tan \alpha_i \tan \varphi_i') / F_s$).

Kod manjih magnituda (M=6), naglo se smanjuje fiktivni ugao unutrašnjeg trenja. S porastom magnitude zemljotresa i smanjenjem rastojanja kosina od raseda, dolazi do manjeg smanjenja fiktivnog ugla unutrašnjeg trenja. Sa smanjenjem rastojanja kosine od raseda, povećava se porni pritisak vode. Posebno je ovo povećanje pornog pritiska vode izraženo na odstojanjima manjim od 20 km. Drugi važan faktor koji utiče na odnos pornog pritiska je magnituda zemljotresa – s povećanjem magnitude, povećava se i porni pritisak. S druge strane, kada je magnituda velika, a odstojanje raseda od kosine malo, porni pritisak vode naglo se povećava i neizbežno je klizanje kosine.

2.1.1. Primeri analize stabilnosti kosina

U radu se analizira stabilnost kosina dva nasipa visine $H_1 = 10$ m i $H_2 = 20$ m (Slika 2.).



Slika 2. Kosine nasipa izložene dejstvu zemljotresa
Izvor (Olgun and Acar, 2009).

Tabela 2. Karakteristike materijala u nasipima

Karakteristike materijala	Materijal 1	Materijal 2	Prirodno tlo
Zapreminska težina (γ) (kN/m ³)	19.0	20.0	19.5
Kohezija (c) (kN/m ²)	35.0	70.0	30.0
Ugao unutrašnjeg trenja (φ) (°)	30.0	5.0	25.0

Izvor: (Olgun i Acar, 2009; Manić, 2013)

Da bi se vrednovao uticaj zemljotresa i karakteristika tla na stabilnost kosina, dve različite kosine podvrgnute su delovanju statičkih i dinamičkih sila. Uglovi obe kosine su isti, ali su visine kosina različite. Kod obe kosine vršene su analize stabilnosti za po dve vrste tla različitih karakteristika. Karakteristike tla date su u Tabeli 2. Kod **statičke** analize razmatrane su 2 varijante za proračun.

a) Varijanta bez zemljotresa i bez podzemnih voda:

Kod kosine broj 1 za materijal 1 sračunat je faktor sigurnosti $F_s=3,25$, za materijal 2 $F_s=3,17$.
Kod kosine broj 2, za materijal 1 $F_s=1,57$, a za materijal 2 $F_s=1,06$.

Stabilnost kosina sa materijalom 1 (glinoviti materijali) veća je u odnosu na stabilnost kosina sa materijalom 2. Ova razlika stabilnosti je najočiglednija kod kosina sa većim visinama.

Kod obe kosine za iste karakteristike tla ako visinu sa 10 m povećamo na 20 metara za tlo broj 1 faktor sigurnosti sa $F_s=3,25$ se smanjuje na $F_s=1,57$, dok kod tla broj 2 ovo još uočljivije i F_s se smanjuje za $1/3$. Sa promenom visine kosine i kada karakteristike tla ostaju iste uočava se da F_s naglo opada.

b) Varijanta bez zemljotresa i sa visokim nivoom podzemnih voda:

U slučaju prisustva podzemne vode kod kosine broj 1, za materijal 1 $F_s=2,12$, a za materijal 2 $F_s=2,09$. Kod kosine broj 2, za materijal 1 $F_s=1,39$, a za materijal 2 $F_s=0,98$.

Na osnovu dobijenih faktora sigurnosti vidi se da i bez prisustva zemljotresa prisustvo vode kod kosina ima veliki uticaj na faktor sigurnosti, dolazi do smanjenja faktora sigurnosti. U ovom slučaju kod kosina dolazi do pojave pornog pritiska vode, a kao posledica se javlja smanjenje efektivnog napona i smanjenje smičućeg napona u tlu.

Kod **dinamičke** analize stabilnosti, kosina je analizirana za slučajeve zemljotresa sa magnitudom $M=6$, $M=7$ i $M=8$, a udaljenost kosine od raseda je različita: $R=5, 10, 20, 50$ i 100 km.

Dinamička analiza uticaja zemljotresa na kosine sa različitim udaljenostima raseda od kosina, različitim magnitudama zemljotresa i ekstremnim vrednostima ubrzanja sprovedena je prema jednačini (6), a rezultati su dati u Tabeli 3. Na promenu vrednosti ekstremnih ubrzanja utiče faktor udaljenosti raseda od kosine, što se i vidi iz rezultata proračuna. Na sličan način je urađen i proračun za različite magnitudo i različite udaljenosti kosina od raseda za kosinu 1 i kosinu 2, a odnos pritiska vode u porama je nezavistan od visine kosine.

Tabela 3. Ekstremne vrednosti ubrzanja (a_p)

Udaljenost kosine od rastera (km)	Magnitudo zemljotresa		
	M=6	M=7	M=8
R=100	0.0184	0.0420	0.0923
R=50	0.0375	0.0826	0.1702
R=20	0.0908	0.1822	0.3279
R=10	0.1631	0.2940	0.4654
R=5	0.2636	0.4178	0.5851

Izvor: (Manić, 2013)

Sa smanjenjem rastojanja kosine od raseda dolazi do smanjenja pornog pritiska vode. Posebno je ovo smanjenje pornog pritiska vode izraženo na odstojanjima manjim od 20 km. Drugi važan faktor koji utiče na odnos pornog pritiska vode je magnitudo zemljotresa, sa povećanjem magnitudo dolazi do povećanja pornog pritiska. Sa druge strane kada je magnitudo velika a odstojanje raseda od kosine malo dolazi do naglog povećanja pornog pritiska vode i neizbežno je klizanje kosine.

Tabela 4. Fiktivni ugao unutrašnjeg trenja (φ°) posle cikličnog opterećenja

Udaljenost raseda od kosine (km)	Kosina 1						Kosina 2					
	Magnitudo											
	Materijal 1			Materijal 2			Materijal 1			Materijal 2		
	M=6	M=7	M=8	M=6	M=7	M=8	M=6	M=7	M=8	M=6	M=7	M=8
R=200	30	30	30	5	5	5	30	30	30	5	5	5
R=100	30	30	30	5	5	5	30	30	29,9	5	5	5
R=50	30	30	30	5	5	5	30	29,9	29,4	5	5	5
R=20	30	30	30	5	5	5	30	29,6	28,5	5	5	4,8
R=10	30	30	29	5	5	4,5	29,9	29,2	25	4,9	4,8	4
R=5	30	29	27	5	4,5	4	29,8	27,5	20	4,8	4	3

Izvor: (Manić, 2013)

Jedan od uzroka smanjenja smičućih napona tla tokom zemljotresa je i promena ugla unutrašnjeg trenja. Tokom i posle dinamičkog opterećenja kosina dolazi do promena ugla unutrašnjeg trenja, a vezane su za magnitude i udaljenosti kosine od raseda (Tabela 4). Kod magnituda manjih vrednosti ($M=6$) nema većih promena ugla unutrašnjeg trenja, ali sa povećanjem magnitude ugao unutrašnjeg trenja se naglo smanjuje. Ovo je posebno izraženo kad se kosina nalazi u blizini raseda. Primer: kod kosine 2 za $M=8$ i $R=5$ km ugao unutrašnjeg trenja sa $\varphi=30.0^\circ$ se smanjuje na $\varphi=20.0^\circ$. Promena ugla unutrašnjeg trenja je veoma važna za stabilnost kosina. Kod kosine 1 čija je visina manja, pod istim uslovima, ugao unutrašnjeg trenja se sa $\varphi=30.0^\circ$ smanjuje na $\varphi=27.0^\circ$, što znači da visina kosine bitno utiče na promenu ugla unutrašnjeg trenja. U analizi stabilnosti kosina faktor sigurnosti je proračunat na 3 različita načina. Posebno je analizirana situacija postojanja i nepostojanja podzemnih voda. U statičkoj analizi je za faktor sigurnosti uzet kriterijum da je $F_s \geq 1.5$, a kod dinamičke analize $F_s \geq 1.1$:

a) Kosina 1 + Materijal 1:

Ova kosina je pod statičkim opterećenjem bila stabilna, u slučaju zemljotresa sa magnitudama $M=7$ ili $M=8$ uz prisustvo podzemnih voda postoji mogućnost rušenja kosine. Ipak kod iste kosine za $M=8$, $R=5$ km bez prisustva podzemnih voda kosina je stabilna. Ovo je pokazatelj da u slučaju zemljotresa podzemne vode imaju veliki uticaj. Za $R>20$ km i u slučaju prisustva podzemnih voda kosina je stabilna.

b) Kosina 2 + Materijal 1:

Uopšteno za rastojanja do $R=10$ km faktor sigurnosti je ispod kritične vrednosti. Za $M=8$, $R=5$ km i uz prisustvo podzemnih voda faktor sigurnosti pada do 0,54. U poređenju sa kosinom broj 1, faktori sigurnosti za iste uslove kod ove kosine su $2/3$ u odnosu na vrednosti faktora za kosinu broj 1. Ovo je dobar pokazatelj koliko visina nasipa utiče na stabilnost kosina.

c) Kosina 2 + Materijal 2:

Kod glinovitih materijala svi faktori sigurnosti su ispod kritične granice ($F_s < 1.1$).

Ovde se vidi da pored visine kosine i materijal ima veliki uticaj na stabilnost kosine. Posebno kod visokih kosina od glinovitih materijala, kod cikličnih napona uz prisustvo podzemnih voda, porni pritisak vode je dovoljan da naruši stabilnost kosine.

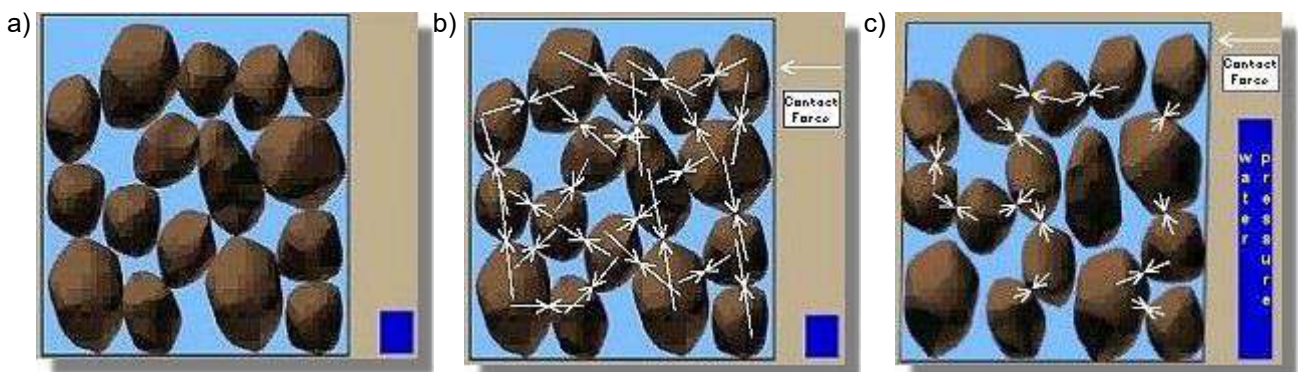
2.2. Pojava likvefakcije usled dejstva zemljotresa

Seizmički talasi koji prolaze kroz zasićena, vlažna ili peščana tla mogu povećati pritisak vode u porama. Ovo povećanje može premašiti čvrstoću tla, uzrokujući likvefakciju. Likvefakcija se može desiti pod uticajem zemljotresa ili drugog dinamičkog opterećenja u slučaju visokog nivoa zasićenosti tla. Glavni faktori koji utiču na likvefakcioni potencijal tla su nizak indeks zbijenosti i visok stepen zasićenja vodom.

Kod sitnozrnih materijala porni pritisak vode se ne može brzo absorbovati i ukupni napon ostaje isti, ali se smanjuje efektivni napon. Može se konstatovati da jedinične deformacije nastale usled cikličnih smičućih napona kod tla mogu da izazovu pojavu likvefakcije i stoga treba definisati kakva smanjenja to može izazvati kod smičućih napona.

Peščano i muljevito tlo su najviše podložni procesu likvefakcije. S obzirom na to da se ovi materijali sastoje od mešavine čvrstih čestica i pornih šupljina u slučaju dejstva zemljotresa porni prostor se ispunjava vodom i doživljava kolaps (peskovita tla), dok su u muljevitom tlu pore već ispunjene vodom. Na taj način tlo poprima karakteristike tečnosti. Ovo dovodi do povećanja pritiska vode između čvrstih čestica tla tako da se one mogu slobodno kretati u vodenoj matrici (Grujić i dr., 2016).

Sa povećanjem pornog pritiska smanjuju se efektivni naponi (za porni pritisak veličine totalnih napona efektivni naponi su jednaki nuli), čime se smanjuju kontakti između zrna što dovodi do likvefakcije (Slika 3).



Slika 3. Modeli likvefakcije nevezanog tla
Izvor (<http://depts.washington.edu/liquefy>)

Na Slici 3a prikazano je stanje mirovanja - čestice se međusobno dodiruju. Slika 3b pokazuje veličinu kontaktnih napona (dužina strelice) između pojedinih čestica nevezanog tla. Kontaktni naponi su veći kada je pritisak vode manji i obrnuto (Slika 3c).

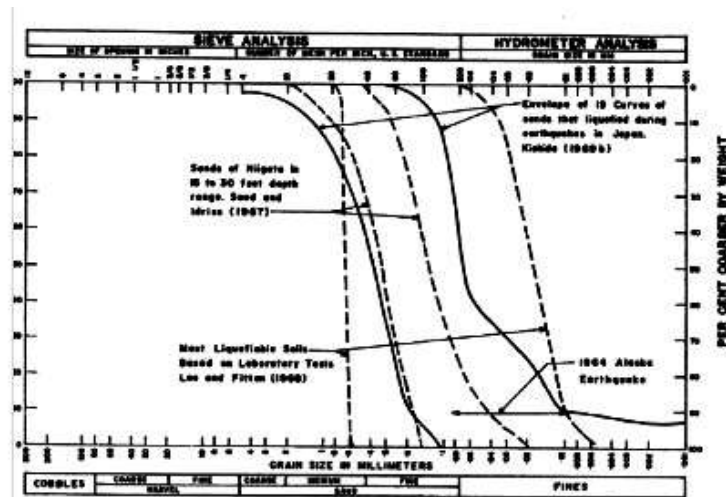
2.2.1. Procena potencijala za pojavu likvefakcije

Da bi se doneo zaključak o mogućnosti pojave likvefakcije na nekoj lokaciji pri jačem zemljotresu, potrebno je predmetnu lokaciju posmatrati uzimajući u obzir višestruke aspekte, pri čemu je najvažniji geotehnički izveštaj koji bi trebalo da pruži sledeće podatke:

- granulometrijska kriva (prisustvo materijala koji je podložan pojavi likvefakcije);
- stanje zbijenosti materijala (jedan od najvažnijih parametara koji dobrim delom zavisi od starosti materijala);
- stepen zasićenosti materijala;
- strateški položaj lokacije;
- zona seizmičke aktivnosti za predmetnu lokaciju;
- pojava likvefakcije u prošlosti na razmatranoj lokaciji.

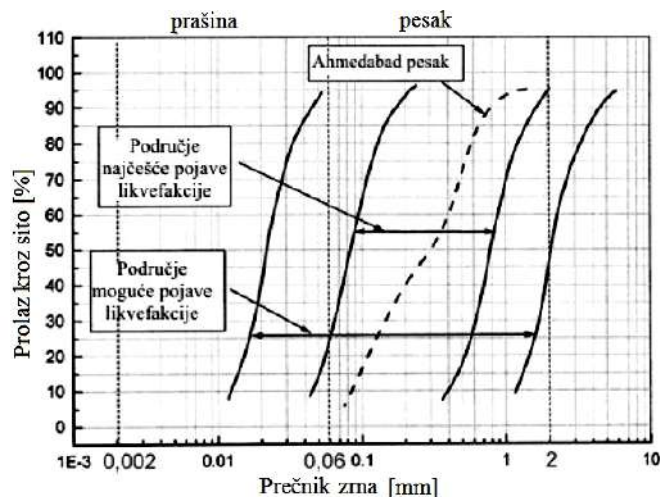
Verovatnoća pojave likvefakcije najpouzdanije se određuje modifikovanim programom PROLIQ2 koji koristi metode Seed-a i Idriss-a.

Kada se radi o analizi prisustva materijala koji je podložan likvefakciji značajna su istraživanja Finn-a (1972) koji je formulisao granično područje pojave likvefakcije (donju i gornju granicu) (Slika 4).



Slika 4. Tlo podložno likvefakciji
Izvor (Finn, 1972).

U kasnijim istraživanjima Seed i dr. (1985) definisali su granulometrijski sastav peska za koji se zna da je podložan likvefakciji (Slika 5).



Slika 5. Granulometrijski sastav peska za koje se zna da je podložan likvefakciji; Izvor (Seed i dr., 1985).

Kada se koristi dinamički pristup proceni pojave likvefakcije, otpornost tla prema likvefakciji se izražava koeficijentom sigurnosti koji je dat na sledeći način:

$$F_{SL} = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \times MSF \times K_{\alpha} \times K_{\sigma} \quad (8)$$

gde je:

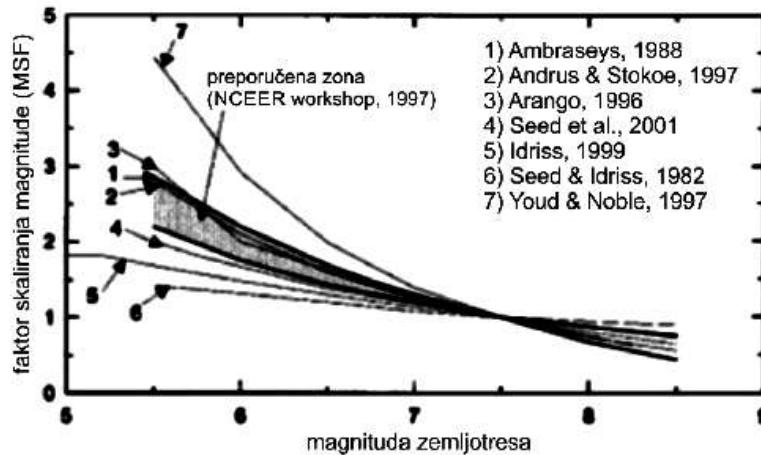
$CRR_{7.5}$ – odnos ciklične otpornosti prema likvefakciji za zemljotres magnitude 7,5;

CSR – odnos cikličnih napreznja koji su prouzrokovani zemljotresom;

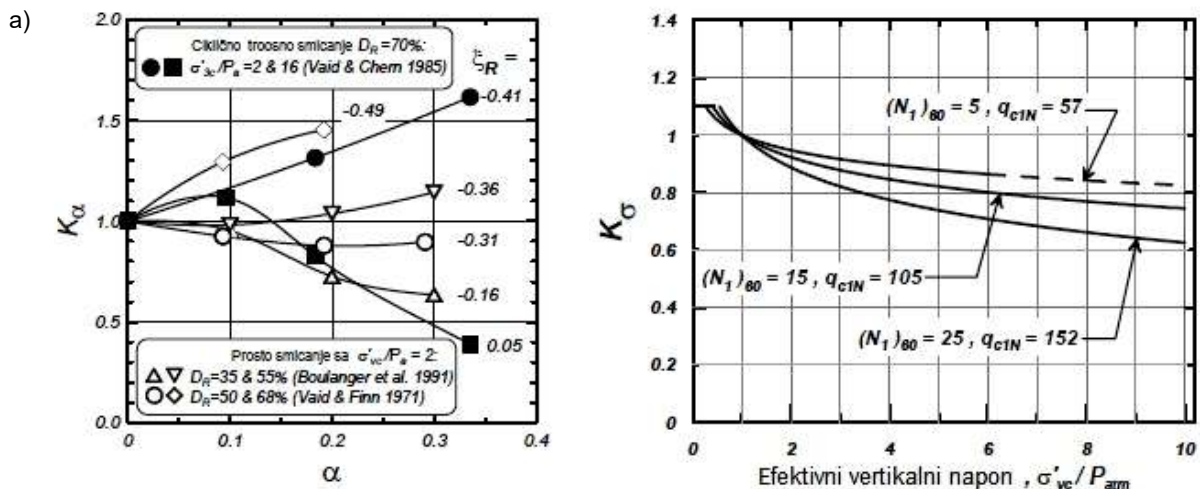
MSF – faktor skaliranja magnitude zemljotresa (Slika 6);

K_{α} – koeficijent korekcije za statičko tangencijalno napreznje (ako postoji) (Slika 7a);

K_{σ} – koeficijent korekcije pritiska nadsloja (nasipa ili konstrukcije) (Slika 7b).



Slika 6. Faktor skaliranja magnitude zemljotresa; Izvor (Kramer i dr., 2013; Grujić i dr., 2016).



Slika 7. Koeficijenti korekcije za proračun otpornosti prema likvefakciji: a) Koeficijent korekcije za statičko tangencijalno napreznje K_{α} ; b) Koeficijent korekcije pritiska nadsloja K_{σ}
 Izvor (Boulanger i Ziotopoulou, 2012; Grujić i dr., 2016).

Istorijski se pesak smatrao jedinom vrstom tla podložnog likvefakciji, ali likvefakcija se javlja i u rastresitim i zasićenim delovima tla, a u novije vreme pojava likvefakcije se utvđuje i u prašinama i drugim sitnozrnim sedimentima. U sitnozrnim sedimentima je moguća pojava likvefakcije ako su ispunjeni sledeći kriterijumi (Wang, 1980):

- Frakcija zrna $0,005 \text{ mm} \leq 15\%$;
- Granica tečenja, $LL \leq 35\%$;
- Sadržina vode u prirodnim uslovima $\geq 0,9 LL$;
- Indeks tečenja $\leq 0,75$.

Podložnost likvefakciji takođe zavisi i od oblika čestica. Naslage tla sa zaobljenim česticama podložnije su likvefakciji nego tla sa uglastim česticama.

Kod krupnozrnih materijala (šljunka) povećanje pornog pritiska vode usled cikličnih napona se nakon prestanka delovanja cikličnog opterećenja (zemljotresa) brzo apsorbuje. Iz tog razloga promena pornog pritiska vode i uticaj na smičuće napone ne može izazvati likvefakciju.

3. ANALIZA UTICAJA VISINE NASIPA NA NJEGOVU STABILNOST

Visina nasipa može uticati na njegovu stabilnost na više načina. Prvo, visina nasipa utiče na opterećenje podtla tako da nije retka pojava da se ispod visokih nasipa radi ojačanje podtla (raznim tehničkim merama). Pri uticaju zemljotresa opterećenja na tlo se povećavaju. Drugo, visina nasipa utiče na stabilnost njegovih kosina, a posebno pri uticaju zemljotresa. Takođe, kada se radi o pojavi likvefakcije, visina nasipa pospešuje povećanje sleganja.

U ovom delu rada se prikazuje jedan od uticaja visine nasipa na njegovu stabilnost – uticaj na stabilnost kosina. Pri tome se razmatra uticaj zemljotresa. Analize su sprovedene za četiri visine nasipa (H = 3, 6, 12 i 24 m) za dve vrste opterećenja nasipa $p = 10.0\text{kPa}$ i $p = 16.60\text{kPa}$. Razmatrani nasipi su u VIII zoni seizmičnosti (prema MCS skali), $k_s=0.06$. Za proračun su korišćene sledeće metode za proračun stabilnosti kosina: Bishop, Fellenius- Pettersson, Spencer, Jambu i Morgenstern-Price.

Ulazni podaci

Kolovozna konstrukcija

Unit weight :	γ	=	23.00	kN/m ³
Stress-state :	effective			
Angle of internal friction :	φ_{ef}	=	45.00	°
Cohesion of soil :	c_{ef}	=	10.00	kPa
Saturated unit weight :	γ_{sat}	=	24.00	kN/m ³

Osnovni teren

Unit weight :	γ	=	19.50	kN/m ³
Stress-state :	effective			
Angle of internal friction :	φ_{ef}	=	20.00	°
Cohesion of soil :	c_{ef}	=	5.00	kPa
Saturated unit weight :	γ_{sat}	=	20.00	kN/m ³

Donji stroj 1 - drobljeni kamen 0-31.5

Unit weight :	γ	=	20.00	kN/m ³
Stress-state :	effective			
Angle of internal friction :	φ_{ef}	=	45.00	°
Cohesion of soil :	c_{ef}	=	0.00	kPa
Saturated unit weight :	γ_{sat}	=	21.00	kN/m ³

Donji stroj 2 - drobljeni kamen 0-63

Unit weight :	γ	=	20.00	kN/m ³
Stress-state :	effective			
Angle of internal friction :	φ_{ef}	=	45.00	°
Cohesion of soil :	c_{ef}	=	0.00	kPa
Saturated unit weight :	γ_{sat}	=	21.00	kN/m ³

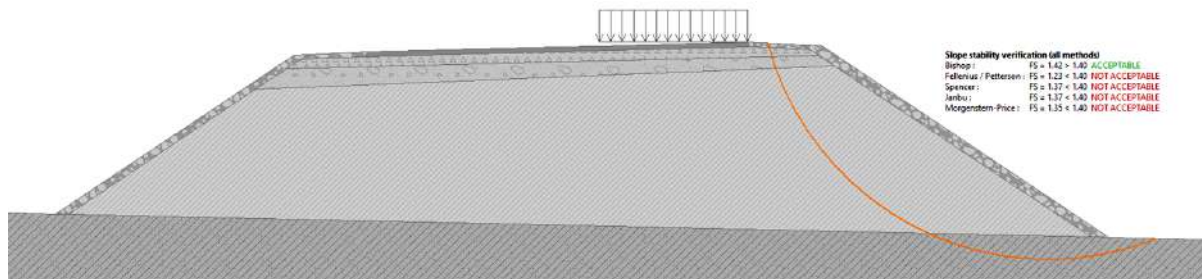
Humuziranje

Unit weight :	γ	=	18.00	kN/m ³
Stress-state :	effective			
Angle of internal friction :	φ_{ef}	=	25.00	°
Cohesion of soil :	c_{ef}	=	0.00	kPa
Saturated unit weight :	γ_{sat}	=	19.00	kN/m ³

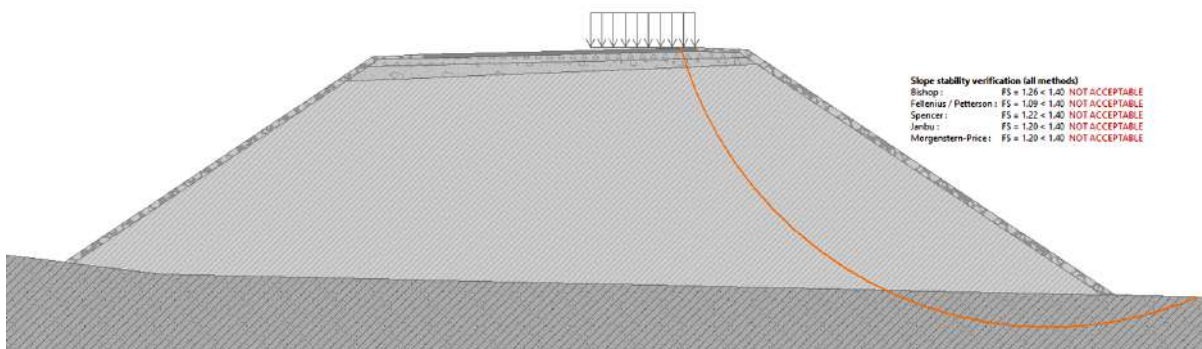
Nasip puta

Unit weight :	γ	=	19.00	kN/m ³
Stress-state :	effective			
Angle of internal friction :	φ_{ef}	=	30.00	°
Cohesion of soil :	c_{ef}	=	0.00	kPa
Saturated unit weight :	γ_{sat}	=	20.00	

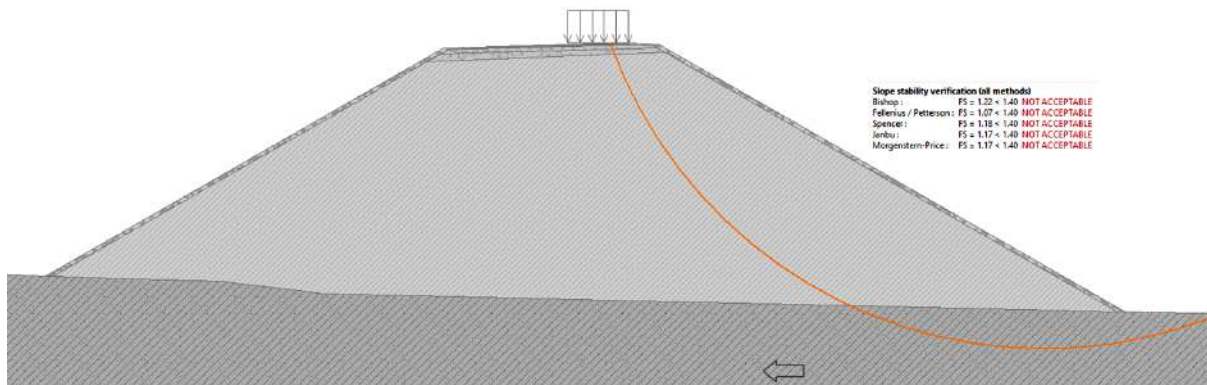
3.1. Proračun za opterećenje nasipa $p = 10.0 \text{ kPa}$



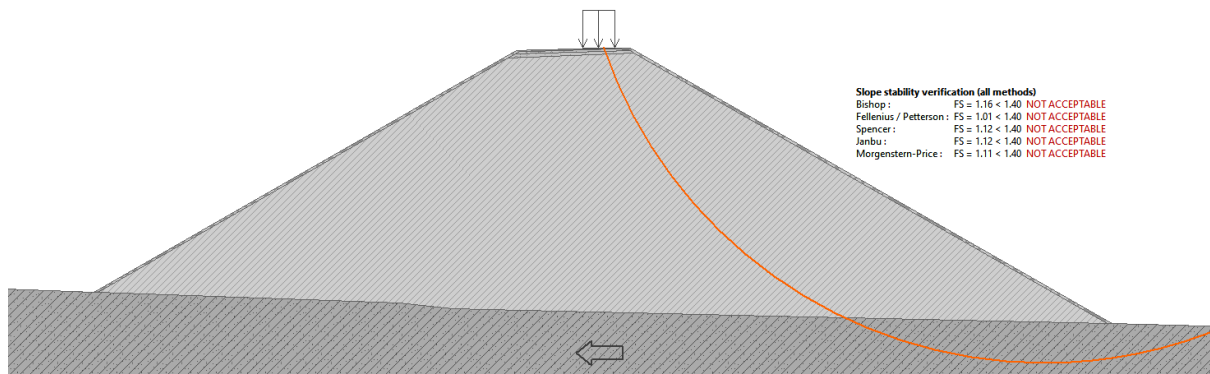
Slika 8. Stabilnost osnovnog nasipa od 3 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.



Slika 9. Stabilnost osnovnog nasipa od 6 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.

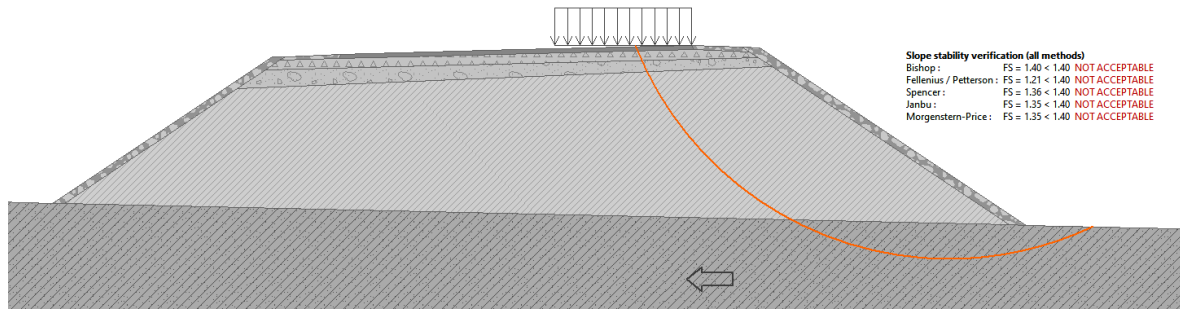


Slika 10. Stabilnost osnovnog nasipa od 12 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.

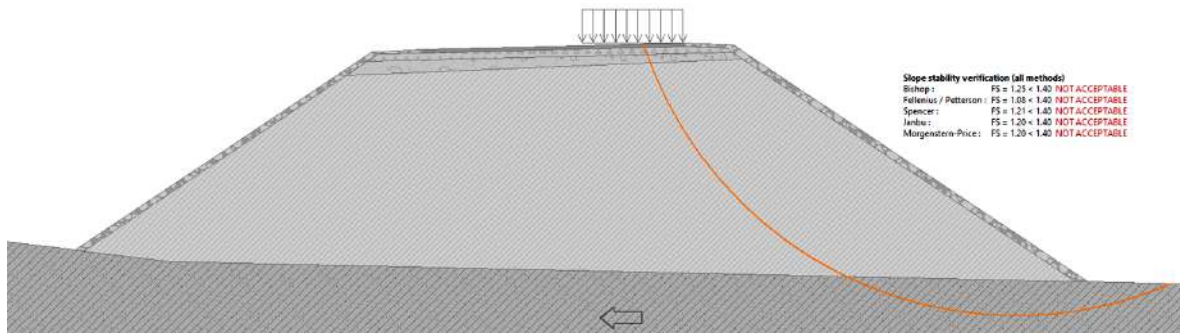


Slika 11. Stabilnost osnovnog nasipa od 24 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.

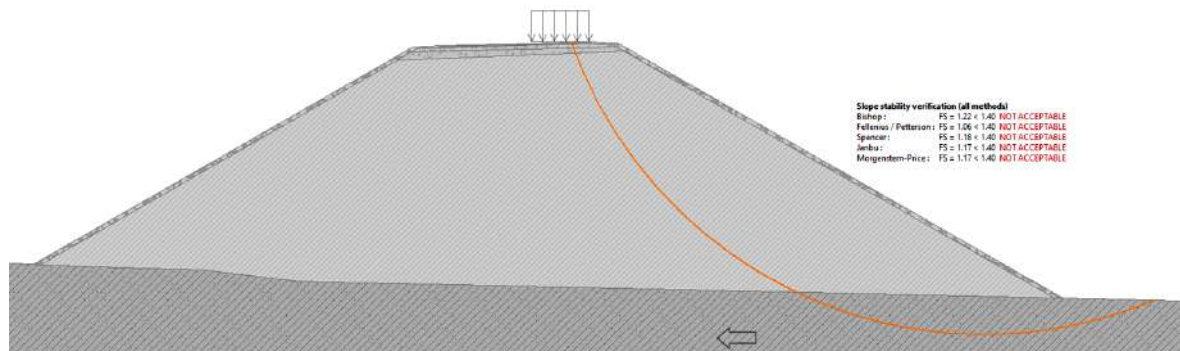
3.2. Proračun za opterećenje nasipa $p = 16.60 \text{ kPa}$



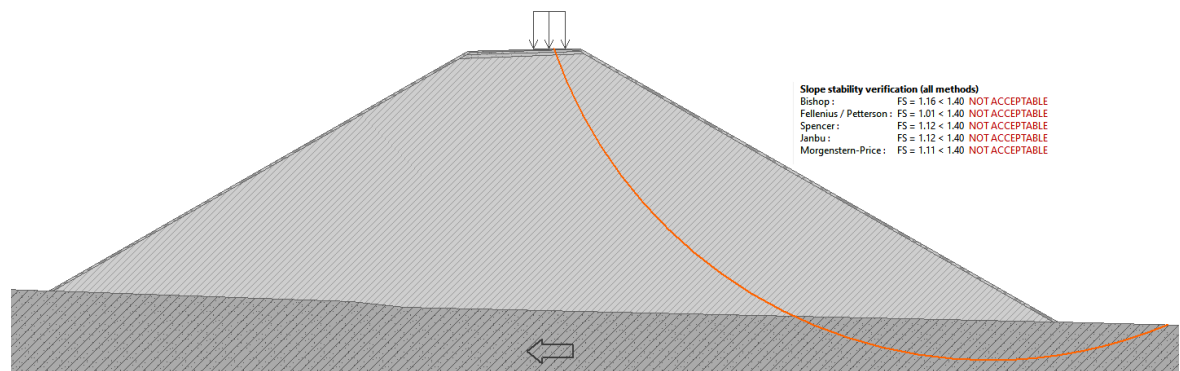
Slika 12. Stabilnost osnovnog nasipa od 3 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.



Slika 13. Stabilnost nasipa od 6 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.



Slika 14. Stabilnost nasipa od 12 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.



Slika 15. Stabilnost nasipa od 24 m, sa uticajem seizmike za $K_s = 0.06$.

U Tabeli 7 prikazani su zbirno rezultati proračuna maksimalnih vrednosti koeficijena (prema Bishop-u) i minimalnih vrednosti (prema Fellenius-Petterson), a prema Slikama 8-15. Takođe, prikazani su i rezultati proračuna koeficijena sigurnosti za kosinu nasipa bez uticaja seizmike (proračuni nisu prikazani u radu zbog obima rada). Na osnovu rezultata može se zaključiti da sa povećanjem visine nasipa koeficijent

sigurnosti u pogledu stabilnosti kosine nasipa opada. Takođe, može se zaključiti da za pojedine visine nasipa koeficijenti ne zadovoljavaju zahtevane vrednosti, što se posebno odnosi na stabilnost kosine nasipa sa uzimanjem uticaja seizmike u obzir.

Tabela 7. Koeficijenti stabilnosti nasipa visine H

opt. p [kN/m ²]	H [m]	bez uticaja seizmike		sa uticajem seizmike	
		Fs,min	Fs,max	Fs,min	Fs,max
10.0	3	1.47	1.57	1.23	1.42
	6	1.23	1.42	1.09	1.26
	12	1.22	1.39	1.06	1.22
	24	1.16	1.33	1.01	1.16
16.7	3	1.38	1.58	1.21	1.40
	6	1.23	1.41	1.08	1.25
	12	1.22	1.39	1.06	1.22
	24	1.16	1.32	1.01	1.16

4. ZAKLJUČAK

Pri projektovanju saobraćajnica, posebno onih od kapitalnog značaja kao što su autoputevi i značajniji putevi, treba obratiti pažnju na nasipe, koji su najosetljiviji deo konstrukcije na dejstvo zemljotresa. Pored toga je potrebno analizirati sve potrebne uticaje (navedene u ovom radu), a koji utiču po bilo kom osnovu na stabilnost nasipa i bezbednost saobraćaja.

U okviru ovog rada prikazani su uticaji zemljotresa na nasipe i analiziran je slučaj pojave likvefakcije. U radu je poseban akcenat dat na uticaj visine nasipa na njegovu stabilnost, bilo da se radi o stabilnosti kosina nasipa ili njegova sleganja. Detaljnije je na osnovu prikazanih proračuna pokazano kako u slučaju dejstva zemljotresa visina nasipa utiče na stabilnost kosina na osnovu utvrđivanja koeficijenta sigurnosti. Na bazi ovih proračuna dolazi se do zaključka da sa povećanjem visine nasipa opada vrednost koeficijenta sigurnosti, kako u uslovima bez uticaja zemljotresa, tako i u uslovima zemljotresnih dejstava.

Delimično prikazana analize (zbog obima rada) ukazuju i na neophodnost da se pri projektovanju nasipa mora pristupiti sveobuhvatno, počev od geotehničkih istraživanja. U istraživanjima posebnu pažnju treba obratiti na slabonosiva tla i tla podložna pojavi likvefakcije. Analize su takođe pokazale da pri projektovanju, ukoliko to uslovi dozvoljavaju, treba izbegavati kao tehnička rešenja visoke nasipe.

Zahvalnica

Rad je rezultat istraživanja u okviru naučno-istraživačkog projekta TR 36043 koji finansira Ministarstvo za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Literatura

- [1] Boulanger, R.W., Ziotopoulou, K. 2012. *A Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering Applications*, University of California at Davis, USA.101p.
- [2] Finn, W.D.L. (1972): Soil dynamics - Liquefaction of sands, Proc., International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, Seattle, Wash., Vol.I, 87-111.
- [3] Grujić, B., Jokanović, I., Zeljić, D., Grujić, Ž. (2016). Mjere za sprečavanje likvefakcije usljed dinamičkog opterećenja, Zbonik radova građevinskog fakulteta Subotica 2016, 603-610.
- [4] <http://depts.washington.edu/liquefy> (January 2000).
- [5] Kramer, S., Asl, B.A., Sideras, S. (2013). Effects of Long Duration Motions on Ground Failure, EERI Annual Meeting: Building Resilient Communities Through Policy and Mitigation, Seattle.
- [6] Manić, N. 2013. *Primena metoda višekriterijumske optimizacije kod projektovanja nasipa saobraćajnica*, Doktorska disertacija, FTN Novi Sad, 139 str.
- [7] Olgun, M., Acar, M.H. 2009. Faktori koji utiču na stabilnost kosina tokom dejstva zemljotresa, J. Fac. Eng. Arch. Selcuk Univ. 24(2): 9-20.
- [8] Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. 1985. Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. J. Geotech. Eng., 111(12): 1425-1445.
- [9] Wang, W.S. 1980. Some findings in soil liquefaction. Chinese J.Geot.Eng. 2(3): 55-63.