

USPOREDBA MARGINA SIGURNOSTI KONCEPATA DOPUŠTENIH NAPREZANJA I GRANIČNE ANALIZE STABILNOSTI KOSINA

SAFETY MARGIN COMPARISON FOR THE CONCEPT OF ALLOWABLE STRESSES AND LIMIT STABILITY ANALYSIS OF SLOPES

Krešo Ivandić^{1*}, Marija Trbljanić²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Zavod za geotehniku, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: kreso.ivandic@gfv.hr

Sažetak: *Provodi se općenita analiza između starih i novih regulatornih koncepata provedbe analiza u geotehničkom inženjerstvu. Detaljizira se problem proračunskih postupaka u svijetlu uporabe graničnih stanja u odnosu na koncept dopuštenih naprezanja. Kvantificira se međusobni odnos zadanih margina sigurnosti pri analizama stabilnosti kosina. Daju se prijedlozi vezani za novu terminologiju, a u svijetlu novih obrazaca proračuna. Predlaže se novi pristup pri određivanju razina sigurnosti kod analiza seizmički opterećenih kosina prirodnog tla i odlagališta otpada.*

Ključne riječi: *granična stanja, dopušteno naprezanje, stabilnost kosina, Eurokod 7.*

Abstract: *The general analysis between the old and new regulatory concepts implementation in geotechnical engineering is performed. Design procedures problems in the light of the use of limit states in relation to the concept of allowable stresses is detailed in. The interrelationship between the safety margins in the stability analysis of slopes is quantified. In the light of the new design patterns new terminology proposals are given. It is proposed a new approach in determining the margin of security at the analysis of seismic loaded slopes of soil and waste.*

Keywords: *limit states, allowable pressure, slope stability, Eurocode 7.*

Received: 22.04.2017 / Accepted: 02.07.2017

Published online: 21.07.2017

Znanstveni rad / Scientific paper

1. UVOD

Donedavni koncept projektiranja u geotehničkom inženjerstvu je promijenjen. Dosadašnja provedba i kontrola računskih postupaka i analiza, bila je definirana prema Pravilniku (1990). Usvajanjem novih proračunskih obrasaca, u skladu s Eurokodom 7 (2008 i 2012), pojavljuje se potreba za uspostavljanjem mosta između starog i novog koncepta projektiranja. Pokazuje se da se u rješavanju zadaća iz područja geotehničkog inženjerstva spomenuti, novi koncept, znatno sporije usvaja. Stariji je pristup bio baziran na analizama prema dopuštenim naprezanjima. Novije, mjerodavne postavke, bazirane su na analizi odgovarajućih graničnih stanja. Mogućnost usporedbe spomenutih pristupa materijalizira se u pokušajima da se ostvare rješenja, koja će biti što sličnija dotadašnjoj, uobičajenoj, inženjerskoj praksi. Navedeni pristup unaprijed onemogućava ispunjavanje osnovnog uvjeta uvođenja novih proračunskih postupaka, a to je izvedba jeftinijih konstrukcija, uz istu ili povećanu marginu sigurnosti. Razlog za usvajanje spomenutog pristupa istovrsnosti novih rješenja, a na bazi dosadašnjeg iskustva, jest u nemogućnosti dosljedne primjene novih koncepata projektiranja. Isto tako nema pokušaja objektivne evaluacije pojedinog rješenja.

2. KONCEPT GRANIČNIH STANJA

Uporaba postupaka granične analize u geotehničkom inženjerstvu nije tako novijeg datuma. Koncept je prvi puta uveden sredinom prošlog stoljeća u Danskoj Hansen (1956). U Americi i Kanadi sredinom 70-tih godina usvaja se tzv. koncept proračunskog faktoriranja opterećenja i otpora (*Load and Resistance Factor Design*), što je na tragu prema Hansen (1956). Navedeni pristupi usvojeni su dominantno u konstrukterstvu. U geotehničkom inženjerstvu prevladavao je obrazac proračuna prema dopuštenim naprezanjima.

Temeljem opisanog stanja, pojavila se potreba da se metodologija proračuna usvojena u konstrukterstvu uskladi sa segmentom, koji se tiče geotehničkog inženjerstva. Zapaženo je da primjena ovog zajedničkog, holističkog koncepta, ne ide glatko.

Princip proračuna prema graničnim stanjima u konstrukterstvu je uveden kako bi projektanti mogli adekvatno vrednovati efekte različitih kombinacija opterećenja. Kao baza za odabir ovih kombinacija određena je vjerojatnost njihova pojavljivanja. Pretpostavlja se da je poznata i vjerojatnosna distribucija otpora. Nakon definiranja kriterija sloma, potrebno je odrediti koliko daleko moraju biti očekivane vrijednosti odgovarajućih parametara u odnosu na uvjete njegova dosezanja. Pri tome je kriterij prihvaćanja proračuna taj da je vjerojatnost po-

jave sloma manja od unaprijed definirane brojčane veličine. Kao rezultat ovog postupka izraženi su skupovi vrijednosti parcijalnih proračunskih koeficijenata za djelovanja i otpore.

Pri rješavanju zadaća geotehničkog inženjerstva nije moguće primijeniti principe analize graničnih stanja na način da se automatski preslikaju obrasci iz područja konstrukterstva. Raspodjela vjerojatnosti pojave pojedinih sastavnica proračuna u geotehničkom inženjerstvu nije unaprijed poznata. Potrebno ju je tek utvrditi na korrektna način, uz redoviti problem nedovoljnog broja uzoraka za ostvarenje uvjeta statističke značajnosti. U geotehničkom inženjerstvu fundamentalna osnova jest uočavanje međusobne ovisnosti pojavnosti djelovanja i otpora, dok je u konstrukterstvu vanjsko djelovanje neovisno o otporu.

Posljedica spomenutih, ne i svih relevantnih, prijepora, jest da u svakodnevnoj praksi u geotehničkom inženjerstvu nema unificirane strukture projektantskih postupaka. Drugim riječima analize prema graničnim stanjima inženjeri geotehničari *doživljavaju* na subjektivan, a ne na strogo propisani i objektivan način.

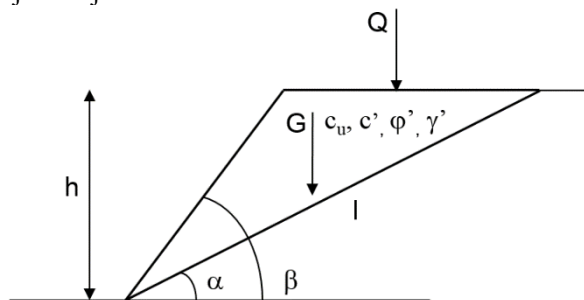
3. DOSADAŠNJA INŽENJERSKA PRAKSA

U Hrvatskoj je na snazi bio [Pravilnik \(1974\)](#), odnosno s preinakama mjernih jedinica [Pravilnik \(1990\)](#). Formalno, pri definiranju obrazaca usvojen je izraz *dopušteno (specifično) opterećenje* za procjene nosivosti plitkih temelja i pilota. Zbog uvođenja posebnih proračunskih koeficijenata za parametre tla, struktura proračuna inklinira konceptu graničnih stanja na osnovu materijalnog pristupa projektiranju (*Material Design Approach*). Deklarirani raspon vrijednosti spomenutih proračunskih koeficijenata (parcijalnih faktora sigurnosti), određen je na osnovu različitih razina pouzdanosti njihova određivanja. Oni se apliciraju isključivo za svojstva materijala, kao postupak proračuna otpora u geotehničkom modelu. Za vanjska djelovanja parcijalni koeficijenti imaju jedinične vrijednosti. Interpretacija odabira vrijednosti materijalnih parcijalnih koeficijenata pri određivanju nosivosti plitkih temelja i pilota su određene s ciljem da konačni rezultat ima za posljedicu dobivanje željenog ekvivalentnog globalnog faktora sigurnosti.

Analiza gravitacionih konstrukcija (potpornih zidova) se provodila s potrebom ostvarenja određenih vrijednosti globalnih faktora sigurnosti pri dokazima na prevrtanje i klizanje. Spomenute vrijednosti nisu bile definirane u [Pravilniku \(1990\)](#). Načini proračuna stabilnosti kosina su definirani u [Pravilniku \(1990\)](#) kroz vrijednosti globalnih faktora sigurnosti i to u samo jednom članku (čl. 163.) u rasponu $FS = 1.3 - 1.7$ za privremene iskope. Za razliku od pristupa proračuna plitkih temelja i pilota, nema apliciranja parcijalnih faktora sigurnosti na materijal.

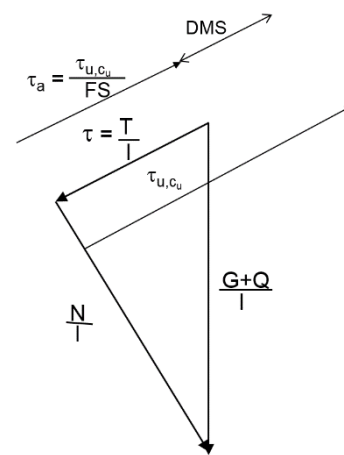
Za razliku od [Pravilnika \(1990\)](#), novi koncept proračuna stabilnosti kosina prema [Eurokodu 7 \(2008 i 2012\)](#) usvaja postupke provedbe faktoriranja vanjskih nepovoljnih i povoljnih djelovanja (stalnih i promjenjivih), te materijala u propisanim kombinacijama.

Na [Slici 1](#) dan je shematizirani prikaz kosine s odgovarajućim parametrima posmične čvrstoće homogenog tla ($c_u, c', \varphi', \gamma'$), zadanom visinom i nagibom (h, β) pretpostavljenom ravnom kliznom plohom (α, l), te vanjskim nepovoljnim trajnim (G) i povremenim (Q) djelovanjima.

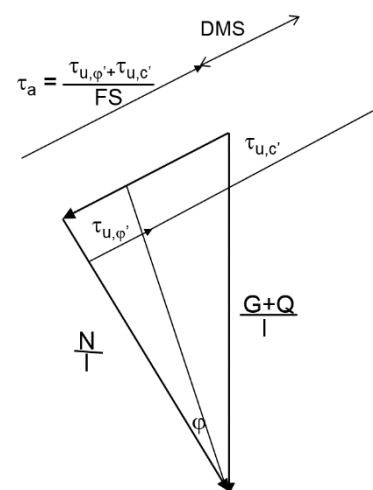


Slika 1. Shematski prikaz kosine s pretpostavljenom ravnom kliznom plohom

Na [Slici 2](#) daje se grafički prikaz dopuštene margine sigurnosti (DMS) – koncept dopuštenih napreznaja – za slučaj prema [Slici 1](#) za nedrenirano, dok na [Slici 3](#) za drenirano stanje, gdje su N/l – normalna i T/l – posmična komponenta rezultantnog vanjskog djelovanja ($G+Q$)/ l na pretpostavljenu ravnu kliznu plohu.



Slika 2. Dopuštena margina sigurnosti (DMS) za nedrenirano stanje



Slika 3. DMS za drenirano stanje

Dopušteno posmično naprezanje τ_a je funkcija graničnog posmičnog naprezanja τ_u i dogovorene margine sigurnosti izražene preko vrijednosti globalnog faktora sigurnosti FS. Spomenuta vrijednost FS određena je na osnovu iskustva, odnosno dokazanog uvida nemogućnosti poznavanja veličina svih relevantnih parametara pri provedbi proračunskih analiza, bez uzimanja u obzir njihovih vjerovatnosnih razdioba.

Generalno, vanjska djelovanja, te otpornost temeljnog tla, određeni su na način da se pokuša odrediti stvarno stanje naprezanja. Potrebno je da vrijednosti odgovarajućih sastavnica proračuna budu što je moguće bliže realnima. Odgovarajuća vrijednost rezultatnog, odnosno potrebnog posmičnog naprezanja za ostvarenje ravnoteže, tada mora biti manja od potencijalne vrijednosti graničnog naprezanja u omjeru globalnog faktora sigurnosti FS.

Za nedrenirani slučaj može se eksplicitno globalni FS transformirati u parcijalni faktor sigurnosti za materijal γ_{cu} (oznaka prema Eurokodu 7 (2008 i 2012)), i/ili za ekvivalentnu vrijednost za vanjsko nepovoljno djelovanje $\gamma_{G,Q}$ iz koncepta graničnih stanja. Za drenirani slučaj to nije moguće, jer su mjerodavna tri parametra posmične čvrstoće c' , φ' , γ' , svaki sa svojim parcijalnim proračunskim koeficijentom γ_c , γ_{φ} , γ_{γ} .

Neovisno o spomenutoj mogućnosti transformacije vrijednosti FS, moguća je relativno jednostavna grafička interpretacija njegove usvojene vrijednosti **Slike 2 – 7**.

Raspon DMS, prema **Pravilniku (1990)**, ali i uobičajenoj, svakodnevnoj inženjerskoj praksi, je ovisio o karakteru vanjskog djelovanja na kosinu. Generalno, ustalile su se slijedeće vrijednosti: za stalna djelovanja FS = 1.5, stalna + povremena FS = 1.3 i stalna + povremena + izvanredna (seizmika) FS = 1.0 – 1.1. Ovakav pristup za analizu stabilnosti kosina razlikovao se od načina provjere nosivosti plitkih temelja i pilota, gdje je bio omogućen određeni raspon materijalnih faktora sigurnosti, također bez množenja vanjskih djelovanja.

4. USPOREDBA KONCEPATA DOPUŠTENIH NAPREZANJA I GRANIČNIH STANJA

Dosadašnji koncept dopuštenih naprezanja obuhvaća analizu stvarnog stanja naprezanja potrebnog za ostvarenje ravnoteže. Na takvom stanju, primjenjuje se margina sigurnosti.

Novi koncept graničnih stanja analizira neželjeno stanje rezultatnih sila. Ono dovodi do neprihvatljivih granica ponašanja. Potrebno je osigurati da je pojava ovako opisanog, graničnog stanja nerealistična, odnosno da je zadovoljena dogovorena, unaprijed propisana i prihvaćena, margina sigurnosti.

Simbolički osnovni zahtjevi graničnih stanja u konstrukterstvu i geotehničkom inženjerstvu.

Konstrukterstvo:

$$E\{\gamma_F F_{rep}; a_d\} = E_d \leq R_d = R\{X_k/\gamma_M; a_d\}$$

Geotehničko inženjerstvo (Projektni pristup 3):

$$E\{\gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d\} = E_d \leq R_d = R\{X_k/\gamma_M; \gamma_F F_{rep}; a_d\}$$

gdje su:

- E – efekti djelovanja generalno,
- E_d – proračunska djelovanja,
- F_{rep} – reprezentativna vrijednost vanjskog djelovanja (opterećenja)
- R – otpornost generalno,
- R_d – proračunska otpornost,
- X_k – karakteristično materijalno svojstvo,
- a_d – proračunski utjecaj geometrije,
- γ_F – proračunski koeficijent na vanjsko djelovanje,
- γ_M – proračunski koeficijent na materijalno svojstvo.

Fundamentalna razlika konstruktorskog i geotehničkog principa proračuna je u pojavnosti materijala i materijalnih proračunskih koeficijenata u području vanjskog djelovanja. Parametri posmične čvrstoće materijala c_u , c' , φ' , γ , značajno utječu na intenzitet vanjskog nepovoljnog djelovanja. Konkretno kod kosina, za drenirano stanje, zapreminska težina tla γ daje vrijednost normalne komponente stalnog nepovoljnog vanjskog djelovanja N. Istovremeno ona daje i komponentu otpora $\tau_{u,\varphi'} = N \times \tan \varphi'$.

Unutar geotehničkog inženjerstva se, prema novim obrascima, razlikuju proračunski pristupi (*Design Approaches* DA1, DA2, DA3) PP1, PP2, PP3. Predložena i usvojena norma Eurokod 7 (2008 i 2012) (Eurocode7, EC7) ne koristi eksplicitno izraženu vrijednost globalnog faktora sigurnosti. Utjecaj pojedinog elementa proračuna određuje se množenjem s odgovarajućim parcijalnim proračunskim koeficijentom. Definirane su određene kombinacije faktoriranja vanjskih trajnih, povremenih, nepovoljnih i povoljnih djelovanja, materijalnih karakteristika i otpornosti (A – Action - djelovanje, M – Material – materijalna svojstva, R – Resistance – otpornost).

Tablica 1 prikazuje shematizirani prikaz kombinacije proračunskih koeficijenata različitih (većih) od jedinične vrijednosti ($\gamma \neq 1$) usvojenih proračunskih pristupa.

Tablica 1. Shematski prikaz relevantnih proračunskih koeficijenata

Pr.	PP1 1	PP1 2	PP2	PP3
Ko.	$\underline{A1} + M1 + R1$	$\underline{A1} + \underline{M2} + R1$	$\underline{A1} + M1 + \underline{R2}$	$\underline{A1}(\underline{A2}) + \underline{M2} + R1$

gdje je u PP3:

- A1 - konstruktorsko djelovanje,
- A2 - geotehničko djelovanje.

U Hrvatskoj (RH) je na snazi PP3, za sve segmente proračunskih analiza. Za analizu pilota i geotehničkih sidara moguć je, osim navedenog, i PP2.

Dokaz graničnog stanja globalne stabilnosti kosina u RH provodi se prema PP3. Sva vanjska djelovanja definirana su kao geotehnička, odnosno A2. U **Tablici 2** se vide vrijednosti parcijalnih koeficijenata za djelovanja za granična stanja STR i GEO.

Tablica 2. Parcijalni koeficijenti za djelovanja (γ_F) ili učinke djelovanja (γ_E) (STR i GEO)

Djelovanje		Simbol	Skupina	
			A1	A2
Trajno	Nepovoljno	$\gamma_{G;sup}$	1.35	1.0
	Povoljno	$\gamma_{G;inf}$	1.0	1.0
Promjenjivo	Nepovoljno	γ_Q	1.5	1.3
	Povoljno	γ_Q	0	0

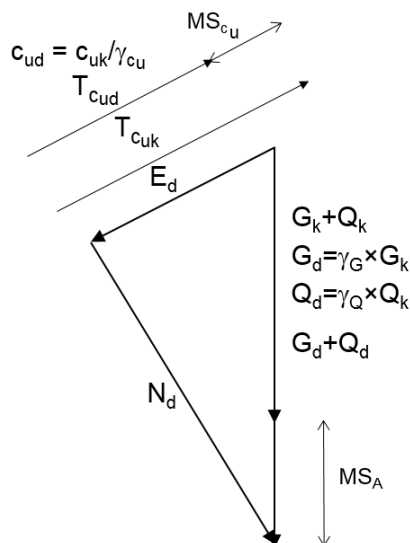
S obzirom da je skup vrijednosti pod A2 – geotehnička djelovanja - uglavnom jediničan (osim za nepovoljno promjenjivo djelovanje), dominantna pozicija djelovanja proračunskih koeficijenata je na svojstva materijala. Iz tog razloga se PP3 naziva i *materijalnim pristupom*.

U **Tablici 3** su dane vrijednosti parcijalnih proračunskih koeficijenata (γ_M) oznake M2 za granična stanja STR i GEO.

Tablica 3. Parcijalni koeficijenti za parametre tla (γ_M)

Parametri tla	Simbol	Vrijednost
Kut unutarnjeg trenja	$\gamma_{\phi'}$	1.25
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1.25
Nedrenirana posmična čvrstoća	γ_{cu}	1.4
Jednoosna tlačna čvrstoća	γ_{qu}	1.4
Gustoća (težine)	γ_γ	1.0

Na **Slikama 4 i 5** dani su shematizirani grafički prikazi pozicija margina sigurnosti s obzirom na mjesto i vrijeme djelovanja parcijalnih faktora (MS_A – margina sigurnosti za djelovanje – *action*, MS_{cu} , $MS_{c'}$, $MS_{\phi'}$ - margina sigurnosti za materijal, odnosno parametre posmične čvrstoće - nedrenirana čvrstoća, efektivna kohezija i kut unutarnjeg trenja.). U PP3 parcijalni faktori djeluju na izvoru djelovanja, konkretno na parametre tla.



Slika 4. Pozicije fragmentiranih MS za nedrenirano stanje

U odnosu na klasičan pristup uporabom dopuštenih napreznja, noviji princip proračuna ima za posljedicu smanjenu vidljivost pozicije i mjere zahtjevane margine sigurnosti. Vrijedi samo djelomična analogija između formata dokaza dopuštenih napona i usvojenih graničnih stanja:

- format dokaza prema dopuštenim napreznjima:

$$\tau_a = \tau_u / FS_z$$

- format dokaza prema graničnim stanjima: $E_d \leq R_d$

R_d

gdje su:

τ_a – dopušteno napreznje,

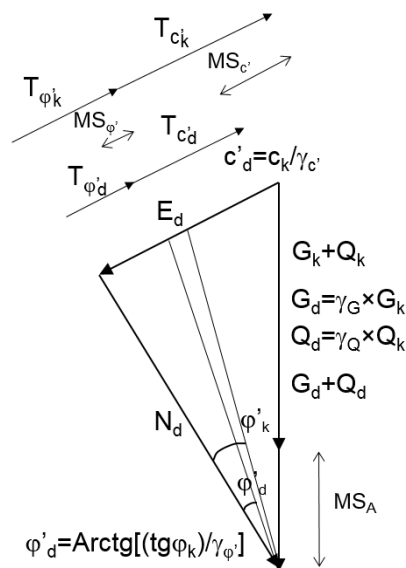
τ_u – granično napreznje,

FS_z – zahtjevani globalni faktor sigurnosti

E_d – proračunsko djelovanje,

R_d – proračunska otpornost.

Generalno, formati dokaza u sustavu dopuštenih napreznja su u specifičnim vrijednostima. Provodi se usporedba aktualnog i dopuštenog napreznja. Margina sigurnosti je eksplicitno izražena. U analizama graničnih stanja format dokaza je tvoren usporedbom rezultatnih sila, odnosno provodi se komparacija zahtjevane u odnosu na aktualnu čvrstoću. Propisana margina sigurnosti je fragmentirana.



Slika 5. Pozicije fragmentiranih MS za drenirano stanje

Vrijednost zahtjevanog globalnog faktora sigurnosti FS_z ovisi o proračunskoj projektnoj situaciji, odnosno kombinaciji vanjskih djelovanja. Potrebno je ostvariti uvjet da stvarni faktor sigurnosti FS (potreban za ostvarenje ravnoteže) bude veći ili jednak zahtjevanom faktoru sigurnosti, odnosno $FS \geq FS_z$ (stalno i promjenjivo djelovanje) ili $FS_{se} \geq FS_{zse}$ (seizmičko djelovanje). U situaciji kada to nije slučaj zahtjev nije zadovoljen. U rasponima vrijednosti - $1 < FS \leq FS_z$ i $1 \leq FS_{se} \leq FS_{zse}$ postoje rezerve margine sigurnosti, gdje je $FS_z > FS_{zse}$ ($1.5 > (1.0 - 1.1)$).

Iz formata dokaza graničnog stanja vidljivo je da je optimalna margina sigurnosti dosegnuta kada je $E_d = R_d$, odnosno kada je $R_d/E_d = 1$. Kada se pojavi slučaj $R_d < E_d$, odnosno kada je $R_d/E_d < 1$, ne znači da je margina sigurnosti posve iscrpljena, kao što je to bio slučaj kod dokaza formata dopuštenih naprezanja. I za ovaj slučaj ona postoji, ali nije eksplicitno vidljiva. Ne može se razvidno definirati određena vrijednost koeficijenta R_d/E_d kada dolazi do ostvarenja sloma, kao što je to bio slučaj u postupcima dopuštenih naprezanja.

Pri proračunima dokaza protiv ostvarenja graničnih stanja globalne stabilnosti kosina, prema PP3, potrebno je primijeniti parcijalne koeficijente na parametre tla, neovisno o projektnoj situaciji (stalne, prolazne, izvanredne projektno situacije). Razlika između projektnih situacija se pojavljuje u apliciranju proračunskih koeficijenata na vanjska djelovanja. Za PP3, prema **Tablici 2**, vidljivo je da su proračunski koeficijenti za vanjska djelovanja jedinični, osim za promjenjivo nepovoljno djelovanje.

Daje se prikaz nekoliko međusobno različitih slučajeva usporednih doseganja potrebnih margina sigurnosti za dva modela u ovisnosti o pojavnosti i veličini promjenjivog nepovoljnog djelovanja Q, za nedrenirano stanje i seizmičko djelovanje za geotehnički proračunski model prema **Slici 1**.

Za nedrenirano stanje, $Q = 0$, stalnu i prolaznu projektnu situaciju, te PP3, razlika u margini sigurnosti predstavljena je omjerom vrijednosti globalnog faktora sigurnosti FS koncepta dopuštenih naprezanja i proračunskog faktora za nedreniranu čvrstoću γ_{cu} koncepta graničnih stanja prema Eurocodu 7 (OMS – omjer margina sigurnosti): $OMS = FS/\gamma_{cu}$. FS ovisi o procjeni projektanta, dok je γ_{cu} zadana i nepromjenjiva vrijednost. Za $FS = 1.5$, $\gamma_{cu} = 1.4$, $OMS = 1.5/1.4 = 1.07$. Slijedi da je noviji koncept manje konzervativan

Za slučaj kada $Q \neq 0$ i prema oznakama na **Slici 1**, generalno omjeri R/E i R_d/E_d :

$$\frac{R}{E} = FS = \frac{\frac{h}{\sin \alpha} c_u}{\gamma \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{\text{tg} \alpha} - \frac{1}{\text{tg} \beta} \right) \sin \alpha + Q \sin \alpha}$$

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{\frac{h}{\sin \alpha} c_{uk}}{\gamma_G \left[\gamma \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{\text{tg} \alpha} - \frac{1}{\text{tg} \beta} \right) \sin \alpha \right] + \gamma_Q Q \sin \alpha}$$

gdje su:

R, R_d – karakteristična i proračunska otpornost,

E, E_d – karakteristično i proračunsko djelovanje,

γ_G – proračunski koeficijent za vanjsko nepovoljno stalno djelovanje, za PP3 $\gamma_G = 1.0$ - sva djelovanja su geotehnička pri analizama kosina,

γ_Q – proračunski koeficijent za vanjsko nepovoljno promjenjivo djelovanje, za PP3 $\gamma_Q = 1.3$.

Sada nije moguće eksplicitno izraziti OMS faktora sigurnosti i margina sigurnosti iz novog koncepta. Razlog je taj što se u izrazu za vanjska djelovanja pojavljuje proračunski koeficijent γ_Q , koji je veći od jedinične vrijednosti. Upravo će o zadanoj vrijednosti Q ovisiti u kojoj

će mjeri noviji obrasci proračuna imati manji ili veći stupanj konzervativnosti u odnosu na rješenja prema starijem konceptu proračuna. Za slučaj djelovanja izvanredne projektno situacije i nedreniranog stanja $OMS = 1.5/1.4 = 1.07$, kao i u slučaju $Q = 0$.

Unutar novih obrazaca proračuna, za uobičajeni odnos vrijednosti nepovoljnog promjenjivog Q i stalnog djelovanja G, te za zadovoljenje iste margine sigurnosti, slijedi da je mjerodavna projektna situacija izvanrednog djelovanja. Ona djeluje s većim nepovoljnim učincima na kosinu u odnosu na slučajeve samo stalnog i promjenjivog djelovanja. Navedeno je posljedica činjenice da nema promjene u vrijednostima proračunskog koeficijenta na materijal, dok su vrijednosti na vanjska djelovanja jedinične, tj. nema promjene zahtjevanje margine sigurnosti.

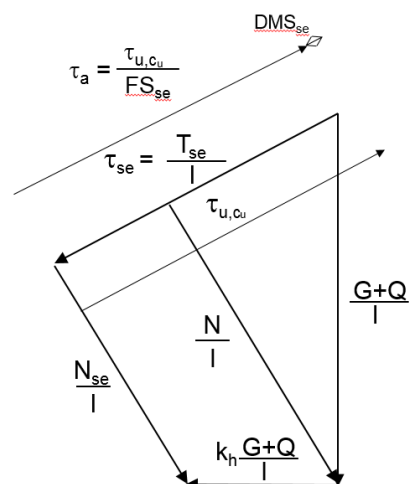
Projektna situacija izvanredno djelovanje (slučaj $k_h \neq 0$, $k_v = 0$ – koeficijenti povećanja sile u horizontalnom i vertikalnom smjeru):

$$\frac{R_d}{E_d} = \frac{\frac{c_{uk}}{\gamma_{cu}}}{\left[\gamma \frac{h}{2} \left(\frac{1}{\text{tg} \alpha} - \frac{1}{\text{tg} \beta} \right) + \frac{Q}{h} \right] (\sin^2 \alpha + k_h \cos \alpha \sin \alpha)}$$

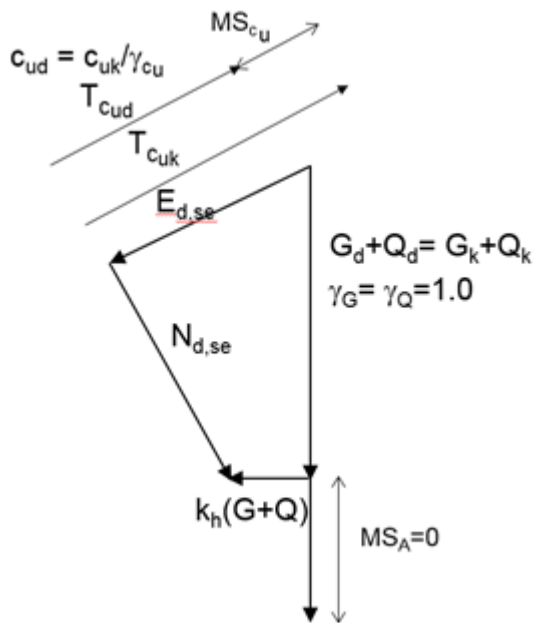
Određeni dio vanjskog promjenjivog nepovoljnog djelovanja Q kompenziran je jediničnom vrijednosti proračunskog koeficijenta za izvanrednu projektnu situaciju. Međutim, s obzirom na vrijednost seizmičkog ubrzanja tla, te relativno mali odnos promjenjivog, u odnosu na stalno opterećenje, spomenuta kompenzacija nije značajna.

Potrebno je istražiti za koliko je moguće smanjiti odnos proračunske otpornosti i proračunskog djelovanja od jediničnog, kako bi se dosegla odgovarajuća margina sigurnosti dosegnuta obrascima dopuštenih naprezanja. Ili drugim riječima kvantificirati povećanu količinu radova, koja eventualno nastaje kao posljedica strogog pridržavanja predloženih obrazaca graničnih stanja, odnosno fiksne margine sigurnosti.

Izrađen je pokazni numerički primjer s određivanjem potrebnog trajnog nagiba kosine prema obrascima dopuštenih naprezanja i graničnih stanja za relevantne projektno situacije.



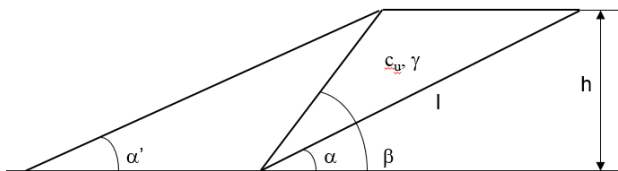
Slika 6. DMS za djelovanje seizmičkih sila



Slika 7. Pozicije fragmentiranih MS za nedrenirano stanje za djelovanje seizmičkih sila

5. NUMERIČKI PRIMJER

Na Slici 8 prikazan je geotehnički model projektne situacije zatečenog prirodnog terena pod nagibom α' . Potrebno je odrediti nagib β trajno stabilne kosine od homogenog materijala za ravnu kliznu plohu pod kutem α za sljedeće projektne uvjete: $h = 6$ m, $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 20$ kN/m³, $c_u = 27$ kN/m², $\gamma_{cu} = 1.4$, $k_h = 0.3$.



Slika 8. Geotehnički model proračuna trajnog nagiba kosine β

Stalno djelovanje:

Faktor sigurnosti

$$FS = 1.56.$$

Faktor konzervativnosti (Over design factor)

$$ODF = 1.11$$

Izvanredno djelovanje - seizmika:

Faktor sigurnosti

$$FS_{se} = 1.02. \text{ - zadovoljavajuće}$$

Faktor konzervativnosti

$$ODF_{se} = 0.73 \text{ - nezadovoljavajuće}$$

Trajni nagib kosine iz uvjeta dobivanja jediničnog faktora konzervativnosti ODF_{se} jednak je $\beta = 48^\circ$.

Za $\alpha' = 25^\circ$ povećanje količine iskopa za slučaj prema novim obrascima u odnosu na postupak prema dopuštenim naprezanjima je cca 20 %.

6. ZAKLJUČAK

Primjena novih propisa ima za posljedicu potrebu za stvarnom prilagodbom proračunskim principima graničnih stanja, odnosno omogućavanjem uniformnog načina analiza inženjerskih zadaća. Generalno, nije moguće jednoznačno poklapanje procedura verifikacije graničnih stanja s onima u segmentu konstrukterstva. Razlozi su nemogućnost potpune dosljednosti zajedničke probabilističke osnove proračuna, te fundamentalan utjecaj materijalnih svojstava na vrijednosti vanjskih nepovoljnih djelovanja i obrnuto, utjecaj vanjskih djelovanja na otpornost. Posljedično, nije moguće provoditi zasebna faktoriranja proračunskim koeficijentima, kao u konstrukterstvu.

Dominantan kriterij za odabir vrijednosti proračunskih koeficijenata, ponajviše materijalnih, s obzirom na usvojeni proračunski pristup, nije probabilistička osnova, već usklađivanje s dosadašnjom, iskustvenom marginom sigurnosti.

Pri analizama stanja stabilnosti kosina, kod značajnijih vanjskih povremenih i/ili seizmičkih djelovanja, pojavljuje se, strogo primjenom usvojenih obrazaca iz novih propisa, povećana konačna, ekvivalentna margina sigurnosti. Posljedica je pojava konzervativnijih rješenja. Konkretno, pri određivanju nagiba kosina od prirodnog tla ili odlagališta otpada, posljedica je potreba za smanjenjem njihovih nagiba, a time i skupljim i neracionalnijim rješenjima.

Za ilustraciju opisanih zadaća napravljena je analiza margina sigurnosti za simplificiran i idealiziran slučaj proračuna stabilnosti homogene kosine za nedrenirano stanje i ravnu kliznu plohu, za dvije projektne situacije. Pokazano je da se primjenom novih obrazaca, na pokaznom primjeru, dobiva konzervativnije rješenje, s povećanjem obima radova iskopa za cca 20 %.

Daljnji rad na istraživanju treba obuhvatiti općenitije slučajeve s tečenjem vode, uslojenim tlom, kružnim i poligonalnim kliznim ploham, utjecajem vanjskog povremenog djelovanja i dr. Rezultati budućih analiza bi trebali imati za posljedicu eventualnu korekciju usvojenih, regulatornih obrazaca, a u cilju postizanja racionalnijih tehničkih rješenja zadaća iz geotehničkog inženjerstva. Mogući pristup je smanjenje potrebne vrijednosti faktora konzervativnosti (ODF) za projektne situacije izvanrednih djelovanja.

7. LITERATURA

Hansen, Brinch. J. (1956) Limit state and safety factors in soil mechanics, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bulletin No. 1

HRN EN 1997-1:2008 (2008) Eurokod 7, Geotehničko projektiranje – 1. dio, Opća pravila (EN 1997-1:2004)

HRN EN 1997-2:2008 (2008) Eurokod 7, Geotehničko projektiranje – 2. dio, Eurocode 7, Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla, (EN 1997-2:2007)

HRN EN 1997-1:2012/NA (2012) Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila – Nacionalni dodatak; HRN EN 1997-1:2012

Pravilnik o tehničkim normativima za projektiranje i izvedbu radova na temeljenju građevinskih objekata (1974) Sl. List. 34/74.

Pravilnik o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata (1990) HRN 1990. Sl. List. 15/90