

28-30. 09. 2022.  
ARANĐELOVAC



# ZBORNİK RADOVA SA NACIONALNOG KONGRESA

## U SARADNJI SA



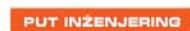
Република Србија  
Министарство  
просвете, науке и  
технолошког развоја



Инжњерска  
комора  
Србије

## POKROVITELJ

## PLATINASTI SPONZORI



## ZLATNI SPONZORI



CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

624(082)(0.034.2)  
69(082)(0.034.2)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије (Београд). Национални конгрес (16 ; 2022 ; Аранђеловац)

Zbornik radova sa Nacionalnog kongresa DGKS ASES [Elektronski izvor] / Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 16. Kongres, 28 - 30. 09. 2022., Aranđelovac ; [urednici Zlatko Marković, Ivan Ignjatović, Jelena Dobrić]. - Beograd : Univerzitet, Građevinski fakultet : Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 2022 (Aranđelovac : Grafopak). - 1 USB fleš memorija ; 5 x 2 x 1 cm

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 250. - Bibliografija uz svaki rad. - Summaries.

ISBN 978-86-7518-226-9 (GF)

а) Грађевинарство -- Зборници

COBISS.SR-ID 74850313

<b>Izdavač:</b>	<b>Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet</b> Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/I
<b>Suizdvač:</b>	<b>Društvo građevinskih konstruktera Srbije</b> Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73
<b>Urednici:</b>	prof. dr Zlatko Marković v.prof. dr Ivan Ignjatović v.prof. dr Jelena Dobrić
<b>Tehnička priprema:</b>	doc. dr Nina Gluhović doc. dr Marija Todorović dr Isidora Jakovljević
<b>Grafički dizajn:</b>	Tijana Stevanović
<b>Dizajn korica:</b>	Luka Pavelka
<b>Štampa:</b>	Grafopak, Aranđelovac
<b>Tiraž:</b>	250 primeraka

**Beograd, septembar 2022.**

*Nikola Obradović<sup>1</sup>, Ratko Salatić<sup>2</sup>*

## **SEIZMIČKA ANALIZA FLEKSIBILNIH UKOPANIH POTPORNIH KONSTRUKCIJA PREMA RAZLIČITIM TEHNIČKIM NORMATIVIMA**

### **Rezime:**

Prikazane su odredbe vezane za projektovanje fleksibilnih ukopanih potpornih zidova na dejstvo zemljotresa za tri izabrana seizmička propisa – Evrokod 8, nacрта Pravilnika o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima iz 1986. godine i prema odredbama američkih propisa AASHTO za seizmički proračun potpornih konstrukcija iz 2009. godine. Na primeru jednostavne ukopane nepoduprte potporne konstrukcije izvedene u krupnozrnom tlu izvršena je uporedna analiza seizmičkog proračuna primenjući dva numericka postupka prema nabrojanim propisa. Određeni su seizmički pritisci tla, potrebne dubine ukopavanja, kao i pomeranja. Iz rezultata proračuna izvedeni su zaključci i date preporuke za analizu ovog tipa potpornih konstrukcija na dejstvo zemljotresa.

*Кljučне речи: potporne konstrukcije, seizmički pritisci tla, Evrokod, AASHTO*

## **SEISMIC DESIGN OF FLEXIBLE EMBEDDED RETAINING WALLS ACCORDING TO DIFFERENT SEISMIC CODES**

### **Summary:**

A review of provisions for seismic design of flexible embedded retaining walls according to three selected seismic codes is presented. The selected codes are: Eurocode 8, draft of Rulebook on technical norms for design and calculation of structures in seismic areas (1986) and seismic provisions in AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2009). A comparative analysis of design of a simple flexible embedded unsupported retaining wall built in non-cohesive soil is done according to previously mentioned codes using two different numerical methods. Seismic soil pressures, embedment depth and horizontal displacements are calculated and compared. Conclusions are made based on the results of this example and recommendations for seismic analysis of this specific type of retaining structures are given.

*Key words: retaining walls, non-gravity retaining walls, seismic soil pressure, Eurocode, AASHTO LRFD*

<sup>1</sup> MSc, asistent, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, nobradovic@grf.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Dr, redovni profesor, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, rsalatic@grf.bg.ac.rs

## 1. UVOD

Savremeni seizmički propisi podrazumevaju neophodnost projektovanja ovog tipa konstrukcija na dejstvo zemljotresa. U radu Ostadana [1] dat je pregled oštećenja raznih potpornih konstrukcija nakon razornih zemljotresa. Glavni uzroci oštećenja su bili posledica povećanja pritisaka tla tokom dejstva zemljotresa. Pogotovo su osetljive one potporne konstrukcije, koje su fundirane ili su okružene sa tлом koje je sklono likvefakciji. Projektovanje potpornih konstrukcija prema uslovu da ne pretrpe strukturna oštećenja nije dovoljno, već se pojavljuje i potreba i da zaostala pomeranja konstrukcija budu u dozvoljenim granicama, kako bi bili zadovoljeni estetski i kriterijumi upotrebljivosti. Potporne konstrukcije razmatrane u ovom radu spadaju u grupu ukopanih potpornih konstrukcija sa spoljašnjom stabilizacijom tla, kao što su priboji od čeličnih, betonskih ili drvenih talpi, zidovi od razmaknutih šipova sa veznom gredom, zidovi od tangentnih/sekantnih šipova i armirano betonske dijafragme.

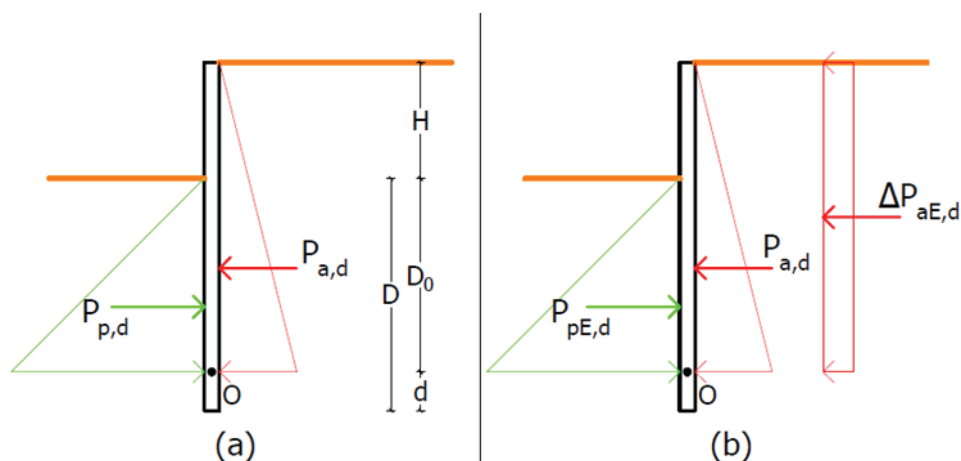
Potporne konstrukcije se na dejstvo zemljotresa mogu analizirati primenom pseudo-statičkih metoda ili direktnom dinamičkom analizom. Pseudo-statička metoda je uprošćen postupak, gde se dejstvo zemljotresa uzima kao set ekvivalentnih horizontalnih i vertikalnih inercijalnih sila koje deluju na sve mase. Veličina ovih ekvivalentnih sila zavisi od seizmičke zone, veličine dozvoljenih pomeranja tokom zemljotresa, kao i trajnih pomeranja potporne konstrukcije koja su prihvatljiva nakon prestanka zemljotresa. Direktnom dinamičkom analizom zasnovanom na postupcima teorije dinamike konstrukcija i tla se utvrđuje ponašanje konstrukcije u elastičnom i neelastičnom području za vremenske istorije ubrzanja tla očekivanih zemljotresa na lokaciji konstrukcije. Bilo koja metoda analize konstrukcije u skladu sa principima dinamike konstrukcija je prihvatljiva, ako je proverena inženjerskom praksom i merenjima.

U okviru rada razmatrane su odredbe tri seizmička propisa koje se odnose na ovaj tip konstrukcija. Evrokodovi [2], [3], [4], su standardi čija je primena od 2020. godine obavezna u Srbiji. Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima iz 1986. [5] godine nikada nije usvojen, ali su ga primenjivali inženjeri u praksi. Pravilnik je sadržao odredbe vezane za potporne konstrukcije koje su slične onima iz Evrokodova koji su usvojeni decenijama kasnije. Američki propisi AASHTO [6,7], za proračun mostovskih konstrukcija, sadrže detaljne odredbe za projektovanje svih vrsta potpornih konstrukcija na dejstvo zemljotresa. Svi navedeni propisi predviđaju da se seizmičko opterećenje može redukovati faktorom duktilnosti, što omogućava smanjenje potrebnih dimenzija konstrukcije na račun povećanih zaostalih pomeranja. Ukoliko su zaostala pomeranja prihvatljiva, projektovanje na takav način može rezultirati ekonomičnim konstrukcijama.

## 2. METODE PRORAČUNA UKOPANIH POTPORNH KONSTRUKCIJA

Proračun ovog tipa potpornih konstrukcija podrazumeva uspešnu identifikaciju situacija i mehanizama koji mogu da se pojave u konstrukciji ili njenom delu, a koji su kritični u odnosu na nosivost, upotrebljivost i trajnost konstrukcije. Prilikom proračuna mora se uzeti u obzir interakcija tla i konstrukcije jer je konstrukcija jednim delom opterećena pritiscima tla, a drugim delom oslonjena na tlo koristeći njegovu otpornost. Jedna od klasičnih metoda granične

ravnoteže za proračun je postupak zasnovan na Blum-ovoj metodi nepomerljivog oslonca tla. Ova metoda je pogodna za procenu potrebnih dimenzija potporne konstrukcije koje se dalje koriste kao ulazni podaci za naprednije analize. Za poznatu visinu  $H$  poduprtog tla, potrebno je odrediti dubinu ukopavanja tako da je zadovoljena stabilnost potporne konstrukcije. U slučaju statičkih proračunskih situacija, na konstrukciju deluju sa desne strane sile aktivnog pritiska tla  $P_{a,d}$ , a sa leve strane pasivni otpori  $P_{p,d}$  (Slika 1.a). U slučaju seizmičke proračunske situacije, sa desne strane na konstrukciju deluju sile seizmičkih aktivnih pritisaka tla koji se mogu podeliti na statičke aktivne pritiske  $P_{a,d}$  i dodatne pritiske usled dejstva zemljotresa  $\Delta P_{aE,d}$ . Dok sa leve strane deluju seizmički pasivni pritisci  $P_{pE,d}$  (Slika 1.b). Inercijalne sile usled težine potporne konstrukcije mogu da se zanemare [4,6]. Potporna konstrukcija se tretira kao kruta konstrukcija koja rotira oko neke tačke ispod iskopa (tačka O). Pritisaci tla na zid ispod tačke O se zamenjuju silom koja deluje u tački O. Potrebna dubina ukopavanja se određuje iz uslova ravnoteže momenata svih sila u odnosu na tačku O. Potrebno je odrediti dubinu  $D_0$ , na kojoj se nalazi tačka O, tako da je zadovoljen prethodni uslov ravnoteže. Dobijena dubina se uveća za oko 20% kako bi se dobila ukupna dubina ukopavanja D. Pretpostavlja se da se konstrukcija dovoljno pomera da se mogu javiti aktivni pritisci, dok je upitno da li se dovoljno pomera za aktivaciju pasivnih otpora. Zbog toga pasivne otpore ne bi trebalo uzimati u punom iznosu, već ih treba redukovati. Iz prethodne analize se ne mogu odrediti deformacije potporne konstrukcije, zbog čega treba koristi naprednije metode analize.



Slika 1 – Metoda granične ravnoteže za proračun stabilnosti potporne konstrukcije: (a) statičke proračunske situacije, (b) seizmička proračunska situacija

Smatra se da je potporna konstrukcija stabilna na preturanje (granično stanje ULS GEO), ako je zadovoljena sledeća relacija (1) za statičke proračunske situacije, odnosno (2) za seizmičke proračunske situacije:

$$\frac{1}{3} \cdot P_{a,d} \cdot (H + D_0) \leq \frac{1}{3} \cdot P_{p,d} \cdot D_0 \quad (1)$$

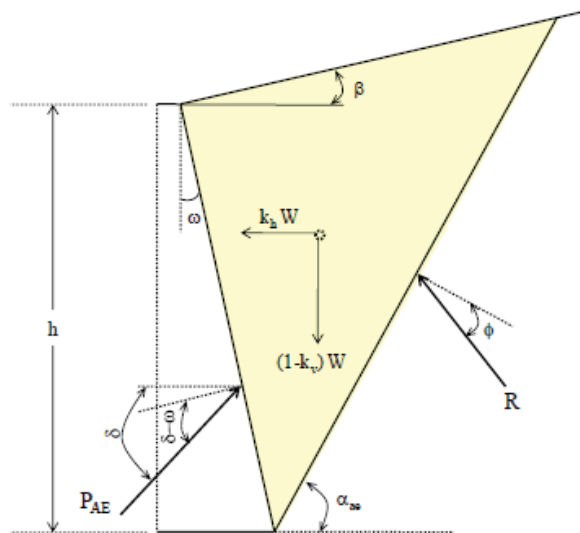
$$\frac{1}{3} \cdot P_{a,d} \cdot (H + D_0) + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{aE,d} \cdot (H + D_0) \leq \frac{1}{3} \cdot P_{pE,d} \cdot D_0 \quad (2)$$

Statički pritisci tla se mogu odrediti prema poznatim relacijama Mehanike tla. Deformacije potporne konstrukcije mogu se odrediti koristeći proračun zasnovan na Winkler-ovoj hipotezi,

metodi konačnih elemenata, metodi konačnih razlika i dr. Zbog kompleksnosti tih proračuna neophodna je upotreba računarskih programa.

## 2.1 SEIZMIČKI PRITISCI TLA

Aktivni seizmički pritisci tla iza zida i pasivni seizmički otpori tla ispred zida zavise od karakteristika tla iza i ispred zida, geometrije zida i terena iza zida, kao i od seizmičkog koeficijenta,  $k_h$ , koji zavisi od seizmičnosti lokacije na kojoj se nalazi objekat. Mononobe-Okabe-ova teorija (M-O teorija) za određivanje seizmičkih pritisaka tla se najčešće koristi u modernim seizmičkim propisima. Ova teorija je proširenje Coulomb-ove teorije pritisaka tla, tako što uključuje horizontalne i vertikalne inercijalne sile koje deluju na tlo u okviru aktivnog, odnosno pasivnog klina. Uticaj vertikalnog ubrzanja tla na veličinu seizmičkih pritisaka tla se najčešće ignoriše. Jedan od razloga je taj što vertikalno ubrzanje nije u istoj fazi i ima drugačije frekventne karakteristike od horizontalnog ubrzanja. Drugi razlog je što se maksimum vertikalnog ubrzanja neće dogoditi istovremeno sa maksimumom horizontalnog ubrzanja.



Slika 2 – Uslovi ravnoteže za određivanje aktivnih seizmičkih pritisaka tla prema Mononobe-Okabe-ovoj teoriji [7]

Ako se ignoriše vertikalno ubrzanje tla, aktivni seizmički pritisci se mogu sračunati prema:

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_{AE} \quad (3)$$

gde je:  $\gamma$  zapreminska težina tla,  $H$  visina tla (aktivnog klina) i  $k_{AE}$  koeficijent aktivnog seizmičkog pritiska. Sila sračunata prema izrazu (3) sadrži i statičke i dinamičke pritiske tla. Oduzimanjem statičkih pritisaka od sile  $P_{AE}$  dobijaju se čisto dinamički pritisci tla. Za statičke pritiske se usvaja da deluju na jednoj trećini visine zida, dok dinamički deluju na polovini visine zida. Koeficijent  $k_{AE}$  zavisi od ugla unutrašnjeg trenja tla iza zida  $\phi$ , ugla nagiba zadnje ivice zida u odnosu na horizontalu  $\omega$ , ugla nagiba terena iza zida u odnosu na horizontalu  $\beta$ , ugla trenja između tla i zadnje ivice zida  $\delta$ , i horizontalnog seizmičkog koeficijenta  $k_h$ , prema sledećem izrazu:

$$k_{AE} = \frac{\sin^2(\phi - \theta + \omega)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \omega \cdot \sin(\omega - \theta + \delta) \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \theta - \omega)}{\sin(\omega - \theta - \delta) \cdot \sin(\beta + \omega)}} \right]^2} \quad (4)$$

gde je  $\theta$  ugao seizmičke inercije dat

$$\theta = \tan^{-1} [k_h] \quad (5)$$

pasivni otpori se mogu sračunati prema

$$P_{PE} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_{PE} \quad (6)$$

gde je  $k_{PE}$  koeficijent pasivnih otpora koji se može sračunati prema:

$$k_{AE} = \frac{\sin^2(\phi - \theta + \omega)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \omega \cdot \sin(\theta + \omega) \cdot \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin \phi \cdot \sin(\phi + \beta - \theta)}{\sin(\omega + \beta) \cdot \sin(\omega + \theta)}} \right]^2} \quad (7)$$

Prethodno izložena teorija za određivanje seizmičkih pritisaka ima nekoliko ograničenja. Za određivanje aktivnih seizmičkih pritisaka podrazumeva da je tlo u okviru seizmičkog aktivnog klina uniformno nekoherentno vodopropusno tlo i da je nagib terena iza zida konstantan. U praksi tlo u okviru aktivnog klina najčešće će biti koherentno (sa kohezijom), heterogenog sastava, sa promenljivim nagibima terena iza zida. U tim slučajevima kao alternativa M-O teoriji može se koristiti metoda probnih klinova (Trial Wedge Method), teorije koje pretpostavljaju da je površina klizanja aktivnog klina u obliku logaritamske spirale (Log Spiral Earth Pressure Theory), generalizovana metoda granične ravnoteže (kao pri analizi stabilnosti kosina). M-O teorija se ne preporučuje za određivanje pasivnih otpora, jer može preceniti njihovu veličinu, već se preporučuje Log Spiral ili generalizovana metoda granične ravnoteže [7]. Svi razmatrani propisi preporučuju upotrebu M-O teorije za određivanje pritisaka tla na pomerljive potporne konstrukcije. U slučaju da se ne mogu ostvariti pomeranja potporne konstrukcije potrebna za mobilisanje punih iznosa aktivnih pritisaka i pasivnih otpora kao u slučaju podrumskih zidova, ukopanih podzemnih konstrukcija i slično, treba koristiti alternativna rešenja [1], [4], [6], [7].

### 3. SEIZMIČKI PROPISI

#### 3.1 EVROKODOVI

Evrokod 7, deo 1 sadrži pravila za projektovanje ukopanih potpornih konstrukcija za stalne, prolazne i incidentne proračunske situacije. Evrokod 8, deo 5 sadrži pravila za projektovanje za seizmičke proračunske situacije. Za stalne i prolazne proračunske situacije koristi se proračunski pristup 2. Parcijalni faktori za dejstva, materijalne parametre i otpornosti dati su u Nacionalnom aneksu. Pasivne pritiske koji obezbeđuju stabilnosti potporne konstrukcije treba tretirati istovremeno kao otpore i povoljna stalna dejstva [8]. Za incidentne proračunske situacije parcijalni faktori za dejstva ili efekte dejstava su jednaki 1.0, dok su vrednosti parcijalnih faktora za parametre materijala i otpornosti isti kao za stalne i prolazne proračunske situacije. Za seizmičke proračunske situacije svi parcijalni faktori imaju vrednost 1.0. Horizontalni seizmički koeficijent se može odrediti prema sledećem izrazu:

$$k_h = \alpha \frac{S}{r} \quad (8)$$

gde je:  $\alpha$  odnos projektnog ubrzanja za tlo tipa A i gravitacionog ubrzanja,  $S$  je faktor tla koji zavisi od tipa tla,  $r$  je faktor duktilnosti koji zavisi od dopuštenih pomeranja potporne konstrukcije. Za zidove visine manje od 10 metara, seizmički koeficijent se može uzeti da je konstantan po visini. Faktor duktilnosti je veći za potporne zidove koji mogu da pretrpe veća trajna pomeranja. Za slobodne masivne zidove koji mogu da podnesu trajna pomeranja do  $300\alpha S$  (mm) faktor duktilnosti ima vrednost 2.0, dok za zidove koji mogu da podnesu trajna pomeranja do  $200\alpha S$  ima vrednost 1.5. Za savitljive armirano betonske zidove, usidrene ili ukružene zidove, zidove fundirane na šipovima, podrumске zidove i krilne zidove kod mostova faktor duktilnosti ima vrednost 1.0. U slučaju da je tlo oko ili ispod zida podložno likvefakciji, faktor duktilnosti ne sme biti veći od 1.0. Za zidove visina većih od 10 metara, potrebne su dodatne analize pri određivanju faktora duktilnosti koje su izložene u okviru aneksa E [4].

### 3.2 PRAVILNIK O TEHNIČKIM NORMATIVIMA ZA PROJEKTOVANJE I PRORAČUN INŽENJERSKIH OBJEKATA U SEIZMIČKIM PODRUČJIMA

Ovaj pravilnik kategorizuje sve inženjerske konstrukcije u dve kategorije. Potporni zidovi sa visinom do 20 metara spadaju u prvu kategoriju, dok zidovi sa visinom većom od 20 metara su van kategorije. U slučaju da se potporna konstrukcija nalazi u seizmičkom području stepena seizmičnosti X po skali MCS, tretira se kao da je objekat van kategorije. Inženjerski objekti treba da budu tako projektovani da zemljotresi najačeg inteziteta mogu prouzrokovati oštećenja konstrukcije, ali da ne sme doći do rušenja. Za projektovanje inženjerskih objekata van kategorije potrebno je prethodno izvršiti detaljno proučavanje seizmičnosti lokacija namenjenih za izgradnju konstrukcija sa određivanjem dva tipa projektnih zemljotresa – tip Z1 i tip Z2. Zemljotres tip Z1 je najjači očekivani zemljotres koji može da pogodi objekat u toku njegovog perioda eksploatacije, dok je tip Z2 onaj zemljotres koji može da se dogodi u bilo kom vremenskom periodu. Kod nastajanja zemljotresa Z1 objekat mora ostati bez oštećenja konstrukcionog sistema i sa malim ili nikakvim oštećenjima nekonstruktivnih elemenata. Kod nastajanja zemljotresa Z2 objekti mogu pretrpeti izvesna konstrukciona i nekonstrukciona oštećenja, ali ne sme doći do parcijalnog ili potpunog rušenja objekta. Konstrukcije se mogu analizirati metodom spektralne analize ili metodom dinamičke analize. Metodom spektralne analize proračunavaju se konstrukcije objekata prve kategorije, kao i konstrukcije objekata van kategorije pri izradi investiciono-tehničke dokumentacije, idejnih rešenja i studija. Metodom dinamičke analize proračunavaju se objekti van kategorije pri izradi idejnih rešenja i glavnih projekata. Metoda spektralne analize za analizu fleksibilnih ukopanih konstrukcija je u principu identična pseudo-statičkoj analizi u Evrokodu. Horizontalni seizmički koeficijent određuje se kao proizvod:

$$k_h = K_s \cdot \psi = \frac{\ddot{X}_{max}}{\mu_p} \cdot \psi \quad (9)$$

gde je  $K_s$  koeficijent seizmičkog inteziteta za horizontalni pravac,  $\psi$  koeficijent redukcije koji ima vrednost 0.75,  $\ddot{X}_{max}$  maksimalno ubrzanje tla na lokaciji objekta za dejstvo zemljotresa Z1 ili Z2 izraženo u delovima od zemljinog ubrzanja. U slučaju da za lokaciju objekta ne postoje detaljna proučavanja seizmičnosti,  $\ddot{X}_{max}$  se može usvojiti na osnovu stepena seizmičnosti prema MCS skali. Propisani faktor duktilnosti,  $\mu_p$  iznosi 2.50 za objekte koji su izloženi zemljinom pritisku. Ovako propisana vrednost faktora duktilnosti značajno je veća u odnosu na



iste vrednosti propisane Evrokodom, što znači da ovaj pravilnik predviđa da su dopuštena veća zaostala pomeranja nakon zemljotresa.

### 3.3 ODREDBE PRAVILNIKA AASHTO ZA SEIZMIČKI PRORAČUN

Prema ovom pravilniku postoje izuzeci kada potporni zidovi ne moraju da se analiziraju na dejstvo zemljotresa. U zavisnosti od nagiba terena iza zida i vrednosti maksimalnog horizontalnog seizmičkog koeficijenta,  $k_{max}$ , može se izostaviti seizmički proračun. To su sledeći slučajevi: ravan teren iza zida i  $k_{max}$  manje od 0.3, teren u nagibu 3H:1V i  $k_{max}$  manje od 0.2 i teren u nagibu 2H:1V i  $k_{max}$  manje od 0.1. Maksimalni horizontalni seizmički koeficijent se računa prema:

$$k_{max} = F_{PGA} \cdot PGA \quad (10)$$

gde je  $F_{PGA}$  faktor tla koji zavisi od tipa tla, a PGA maksimalno ubrzanje tla. U slučaju da je tlo prema AASHTO klasifikaciji klase A ili B, onda vrednost  $k_{max}$  sračunatu prema (10) treba uvećati za 20%. Tako sračunata vrednost  $k_{max}$  je primenjiva samo na zidove visine do 7 metara koji ne mogu da podnesu pomeranja veličine do 2.5 do 5.0 cm tokom zemljotresa. Za zidove veće visine, vrednost  $k_{max}$  može da se redukuje kako bi se uzelo u obzir rasipanje talasa. Za zidove koji mogu da podnesu pomeranja od najmanje 2.5 do 5.0 cm,  $k_{max}$  se može redukovati faktorom duktilnosti. Tako da se horizontalni seizmički koeficijent može odrediti prema:

$$k_h = r \cdot \alpha \cdot k_{max} \quad (11)$$

gde je  $r$  faktor duktilnosti manji ili jednak 1.0,  $\alpha$  faktor koji uzima u obzir visinu zida koji je manji ili jednak 1.0. Što zid može da izdrži veća pomeranja, time je i veća redukcija horizontalnog seizmičkog koeficijenta. Za krute zidove koji ne mogu da podnesu ni najmanja pomeranja, faktor duktilnosti ima vrednost 1.0. Za zidove koji mogu da izdrže pomeranja od 2.5 do 5.0 cm, faktor duktilnosti ima vrednost 0.5. Za zidove koji mogu da podnesu veća pomeranja od 5.0 cm, faktor duktilnosti može još smanjiti. U tom slučaju proračun faktora duktilnosti je iterativan, odnosno njegova vrednost se smanjuje sve dok su pomeranja konstrukcije usled projektnog zemljotresa prihvatljiva. Preporučuje se da se za ovaj tip potpornih konstrukcija usvoji vrednost faktora duktilnosti od 1.0. U slučaju da se dokaže da zid može da pretrpi veća pomeranja tokom zemljotresa, faktor duktilnosti se može dalje redukovati.

## 4. NUMERIČKI PRIMER

Potporna konstrukcija u vidu armiranobetonske dijafragme treba da se izvede u krupnoznom tlu sledećih karakteristika: ugao unutrašnjeg trenja  $\phi=32^\circ$ , zapreminske težine 20 kN/m<sup>3</sup>, Poisson-ov koeficijent  $\nu=0.3$ , modul elastičnosti za velike deformacije  $E_s=25$  MPa, modul smicanja za male deformacije  $G_o=48$  MPa. Visina poduprtog tla je  $H=4.0$ m. U okviru računskog primera prvo će se odrediti potrebna dubina ukopavanja  $D$  kako bi se zadovoljilo ULS GEO za stalne i prolazne proračunske situacije prema odredbama Evrokoda primenom metode granične ravnoteže. Za usvojenu dubinu ukopavanja izvršiće se kontrola ULS GEO za seizmičke proračunske situacije prema odredbama prethodno prikazanih propisa. Na lokaciji potporne konstrukcije, projektno ubrzanje tla za tlo tipa A iznosi 0.15g. Debljina slojeva tla na lokaciji je nekoliko desetina metara. Brzina smičućih talasa se može sračunati iz modula smicanja za male deformacije i težine tla i iznosi 153.6 m/s. Prema Evrokodu 8, kategorija tla je D, prema Pravilniku [5] kateogije III, a prema pravilniku AASHTO tlo je klase E. U okviru

proračuna seizmičkih pritisaka tla variraće se vrednost faktora duktilnosti. Za proračun prema Evrokodu vrednosti faktora duktilnosti su 1.0, 1.5 i 2.0. Za domaći Pravilnik [5], vrednosti faktora duktilnosti su 1.0, 1.5, 2.0 i 2.5. Za proračun prema pravilniku AASHTO vrednosti faktora duktilnosti su 1.0 i 0.5. U narednoj tabeli prikazane su vrednosti horizontalnog seizmičkog koeficijenta za sve propise i vrednosti faktora duktilnosti.

Tabela 1 - Vrednosti horizontalnog seizmičkog koeficijenta

Propisi	horizontalni seizmički koeficijenti $k_h$			
	$r=1.0$	$r=1.5$	$r=2.0$	
Evrokod: $\alpha=0.15, S=1.35$	0.2025	0.135	0.10125	
Pravilnik domaći: $\check{X}_{max}=0.15, \psi=0.75$	$\mu_p=1.0$	$\mu_p=1.5$	$\mu_p=2.0$	$\mu_p=2.5$
	0.1125	0.075	0.05625	0.045
Pravilnik AASHTO: $PGA=0.15g, F_{PGA}=2.1, \alpha=0.9$	$r=1.0$		$r=0.5$	
	0.2835		0.14175	

Potrebna dubina ukopavanja za prethodno definisane ulazne podatke dobija se rešavanjem jednačine (1) za statičke proračunske situacije. Za visinu  $H$  od 4.0 metra potreba dubina ukopavanja iznosi  $D=6.3$  m. Ukoliko se u jednačini (2) momenti od aktivnih pritisaka oko tačke O označe sa  $M_{AE,Ed}$ , a momenti od pasivnih otpora oko tačke O označe sa  $M_{AE,RD}$ , onda se jednačina (2) može napisati u sledećem obliku:

$$M_{AE,Ed} / M_{AE,Rd} \leq 1.0 \quad (12)$$

Za usvojenu dubinu ukopavanja, izvršena je kontrola (12) za seizmičku proračunsku kombinaciju za različite propise i vrednosti faktora duktilnosti (u skladu sa Tabelom 1).

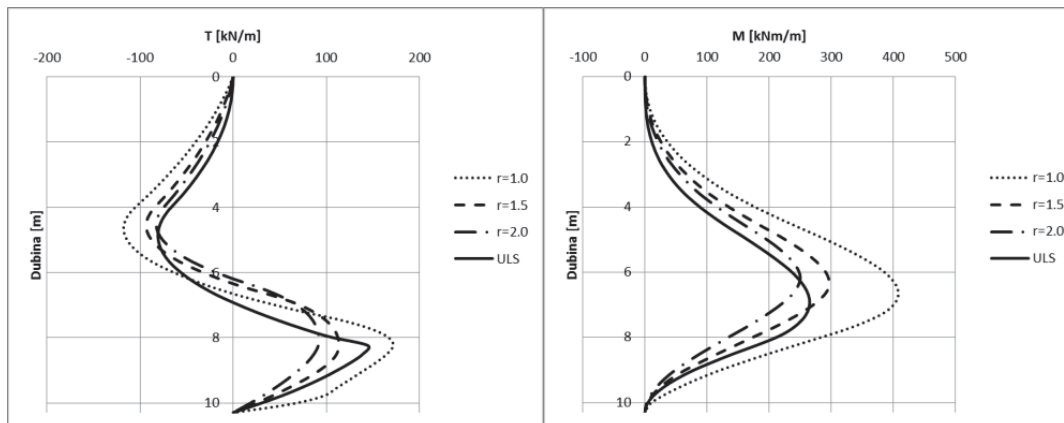
Tabela 2 – Kontrola stabilnosti potporne konstrukcije pri dejstvu zemljotresa

Propisi	$M_{AE,Ed} / M_{AE,Rd}$			
	$r=1.0$	$r=1.5$		$r=2.0$
Evrokod	0.987	0.801		0.721
Pravilnik domaći	$\mu_p=1.0$	$\mu_p=1.5$	$\mu_p=2.0$	$\mu_p=2.5$
	0.747	0.664	0.626	0.604
Pravilnik AASHTO	$r=1.0$		$r=0.5$	
	1.271 !		0.818	

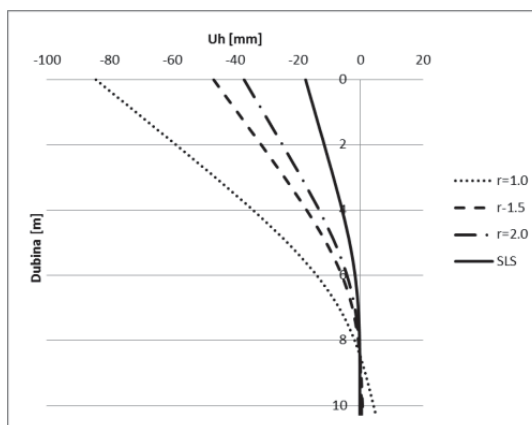
Kao što je prikazano u prethodnoj tabeli, usvojena dubina ukopavanja zadovoljava kriterijum nosivosti za proračun prema Evrokodu, domaćem Pravilniku [5] i prema AASHTO pravilniku za vrednost faktora duktilnosti od 0.5. Dok prema AASHTO pravilniku za vrednost faktora duktilnosti od 1.0 ne zadovoljava, odnosno trebalo bi povećati dubinu ukopavanja na  $D=7.7$  metara. Rezultati proračuna prema Evrokodu ukazuju da je usvojena dubina ukopavanja za stalne i prolazne proračunske situacije dovoljna i za seizmičke proračunske situacije za vrednost faktora duktilnosti od 1.0, što je i vrednost koja je preporučena za ovaj tip potpornih konstrukcija.

Kako bi se utvrdio uticaj faktora duktilnosti na veličinu statičkih uticaja i horizontalnih pomeranja, izvršena je seizmička analiza potporne konstrukcije iz prethodnog primera primenom Winkler-ovog postupka prema odredbama Evrokoda za vrednosti faktora duktilnosti od  $r=1.0, 1.5, 2.0$ . Zbog složenosti proračuna prema Winkler-ovom postupku, za proračun deformacija potporne konstrukcije primenio se programski paket GEO5 – Sheeting Check.

Računarski program koristi metodu zavisnih pritisaka za proračun deformacija potpornih konstrukcija uklještenih u tlo. Za dimenzije potporne konstrukcije usvojeno je da je debljina 40cm i da je izrađena od betona C30/37.



Slika 3 – Dijagrami transverzalnih sila i momenata po visini potporne konstrukcije za različite faktore duktilnosti (seizmički proračun) i statički proračun ULS



Slika 4 – Horizontalna pomeranja potporne konstrukcije za seizmičko dejstvo i za statičko opterećenje (SLS)

Statički uticaji za seizmičku proračunsku situaciju na Slici 3. su najveći za najmanju vrednost faktora duktilnosti. Što je veći faktor duktilnosti, manje su vrednosti statičkih uticaja. Na Slici 3. pod ULS su date vrednosti uticaja za statičke proračunske situacije. Na Slici 4. punom linijom su data pomeranja potporne konstrukcije usled statičkog opterećenja za kontrolu graničnih stanja upotrebljivosti. Pomeranje vrha konstrukcije za statička opterećenja iznosi 17.5 mm. Pomeranje vrha za seizmička opterećenja za vrednost faktora duktilnosti od 1.0 iznosi 84.3 mm što znači da su pomeranja od zemljotresa 66.8 mm. Povećanjem faktora duktilnosti, bila bi potrebna manja dubina ukopavanja (da nije statička proračunska kombinacija merodavna), što bi rezultiralo većim pomeranjima potporne konstrukcije. Ukoliko su prihvatljiva veća pomeranja potporne konstrukcije, povećanje faktora duktilnosti bi smanjilo potrebne dimenzije. Nedostatak prethodnog proračuna primenom Winkler-ovog postupka je

nemogućnost da se odrede zaostala pomeranja, odnosno neophodna je primena naprednijih numeričkih metoda.

## 5. ZAKLJUČAK

Kao što je prikazano, postupak određivanja seizmičkih sila primenom pseudo-statičke analize svodi se na primenu M-O teorije uz poznate parametre tla i vrednost horizontalnog seizmičkog koeficijenta  $k_h$ . Horizontalni seizmički koeficijent se dobija kao količnik maksimalnog horizontalnog seizmičkog koeficijenta  $k_{max}$ , i faktora duktilnosti  $r$ . Prethodno prikazani propisi se razlikuju po tome kako se određuje  $k_{max}$  i  $r$ . Adekvatnim izborom faktora duktilnosti može se postići ušteda u potrebnim dimenzijama potporne konstrukcije. Povećanje faktora duktilnosti ima kao posledicu povećanje ukupnih i zaostalih pomeranja usled seizmičkog opterećenja.

Proračun prema domaćem Pravilniku je najmanje konzervativan, predviđa najveći faktor duktilnosti, odnosno da potporna konstrukcija može da pretrpi velika pomeranja bez dodatnih dokaza proračunom. Proračun prema AASHTO pravilniku daje najveća seizmička opterećenja, ali daje mogućnost za povećanje faktora duktilnosti, ako se pokaže da su ukupna i zaostala pomeranja prihvatljiva. Međutim, takav proračun je zahtevan u uobičajenoj inženjerskoj praksi. Evrokod isto zahteva stroge vrednosti faktora duktilnosti uz mogućnost povećanja minimalnih vrednosti faktora duktilnosti. Primena naprednih metoda direktne dinamičke analize zasnovanih na metodi konačnih elemenata uz korišćenje naprednih konstitutivnih modela predstavlja neophodnost u savremenom projektovanju potpornih konstrukcija.

## ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja preko projekta broj 200092.

## LITERATURA

- [1] Ostadan F. Seismic Soil pressure for building walls: An Updated approach, Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 25, 2005, 785-793.
- [2] Evrokod 7 – Geotehničko projektovanje – Deo 1: Opšta pravila
- [3] Evrokod 8 – Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade
- [4] Evrokod 8 – Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 5: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnički aspekti
- [5] Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima, 1986.
- [6] NCHRP Report 611 – Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes and Embankments, National Cooperative Highway Research Program, 2008
- [7] LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations, Reference Manual, 2009.
- [8] Vukićević M., Obradović N. Proračun ukopanih fleksibilnih potpornih konstrukcija prema Evrokodu 7, Građevinski kalendar 53, 2021, 29-40