

Primljen / Received: 16.2.2016.

Ispravljen / Corrected: 11.7.2016.

Prihvaćen / Accepted: 12.8.2016.

Dostupno online / Available online: 10.12.2016.

# Nelinearna seizmička analiza povijesne brane Topuzlu pri seizmičkom opterećenju različitih razina

## Autori:



Doc.dr.sc. **Erkut Sayın**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Firat, Elazig, Turska  
Tehnički fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
[erkutsayin@gmail.com](mailto:erkutsayin@gmail.com)



Izv.prof.dr.sc. **Muhammet Karaton**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Firat, Elazig, Turska  
Tehnički fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
[mkaraton@firat.edu.tr](mailto:mkaraton@firat.edu.tr)



Prof.dr.sc. **Yusuf Calayır**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Firat, Elazig, Turska  
Tehnički fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
[ycalayir@firat.edu.tr](mailto:ycalayir@firat.edu.tr)

Stručni rad

[Erkut Sayın, Muhammet Karaton, Yusuf Calayır](#)

## Nelinearna seizmička analiza povijesne brane Topuzlu pri seizmičkom opterećenju različitih razina

U radu je obrađena nelinearna analiza povijesne brane Topuzlu pri seizmičkom opterećenju različitih razina, uzimajući u obzir međudjelovanje čvrstog tijela i tekućine. Za analizu nelinearnog ponašanja materijala od kojeg je brana izgrađena koristi se model razmazanih pukotina koji uključuje omekšavanje pri deformaciji. Pretpostavljeno je da su domene akumulacije i tla linearno elastične. Za generiranje rješenja oblikovani su modeli konačnih elemenata u programske paketu ANSYS.

### Ključne riječi:

interakcija čvrstog tijela i tekućine, model razmazanih pukotina, umjetni akcelerogrami, nelinearna seizmička analiza

Professional paper

[Erkut Sayın, Muhammet Karaton, Yusuf Calayır](#)

## Nonlinear seismic analysis of historical Topuzlu Dam under different seismic loads

The nonlinear analysis of historical Topuzlu Dam under various seismic loads is presented in this study, taking into account the solid-fluid interaction. The smeared crack model, which includes strain softening, is used to examine nonlinear behaviour of the dam material. The reservoir and soil domains are assumed to be linearly elastic. The ANSYS finite element program is used for generation of solutions.

### Ključne riječi:

solid-fluid interaction, smeared crack model, artificial accelerograms, nonlinear seismic analysis

Fachbericht

[Erkut Sayın, Muhammet Karaton, Yusuf Calayır](#)

## Nichtlineare seismische Analyse des historischen Damms Topuzlu bei seismischen Einwirkungen

In dieser Arbeit wird die nichtlineare Analyse des historischen Damms Topuzlu bei seismischen Einwirkungen verschiedener Intensitäten bearbeitet. Dabei wird die Interaktion zwischen dem steifen Körper und der Flüssigkeit berücksichtigt. Bei der Analyse des nichtlinearen Verhaltens wird für das Material, aus dem der Damm besteht, ein Modell verschmierter Risse mit Enthärtung bei Verformungen angesetzt. Es wird angenommen, dass die Domänen der Akkumulation und des Bodens linear elastisch sind. Um die Ergebnisse zu generieren, wurden im Programm ANSYS finite Elemente Modelle erstellt.

### Ključne riječi:

Interaktion steifer Körper und Flüssigkeiten, Modell verschmierter Risse, künstliche Beschleunigungszeitverläufe, nichtlineare seismische Analyse

## 1. Uvod

Povijesna zdanja jesu građevine koje služe kao most između prošlosti i sadašnjosti. Povijesne brane dio su povijesnog naslijeđa države. Brane se grade uglavnom da bi omogućile navodnjavanje i opskrbu pitkom vodom. Potres se smatra jednim od glavnih problema u vezi sa zaštitom povijesnih zdanja. Stoga treba odrediti seizmičko ponašanje povijesnih građevina nakon čega treba poduzeti mjere koje su potrebne da bi se takve građevine u što manjoj mjeri oštetile tijekom potresa, tj. da bi se sačuvala cjelovitost konstrukcije.

Ovisno o razini osjetljivosti i potrebnoj jednostavnosti modeliranja zida, danas se koriste tri različite metode modeliranja: detaljno mikromodeliranje, pojednostavljeno mikromodeliranje i makromodeliranje [1]. Metoda makromodeliranja najčešće se koristi za modeliranje velikih zidanih konstruktivnih sustava jer se tom metodom ostvaruju znatne uštede u vremenu potrebnom za računalne proračune [2, 3]. Fanning i Boothby [4] analizirali su tri zidana mosta na koje je nanoseno statičko opterećenje, a modelirani su primjenom metode makromodeliranja. Za nosive konstrukcijske elemente koristili su model razmazanih pukotina. Bernardeschi i dr. [5] analizirali su zvonik Buti u Italiji, i to makromodeliranjem dvaju stanja: utjecaja vlastite mase i utjecaja horizontalnih opterećenja, koja uključuju vlastitu masu. Karaton i dr. [6] ocijenili su nelinearno seizmičko ponašanje povijesnog mosta Malabadi, za što su koristili podatke o akceleraciji zabilježene tijekom potresa koji je 1992. pogodio Erzincan. Bayraktar i dr. [7] generirali su model konačnih elemenata za zvonik Aje Sofije u Trabzonu primjenom metode makromodeliranja, a nelinearna dinamička analiza provedena je za komponentu istok-zapad potresa u Erzincanu iz 1992. Sayın i dr. [8] modelirali su povijesni most Uzunok u Malatiji primjenom metode makromodeliranja, a proveli su linearnu i nelinearnu seizmičku analizu mosta. Pritom su koristili zapis akceleracije potresa koji je 2003. pogodio Bingol. Gonen i dr. [9] istraživali su naprezanja i deformacije zidanoga lučnog povijesnog mosta pri statičkome opterećenju, a primijenjen je pristup makromodeliranja. Istražen je linearno elastični odziv mosta.

Pretpostavljeno je da problemi interakcije između brane, tla i akumulacije uključuju međudjelovanje između tekućine i čvrstog tijela. Ta se interakcija može modelirati primjenom Eulerova, Lagrangeova ili Westergardova pristupa. Kada se primjenjuje Eulerov pristup, domene čvrstog tijela i tekućine odlikuju se slobodom pomaka, a u drugome na hidrodinamički tlak. Stoga se za obje domene trebaju koristiti elementi transformacije na kontaktu. Međutim, kod Lagrangeova pristupa i domena čvrstog tijela i domena tekućine odlikuju se slobodom pomaka. Zato za interakciju nisu potrebni posebni kontaktni elementi. U slučaju Westergardova pristupa pretpostavlja se da domena akumulacije predstavlja mase koje se dodaju uzvodno od brane.

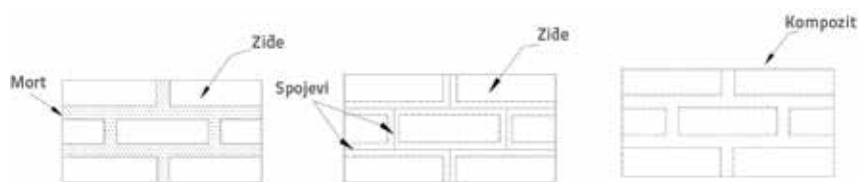
U ovome je istraživanju provedena nelinearna analiza povijesne brane Topuzlu (sultan Mahmud I.), pri čemu se u obzir uzima interakcija između čvrstog tijela i tekućine. Seizmičko ponašanje brane ocijenjeno je usporedbom rezultata. Model razmazanih pukotina, kojim se u obzir uzima omekšavanje pri deformaciji, koristi se za ocjenu nelinearnog ponašanja materijala od kojeg se sastoji brana. Pretpostavlja se da su domene akumulacije i tla linearno elastične. Interakcija između čvrstog tijela i tekućine (tj. između brane i tla – akumulacije) uzima se u obzir primjenom Eulerova pristupa. Kao seizmički učinak generirani su umjetni akceleroگرامi u skladu s proračunskim spektrom akceleracija koji je iskazan u turskome seizmičkom propisu za obalne i lučne konstrukcije (DLH'2007). U dinamičkim se analizama koristi kombinirani oblik opće a-metode i prediktor-korektor postupka [11].

## 2. Numeričko modeliranje zidanih konstrukcija

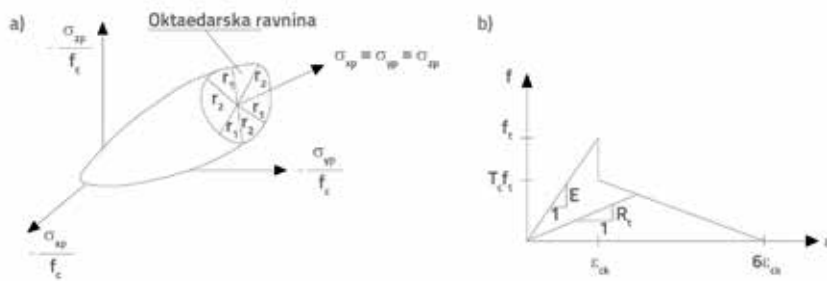
Ovisno o potrebnoj razini točnosti, za modeliranje zidanih konstrukcija uglavnom se koriste tri pristupa. Ti su pristupi (detaljni mikropriступ, pojednostavljeni mikropriступ i makropriступ) prikazani na slici 1. [1].

Prema detaljnome mikropriступu, svojstva materijala zidanih jedinica i morta, tj. modul elastičnosti, Poissonov koeficijent i gustoća, određuju se zasebno. U pojednostavljenom se modeliranju zidane jedinice proširuju i do polovice sloja morta. Stoga se sloj morta zanemaruje, a zidane se jedinice razdvajaju jedne od druge kontaktnim linijama. Makromodeliranje temelji se na modelu ekvivalentnog materijala, pri čemu se pretpostavlja da su građevinski elementi kompozit i ne radi se razlika između kamena, opeke i morta. Prema podacima iz literature, makropriступ koristi se za modeliranje velikih povijesnih konstrukcija jer se njime skraćuje vrijeme proračuna. U ovom se istraživanju brana modelira primjenom makropriступа.

Za modeliranje oštećenja/pojave pukotina u materijalu može se koristiti jedna od metoda mehanike loma i mehanike oštećenja. Kada se koristi mehanika loma, pukotina koja se javlja u materijalu može se modelirati primjenom jednog od dvaju pristupa, odnosno lokalnog pristupa (razmazane pukotine) ili globalnog pristupa (diskretne pukotine). Priступ s razmazanim pukotinama temelji se na preraspoređivanju matrice koja povezuje naprezanja i deformacije ovisno o opisu oslabljene površine u smjeru okomitom na vlačno naprezanje. Mehanika oštećenja jest lokalni pristup koji se temelji na istim načelima kao i model razmazanih pukotina [12, 13]. U pristupu s diskretnim



Slika 1. Pristupi koji se koriste za modeliranje zidanih konstrukcija: a) detaljno mikromodeliranje; b) pojednostavljeno mikromodeliranje; c) makromodeliranje



Slika 2. Troparametarski betonski model: a) ploha tečenja; b) Jednoosni odnos naprezanja i deformacije

pukotinama one se modeliraju opisivanjem zone diskontinuiteta u domeni kontinuuma, a naprezanje se izračunava na temelju teorija mehanike loma.

U ovom se istraživanju primjenom računalnog programa ANSYS za iniciranje pojave pukotina i drobljenja zidanih elemenata koristi betonski element Solid 65. U pristupu razmazanih pukotina u obzir se uzima pojava pukotina u elementu i njegovo drobljenje. Taj je element korišten u makromodeliranju zidanih konstrukcija [4]. Kao što se vidi na slici 2.a, ploha tečenja elementa jest ploha tečenja prema radu Williama i Warnkea [14], a odlikuje se oktaedarskom ravninom. Na toj slici oznake  $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{yv}$  i  $\sigma_{zp}$  predstavljaju normalna naprezanja, dok  $f_c$  predstavlja jednoosnu tlačnu čvrstoću materijala. Kao što je vidljivo na slici 2.b, idealizirana krivulja prikazuje jednoosni odnos naprezanja i deformacija za promatrani materijal. Na toj slici  $f_c$  jest jednoosna vlačna čvrstoća materijala,  $E$  početni modul elastičnosti, a  $\epsilon_{ck}$  maksimalna deformacija kod pojave pukotina.  $T_c$  jest koeficijent smanjenja vlačne čvrstoće nakon maksimalne deformacije kod pojave pukotina, a  $R_c$  sekantni modul elastičnosti u području omekšavanja materijala. Krajnja deformacija također je ograničena i iznosi  $6\epsilon_{ck}$ .

### 3. Eulerova formulacija sustava dinamičke interakcije između tekućine i čvrstog tijela

Trodimenzionalnu jednadžbu valova za linearno elastičanu, neviskoznu i bezvrtložnu tekućinu male amplitude prikazali su Zeinkiewicz i Taylor [15]:

$$P_{,xx} + P_{,yy} + P_{,zz} = \frac{1}{C^2} \ddot{P} \quad (1)$$

gdje je  $P$  hidrodinamički tlak, dok su  $P_{,xx}$ ,  $P_{,yy}$ ,  $P_{,zz}$  i  $\ddot{P}$  dvostruke parcijalne derivacije hidrodinamičkog tlaka u odnosu na smjerove  $x$ ,  $y$  i  $z$  te u odnosu na vrijeme.  $C$  jest brzina zvuka u tekućini. Jednadžbe strujanja sustava sastavljenog od tekućine i čvrstog tijela pri dinamičkoj pobudi mogu se iskazati onako kako su to prikazali autori Calayir i Karaton [16]:

$$[M_s] \{\ddot{U}_s\} + [C_s] \{\dot{U}_s\} + \{F_s^{int}\} + [K_{sf}] \{P\} = \{F_s\} \quad (2)$$

$$[M_{fs}] \{\ddot{U}_s\} + [M_f^p] \{\dot{P}\} + [C_f^p] \{P\} + [K_f^p] \{P\} = \{F_{fg}\} \quad (3)$$

gdje su  $[M_s]$  i  $[C_s]$  matrica masa i prigušenja za tijelo.  $\{\dot{U}_s\}$ ,  $\{U_s\}$ ,  $\{F_s^{int}\}$  i  $\{F_s\}$  jesu vektori relativne akceleracije, relativne brzine, unutarnjih sila i vanjskih sila za isti sustav.  $\{P\}$  jest vektor hidrodinamičkog tlaka, a  $\{\dot{P}\}$  i  $\{P\}$  njegova su prva i druga parcijalna derivacija.  $[K_f^p]$ ,  $[M_f^p]$  i  $[C_f^p]$  jesu matrice koeficijenta za vektore  $\{P\}$ ,  $\{\dot{P}\}$  i  $\{\ddot{P}\}$ .  $\{F_{fg}\}$  jest vektor sila međudjelovanja tijela na tekućinu.  $[R]$  jest matrica transformacije na kontaktu između tekućine i čvrstog tijela, a koristi se u

određivanju vektora opterećenja fluida zbog akceleracije čvrstog tijela te dodatnih opterećenja na tijelo uslijed tlakova u domeni tekućine. Vrijednosti za  $[M_{fs}]$  i  $[K_{fs}]$  mogu se izraziti kako slijedi:

$$[M_{fs}] = \rho [R] \quad (4.a)$$

$$[K_{sf}] = -[R]^T \quad (4.b)$$

gdje je  $\rho$  gustoća mase u domeni tekućine.

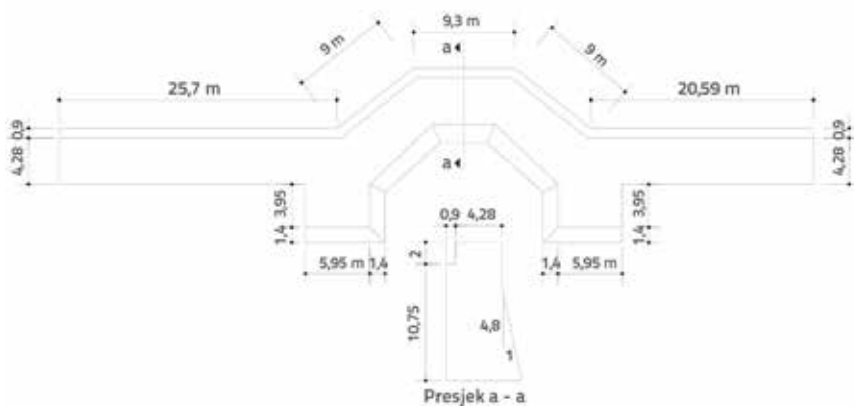
### 4. Nelinearne seizmičke analize povijesne brane Topuzlu

U sklopu studije izvedene su nelinearne seizmičke analize brane Topuzlu i pritom su u obzir uzete interakcije između brane, tla i akumulacije. Brane koje su uključene u taksimski vodoopskrbni sustav izgrađene su na rijeci Acielma, koja je jedna od pritoka rijeke Kagâğthane. Gradnja triju brana od koji se sastoji taksimski sustav počela je izgradnjom brane Topuzlu. Nakon 1731. voda dopremana u grad više nije mogla zadovoljiti potrebe stanovnika pa je u pogon pušten taksimski distribucijski sustav. Godine 1750. na pritoku Eskibağlar rijeke Acielma u Bahçeköyü sultan Mahmud I. izgradio je branu Topuzlu. Radi se o zidanoj brani u obliku poligonalnog luka koji povezuje dva velika kontrafora (slika 3.). Hidrološko područje brane prostire se na 920.000 m<sup>2</sup>. Visina najvišeg dijela brane iznosi 12,75 m, duljina krune je 63,05 m, a volumen akumulacije iznosi 160.000 m<sup>3</sup> [17].

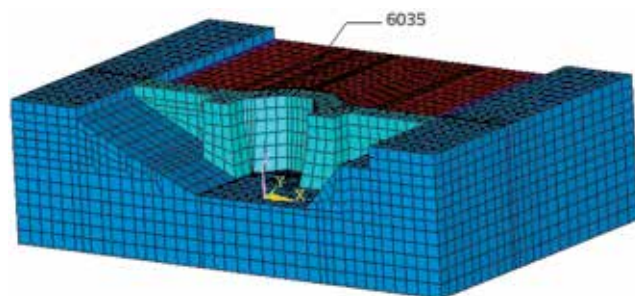


Slika 3. Brana Topuzlu

Za modeliranje brane korišten je makropristup. Za opis nelinearnog ponašanja materijala korišten je model razmazanih pukotina kojim se u obzir uzima omekšanje pri deformaciji. Za domene akumulacije i tla usvojeno je linearno elastično ponašanje. Interakcija između čvrstog tijela i tekućine modelirana je Eulerovim pristupom. Tlocrt brane s najvišim dijelom prikazan je na slici 4. Trodimenzionalni model brane s konačnim elementima prikazan je na slici 5. U modelu konačnih elemenata ukupno su korišteni 15.701 čvor i 13.333 prizmatična konačna elementa. Na slici je također prikazan čvor 6035 koji je središnja točka krune brane. Što se tiče seizmičkih utjecaja, određeni su umjetni akceleroگرامи za svaku razinu potresa (D1, D2 i D3) pa su kompatibilni s proračunskim spektrom koji je dan u propisima DLG'2007 i pritom su u obzir uzete seizmičke karakteristike regije u kojoj se nalazi brana Topuzlu. Razina D1 odnosi se na potrese niske amplitude, čija je vjerojatnost da će se pojaviti tijekom uporabnog vijeka građevine velika. Vjerojatnost premašaja potresa te razine iznosi 50 posto u 50 godina, a povratno razdoblje je 72 godine. U razinu D2 spadaju jaki potresi čija vjerojatnost da će se pojaviti tijekom uporabnog vijeka građevine nije velika. Vjerojatnost premašaja te razine potresa iznosi 10 posto u 50 godina, a povratno razdoblje je 475 godina. Razina D3 uzima u obzir najveće djelovanje potresa kojemu građevina može biti izložena. Vjerojatnost je pojave takvog potresa u vijeku trajanja građevine niska. Vjerojatnost premašaja amplitude potresa je 2 posto u 50 godina, a povratno razdoblje iznosi 2475 godina. Potresno djelovanje zadano je umjetnim akceleroگرامом trajanja 11 sekundi u y-smjeru sustava *brana – tlo – akumulacija* za razine potresa D1, D2 i D3. Za te su razine potresa provedene nelinearne seizmičke analize.  $S_{MS}$  jest vrijednost maksimalne spektralne akceleracije, a  $S_{M1}$  jest vrijednost spektralne akceleracije koja odgovara periodu od 1,0 s. U tablici 1. dane su referentne vrijednosti  $S_{MS}$  i  $S_{M1}$  (DLH-2007) koje su korištene za generiranje umjetnih akceleroگرامа za razine potresa D1, D2 i D3. Umjetni akceleroگرامи generirani su tako da ne prijeđu 5 posto srednjeg odstupanja između referentnog i umjetnog spektra akceleracije. Krivulje referentnog i umjetnog spektra akceleracija prikazane su na slici 6. za razine potresa D1, D2 i D3.



Slika 4. Tlocrt i najviši presjek brane



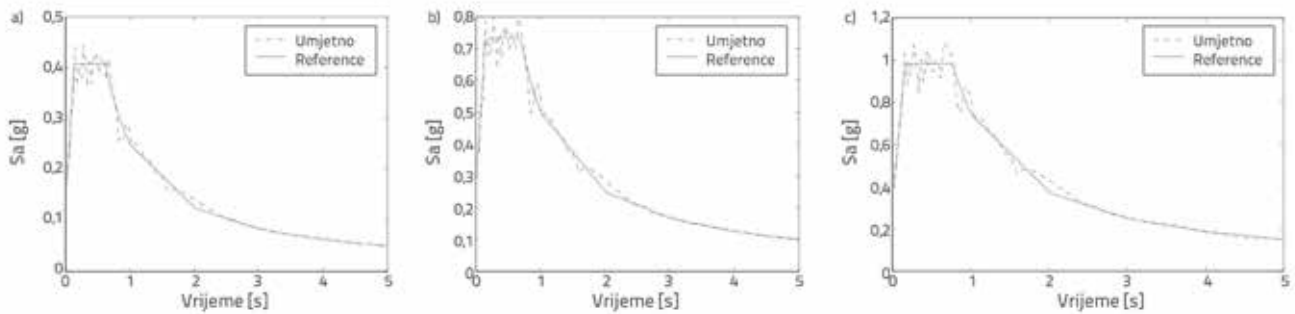
Slika 5. Trodimenzionalni model konačnih elemenata povijesne brane Topuzlu

Vrijednosti apsolutne maksimalne amplitude umjetnih akceleroگرامа iznose 0,1986 g, 0,3370 g i 0,4342 g za razine potresa D1, D2 i D3. Grafički prikazi vremenskih funkcija umjetnih akceleroگرامа prikazani su na slici 7. Za seizmičke je analize korišten opći algoritam prediktor-korektor metode. Prema [2, 3, 4, 5, 7] vrijednosti parametara materijala brane su sljedeće: modul elastičnosti ( $7,5 \times 10^3$  MPa), gustoća ( $2,2 \text{ t/m}^3$ ), Poissonov koeficijent (0,25), vlačna čvrstoća (1,0 MPa) i tlačna čvrstoća (10 MPa). U rješenjima je pretpostavljeno da domena tla nema mase, a modul elastičnosti i Poissonov koeficijent tla iznose  $3 \times 10^4$  MPa i 0,20 (kategorija tla C prema DLH'2007). Prihvaćeno je to da jedinična gustoća i modul kompresije u domeni akumulacije iznose  $1,0 \text{ t/m}^3$ , tj. 2070 MPa. Koeficijent smanjenja vlačne čvrstoće nakon pojave pukotina iznosi 1,0. U domeni tijela primjenjuje se viskozno prigušenje proporcionalno krutosti. Prirodna frekvencija sustava brana-tlo iznosi 16,4521 Hz u smjeru toka. Koeficijent prigušenja proporcionalan krutosti sustava brana – tlo određen je tako da daje 5 posto prigušenja te frekvencije.

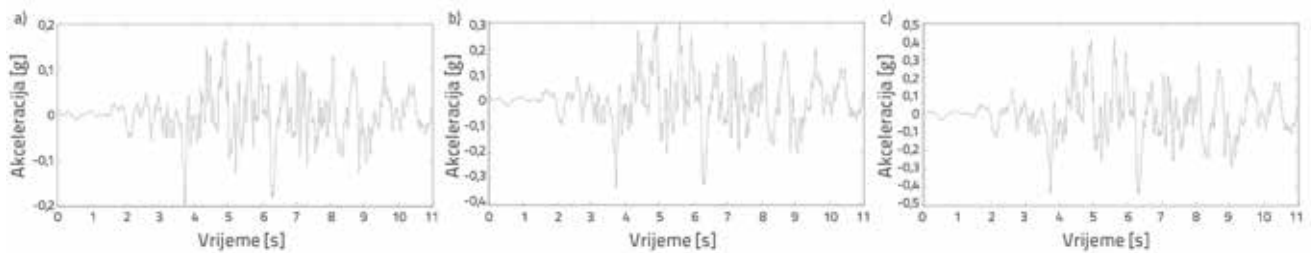
Tablica 1. Referentne vrijednosti  $S_{MS}$  i  $S_{M1}$  za tri potresne razine

Potresna razina	D1	D2	D3
Referentne vrijednosti			
$S_{MS}$	0,5520	0,6900	0,7756
$S_{M1}$	0,2800	0,3500	0,5075

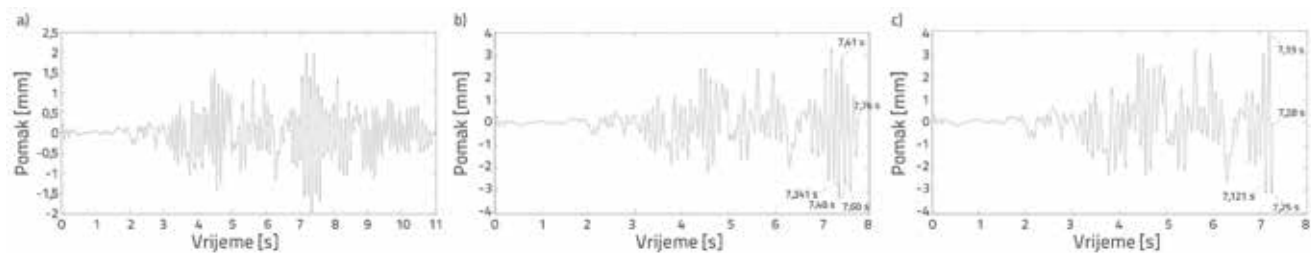
Prihvaćeno je to da integracijski korak iznosi 0,001 s da bi se izbjeglo naglo širenje pukotina. Također je prihvaćeno da maksimalni broj iteracija iznosi 40. Za izračunavanje rješenja korišten je program ANSYS. Nelinearna seizmička rješenja za sustav brana – tlo – akumulacija dobivena su primjenom umjetnih akceleroگرامа koji su generirani za tri različite razine potresa. Kao rezultat tih rješenja određeni su vremenski grafički prikazi za čvor 6035 (u smjeru toka) koji se nalazi u središnjem dijelu krune brane, a prikazani su na slici 8.



Slika 6. Krivulje umjetnog i referentog spektra akceleracije za potresne razine: a) razina D1; b) razina D2; c) razina D3



Slika 7. Vremenske funkcije umjetnih akceleroograma za različite potresne razine: a) razina potresa D1; b) razina potresa D2; c) razina potresa D3

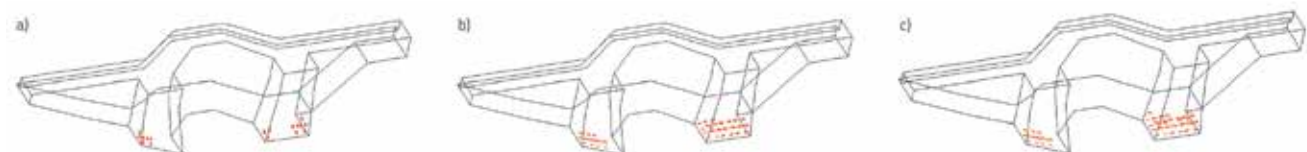


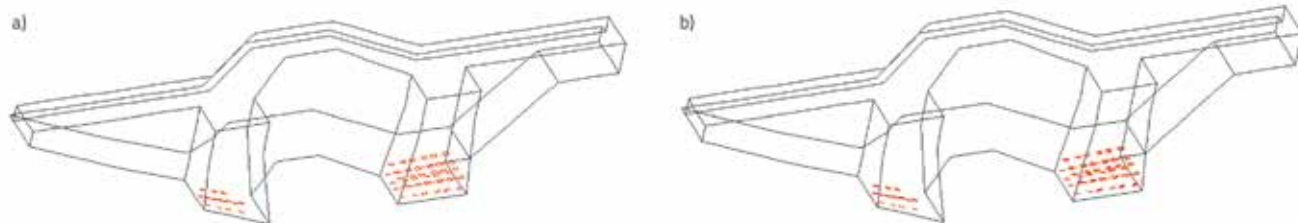
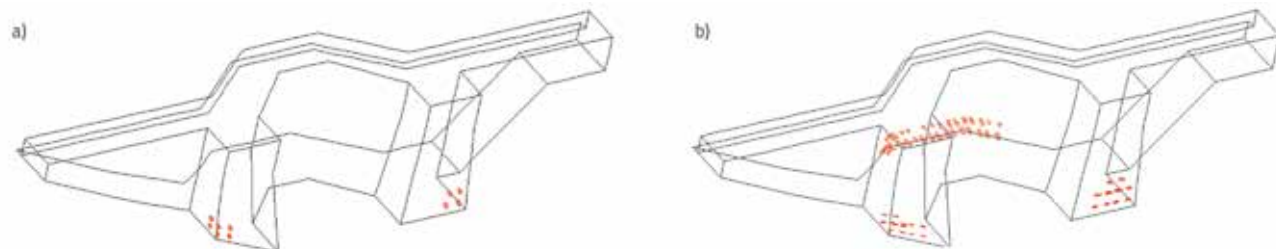
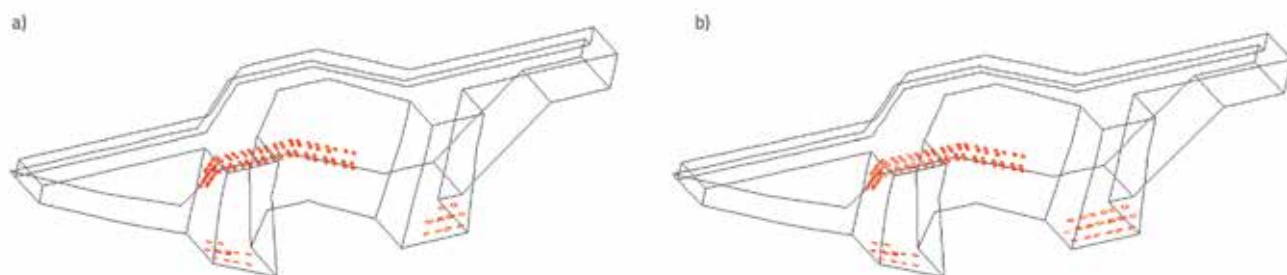
Slika 8. Vremenske funkcije odziva čvora 6035 u smjeru tečenja: a) razina potresa D1; b) razina potresa D2; c) razina potresa D3

Rješenja za razinu potresa D1 određena su za 11 sekundi, a potres nije nimalo oštetio branu. Apsolutna maksimalna vrijednost pomaka za razinu potresa D1 iznosi oko 2 mm. U analizama za razine potresa D2 i D3 prekoračen je maksimalan broj iteracija, a rješenja nisu konvergirala zbog pojave pukotina u brani. Apsolutne vrijednosti maksimalnog pomaka iznosile su 3,32, tj. 3,92 mm za razine potresa D2 i D3. Brojevi zabilježeni na grafičkim prikazima (slike 8.b i 8.c) pokazuju vrijeme pojave pukotina i širenje zona pukotina u brani.

U istraživanju pojave i širenja pukotina brane za navedene potresne razine utvrđeno je da se na razini potresa D1 brana ne oštećuje. Međutim, prvo oštećenje na razini potresa D2 zabilježeno je u zoni u kojoj su lijevi i desni kontraforni zidovi povezani s tlom u trenutku 7,341 s. Taj slučaj pojave pukotina

prikazan je na slici 9.a. Te su se zone pukotina pojavile zbog pomicanja krune brane u smjeru suprotnom od tečenja. Do širenja je u tim zonama pukotina došlo kod  $t = 7,41$  s zbog pomicanja krune brane u smjeru tečenja (slika 9.b). Krana brane pomaknula se u smjeru suprotnom od toka, a dodatno povećanje uočeno je u tim zonama pukotina (slika 9.c). Širenje u zoni pukotina na lokaciji desnoga kontrafornog zida brane uočeno su pri  $t = 7,48$  s (slike 10.a i 10.b). Rješenja nisu dalje konvergirala zbog pomaka krune pri  $t = 7,76$  s u smjeru toka. Prvo oštećenje na razini potresa D3 zabilježeno je pri 7,121 s u zoni u kojoj se desni i lijevi kontraforni zidovi spajaju s tlom (slika 11.a.). Te su se zone pukotina pojavile zbog pomicanja krune brane u smjeru suprotnom od toka. Nova zona pukotina uočena je u spojenoj zoni tla sa sredinom brane, na uzvodnoj strani zbog pomicanja krune brane u smjeru toka pri  $t = 7,19$  s

Slika 9. Pojava pukotina u brani u različitim trenucima za razinu potresa D2: a)  $t = 7,341$  s; b)  $t = 7,41$  s; c)  $t = 7,48$  s

Slika 10. Pojava pukotina na brani na razini potresa D2 pri: a)  $t = 7,60$  s; b)  $t = 7,76$  sSlika 11. Pojava pukotina na brani s na razini potresa D3 pri: a)  $t = 7,121$  s; b)  $t = 7,19$  sSlika 12. Pojava pukotina u brani na razini potresa D3 nakon: a)  $t = 7,25$  s; b)  $t = 7,28$  s

(slika 11.b). Osim toga, širenje u zonama pukotina uočeno je i na zidovima kontrafora (slika 11.b).

U smjeru suprotnom od toka do širenja pukotina u uzvodnome dijelu brane došlo je pri 7,25 s (slika 12.a). Nakon tog trenutka uočeno je da širenje u zoni pukotina, u desnom kontraforu ovisi o pomaku krune brane u smjeru toka. Analiza je završena jer konvergencija iteracija nije postignuta nakon 7,28 s (slika 12.b).

#### 4. Zaključak

U sklopu rada provedene su nelinearne seizmičke analize povijesne brane Topuzlu izgrađene u sklopu taksimskog sustava brana. U analizama su u obzir uzete interakcije između brane, tla i akumulacije. Za branu je generiran trodimenzionalni model konačnih elemenata primjenom metode makromodeliranja. Za modeliranje materijala korišten je model razmazanih pukotina u kojemu se u obzir uzima omekšavanje pri deformaciji. Usvojeno

je linearno elastično ponašanje domena akumulacije i tla. Eulerov je pristup korišten za interakciju između čvrstog tijela i tekućine. Umjetni akceleroگرامi generirani su za tri razine potresa: D1, D2 i D3 i pritom su u obzir uzete karakteristike regije u kojoj je smještena brana Topuzlu. U dinamičkim analizama korišten je kombinirani oblik opće  $\alpha$ -metode i prediktor-korektor postupka. Pojava pukotina na brani nije zabilježena kod umjetnoga potresnog zapisa za razinu potresa D1. Na razini potresa D2 pukotine su se pojavile u zonama spoja između lijevog i desnog kontrafora te tla. Analiza je završena jer se konvergencija nije mogla postići pri iteracijama kod 7,76 s. Na razini potresa D3 pukotine su se pojavile u zonama spoja između tla s desnim i lijevim kontraforom brane i spoja gornje strane brane s tlom. Na toj razini potresa analiza je završena pri 7,28 s jer nije postignuta konvergencija rješenja. Stoga se tijekom konzervatorskih radova na toj povijesnoj brani konstruktivni elementi brane trebaju pojačavati u smjeru tečenja.

## LITERATURA

- [1] Lourenço, P.B.: Computational strategies for masonry structures, Ph.D. Thesis, Delft Technical University of Technology, The Netherlands, 1996.
- [2] Modena, C., Valluzzi, M.R., Tongini, F.R., Binda, L.: Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza Cathedral Bell-tower, *Construction and Building Materials*, 16 (2002), pp. 385-395, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00041-7)
- [3] Betti, M., Orlando, M., Vignoli, A.: Static behaviour of an Italian Medieval Castle: Damage assessment by numerical modelling, *Computers and Structures*, 89 (2011), pp. 1956-1970, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.05.022>
- [4] Fanning, P.J., Boothby, T.E.: Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges, *Computers and Structures*, 79 (2001), pp. 2645-2662, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00109-2)
- [5] Bernardeschi, K., Padovani, C., Pasquinelli G.: Numerical modelling of the structural behaviour of Buti's Bell tower, *Journal of Cultural Heritage*, 5 (2004), pp. 371-378, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2004.01.004>
- [6] Karaton, M., Sayın, E., Calayır, Y.: Nonlinear seismic analyses of Malabadi Bridge, *Strengthening and preserving historical buildings and cultural heritage-2*, 15-17 October, Diyarbakır, Turkey, 2009 (in Turkish).
- [7] Bayraktar, A., Şahin, A., Özcan, D., Yıldırım, F.: Numerical damage assessment of Hagia Sophia bell tower by nonlinear FE modelling, *Applied Mathematical Modelling*, 34 (2010), pp. 92-121, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.03.033>
- [8] Sayın, E., Calayır, Y., Karaton, M.: Nonlinear seismic analyses of historical Uzunok Bridge, *Seventh National Conference on Earthquake Engineering*, 30 May-3 June, İstanbul, Turkey, 2011 (in Turkish).
- [9] Gonen, H., Dogan M., Karacasu, M., Ozbasaran, H., Gokdemir, H.: Structural failures in retrofit Historical Murat Masonry Arch Bridge, *Engineering Failure Analysis*, 35 (2013), pp. 334-342, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.024>
- [10] DLH.: Turkish Seismic Code for Coastal and Harbour Structures, Ministry of Transportation of Turkey, Ankara, 2007 (in Turkish).
- [11] Chung, J., Hulbert, G.M.: A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: The Generalized- $\alpha$  Method, *Journal of Applied Mechanics*, 60 (1993), pp. 371, <https://doi.org/10.1115/1.2900803>
- [12] Manfredi, C., Ramasco, R.: The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different methods, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22 (1993) 10, pp. 855-868.
- [13] Rajgelj, S., Amadio, C., Nappi, A.: An internal variable approach applied to the dynamic analysis of elastic-plastic structural systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22 (1993) 10, pp. 885-903.
- [14] William, K.J., Warnke, E.P.: Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete, *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, 19 (1975), pp. 174-186.
- [15] Zeinkiewicz, O.C., Taylor, R.L.: *Finite Element Method*, Volume 2, McGraw-Hill, 1991.
- [16] Calayır, Y., Karaton, M.: Non-linear dynamic analysis of concrete gravity dam via anisotropic damage model: Eulerian and Lagrangian approaches, *6<sup>th</sup> National Conference on Earthquake Engineering*, vol-1, pp. 737-748, 16-20 October 2007, İstanbul, Turkey (in Turkish).
- [17] Çeçen, K.: *Taksim ve Hamidiye Suları*, İSKİ Yayınları, İstanbul, 1992 (in Turkish).