

# Seizmička analiza zvonika Katedrale Sv. Duje primjenom metode konačno-diskretnih elemenata

---

Šakić, Mia

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:189283>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mia Šakić**

**Split, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I  
GEODEZIJE**

**Mia Šakić**

**Seizmička analiza zvonika Katedrale Sv. Duje  
primjenom metode konačno – diskretnih elemenata**

**Diplomski rad**

**Split, 2024.**

## **Seizmička analiza zvonika Katedrale Sv. Duje primjenom metode konačno – diskretnih elemenata**

### ***Sažetak:***

U ovom diplomskom radu prikazana je seizmička analiza sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje u Splitu korištenjem kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata računalnim programom „Y“. Kao referentni događaj uzeta su tri potresa koja su se dogodila u prošlosti: potres u Petrovcu 1979., Campano Lucanu 1980., te South Icelandu 2000. Kao ulazni podatak opterećenja konstrukcije korišteni su zapisi o horizontalnim i vertikalnim ubrzanjima ta tri potresa. Rezultati proračuna prikazani su kroz niz grafičkih prikaza koji prikazuju pomake vrha konstrukcije tijekom simuliranog potresnog djelovanja.

### ***Ključne riječi:***

Potres, Kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata, pomak, vršno ubrzanje, pukotina, gubitak stabilnosti

## **Seismic analysis of the bell tower of the Cathedral of St. Domnius using the finite-discrete element method**

### ***Abstract:***

This thesis presents the seismic analysis of the northern facade of the bell tower of the Cathedral of St. Domnius in Split using the combined finite-discrete element method analysed by computer program „Y“. Three earthquakes that occurred in the past were taken as a reference event: the earthquake in Petrovac in 1979, Campano Lucan in 1980, and South Iceland in 2000. For those three earthquakes, the records of horizontal and vertical accelerations were used as input data for the structural load. The results of the calculations are presented through a series of graphic displays that show the displacements of the top of the structure during the simulated earthquake action.

### ***Keywords:***

Earthquake, Combined finite-discrete element method, displacement, peak acceleration, crack, loss of stability

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO**

KANDIDAT: Mia Šakić

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083215128

KATEDRA: **Katedra za teoriju konstrukcija**

PREDMET: Osnove simulacijskog inženjerstva

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema:

Seizmička analiza zvonika Katedrale Sv. Duje primjenom metode konačno – diskretnih elemenata

Opis zadatka:

Primjenom kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata, na osnovu zadanog nacrtu sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje provesti numeričku analizu konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju. Kao ulazni podatak koristiti zapise horizontalnih i vertikalnih ubrzanjima tri realna potresa (Petrovac, Campano Lucano i South Iceland). Provesti inkrementalnu dinamičku analizu do potpunog sloma konstrukcije. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i donijeti zaključak o ponašanju i nosivosti konstrukcije izložene seizmičkom opterećenju.

U Splitu, ožujak 2024.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović  
Komentor: Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

# SADRŽAJ

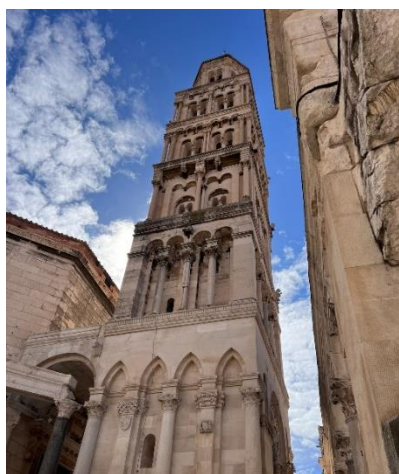
|       |                                                                    |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | UVOD .....                                                         | 6  |
| 1.1   | Općenito .....                                                     | 7  |
| 1.2   | Potres .....                                                       | 8  |
| 1.2.1 | Uzroci potresa i potresna djelovanja .....                         | 8  |
| 1.2.2 | Elastični spektar odziva kod potresa .....                         | 9  |
| 1.2.3 | Petrovac 1979., Crna Gora .....                                    | 11 |
| 1.2.4 | Campano Lucano 1980., Italija .....                                | 11 |
| 1.2.5 | South Iceland 2000., Island .....                                  | 11 |
| 2     | METODA KONAČNO – DISKRETNIH ELEMENATA .....                        | 12 |
| 3     | ULAZNI PODACI .....                                                | 14 |
| 3.1   | Diskretizacija zvonika na diskretne elemente .....                 | 17 |
| 3.2   | Diskretizacija diskretnih elemenata mrežom konačnih elemenata..... | 18 |
| 3.3   | Opterećenje konstrukcije .....                                     | 20 |
| 4     | REZULTATI PRORAČUNA .....                                          | 21 |
| 4.1   | Rezultati analize za potres u Petrovcu.....                        | 21 |
| 4.2   | Rezultati analize za potres u Campano Lucanu.....                  | 25 |
| 4.3   | Rezultati analize za potres u South Icelandu.....                  | 29 |
| 5     | ANALIZA REZULTATA SEIZMIČKOG PRORAČUNA .....                       | 33 |
| 6     | ZAKLJUČAK .....                                                    | 36 |
| 7     | LITERATURA .....                                                   | 37 |

## 1 UVOD

Seizmički proračun konstrukcija predstavlja ključan aspekt u građevinarstvu, posebno u seizmički aktivnim područjima. Potresne sile mogu imati devastirajuće posljedice na građevine te često stradavaju zidane građevine i spomenici koje spadaju u kulturnu baštinu kao i suvremene građevine, što naglašava potrebu za preciznim metodama analize. Jedna od naprednih metoda u ovom području je kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata koju je razvio naš profesor dr.sc. Antonijo Munjiza koja omogućava detaljnu analizu i simulaciju ponašanja konstrukcije pod dinamičkim opterećenjima.

U ovom diplomskom radu obrađena je primjena te metode za seizmički proračun sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje u Splitu. Katedrala Sv. Duje, kao jedan od najvažnijih povijesnih i kulturnih spomenika Hrvatske, zahtjeva posebnu pažnju i preciznost prilikom analize otpornosti na potresna djelovanja. Obzirom na njenu povijesnu vrijednost i jedinstvenu arhitekturu, kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata predstavlja idealan alat za analizu jer omogućuje detaljno modeliranje složenih geometrija i materijalnih svojstava građevinskih elemenata.

Cilj ovog rada je prikazati postupak i rezultate seizmičkog proračuna sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje. Rezultati proračuna prikazani su kroz niz grafičkih prikaza koji ilustriraju raspodjelu naprezanja i pomaka u konstrukciji tijekom simuliranog potresnog djelovanja prema tri realna potresa koja su se dogodila u povijesti. Kao referentni događaj uzeti su zapisi potresa u Petrovcu 1979. u Crnoj Gori, South Iceland-u 2000. na Islandu te Campano Lucano 1980.. u Italiji.



Slika 1. sjeverno pročelje zvonika Katedrale Sv. Duje

## 1.1 Općenito

Kamen je jedan od najstarijih građevinskih materijala koji su ljudi koristili. Njegova dostupnost, trajnost i estetska privlačnost učinili su ga osnovnim građevinskim materijalom kroz povijest. Korišten je za gradnju raznih struktura, od jednostavnih kuća i zidova do monumentalnih građevina poput piramida, katedrala i dvoraca. Njegova upotreba može se pratiti od prapovijesti, preko antičkog Egipta, Grčke i Rima, sve do srednjovjekovne Europe i modernog doba [6-7]. Zidane konstrukcije, koje se sastoje od blokova kamena, opeke ili betona vezanih mortom, imaju specifične karakteristike koje ih čine osjetljivima na potresna djelovanja. Tijekom potresa, zgrade su izložene dinamičkim silama koje uzrokuju pomake i naprezanja unutar konstrukcije. Zidane konstrukcije, zbog svoje krutosti i težine, često ne podnose dobro ove dinamičke sile, što može dovesti do pukotina, oštećenja ili čak kolapsa [12-13].

Kamen još uvijek nalazi široku primjenu u današnjoj građevinskoj industriji. Najvažnija karakteristika zidane konstrukcije je njena jednostavnost. Polaganje komada kamena ili opeke jednih na druge, bilo sa ili bez kohezije putem morta, jednostavna je, ali primjerena tehnika koja je bila uspješna još od davnih vremena [1]. Unatoč jednostavnosti koja se očituje pri gradnji zidanih konstrukcija, razumijevanje i opisivanje mehaničkog ponašanja takvih konstrukcija, osobito u uvjetima seizmičkog opterećenja, i danas predstavlja pravi izazov zahvaljujući samoj prirodi zidane konstrukcije koja zbog prisutnosti sljubnica između blokova, koje mogu a i ne moraju biti popunjene mortom, pokazuje kompleksno i izrazito nelinearno ponašanje.

Mnoge zidane konstrukcije nalaze se u seizmički aktivnim područjima u kojima je potres otkrio svu njihovu ranjivost. U tim potresima često stradavaju zidane građevine i spomenici koji se svrstavaju u kategoriju kulturne baštine, kao i suvremene zidane konstrukcije [2].



## 1.2 Potres

### 1.2.1 Uzroci potresa i potresna djelovanja

Potres je prirodna pojava uzrokovana naglim oslobađanjem energije u Zemljinj kori, što stvara seizmičke valove. Ovi valovi uzrokuju pomicanje tla i stvaraju potresne sile koje mogu značajno oštetiti građevine. Stare građevine, koje su često dio kulturne baštine, posebno su osjetljive na potrese zbog svoje starosti, konstrukcijskih metoda koje nisu bile prilagođene modernim standardima seizmičke otpornosti i materijala koji su tijekom vremena degradirali [12-13].

Naše područje se smatra područjem stalne seizmičke aktivnosti, te da je uzrok tomu pritisak Afričke ploče, gdje se Afrička ploča razmiče od Južnoafričke. Zbog takvih pomaka ploča (sudaranja i/ili podvlačenja), nakuplja se ogromna količina energije koja se oslobađa kada je iscrpljena posmična nosivost materijala na granici između tektonskih ploča, što je uzrok potresa. Mjesto nastanka potresa u dubini Zemlje naziva se žarište ili hipocentar potresa, to je mjesto gdje počinje slom materijala i odakle počinje širenje seizmičkih valova. Jačina potresa ovisi o oslobođenoj energiji, odnosno o količini oslobođene energije u potresu, te se ta mjera za jačinu potresa naziva magnituda, koju je definirao Richter 1935. [4].

Potresna djelovanja su među najkompleksnijim djelovanjima kojima je konstrukcija izložena. Kao posljedicu svoga djelovanja iza sebe ostavljaju niz materijalnih šteta, pri kojima najčešće stradaju ljudski životi. Nakon njihovoga djelovanja nastaju oštećenja na građevinama, gdje iste trebaju obnovu, ponovnu izgradnju, a isto tako potrebno se je i zbrinuti o ljudima koji su ostali bez doma. Kako bi se što bolje pripremili za nadolazeća djelovanja potrebno je na osnovu onoga što se je zbilo u prošlosti, procijeniti što će se dogoditi u budućnosti, odnosno procijeniti što će se dogoditi u vremenskom razdoblju u kojem će se koristiti građevina (npr. 50 godina). Seizmološki i geološki podatci obuhvaćaju povijest jakih potresa, odnosno vremensko razdoblje između dva jaka potresa poznato kao povratni period potresa koji su se dogodili u posljednjih sto ili tisuću godina [4].

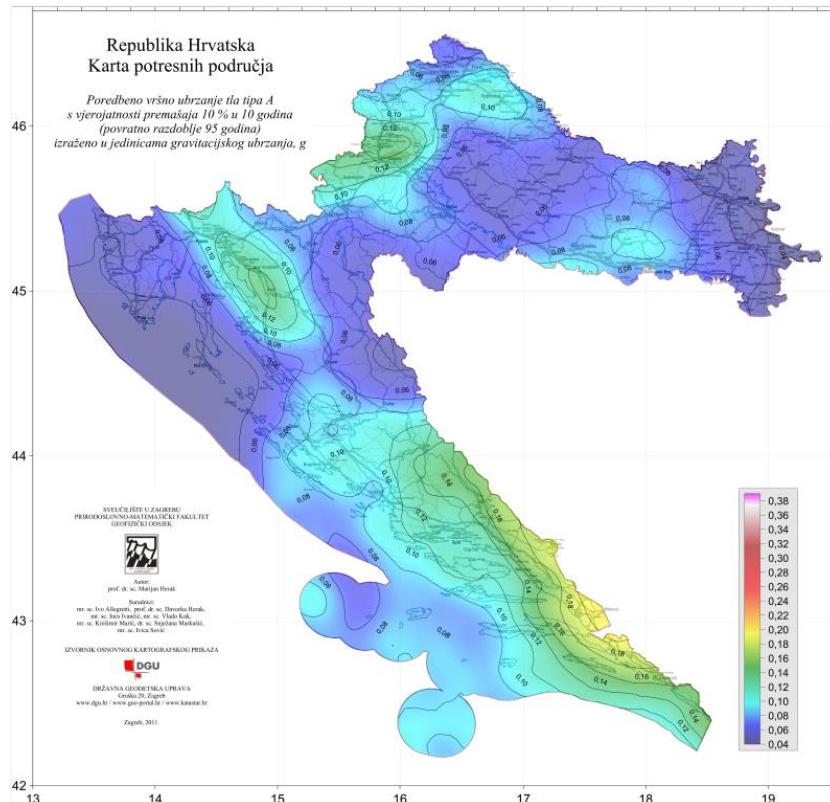
### 1.2.2 Elastični spektar odziva kod potresa

Elastični spektar odziva (Response Spectrum) je grafički prikaz maksimalnih odziva (pomaka, brzine ili ubrzanja) niza jednostavnih oscilatora s različitim prirodnim frekvencijama, kada su izloženi istom potresnom djelovanju. Ovaj spektar pruža ključne informacije za projektiranje seizmički otpornih konstrukcija jer omogućuje inženjerima da predvide kako će različiti dijelovi građevine reagirati na potresne sile [14].

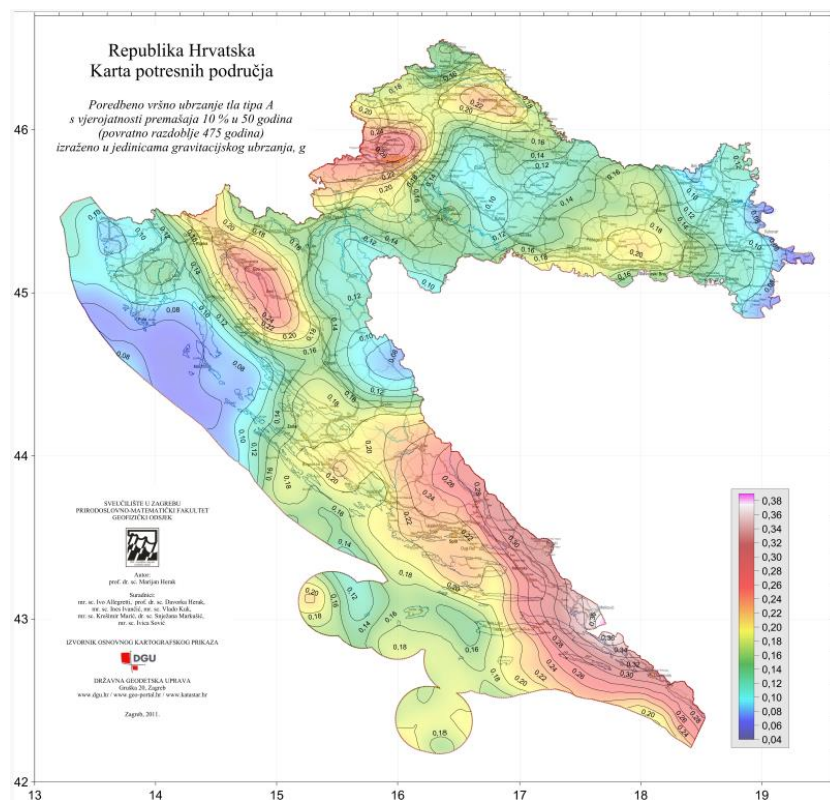
Prema Seizmološkoj karti (HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Državna geodetska uprava-republika Hrvatska – karta potresnih područja, <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>), lokacija se nalazi na području za koje se za povratni period od 95 godina predviđa maksimalno horizontalno ubrzanje u veličini od 0,112g te se za povratni period od 475 godina predviđa maksimalno horizontalno ubrzanje u veličini od 0,220g.



Slika 2 Maksimalno horizontalno ubrzanje za lokaciju



Slika 3. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratni period od 95 godina  
(izraženo kao ubrzanje g)



Slika 4. Karta potresnih područja Republike Hrvatske za povratni period od 475 godina  
(izraženo kao ubrzanje g)

### 1.2.3 Petrovac 1979., Crna Gora

Potres u Petrovcu dogodio se 15. travnja 1979. godine, s magnitudom od 6,9 po Richterovoj ljestvici. Epicentar potresa bio je u Jadranskom moru, nedaleko od crnogorskog primorja. Regija je seizmički aktivna zbog tektonskih aktivnosti koje uključuju pomicanje Jadranske mikroploče u odnosu na Euroazijsku ploču. Potres je prouzročio znatne štete na infrastrukturnim objektima i zgradama duž crnogorskog primorja, uključujući stari grad Kotor. Više od 100 ljudi izgubilo je život, a tisuće su ostale bez domova. Mnoge povijesne građevine pretrpjele su teška oštećenja. Maksimalno horizontalno ubrzanje zabilježeno tijekom potresa iznosilo je oko 0,45g, dok je maksimalno vertikalno ubrzanje bilo približno 0,30g.

### 1.2.4 Campano Lucano 1980., Italija

Potres u Campano Lucano, poznat i kao Irpinski potres, dogodio se 23. studenoga 1980. godine. Imao je magnitudu 6,9 po Richterovoj ljestvici. Epicentar potresa bio je u regiji Kampanija, blizu mjesta Eboli, u južnoj Italiji. Ovo područje leži na konvergentnom granici između Afričke i Euroazijske ploče, što ga čini seizmički aktivnim. Potres je prouzročio velike štete na infrastrukturi i zgradama, uzrokujući smrt više od 2.700 ljudi i ostavljajući desetke tisuća bez krova nad glavom. Mnoge zgrade izgrađene od kamena i opeke pretrpjele su ozbiljna oštećenja ili se srušile. Maksimalno horizontalno ubrzanje zabilježeno tijekom potresa iznosilo je oko 0,38g, dok je maksimalno vertikalno ubrzanje bilo približno 0,20g.

### 1.2.5 South Iceland 2000., Island

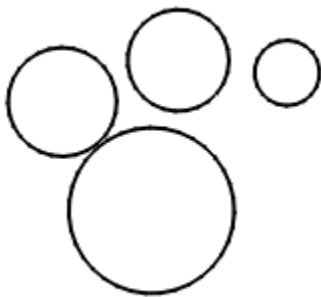
Potres se dogodio 17. lipnja 2000. godine, a imao je magnitudu 6,5 po Richterovoj ljestvici. Drugi jak potres magnitude 6,4 uslijedio je nekoliko dana kasnije, 21. lipnja 2000. godine. Epicentar potresa bio je u regiji Južnog Islanda, koja se nalazi na južnom dijelu Islandskog rasjednog pojasa. Ova regija je seizmički aktivna zbog složenih tektonskih aktivnosti koje uključuju pomake Sjevernoameričke i Euroazijske ploče. Potres je prouzročio znatne štete na infrastrukturnim objektima, zgradama i kulturnoj baštini. Mnoge građevine u području epicentra pretrpjele su pukotine i kolaps, osobito one izgrađene od kamena i betona bez odgovarajuće seizmičke zaštite. Maksimalno horizontalno ubrzanje zabilježeno je oko 0,5g, dok je maksimalno vertikalno ubrzanje bilo niže, ali značajno za analize.

## 2 METODA KONAČNO – DISKRETNIH ELEMENATA

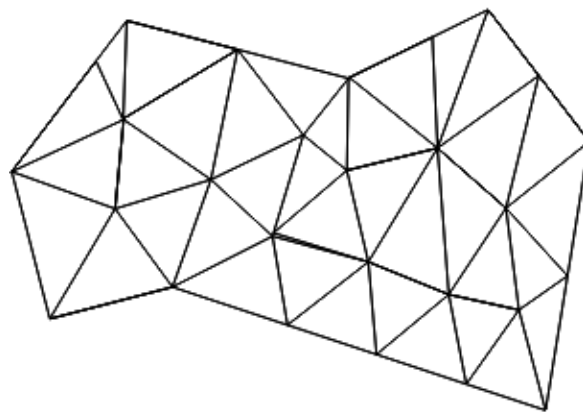
Postoji velik broj numeričkih metoda za analizu zidanih konstrukcija, a sve one mogu se razlikovati u nekim segmentima kao što su ulazni podaci, željeni rezultati te efektima koji se mogu javiti u konstrukciji i vremenu trajanja proračuna.

Jedna od takvih metoda koja se koristi za analizu kamenih konstrukcija je metoda konačnih elemenata. Kod metode konačnih elemenata konstrukcija se opisuje kao ortotropni kontinuum (Sredine u svoja dva (tri) međusobno okomita pravca ima različite karakteristike.). Nedostatak ove metode je nemogućnost opisivanja pojave velikih diskontinuiteta u polju pomaka među blokovima te nemogućnost simuliranja mehaničke interakcije između više blokova što je bitno pri analizi konstrukcija izloženih intenzivnom potresnom opterećenju kao i analizi progresivnog sloma kamenih konstrukcija.

Druga metoda koja se koristi u analizi kamenih konstrukcija je metoda diskretnih elemenata. Kod metode diskretnih elemenata konstrukcija se opisuje kao skup diskretnih elemenata međusobno povezanih kontaktnim elementima što omogućava simuliranje sloma konstrukcije uslijed rotacije, klizanja i udarnih opterećenja. Nedostatak ove metode je nemogućnost opisivanja stanja napreznja i deformacija unutar elemenata što je bitno za analizu pojave i razvoja pukotina [3].



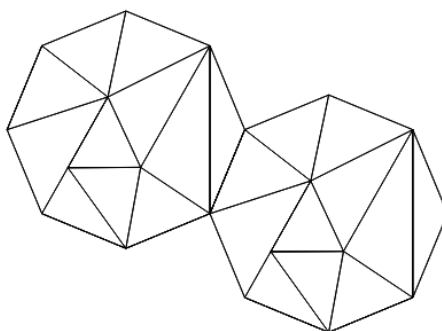
Slika 5. Simulacija materijala preko metode diskretni element



Slika 6. Simulacija materijala preko metode konačni element



Jedan od pristupa koji koristi prednosti metode konačnih elemenata i diskretnih elemenata je kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata (FED/DEM) koju je razvio profesor Ante Munjiza. Kombinirana metoda konačno – diskretnih elemenata („Finite – Discrete Element Method FDEM) predstavlja naprednu metodu numeričke simulacije i analize složenih sustava. Zasniva se na simulaciji ponašanja velikog broja diskretnih elemenata koji mogu imati međusobnu interakciju. Proračun kombinira metodu konačnih elemenata (Finite Element Method, FEM) i metodu diskretnih elemenata (Discrete Element Method, DEM) što omogućava precizno modeliranje za simulaciju ponašanja konstrukcija i njenih dijelova. Metoda je prvenstveno namijenjena za simulaciju ponašanja konstrukcija uzimajući u obzir deformabilnost blokova koji mogu pucati te od jednog bloka tijekom analize može nastati više blokova [6]. Značajke metode su diskretizacija vlastitom mrežom trokutastih konačnih elemenata između kojih postoji kontaktna interakcija pomoću kojih je opisana pojava i razvoj pukotina pod visokim opterećenjima i dinamičkim uvjetima zbog nelinearnosti materijala. Metoda je vrlo prilagodljiva te se može primijeniti na velik raspon problema, od mikrostrukture do velikih inženjerskih konstrukcija. Za praćenje efekata ove kombinirane metode razvijen je računalni program „FEMDEM“ od strane profesora dr.sc. Antonija Munjize



Slika 7. Simulacija materijala kombiniranom metodom konačno - diskretnih elemenata

U ovom radu korištena je metoda konačno – diskretnih elemenata za seizmički proračun sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje u Splitu korištenjem numeričkog modela koji nam pokazuje ponašanje konstrukcije uslijed seizmičkog djelovanja. Kao referentni događaji u povijesti korišteni su primjeri tri razorna potresa, Petrovac (Crna Gora, 1979.), Campano Lucano (Italija, 1980.) te South Iceland (Island, 2000.). Rezultati analize prikazuju krajnje stanje konstrukcije do potpunog sloma.

### 3 ULAZNI PODACI

Za Sjeverno pročelje zvonika Katedrale Sv. Duje u Splitu izvršena je seizmička analiza korištenjem kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata. Kao podloga korišten je nacrt pročelja kojem nije poznata godina izrade. Kamene blokovi su različitih dimenzija i oblika, pročelje i kapiteli stupova su uz konstruktivne kamene blokove ukrašeni vijencima i ostalim nekonstruktivnim elementima. Ukrasi nisu uključeni u proračunski model te je sam proračun izvršen u „FEMDEM“ računalnom programu razvijenom u sklopu knjige profesora dr.sc. Anotnija Munjize pod naslovom „The combined finite – discrete element metode“.

Katedrala Sv. Duje u Splitu izgrađena je prvenstveno od vapnenca i kamena koji potječu iz lokalnih kamenoloma, posebno iz kamenoloma na otoku Braču. Ovi materijali imaju specifične karakteristike koje su bile ključne za izgradnju i dugovječnost zvonika katedrale.

Karakteristike vapnenca i bračkog kamena:

#### *Čvrstoća na pritisak*

Vapnenac, a posebno brački kamen, poznat je po svojoj visokoj čvrstoći na pritisak. Čvrstoća na pritisak bračkog kamena može varirati, ali općenito se kreće od 80 do 120 MPa (megapaskala). Ova visoka čvrstoća čini ga izuzetno pogodnim za gradnju nosivih zidova i drugih strukturalnih elemenata.

#### *Poroznost*

Poroznost vapnenca može varirati ovisno o njegovom tipu i mjestu izvora. Za brački kamen, poroznost se obično kreće od 5% do 15%. Poroznost utječe na apsorpciju vode i dugoročnu trajnost kamena. Manja poroznost znači bolju otpornost na vremenske uvjete i smanjeno upijanje vode, što je ključno za očuvanje strukture kroz stoljeća.

#### *Gustoća*

Gustoća vapnenca obično se kreće od 2.3 do 2.7 g/cm<sup>3</sup>. Brački kamen ima gustoću oko 2.5 g/cm<sup>3</sup>, što doprinosi njegovoj čvrstoći i otpornosti na mehaničke udarce.

### ***Otpornost na vremenske uvjete***

Brački kamen pokazuje visoku otpornost na eroziju i vremenske uvjete, što je ključno za građevine koje su izložene vanjskim uvjetima. Njegova otpornost na smrzavanje i odmrzavanje te kemijsku eroziju doprinosi dugovječnosti struktura izgrađenih od ovog materijala.

### ***Obradivost***

Jedna od značajki bračkog kamena je njegova relativna lakoća obrade. Ovo svojstvo je omogućilo izradu finih detalja i ornamenata na Katedrali Sv. Duje, što je pridonijelo njenoj estetskoj vrijednosti.

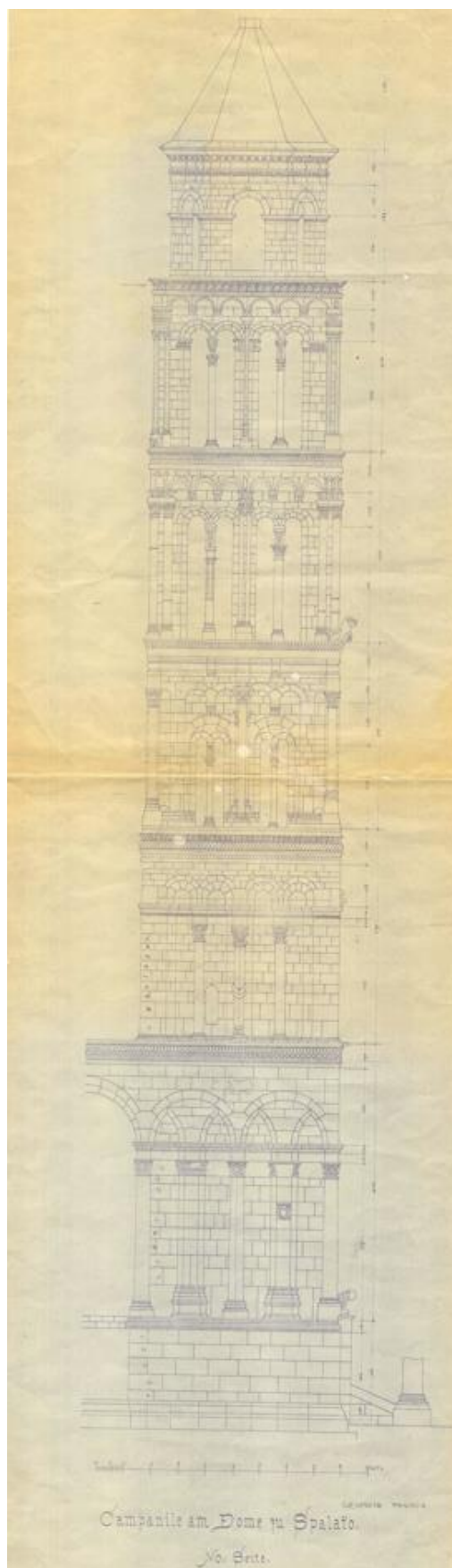
Katedrala Sv. Duje je izgrađena od visokokvalitetnog vapnenca, posebno bračkog kamena, koji pruža izuzetne karakteristike potrebne za dugovječnost i otpornost građevine. Njegova visoka čvrstoća na pritisak, umjerena poroznost, visoka gustoća, otpornost na vremenske uvjete i obradivost učinili su ga idealnim materijalom za gradnju jednog od najvažnijih povijesnih spomenika u Hrvatskoj. Ove karakteristike također igraju ključnu ulogu u procjeni seizmičke otpornosti zvonika Katedrale Sv. Duje, jer utječu na način na koji konstrukcija reagira na potresna djelovanja. Visoka čvrstoća i otpornost na vremenske uvjete povećavaju stabilnost i dugovječnost konstrukcije, ali je također važno uzeti u obzir i potencijalne slabosti poput pukotina i oštećenja koja mogu nastati tijekom jakih seizmičkih aktivnosti [6-13].

Mehaničke karakteristike kamena koje su poslužile kao ulazni podaci za seizmičku analizu otpornosti sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje u Splitu na potresno djelovanje navedene su u tablici ispod.

| Modul elastičnosti | Gustoća                        | Statički koeficijent | Dinamički koeficijent trenja | Koeficijent prigušenja |
|--------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|
| $E$<br>(MPa)       | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\mu_{st}$           | $\mu_{din}$                  | $\bar{\mu}$            |
| 48400              | 2700                           | 0.6                  | 0.6                          | $4.5 \cdot 10^6$       |

Tablica 1. Mehaničke karakteristike kamena

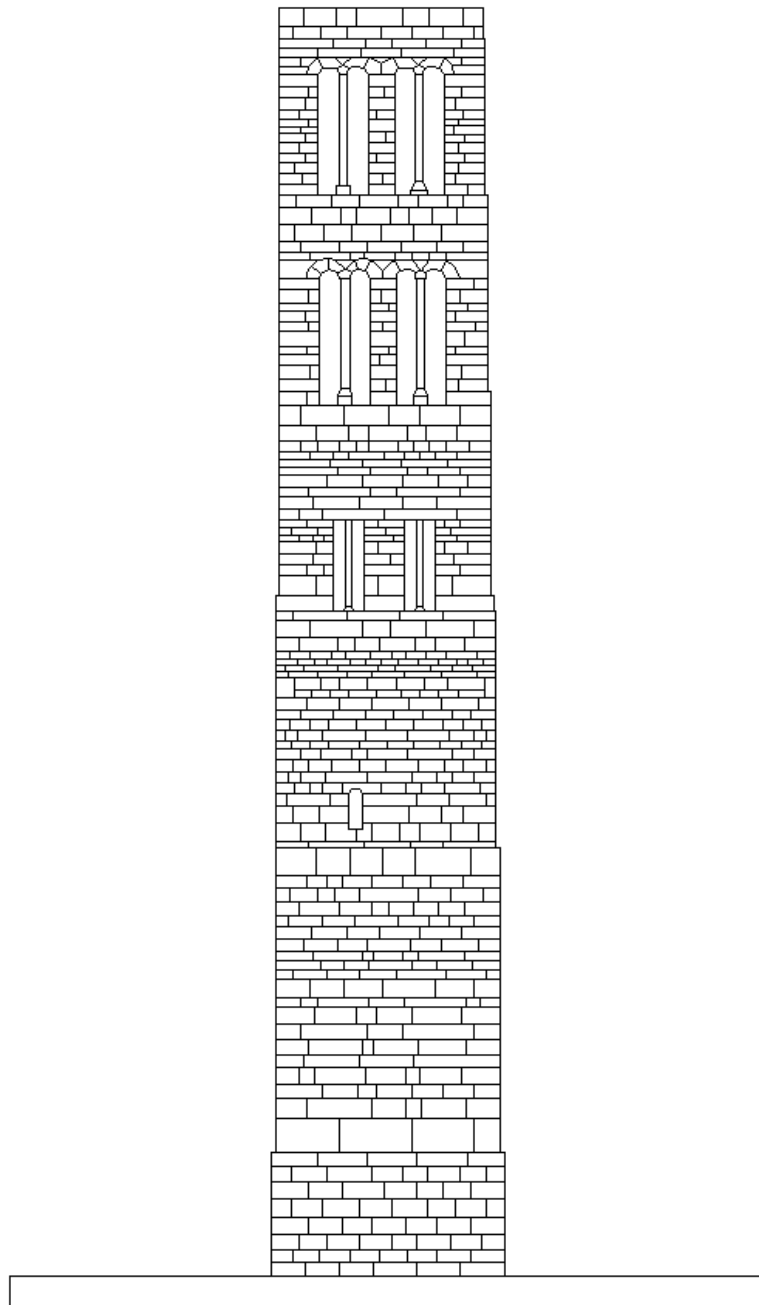




Slika 8. Nacrt sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje – podloga za nacrt [15]

### 3.1 Diskretizacija zvonika na diskretne elemente

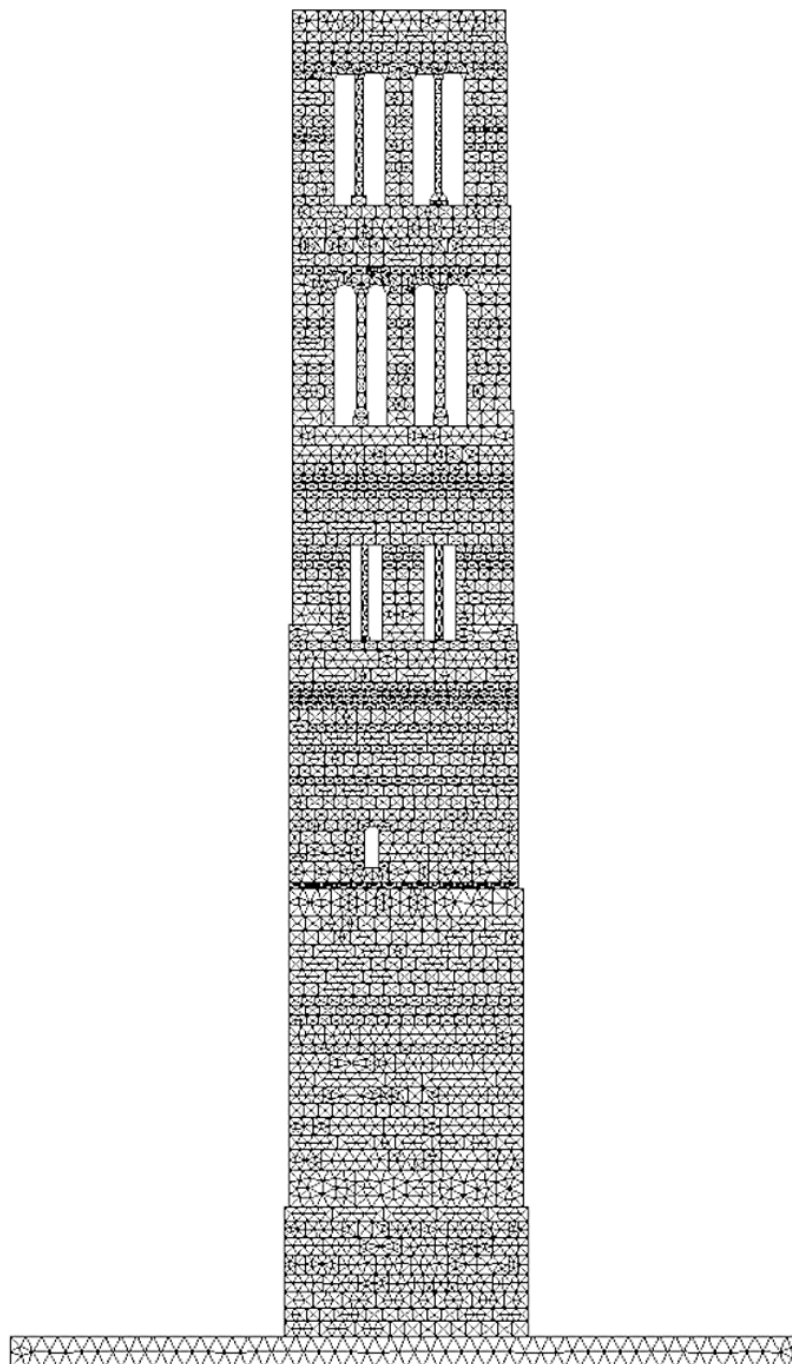
Kameni blokovi od kojih je sazidana Katedrala Sv. Duje uzeti su kao diskretni elementi zvonika gdje svaki kameni blok predstavlja jedan diskretni element. Nacrt zvonika sa ucrtanim svakim pojedinim kamenim blokom izrađen je u računalnom programu Autodesk, „AutoCAD“ u metrima.



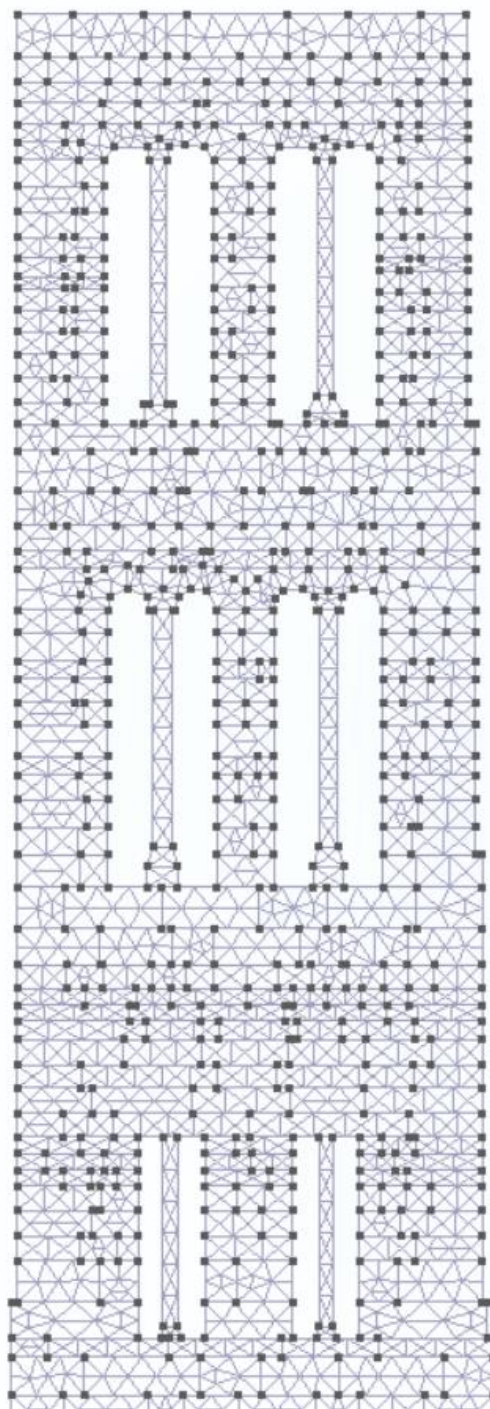
Slika 9. Sjeverno pročelje podijeljeno na diskretne elemente

### 3.2 Diskretizacija diskretnih elemenata mrežom konačnih elemenata

Diskretizacija je izvršena mrežom trokutastih konačnih elemenata korištenjem programa „GMSH“ koji za pripremljen nacrt diskretnih elemenata automatski generira mrežu konačnih elemenata.



Slika 10. Diskretizacija konstrukcije mrežom trokutastih konačnih elemenata



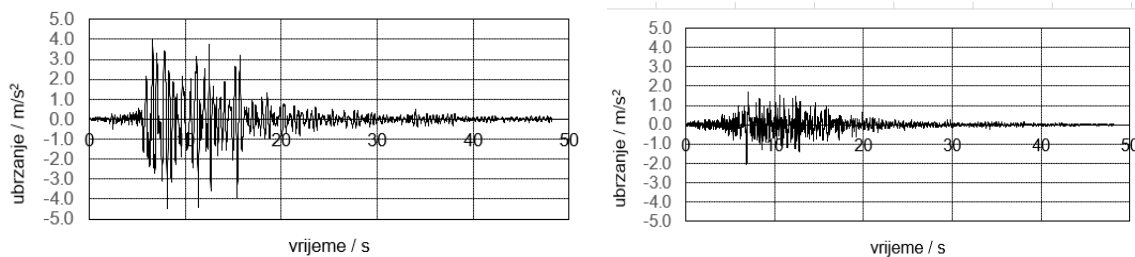
Slika 11. Detalj mreže konačnih elemenata

### 3.3 Opterećenje konstrukcije

Potresna opterećenja koja su korištena kao ulazni podatak za seizmičku analizu su zapisi ubrzanje tla tri realna potresa iz prošlosti: Petrovac 1979., Crna Gora; Campano Lucano 1980., Italija i South Iceland 2000., Island sa svojim horizontalnim i vertikalnim komponentama ubrzanja

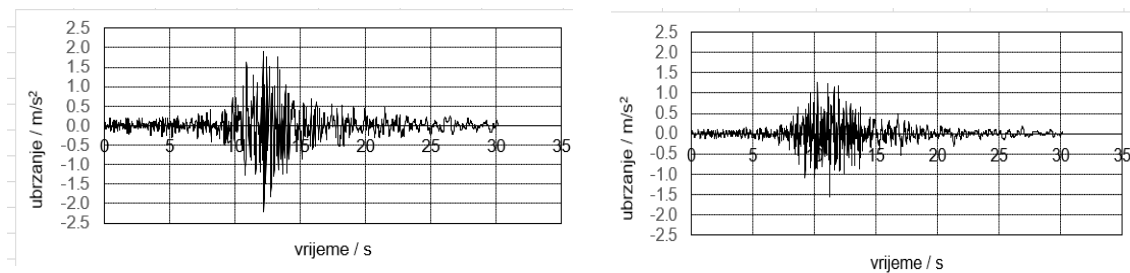
Na idućim grafovima za navedene potrese kojima je opterećena konstrukcija prikazane su njihove horizontalne i vertikalne komponente za različita vršna ubrzanja do sloma konstrukcije.

#### *Akcelerogram potresa u Petrovcu 1979., Crna Gora*



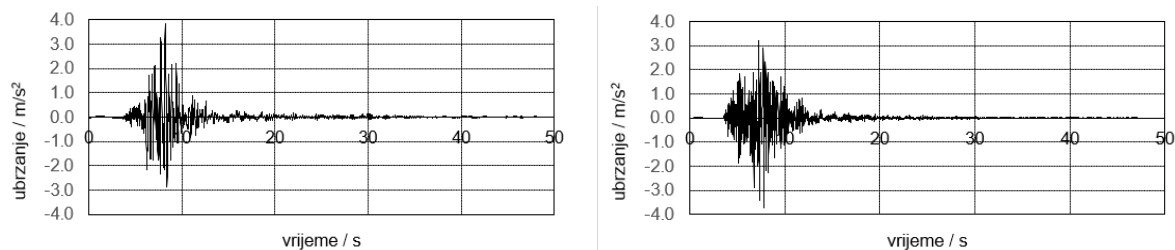
Slika 12. Akcelerogrami Petrovac; lijevo) horizontalna komponenta; desno) vertikalna komponenta

#### *Akcelerogrami potresa u Campano Lucanu 1980., Italija*



Slika 13. Akcelerogrami Campano Lucano; lijevo) horizontalna komponenta; desno) vertikalna komponenta

#### *Akcelerogrami potresa u South Islandu 2000., Island*

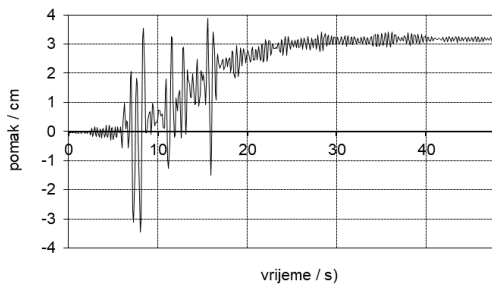


Slika 14. Akcelerogrami South Iceland; lijevo) horizontalna komponenta; desno) vertikalna komponenta

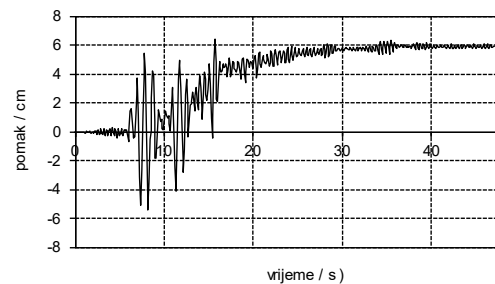
## 4 REZULTATI PRORAČUNA

### 4.1 Rezultati analize za potres u Petrovcu

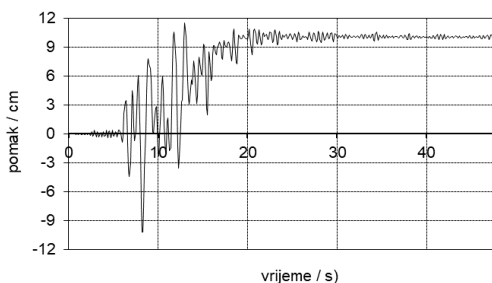
Na idućim grafovima za potres kojim je opterećena konstrukcija prikazani su pomaci vrha konstrukcije u centimetrima za različita vršna ubrzanja. Iz grafova je vidljivo da do pomaka dolazi već pri veoma malim vršnim ubrzanjima koji se kreću od cca 3cm pa sve do cca 13cm. Za vršno ubrzanje  $a_g=0.1g$  najveći pomaci javljaju se između  $t=7s$  i  $t=16s$ , a iznose oko 3.5cm. Konstrukcija je analizirana i za vršna ubrzanja  $a_g=0.15g$ ,  $a_g=0.22g$ ,  $a_g=0.30g$ ,  $a_g=0.35g$ , kod kojih pomaci vrha konstrukcije ukazuju na velika oštećenja ali ne i otkazivanje stabilnosti konstrukcije, te konačno za  $a_g=0.40g$ . Porastom vršnih ubrzanja rastu i pomaci vrha konstrukcije izložene potresnom djelovanju sa vrhuncem tih pomaka za vršno ubrzanje  $a_g=0.40g$  kod kojeg početni pomaci iznose cca 10cm te u  $t=19s$  dolazi do otkazivanja stabilnosti konstrukcije i njenog urušavanja gornje etaže.



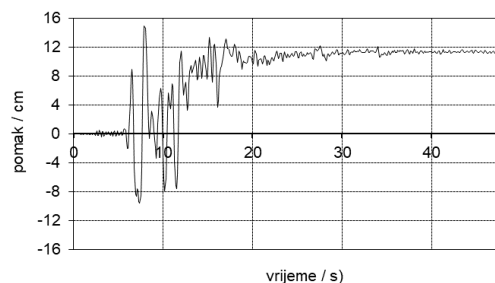
vršno ubrzanje 0.10 g



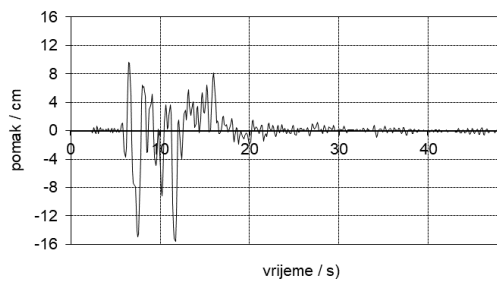
vršno ubrzanje 0.15 g



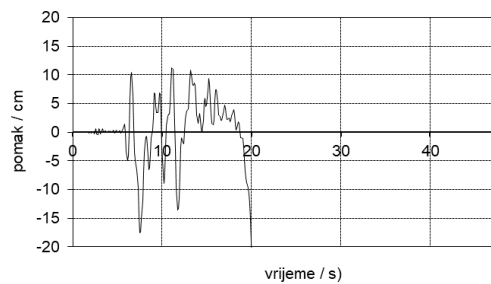
vršno ubrzanje 0.22 g



vršno ubrzanje 0.30 g



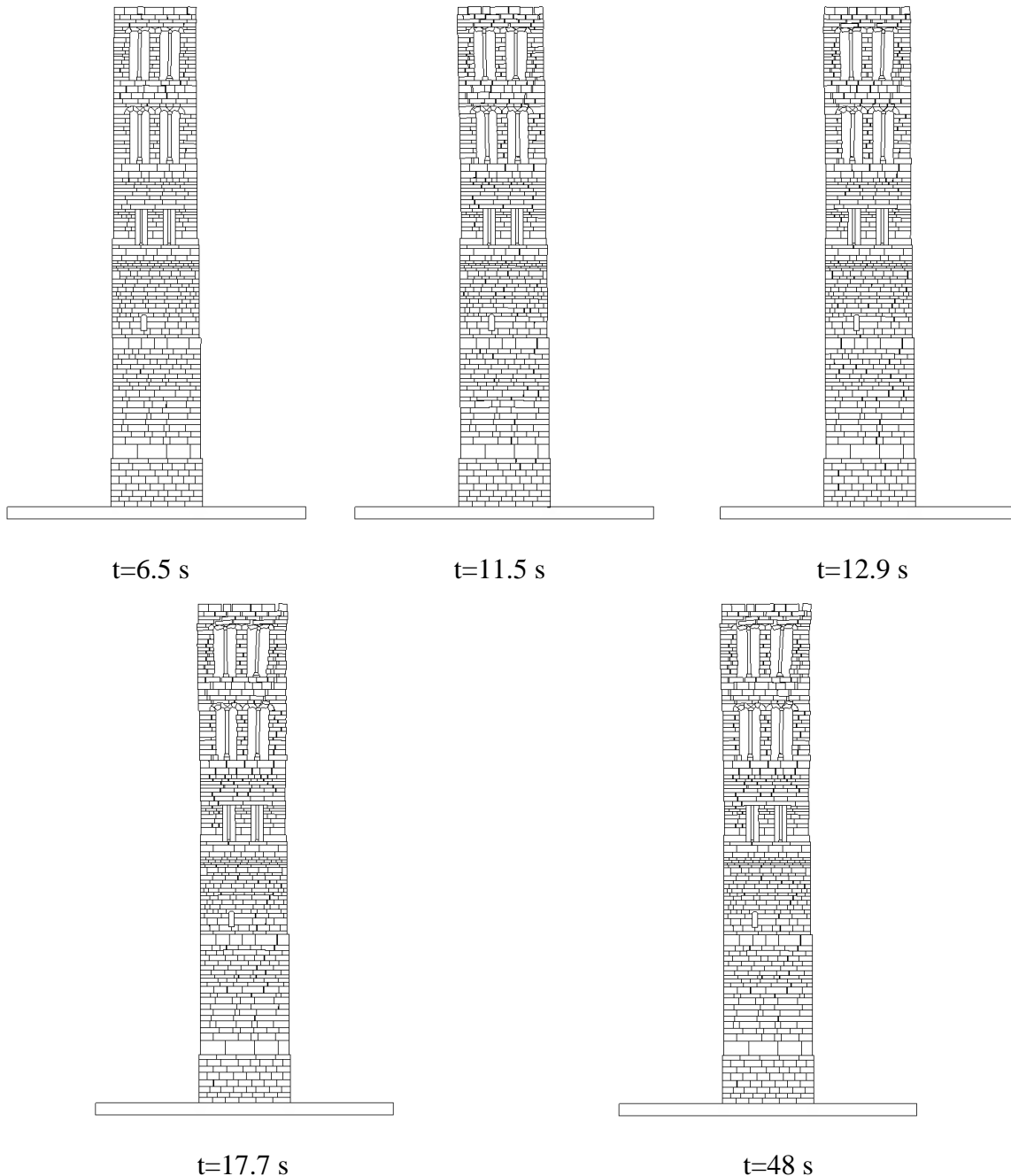
vršno ubrzanje 0.35 g



vršno ubrzanje 0.40 g



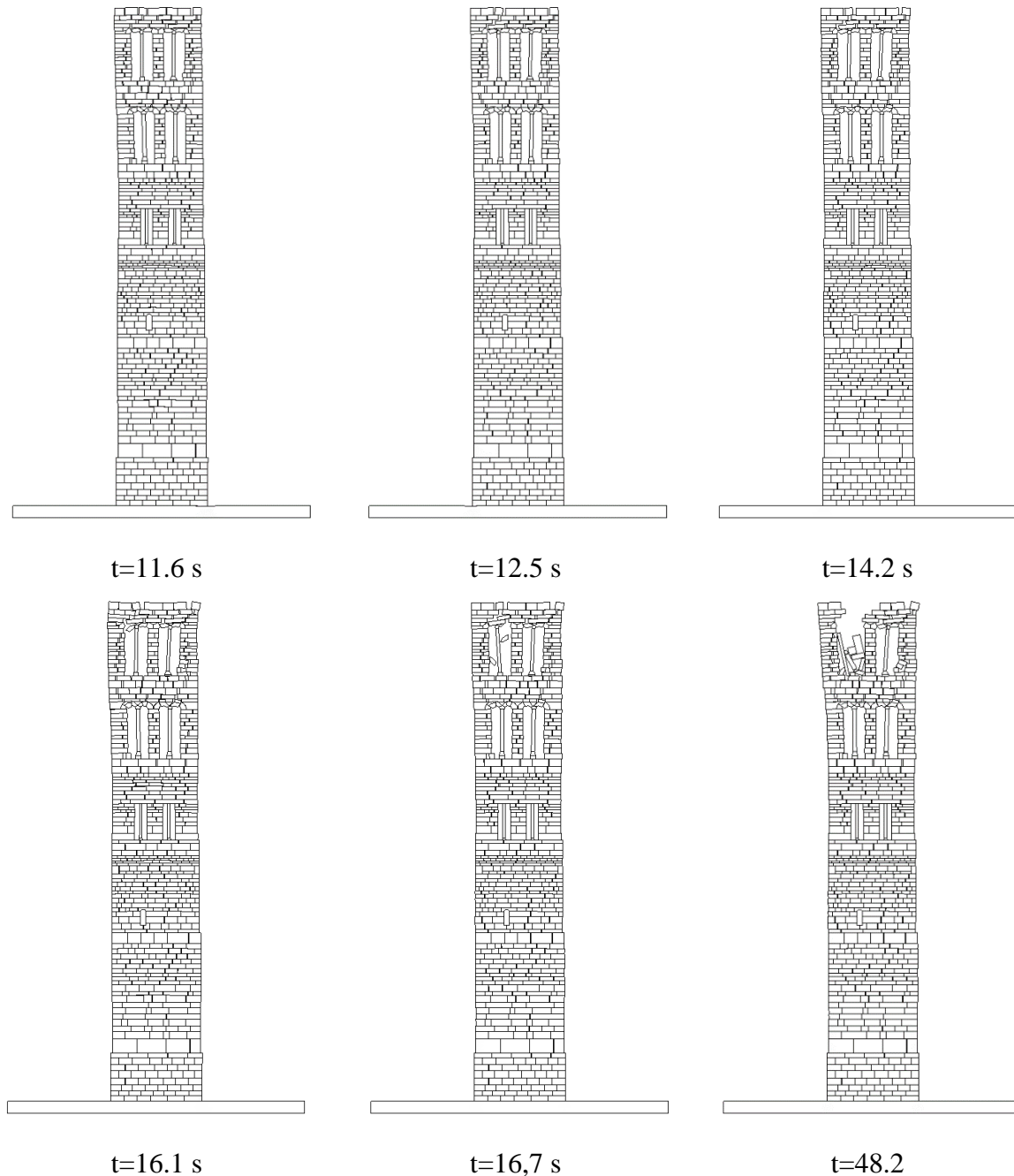
Slika 15. prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja  $a_g=0.35g$  tj. za vršno ubrzanje prije gubitka stabilnosti konstrukcije. Za vršno ubrzanje  $a_g=0.35g$  do pojave prve pukotine dolazi u 6. sekundi. Širenje pukotina nastavlja se do  $t=17s$  kada primjećujemo prva odvajanja blokova gornje etaže koja se ne povećavaju do kraja djelovanja potresa



Slika 15. Nastanak i širenje pukotina za potres Petrovac,  $a_g=0.35g$



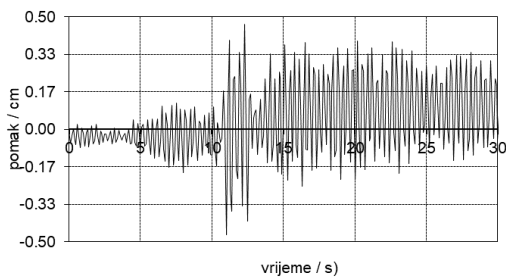
Slika 16. prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja  $a_g=0.40g$  tj. za vršno ubrzanje pri kojem dolazi do gubitka stabilnosti konstrukcije. Za vršno ubrzanje  $a_g=0.40g$  do pojave prve pukotine dolazi u 6. sekundi. Širenje pukotina nastavlja se do  $t=11s$ . do  $t=16s$  kada primjećujemo prva odvajanja blokova gornje etaže. Nakon  $t=16s$ . podrhtavanja dolazi do značajnih oštećenja gornje etaže u vidu odlamanja nadvoja nad stupovima i početka gubitka stabilnosti, takvo stanje nastavlja se do kraja podrhtavanja kada dolazi do urušavanja gornje etaže dok ostatak konstrukcije nije izgubio stabilnost.



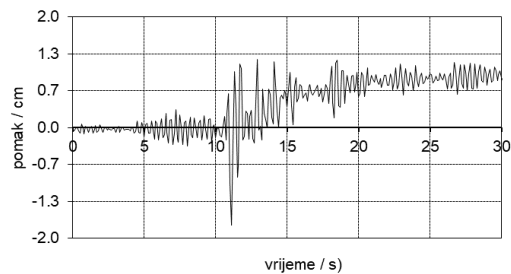
Slika 16. Nastanak i širenje pukotina za potres Petrovac,  $a_g=0.40g$

## 4.2 Rezultati analize za potres u Campano Lucanu

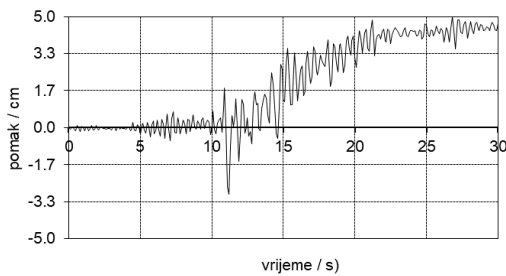
Na idućim grafovima za potres kojim je opterećena konstrukcija prikazani su pomaci vrha konstrukcije u centimetrima za različita vršna ubrzanja. Iz grafova je vidljivo da do značajnijih pomaka dolazi tek pri dosta većim vršnim ubrzanjima. Za vršno ubrzanje  $a_g=0.22g$ , koje je karakteristično za područje Splita najveći pomaci javljaju se između  $t=10s$ . i  $t=13s$ , a iznose oko 0.5cm. Konstrukcija je analizirana i za vršna ubrzanja  $a_g=0.50g$ ,  $a_g=1.0g$ ,  $a_g=1.50g$ ,  $a_g=2.0g$  i  $a_g=2.50g$  kod kojih vidimo da su pomaci vrha konstrukcije do maksimalno 15cm što ne upućuje na značajna oštećenja. Za vršno ubrzanje  $a_g=3.0g$  ti pomaci rastu na cca 23c, ali konstrukcije ne gubi stabilnost.



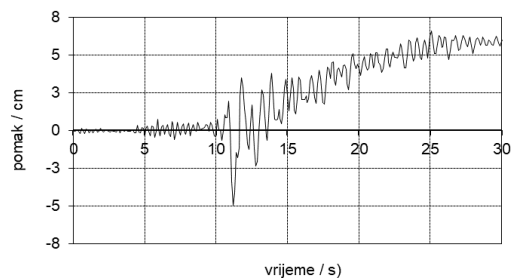
vršno ubrzanje 0.22 g



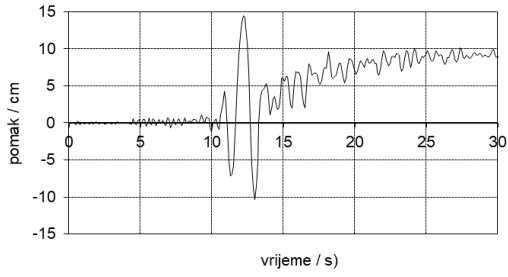
vršno ubrzanje 0.50 g



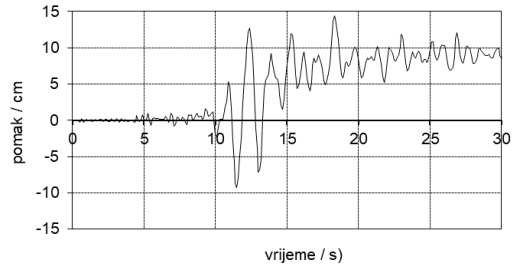
vršno ubrzanje 1.00 g



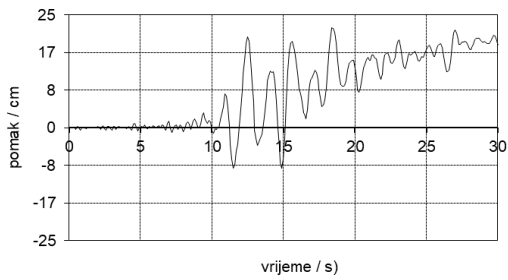
vršno ubrzanje 1.50 g



vršno ubrzanje 2.00 g

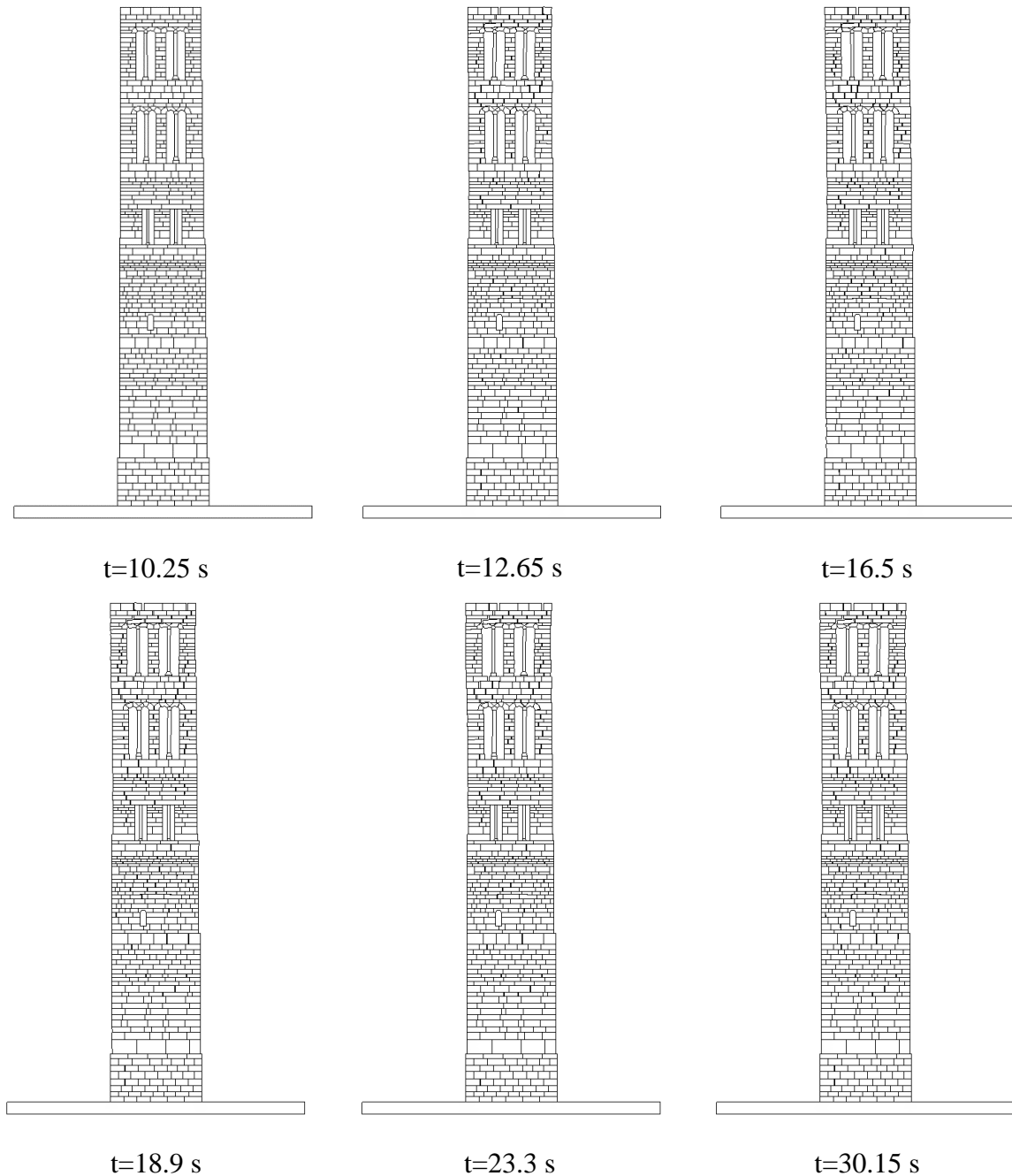


vršno ubrzanje 2.50 g



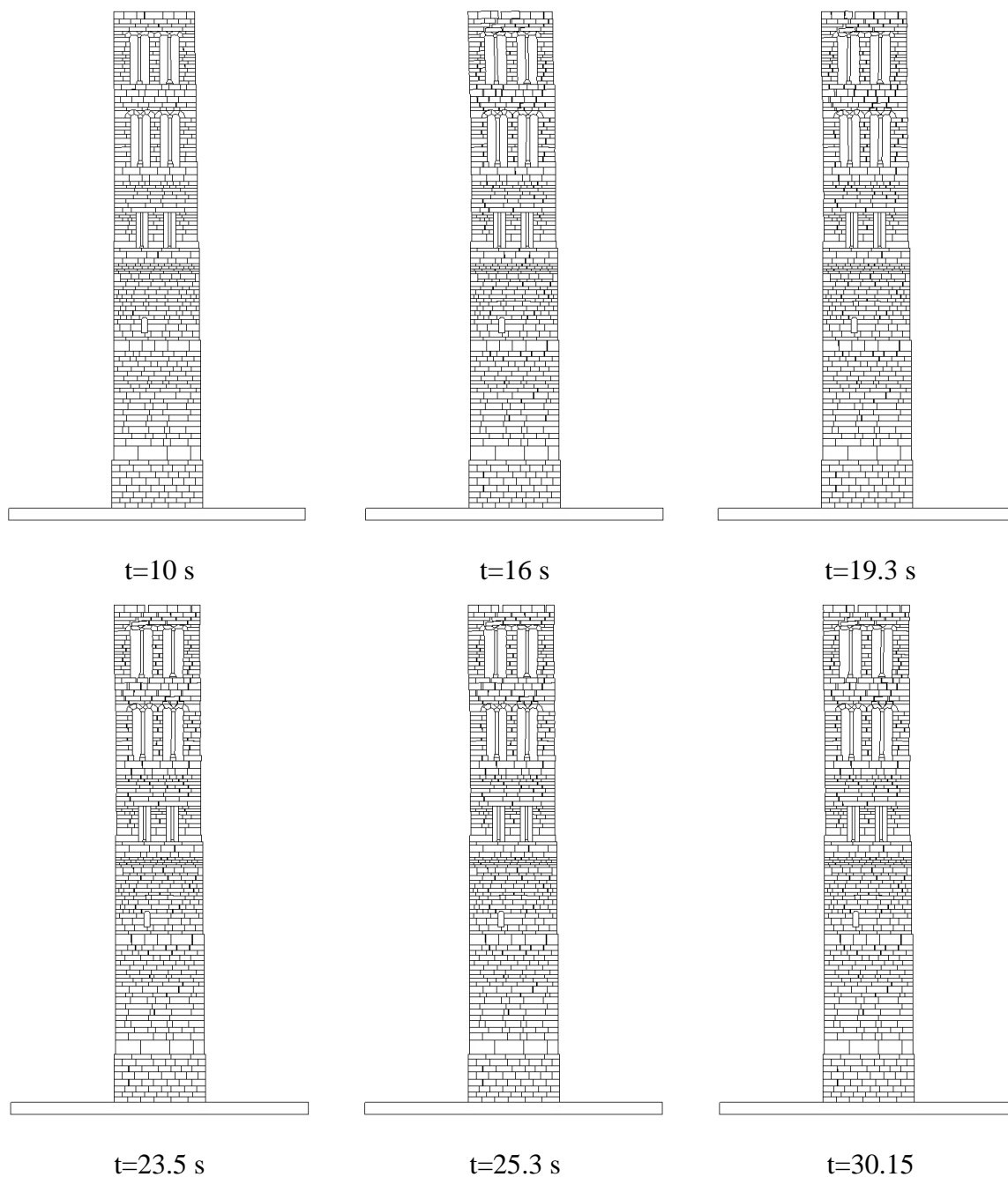
vršno ubrzanje 3.00 g

Slika 17. prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja  $a_g=2.5g$ . Za vršno ubrzanje  $a_g=2.5g$  do pojave prvih pukotina dolazi u  $t=10s$ . Na konstrukciji je vidljivo širenje pukotina do  $t=18s$  nakon čega je vidljivo prvo odvajanje bloka gornje etaže konstrukcije. Od  $t=19s$  do kraja djelovanja podube oštećenja se ne povećavaju.



Slika 17. Nastanak i širenje pukotina za potres Campano Lucano,  $a_g=2.5g$

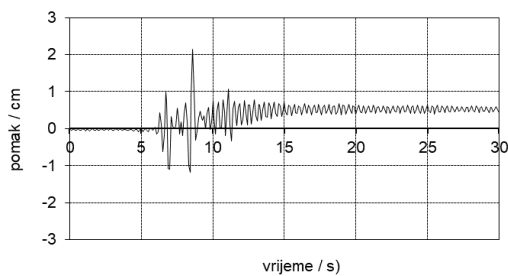
Slika 18. prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja  $a_g=3.0g$  tj. za maksimalno vršno ubrzanje pri kojem unatoč značajnijim oštećenjima ipak nije došlo gubitka stabilnosti konstrukcije. Za maksimalno ubrzanje, do  $t=16s$  podrhtavanja, konstrukcija ne poprima značajna oštećenja. Odvajanje bloka gornje etaže detektirano je nakon  $t=19s$  te do kraja djelovanja pobude ta se oštećenja povećavaju dok konstrukcija ostaje stabilna. Možemo uočiti da se konstrukcija ipak nalazi na samoj granici stabilnosti obzirom da su na stupova gornje etaže zabilježeni značajni pomaci.



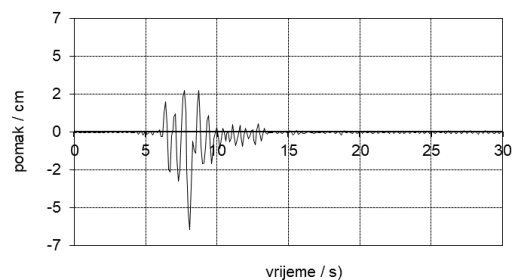
Slika 18. Nastanak i širenje pukotina za potres Campano Lucano,  $a_g=3.0g$

### 4.3 Rezultati analize za potres u South Icelandu

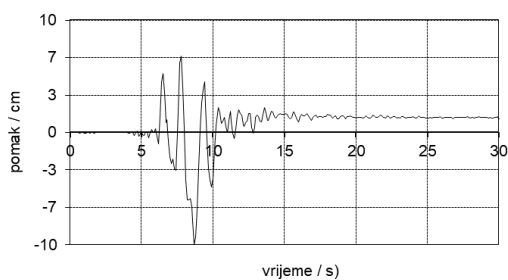
Na idućim grafovima za potres kojim je opterećena konstrukcija prikazani su pomaci vrha konstrukcije u centimetrima za različita vršna ubrzanja. Iz grafova je vidljivo da za vršna ubrzanja  $a_g=0.22g$  koje je karakteristično za područje grada Splita i  $a_g=0.50g$  maksimalni pomak vrha konstrukcije iznosi nešto više od 2cm što ne ukazuje na značajna oštećenja konstrukcije. Daljnjim povećavanjem ubrzanja  $a_g=1.0g$ ,  $a_g=1.50g$  i  $a_g=2.0g$  dolazi do većih pomaka vrha konstrukcije koji se kreću između sedam i dvadeset centimetara, uzrokuju određena oštećenja ali ne i gubitak stabilnosti. Slična je situacija i za vršno ubrzanje  $a_g=2.5g$  pri kojem dolazi do znatno većih pomaka od skoro 35cm što ukazuje na značajna oštećenja konstrukcije. Za maksimalno vršno ubrzanje  $a_g=3.0g$  dolazi do potpunog gubitka stabilnosti konstrukcije nakon  $t=15$  sekundi pobude.



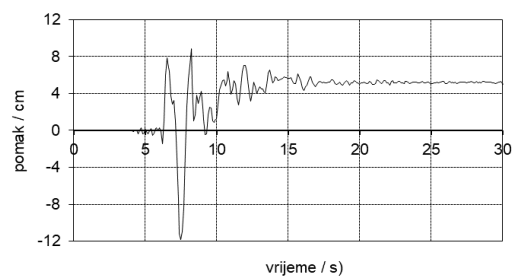
vršno ubrzanje 0.22 g



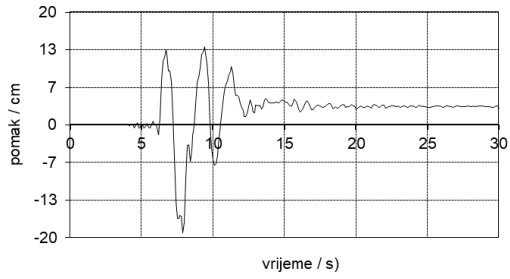
vršno ubrzanje 0.50 g



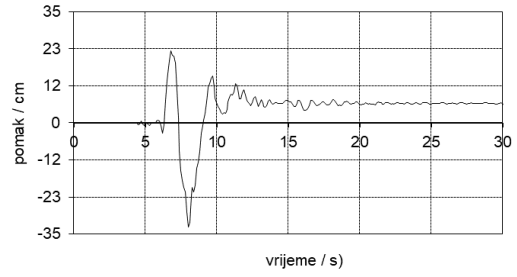
vršno ubrzanje 1.00 g



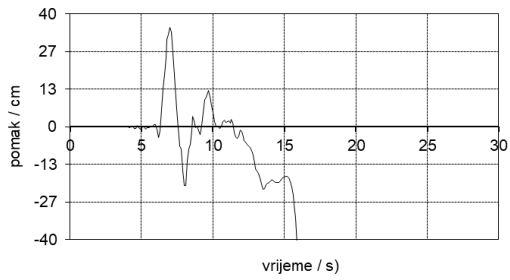
vršno ubrzanje 1.50 g



vršno ubrzanje 2.00 g

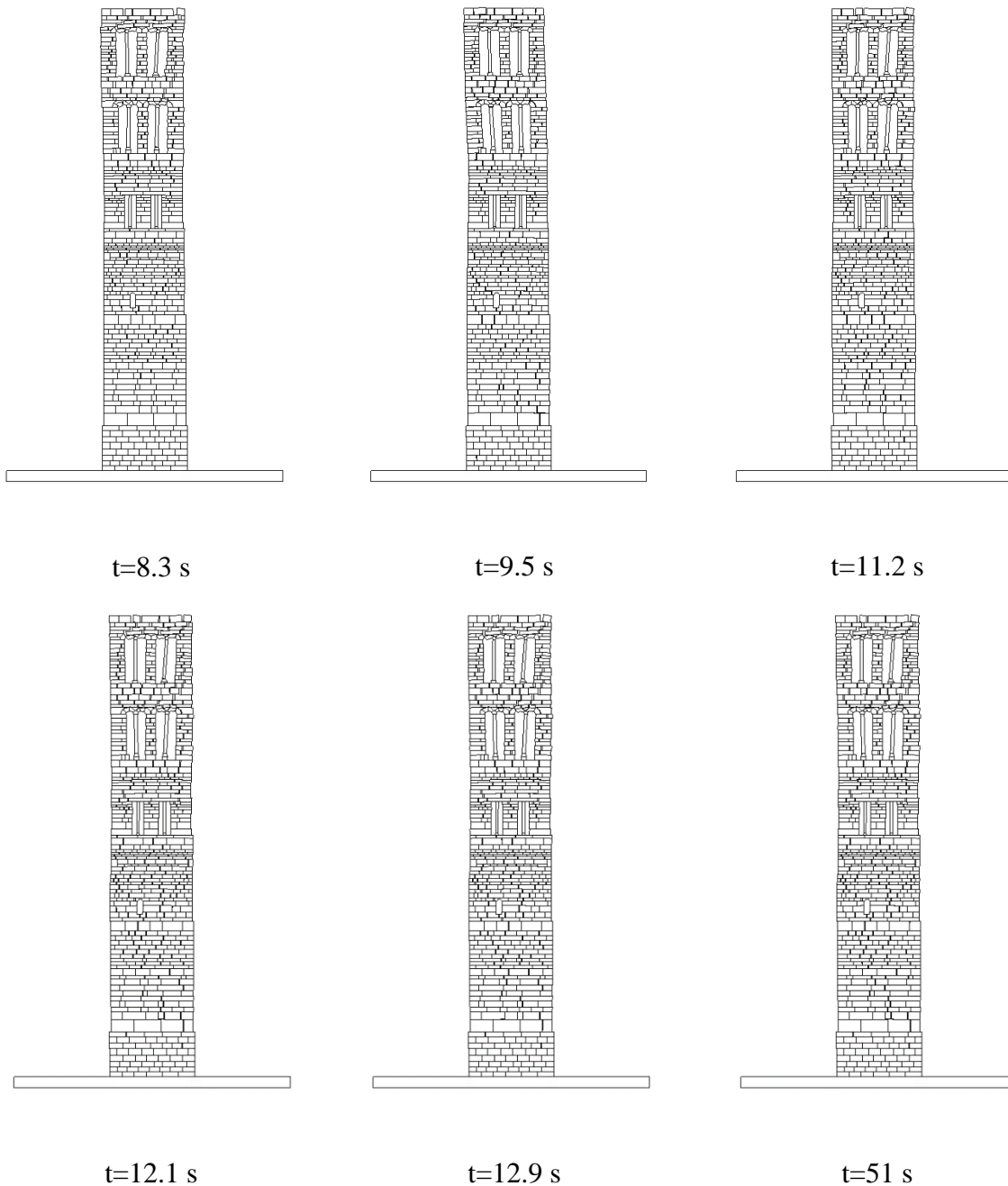


vršno ubrzanje 2.50 g



vršno ubrzanje 3.00 g

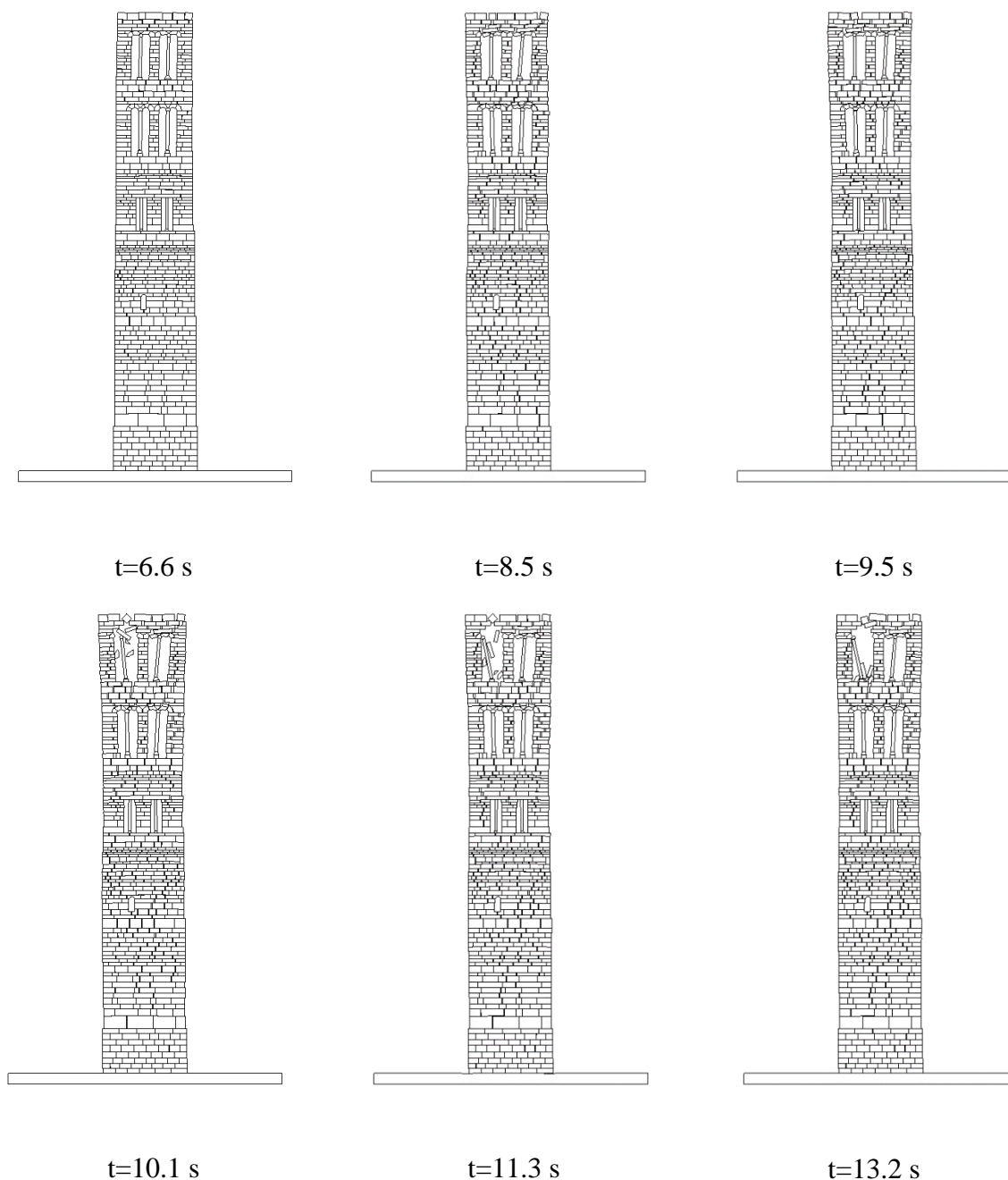
Slika 19. prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja  $a_g=2.5g$ . Za vršno ubrzanje  $a_g=2.5g$  do pojave prvih pukotina dolazi do  $t=8s$ . Na konstrukciji je vidljivo širenje pukotina do  $t=11s$  nakon čega je vidljivo prvo odvajanje bloka gornje etaže konstrukcije. Od  $t=11s$  do kraja djelovanja pobude oštećenja se ne povećavaju.



Slika 19. Nastanak i širenje pukotina za potres South Iceland,  $a_g=2.5g$



Slika 20. prikazuje nastanak i širenje pukotina konstrukcije izložene potresu vršnog ubrzanja  $a_g=3.0g$  tj. za maksimalno vršno ubrzanje pri kojem dolazi do gubitka stabilnosti konstrukcije. Za ubrzanje  $a_g=3.0g$  do pojave prve pukotine dolazi do  $t=6$  sekundi. Širenje pukotina nastavlja se do  $t=8s$  kada primjećujemo prva odvajanja blokova gornje etaže. Između  $t=8s$  i  $t=10s$  te pukotine se šire dok u konačnici u  $t=10.1$  sekundi dolazi do urušavanja stupa otvora gornje etaže te odlamanja fragmenata nadvoja. Potpuni gubitak stabilnosti gornje etaže konstrukcije vidljivo je u  $t=13$  sekundi.

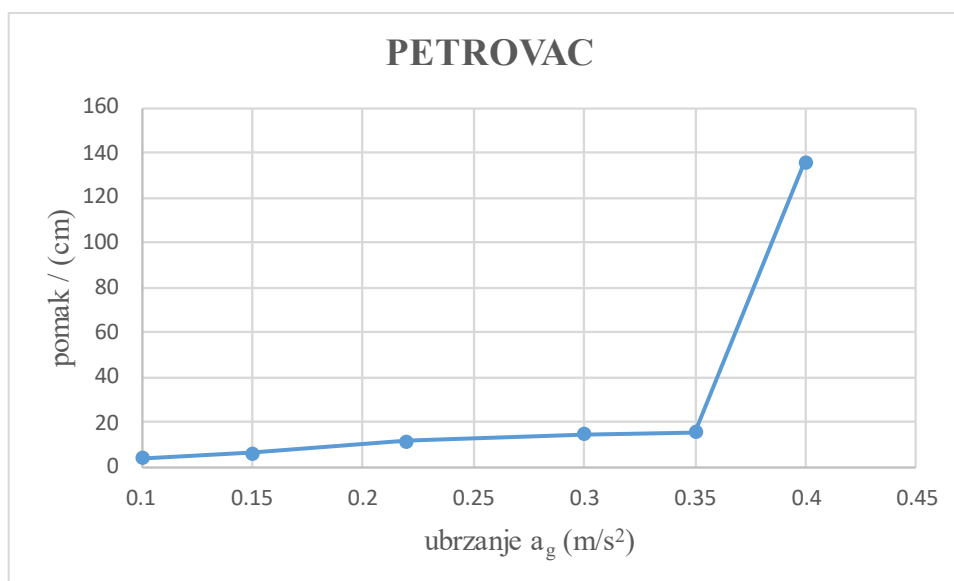


Slika 20. Nastanak i širenje pukotina za potres South Iceland,  $a_g=3.0g$

## 5 ANALIZA REZULTATA SEIZMIČKOG PRORAČUNA

Za odabrane potrese koji su poslužili kao referentni događaji za seizmičku analizu tornja izvršena je analiza dobivenih rezultata u vidu pomaka za različita ubrzanja  $a_g$ . Analiza se provela za svaki potres pojedinačno na način da se promatra ponašanje konstrukcije uslijed potresa.

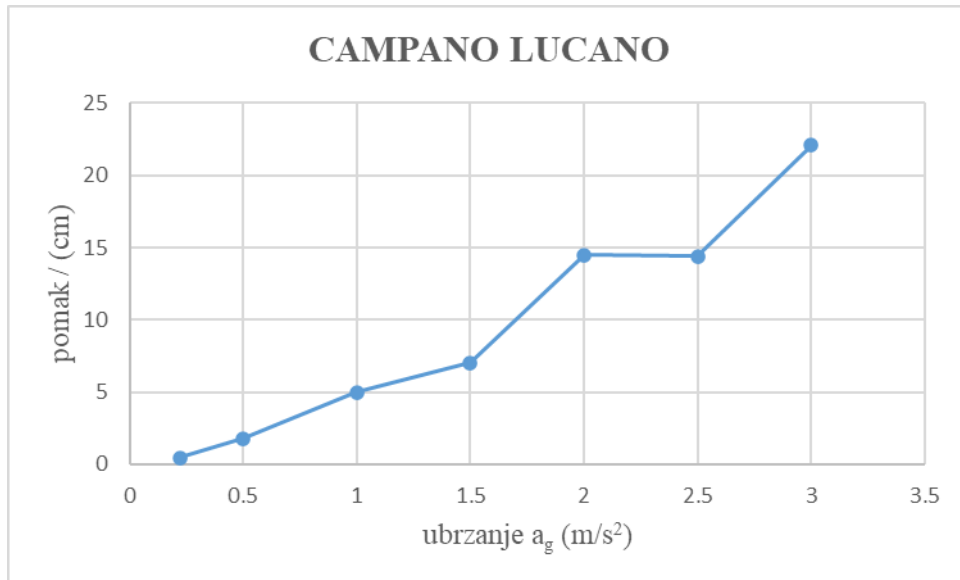
Na slici 21. prikazani su rezultati analize ponašanja konstrukcije zvonika Katedrale Sv. Duje uslijed djelovanja različitih ubrzanja potresa „Petrovac“.



Slika 21. Grafički prikaz pomaka konstrukcije uslijed djelovanja potresa "Petrovac"

Iz prikaza ponašanja konstrukcije uslijed različitih ubrzanja tijekom izloženosti potresnom djelovanju „Petrovac“ može se uočiti da za vršna ubrzanja  $a_g=0.1g$ ,  $a_g=0.15g$  i  $a_g=0.22g$  maksimalni pomaci vrha konstrukcije iznose do cca 10cm, dok za ubrzanja  $a_g=0.3g$  i  $a_g=0.35g$  su pomaci nešto veći od 10cm ali manji od 20cm. Za vršno ubrzanje  $a_g=0.4g$  dolazi do potpunog kolapsa i rušenja konstrukcije.

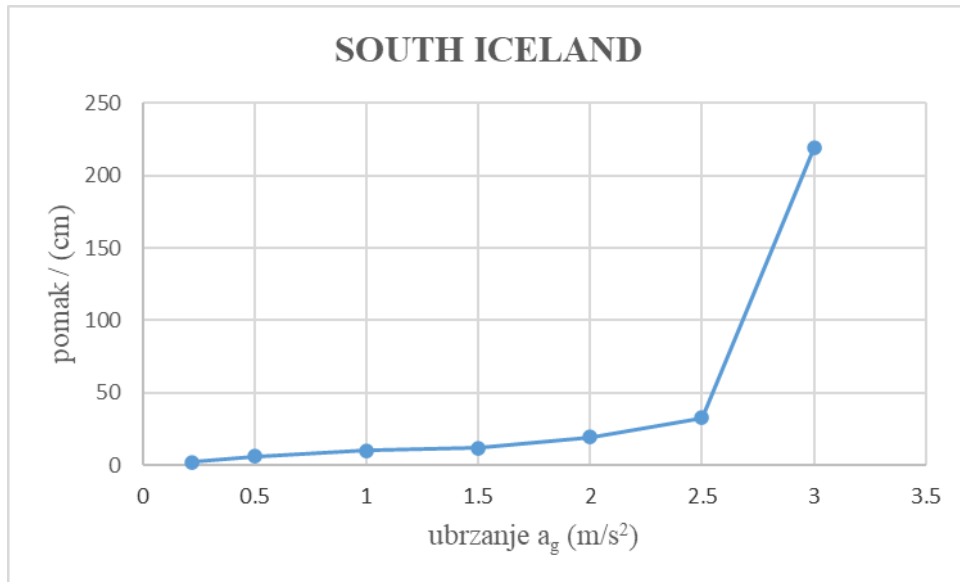
Na slici 22. prikazani su rezultati analize ponašanja konstrukcije zvonika Katedrale Sv. Duje uslijed djelovanja različitih ubrzanja potresa „Campano Lucano“.



Slika 22. Grafički prikaz pomaka konstrukcije uslijed djelovanja potresa "Campano Lucano"

Iz prikaza ponašanja konstrukcije uslijed različitih ubrzanja tijekom izloženosti potresnom djelovanju „Campano Lucano“ može se uočiti da za vršna ubrzanja  $a_g=0.22g$ ,  $a_g=0.5g$  i  $a_g=1.0g$  maksimalni pomaci vrha konstrukcije iznose do maksimalno 5 cm, dok za ubrzanje  $a_g=1.5g$  pomak vrha konstrukcije iznosi oko 7 cm te za  $a_g=2.0g$  i  $a_g=2.5g$  pomaci nešto malo manji od 15 cm. Za vršno ubrzanje  $a_g=3.0g$  dolazi do najvećeg pomaka vrha konstrukcije ali ne i potpunog kolapsa i rušenja konstrukcije.

Na slici 23. prikazani su rezultati analize ponašanja konstrukcije zvonika Katedrale Sv. Duje uslijed djelovanja različitih ubrzanja potresa „South Iceland“.



Slika 23. Grafički prikaz pomaka konstrukcije uslijed djelovanja potresa "South Iceland"

Iz prikaza ponašanja konstrukcije uslijed različitih ubrzanja tijekom izloženosti potresnom djelovanju „South Iceland“ može se uočiti da za vršna ubrzanja  $a_g=0.22g$ ,  $a_g=0.5g$  i  $a_g=1.0g$  maksimalni pomaci vrha konstrukcije iznose do maksimalno 10 cm, dok za ubrzanje  $a_g=1.5g$  pomak vrha konstrukcije iznosi oko 12 cm te za  $a_g=2.0g$  pomak vrha konstrukcije iznosi 20 cm, a  $a_g=2.5g$  pomaci vrha konstrukcije su 33 cm. Za vršno ubrzanje  $a_g=3.0g$  dolazi do potpunog kolapsa i rušenja konstrukcije.

## 6 ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu analiziranja je seizmička otpornost sjevernog pročelja zvonika Katedrale Sv. Duje u Splitu korištenjem kombiniranja metode konačno – diskretnih elemenata razvijene od strane profesora dr.sc. Antonija Munjize. Analiza je provedena na temelju dostupnih podataka o maksimalnim horizontalnim i vertikalnim ubrzanjima tri značajna povijesna potresa, onog u Petrovcu 1979. godine, Campano Lucanu 1980.godine i potresu na Južnom Islandu 2000. godine.

Iz provedenih analiza i grafičkih prikaza te podataka o pomacima za izabrana vršna ubrzanja, pokazalo se da je najrazorniji potres za zvonik Katedrale Sv. Duje upravo potres koji se dogodio u Petrovcu 1979. godine. Vidljivo je da za veoma malo vršno ubrzanje dolazi potpunog kolapsa i otkazivanja stabilnosti. Potresi Campano Lucano i South Iceland nisu pokazali toliko ekstremne pomake pri istim vršnim ubrzanjima kao potres u Petrovcu, do otkazivanja stabilnosti dolazi tek za znatno veća vršna ubrzanja dok pomaci za manja ubrzanja ukazuju na ozbiljna oštećenja, ali ne i gubitak stabilnosti.

Prema Eurokodu 8, potrebno je uzeti minimalno tri potresa i tada za proračunske učinke treba uzeti najveće odzive skupina neovisnih parova horizontalnih gibanja, odnosno ono koje uzrokuje kolaps konstrukcije. Kada se provodi nelinearni dinamički proračun za najmanje sedam neovisnih parova horizontalnih gibanja temeljnog tla, za proračunske vrijednosti učinka djelovanja smije se uzeti prosječna vrijednost pojedinačnih odziva. Može se zaključiti kako je u analizama važno uzeti što više potresnih zapisa u obzir budući da se pokazalo da postoji velik rasap rezultata između pojedinih zapisa potresa kako je vidljivo u analizama.

Provedenim analizama dobili smo uvid kako korištenjem kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata možemo precizno predvidjeti ponašanje konstrukcije tijekom potresnog djelovanja. Model napravljen pomoću ove metode omogućava simulaciju nastajanja i širenja pukotina koje su rezultat potresnog djelovanja te ponašanja konstrukcije i u slučaju otkazivanja stabilnosti. Unatoč preciznom predviđanju ponašanja konstrukcije veoma je važno uvijek tražiti i razvijati nove tehnologije za još pouzdanije predviđanja ponašanja konstrukcija u svrhu očuvanja ljudskih života, kulturne baštine i umanjenja materijalnih šteta koje potresi mogu prouzrokovati.

## 7 LITERATURA

- [1] Lourenço P.B., Computational strategies for masonry structures, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1996.
- [2] Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž.: Overview of the methods for the modelling of historical masonry structures, GRAĐEVINAR, 65 (2013) 7, pp. 603-618, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.890.2013>
- [3] Zubović, E., Smoljanović, H., Trogrlić, B.: Stability analysis of dry-stone lintels using combined finite-discrete element method, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 3, pp. 259-268, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1156.2014>
- [4] M. Čaušević; Dinamika konstrukcija; Golden marketing - Tehnička knjiga; Zagreb, 2010.
- [5] Munjiza, A. (2004). The Combined Finite-Discrete Element Method. John Wiley & Sons.
- [6] Curl, J. S. (2006). A Dictionary of Architecture and Landscape Architecture. Oxford University Press.
- [7] Ashurst, J., & Dimes, F. G. (1998). Conservation of Building and Decorative Stone. Butterworth-Heinemann.
- [8] Trosković, T., & Mirošević, K. (2008). Brački kamen – povijest, eksploatacija i primjena. Znanstvena biblioteka.
- [9] Ujević, M., & Pavić, K. (2005). The Brač Stone - Characteristics and Durability. Građevinar.
- [10] Matijević, M. (2011). Dioklecijanova palača u Splitu. Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [11] Kukoč, M., & Vukadin, I. (2014). The Cathedral of St. Domnius: Architectural Heritage and Conservation. Conservation and Management of Archaeological Sites.
- [12] Chopra, A. K. (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Pearson.
- [13] Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. Wiley-Interscience.
- [14] Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). Earthquake Spectra and Design. Earthquake Engineering Research Institute.
- [15] Hauser, A., Arhitektonski snimak postojećeg stanja s kraja 19. stoljeća u mj 1:40