

# Procjena seizmičke otpornosti tornja katedrale Svetog Dujma metodom konačno-diskretnih elemenata

---

Gučanin, Mateo

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:123:199742>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-18**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mateo Gučanin**

**Split, 2024.**

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

**Mateo Gučanin**

**Procjena seizmičke otpornosti tornja katedrale Svetog Dujma  
metodom konačno – diskretnih elemenata**

**Diplomski rad**

## **Procjena seizmičke otpornosti tornja katedrale Svetog Dujma metodom konačno – diskretnih elemenata**

### ***Sažetak:***

U ovom radu predstavljena je primjena razvijenog numeričkog modela s ciljem analize ponašanja građevinske konstrukcije pod djelovanjem potresa. Analiza je fokusirana na potresne događaje koji su se već dogodili u prošlosti, a to su zapisi potresa Petrovac, Campano Lucano i South Iceland. Analizu provodimo na zidanoj konstrukciji koja ima namjenu zvonika kao cjeloviti dio katedrale Svetog Dujma, a smještena je u Splitu, u Hrvatskoj. Istraživanje je usmjereno na detaljnu analizu suhozidane konstrukcije koristeći kombiniranu metodu konačno - diskretnih elemenata uz pomoć računalnog programa Y-2D. Rezultati istraživanja prikazuju krajnja stanja konstrukcije, uključujući fazu potpunog kolapsa, pružajući tako vrijedne uvide u otpornost i stabilnost suhozidanih struktura pod seizmičkim opterećenjem. Ova studija doprinosi boljem razumijevanju mehanizama oštećenja i može poslužiti kao osnova za daljnje unapređenje metoda za analizu i dizajn seizmički otpornih građevinskih konstrukcija.

### ***Ključne riječi:***

Numerički model, potres, zidana konstrukcija, suhozidna konstrukcija, metoda konačno – diskretnih elemenata, seizmičko opterećenje

# **Assessment of Seismic Resistance of the Bell Tower of the Cathedral of Saint Domnius Using the Finite-Discrete Element Method**

## ***Abstract:***

This study presents the application of a developed numerical model for analyzing the behavior of building structures under earthquake loading is presented. The analysis focuses on past seismic events, specifically the earthquake records of Petrovac, Campano Lucano, and South Iceland. The analysis is conducted on a masonry structure serving as the bell tower, which is an integral part of the Cathedral of Saint Domnius, located in Split, Croatia. The research is directed towards a detailed analysis of the dry-stone masonry structure using the combined finite-discrete element method with the assistance of the Y-2D computer program. The research results illustrate the ultimate states of the structure, including the phase of complete collapse, thus providing valuable insights into the resilience and stability of dry-stone structures under seismic loading. This study contributes to a better understanding of damage mechanisms and can serve as a basis for further improvement of methods for the analysis and design of seismically resistant building structures.

## ***Keywords:***

Numerical model, earthquake, masonry structure, dry-stone structure, finite-discrete element method, seismic loading

STUDIJ: SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO

KANDIDAT: MATEO GUČANIN

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083223852

KATEDRA: KATEDRA ZA TEORIJU KONSTRUKCIJA

KOLEGIJ: OSNOVE SIMULACIJSKOG INŽENJERSTVA

## **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Procjena seizmičke otpornosti tornja katedrale Svetog Dujma metodom konačno – diskretnih elemenata

Opis zadatka: Na temelju zadanog nacрта istočnog pročelja zvonika Sv. Dujma u Splitu potrebno je izvršiti seizmičku analizu u računalnom programu “Y“, koji je baziran na kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata. Za seizmičko opterećenje uzeti zapise tri potresa (Petrovac, Campano Lucano i South Iceland) te ih skalirati na zadane vrijednosti vršnog ubrzanja. Potrebno je usporediti dobivene rezultate te donijeti zaključke o izdržljivosti konstrukcije na temelju istih.

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 studija Građevinarstvo:

izv. prof. dr. sc. Ivan Balić



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,  
ARCHITECTURE AND GEODESY

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

kojom ja, Mateo Gučanin, JMBAG: 0083223852, student Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, kao autor ovog diplomskog rada izjavljujem da sam ga izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović / komentorstvom izv. prof. dr. sc. Ivan Balić.

U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, zaključke, teorije, formulacije i grafičke prikaze koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u radu citirao sam i povezao s korištenim bibliografskim jedinicama.

*Mateo Gučanin*

(vlastoručni potpis studenta)

## POSVETA

*Mome mlađem bratu Gabrielu.*

*Ovaj rad posvećujem tebi, moj dragi mali brate. Hvala ti što si bio neizostavni dio mog života, što si mi dao snagu da nastavim dalje kad je bilo najteže. Ovo je samo mali znak moje beskrajne zahvalnosti za sve što si mi pružio, za svaku lekciju koju si me naučio. Sav svoj budući trud i uspjeh posvećujem tebi. Neka te nebeski proplanci i anđeli čuvaju, voljeni brate, zauvijek ćeš biti u mom srcu.*



# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Općenito .....	1
1.2. Uvod u metodu proračuna .....	4
1.3. Metoda konačnih elemenata.....	5
1.4. Metoda diskretnih elemenata.....	6
1.4.1. Primjena metode .....	6
1.4.2. Razvoj metoda .....	7
1.4.3. Prednosti i ograničenja .....	7
<b>2. OSNOVE KOMBINIRANE METODE KONAČNO – DISKRETNIH ELEMENATA .....</b>	<b>8</b>
2.1. Detekcija i interakcija kontakata .....	8
2.2. Deformabilnost konačnih elemenata u kombiniranoj metodi konačno - diskretnih elemenata .....	8
2.3. Prijelaz iz kontinuuma u diskontinuum.....	9
2.4. Vremenska diskretizacija .....	10
<b>3. PRIMJENA KOMBINIRANE METODE KONAČNO – DISKRETNIH ELEMENATA .....</b>	<b>12</b>
3.1. Ulazni podaci.....	12
3.2. Podjela na diskretne elemente .....	14
3.3. Diskretizacija modela .....	15
3.4. Potresna djelovanja na konstrukciju.....	16

<b>4. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA .....</b>	<b>18</b>
4.1. Rezultati proračuna za potres Petrovac .....	18
4.2. Rezultati proračuna za potres Campano Lucano .....	24
4.3. Rezultati proračuna za potres South Iceland .....	30
<b>5. ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA .....</b>	<b>36</b>
5.1. Analiza numeričkih rezultata za potres Petrovac .....	36
5.2. Analiza numeričkih rezultata za potres Campano Lucano .....	37
5.3. Analiza numeričkih rezultata za potres South Iceland .....	38
5.4. Prikaz pomaka konstrukcije pri povećanju vršnog ubrzanja za sva tri potresa .....	39
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>40</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>42</b>

## 1. UVOD

### 1.1. Općenito

Zidani objekti predstavljaju najraspostranjenije tipove građevinskih objekata od postanka svijeta pa do današnjih dana. Za izgradnju objekta u prvo vrijeme korišteni su elementi od kamena i drveta obzirom da su ovi materijali bili lako dostupni u prirodi, a kasnije su korišteni elementi od pečene gline tzv. opeke. Kamen je od davnina široko primjenjivan kao materijal za građenje u prvom redu zgrada za stanovanje, ali i drugih objekata: hramova, palača, kazališta, tvrđava, mostova, akvadukta i dr.

Danas, gotovo da nema poljoprivredne površine u Hercegovini i Dalmaciji koja u svom krajoliku nema napuštene suhozidne krajolike, koji pripovjedaju priču o nekadašnjem čovjekovu načinu života i odnosu prema okolišu, budući da su suhozidi oduvijek bili vrijedno eko stanište za različite biljke i životinje (razni kukci, gmizavci...).

Zidane konstrukcije su danas, u svijetu, a i kod nas masovno zastupljeni u oblasti stambenih i javnih zgrada. Kod svih objekata ove vrste oko 80% (po površini) pripada tipu zidanih konstrukcija, što znači da su ove konstrukcije danas u vrhu masovnog graditeljstva. Treba napomenuti da se zidane konstrukcije, u novije vrijeme, ne tretiraju kao nekad – na empirij, već se njihov proračun i izvođenje baziraju na znanstvenim dostignućima. U prilog ovoj tvrdnji ide i činjenica da se, u okviru Eurokoda, zidane konstrukcije tretiraju samostalno i ravnopravno sa konstrukcijama od drugih, suvremenih materijala. [1]

Zidarski radovi zahtijevaju pažljivo planiranje, preciznost i stručnost kako bi se osigurala stabilnost i dugovječnost građevine. Zidari koriste razne materijale poput opeke, kamena, betona i raznih blokova, te primjenjuju tehnike kao što su miješanje morta, postavljanje armature i ravnanje površina. Kroz ove tehnike, zidari ne samo da stvaraju funkcionalne zgrade, već i poboljšavaju estetski izgled i karakter prostora.

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. Da bi se smanjio broj ljudskih žrtava te smanjila oštećenja takvih konstrukcija, potrebno je dati bolji uvid u ponašanje zidanih konstrukcija pod seizmičkim djelovanjem, što na neki način i prikazujem ovim radom.

Seizmička analiza zidanih konstrukcija može se podijeliti na linearne i nelinearne metode. Linearne metode uključuju pojednostavljenu ekvivalentnu statičku analizu, koja koristi ekvivalentno statičko opterećenje, i modalnu analizu koja koristi metodu konačnih elemenata za izračun vlastitih oblika i frekvencija. Pojednostavljena ekvivalentna statička analiza može koristiti konstantno horizontalno ubrzanje ili raspodijeljeno opterećenje koje raste od dna prema vrhu konstrukcije. Nelinearne metode uključuju statičku metodu postupnog guranja, koja prati odgovor konstrukcije na postepeno povećavanje horizontalnih sila, i metodu odgovora u vremenu, koja izračunava naprezanja, deformacije i pomake konstrukcije za određeni zapis ubrzanja podloge.

Mnoge zidane konstrukcije nalaze se u seizmički aktivnim područjima, gdje potresi otkrivaju njihovu ranjivost. Potrebno je bolje razumjeti njihovo ponašanje pod seizmičkim opterećenjem kako bi se smanjila oštećenja i poboljšala njihova otpornost. Cilj ovog istraživanja je razviti numerički model za simulaciju reakcije zidanih konstrukcija na seizmička opterećenja, što bi moglo pomoći u procjeni njihove otpornosti i donošenju odluka o poboljšanju njihove seizmičke otpornosti. [2]

U ovom radu za proračun zidanih konstrukcija korištena je metoda konačnih elemenata. Metoda diskretnih elemenata predstavlja moćan alat za analizu i optimizaciju zidanih konstrukcija, omogućujući inženjerima i istraživačima da bolje razumiju i poboljšaju otpornost ovih konstrukcija na različite vrste opterećenja, uključujući seizmička.

Kao što je prethodno navedeno zidane konstrukcije kroz povijest su među najzastupljenijim građevinama, neke od poznatih suhozidnih konstrukcija uključuju Velika piramida u Gizu u Egiptu, Kineski zid u Kini, Colosseum u Italiji, Dubrovačke zidine u Hrvatskoj i mnoge druge.



*Slika 1. Piramide u Gizi*



*Slika 2. Kineski zid*



*Slika 3. Colosseum u Rimu*



*Slika 4. Dubrovačke zidine*

## 1.2. Uvod u metodu proračuna

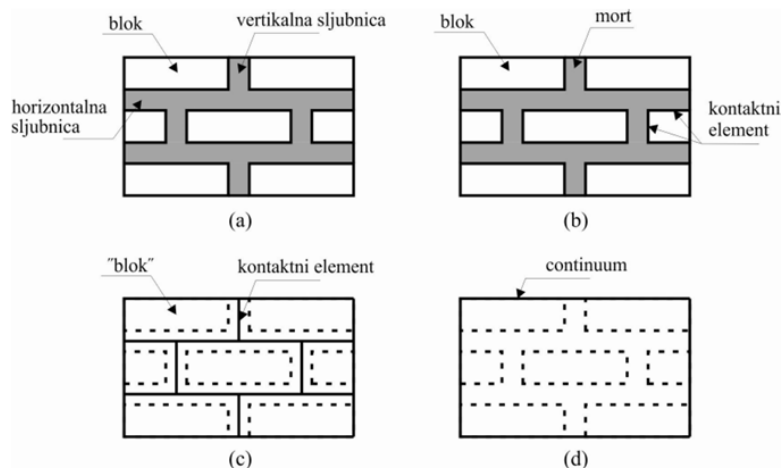
Katedrala Svetog Duje, koja se nalazi u Splitu, Hrvatska, predstavlja jednu od najvažnijih kulturnih i povijesnih građevina u regiji. S obzirom na seizmičku aktivnost područja, izuzetno je važno osigurati stabilnost i otpornost tornja katedrale na potrese. Metoda konačno-diskretnih elemenata (FDEM) [3] pruža napredni pristup za seizmički proračun ovakvih složenih povijesnih konstrukcija, kombinirajući prednosti metode konačnih elemenata (FEM) [3] i metode diskretnih elemenata (DEM) [3].

Za proračun i modeliranje zidanih konstrukcija ključno je razumjeti njihova glavna obilježja. Zidane konstrukcije su kompozitne, sastavljene od blokova odvojenih sljubnicama, koje mogu, ali ne moraju biti ispunjene mortom. Sljubnice su najslabija karika, što uzrokuje nelinearno i kompleksno ponašanje te otežava numeričko modeliranje. Postoji širok spektar metoda i modela za proračun zidanih konstrukcija, koji se razlikuju po složenosti, potrebnim podacima i točnosti.

U numeričkom modeliranju zidanih konstrukcija dijele se na kontinuumске i diskontinuumске. Kontinuumski pristup tretira konstrukciju kao homogen materijal, dok diskontinuumski pristup promatra konstrukciju kao skup diskretnih elemenata koji se mogu slobodno kretati i međusobno djelovati tijekom analize.

Kombinirani pristupi koriste prednosti oba modela. Neke metode koriste kontaktne elemente unutar mreže konačnih elemenata, dok druge diskretiziraju svaki diskretni element s mrežom konačnih elemenata, uzimajući u obzir deformabilnost.

Modeliranje se može podijeliti na makro, mikro i pojednostavljeno mikro modeliranje (slika 5). Makro modeliranje tretira konstrukciju kao homogeni anizotropni kontinuum. Ovakav pristup prikladan je za analizu većih konstrukcija jer je proračunski najmanje zahtjevan. Mikro modeliranje detaljno modelira blokove i mort s konačnim elementima, zbog svojih velikih proračunskih zahtjeva ovaj pristup prikladan je za modeliranje manjih konstrukcijskih detalja, ali ne i realnih konstrukcija, dok se pojednostavljeno mikro modeliranje koristi kontaktne elemente za predstavljanje veza između blokova i morta.



Slika 5. Razine modeliranja zidanih konstrukcija: (a) predložak zidane konstrukcije; (b) detaljno mikro modeliranje; (c) pojednostavljeno mikro modeliranje; (d) makro modeliranje [4]

Metode za seizmičku analizu zidanih konstrukcija uključuju linearne metode (poput ekvivalentne statičke analize i modalne analize) te nelinearne metode (poput postupnog guranja i metode odgovora u vremenu). Ekvivalentna statička analiza koristi konstantno horizontalno ubrzanje ili raspodijeljeno opterećenje po visini konstrukcije. Modalna analiza koristi metodu konačnih elemenata za izračun vlastitih oblika i frekvencija. Nelinearne metode prate odgovore konstrukcije na povećane amplitude horizontalnih sila ili analizu reakcije na zapis ubrzanja podloge. [4]

### 1.3. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (FEM) najčešće se koristi za proračun zidanih konstrukcija zbog svoje dugotrajne tradicije i široke primjene. Postoji mnogo modela baziranih na ovoj metodi koji se razlikuju po vrsti elemenata i zakonima ponašanja materijala, koji mogu biti linearni ili nelinearni.

Najjednostavniji način modeliranja zidanih konstrukcija je diskretizacija skeletnim sustavom korištenjem linijskih elemenata. Napredniji modeli uključuju materijalnu i geometrijsku nelinearnost te kriterije loma. Pojednostavljeni modeli koriste ekvivalentne okvirne sustave za analizu zidanih zidova, dok makroelementi smanjuju broj stupnjeva slobode i vrijeme proračuna.

Makromodeliranje, koje koristi dvodimenzionalne i trodimenzionalne elemente, postalo je popularno za analizu velikih zidanih konstrukcija zbog ravnoteže između troškova proračuna i

točnosti. Linearna analiza može se koristiti za predviđanje prvih pukotina, ali je nelinearna analiza potrebna za potpuni prikaz ponašanja konstrukcije pod opterećenjem.

Nelinearni makromodeli uzimaju u obzir različite čvrstoće i svojstva materijala duž osi, tretirajući konstrukciju kao homogeni ortotropni kontinuum. Elastični i neelastični parametri određuju se eksperimentalnim ispitivanjima ili numeričkom homogenizacijom.

Teorija plastičnosti i mehanika oštećenja koriste se za formuliranje nelinearnih zakona ponašanja materijala. Plastičnost opisuje trajne deformacije, dok mehanika oštećenja opisuje smanjenje elastičnih svojstava zbog mikropukotina. Klasična metoda konačnih elemenata nije dovoljna za simulaciju diskontinuiteta, pa se koriste kontaktni elementi za opisivanje potencijalnih pukotina.

Kontaktni elementi integriraju materijalnu nelinearnost, dok konačni elementi opisuju linearno elastično ponašanje. Ovaj pristup koristi se za analizu manjih konstrukcijskih detalja ili za tehnike homogenizacije koje utvrđuju konstitutivni zakon ponašanja zidane konstrukcije.

Na kraju, metoda konačnih elemenata ostaje ključna za analizu zidanih konstrukcija, posebno kada se koristi zajedno s kontaktnim elementima za preciznije modeliranje i proračune. [4]

## **1.4. Metoda diskretnih elemenata**

Metoda diskretnih elemenata (DEM) je računalni pristup u kojem se simuliraju pomaci i rotacije diskretnih tijela, uključujući njihovo potpuno odvajanje i prepoznavanje novih kontakata između tijela. Ova metoda je razvijena za simulaciju klizanja i razdvajanja stijenskih masa duž pukotina i diskontinuiteta. Osnovni elementi metode uključuju eksplicitnu numeričku integraciju jednadžbi gibanja u vremenu, što omogućava proizvoljne pomake blokova i njihovu međusobnu interakciju. Metoda također može dobiti statička rješenja korištenjem viskoznog prigušenja, slično dinamičkoj relaksaciji. [4]

### **1.4.1. Primjena metode**

Zidane konstrukcije: Metoda je korisna za analizu zidanih konstrukcija gdje su blokovi predstavljani kao diskretni elementi povezani kontaktnim elementima, omogućujući simulaciju rotacije, klizanja i udarnog opterećenja.

Oblici elemenata: Blokovi mogu biti poligonalni elementi ili kružni diskovi/sfere (zrnati modeli). Zrnati modeli su efikasniji za mikromodeliranje tla i granularnih materijala, dok su poligonalni modeli složeniji za proračun kontakta.

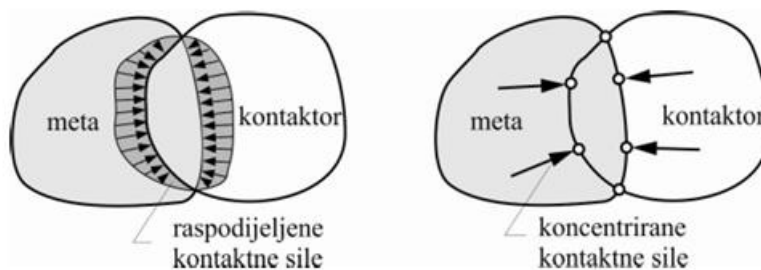


Primjeri upotrebe: Analiza kamenih mostova, statička i dinamička analiza zidanih nosivih zidova, stabilnost stupova s arhitravom, analiza kamenih lukova, te dinamička analiza kamenih zvonika i bazilika. [4]

### 1.4.2. Razvoj metoda

#### a.) Kontaktne sile

Cundall i Hart razlikovali su mekane i krute kontakte. Mekani kontakti dopuštaju preklapanje elemenata, dok kruti ne dopuštaju. Koncentrirane kontaktne sile se ostvaruju kroz niz kontaktnih točaka, dok su linijski i površinski kontakti opisani kontinuiranom funkcijom naprezanja.



Slika 6. Raspodijeljene i koncentrirane kontaktne sile [4]

#### b.) Integracija konačnih elemenata

Neki modeli koriste kombinaciju diskretnih i konačnih elemenata (FEM/DEM) kako bi uzeli u obzir naprezanje i deformaciju unutar diskretnih elemenata. To uključuje modele koji koriste mreže trokutnih elemenata i algoritme za prepoznavanje kontakta. [4]

### 1.4.3. Prednosti i ograničenja

Metoda je prikladna za modeliranje zidane konstrukcije na mikrorazini, ali apsolutno kruti blokovi mogu biti neprikladni za analizu konstrukcija s značajnim unutarnjim naprezanjem. Diskretni elementi mogu se diskretizirati s mrežom konačnih elemenata za detaljniju analizu.[4]

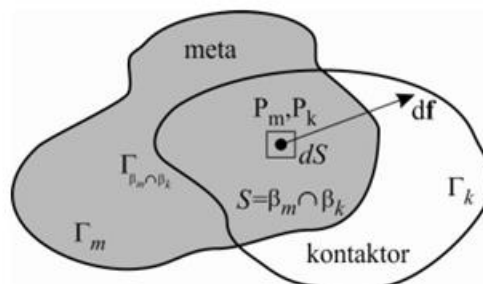
## 2. OSNOVE KOMBINIRANE METODE KONAČNO – DISKRETNIH ELEMENATA

### 2.1. Detekcija i interakcija kontakata

Algoritam za detekciju kontakta prepoznaje elemente koji mogu biti u kontaktu, eliminirajući one koji su predaleko. U kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata koristi se NBS algoritam, najbrži poznati algoritam za prepoznavanje kontakata među elementima sličnih dimenzija, čije je vrijeme prepoznavanja proporcionalno broju elemenata. Kontaktne sile između dva elementa, kontaktora i mete, izračunavaju se pomoću potencijalnih polja  $\phi$ . Diferencijalna sila djelovanja mete na kontaktor u točki  $P_k$  je  $-\text{grad}\phi(P_k)dS_{mk}$ . Ukupna kontaktna sila na kontaktoru dobiva se integracijom:

$$f = \int_{\Gamma_{NS}} (\text{grad}\phi_m - \text{grad}\phi_k)dS$$

Ova formula predstavlja ukupnu kontaktnu silu kao integraciju gradijenta potencijala preko preklapajuće površine. [4]



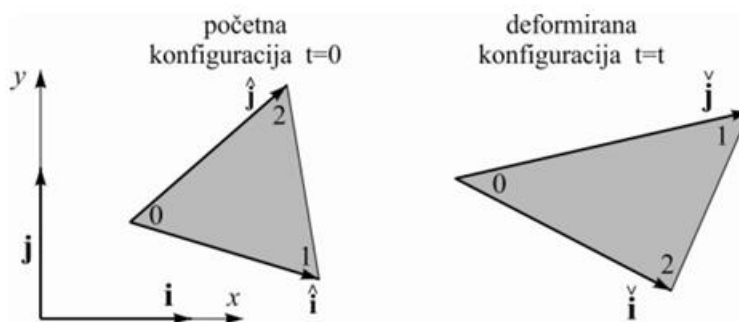
Slika 7. Kontaktna diferencijalna sila u okolini točaka  $P_m$  i  $P_k$  [4]

### 2.2. Deformabilnost konačnih elemenata u kombiniranoj metodi konačno - diskretnih elemenata

Kada promatramo deformabilno tijelo kao kontinuum, vidimo da je sastavljeno od niza točaka unutar vanjske konture. Te točke mogu mijenjati svoj položaj u prostoru tijekom vremena, što uzrokuje transformacije deformabilnog entiteta. Pomaci tih točaka mogu se podijeliti na dvije glavne komponente:

1. Pomaci deformabilnog tijela kao krutog tijela, koji uključuju translaciju i rotaciju.
2. Pomaci koji uzrokuju deformacije, mijenjajući volumen i oblik tijela.

U metodi koja kombinira konačne i diskretne elemente, koristi se najjednostavnija geometrijska konfiguracija konačnog elementa. U dvodimenzionalnom prostoru, to je trokutasti element sa tri čvora. Za precizno opisivanje deformacija ovog trokutnog konačnog elementa i postavljanje trajne veze između naprezanja i deformacija, koristimo tri različita koordinatna sustava, kao što je prikazano na slici u prilogu.[4]



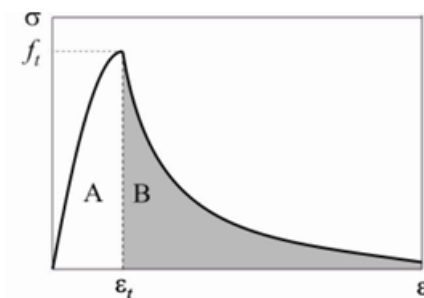
Slika 8. Trokutni konačni element u početnoj i deformiranoj konfiguraciji [4]

### 2.3. Prijelaz iz kontinuuma u diskontinuum

Prijelaz iz kontinuuma u diskontinuum u kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata nastaje uslijed procesa loma i fragmentacije materijala. Ova metoda simulira lom masivnog sustava, počevši s nekoliko, a završavajući s velikim brojem diskretnih elemenata. Pukotine se pojavljuju zbog oštećenja mikrostrukturnih elemenata materijala, što uzrokuje promjene u poljima opterećenja i naprezanja.

Model diskretnih pukotina: Implementiran je u kontaktnim elementima između konačnih elemenata za simuliranje inicijalizacije i razvoja pukotina u materijalu opterećenom u vlaku (mod I) i posmiku (mod II). Ovaj model se temelji na aproksimaciji eksperimentalnih krivulja naprezanja-deformacije betona u direktnom vlaku. Površina ispod krivulje naprezanje-deformacija u vlaku podijeljena je na dva dijela:

- Dio 'A': Implementiran standardnim konstitutivnim zakonom ponašanja materijala.
- Dio 'B': Predstavlja vlačno omekšanje nakon dostizanja vlačne čvrstoće, gdje naprezanje opada s povećanjem deformacije.



Slika 9. Vlačno omekšanje prikazano u relaciji naprezanje – deformacija [4]

## 2.4. Vremenska diskretizacija

U okviru kombinirane FEM/DEM metode, svaki diskretni element je podijeljen u trokutne tročvorne konačne elemente. Oblik i pozicija svakog diskretnog element u prostoru definiraju se pomoću trenutnih koordinata čvorova konačnih elemenata.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_i \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

U analizi, oznaka "n" označava ukupan broj stupnjeva slobode u sustavu. Slično, polje brzina i ubrzanja diskretnog elementa opisano je koristeći trenutne koordinate čvorova.

Inercijalne sile koje djeluju na diskretni element također su diskretizirane prema masi tog elementa. U kombiniranoj FEM/DEM metodi, jednostavan način prikazivanja mase je putem modela koncentriranih masa. Pretpostavlja se da je masa koncentrirana u čvorovima, što rezultira dijagonalnom matricom mase. Ova matrica odražava masu koja je povezana s svakim stupnjem slobode.

Nadalje, slijedi osnovna shema metode konačnih razlika:

$$a_n = \frac{f_n}{m} \quad (5)$$

$$v_{n+1} + 1 = v_n + a_n h \quad (6)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} h \quad (7)$$

Gdje "f<sub>n</sub>" predstavlja ukupnu sumu sila koje proizlaze iz interakcije između dva ili više elemenata u kontaktu, sila koje nastaju zbog deformiranja konačnog elementa, vanjskih sila te

sila prigušenja. Oznaka "m" označava mase povezane sa svakim stupnjem slobode, dok je "h" konstantna veličina vremenskog koraka. Ova shema omogućava proračun dinamičkog ponašanja sustava koristeći metodu konačnih razlika. [4]

### 3. PRIMJENA KOMBINIRANE METODE KONAČNO – DISKRETNIH ELEMENATA

U ovom radu izvršena je temeljita analiza ponašanja zidane konstrukcije - tornja podvrgnutog utjecaju seizmičkih sila, primjenom numeričkog programa Y-2D[7] temeljenog na kombiniranoj FEM/DEM metodi.

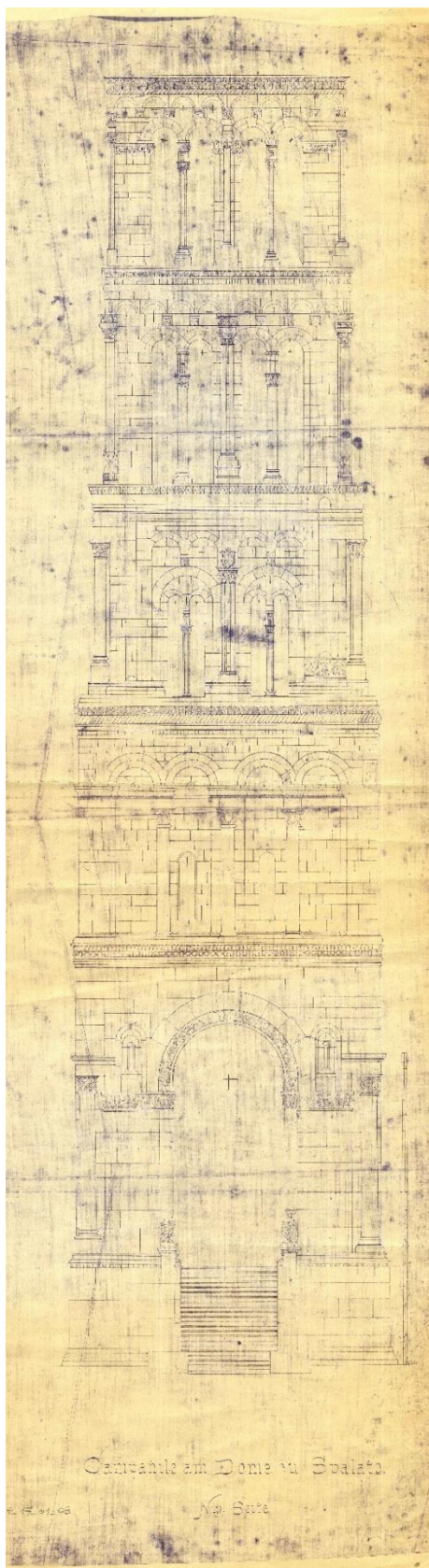
#### 3.1. Ulazni podaci

Katedrala Svetog Dujma u Splitu je primarno izgrađena od lokalnog vapnenca i mramora. Bijeli kamen korišten u strukturi karakterističan je za prirodne materijale tog područja, a crveni granit korišten u nekim stupovima također je lokalnog porijekla. Vapnenac korišten u katedrali dolazi iz obližnjih kamenoloma na otoku Braču i drugih dalmatinskih područja. Bijeli vapnenac je svijetle boje, što pridonosi prepoznatljivom izgledu katedrale. Izuzetno je izdržljiv, otporan na vremenske uvjete i dugotrajan, što je ključna karakteristika za građevine koje traju stoljećima. Mramor korišten u katedrali također je lokalnog podrijetla, s otoka Brača. Mramor je vrlo čvrst materijal, otporan na habanje, što ga čini pogodnim za građevinske elemente koji trpe puno opterećenja.

Za temeljnu analizu korišten je crtež pročelja, čija točna starost nije poznata, prikazan na slici u prilogu. Na crtežu je vidljivo da zidani elementi variraju u dimenzijama i obliku, a pročelje je bogato ukrašeno grbovima, vjencima između katova te kapitelima stupova. Ovi ukrasni elementi nisu uzeti u obzir prilikom izrade proračunskog modela, koji se fokusira isključivo na konstruktivni dio zvonika.

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

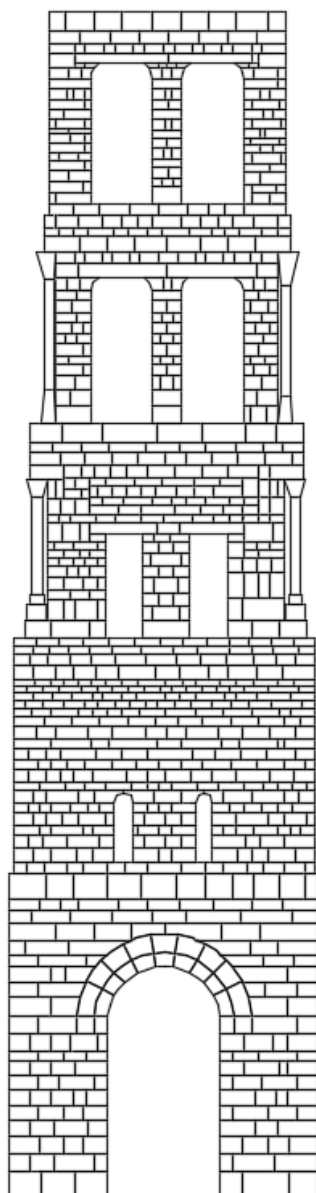
Tablica 1. Mehaničke karakteristike kamena



Slika 10. Nacrt zapadnog pročelja zvonika sv. Dujma [5]

### 3.2. Podjela na diskretne elemente

Zidani elementi zvonika predstavljaju diskretne elemente unutar modela, gdje svaki kamni blok čini jedan diskretni element. Model zvonika, podijeljen na ove elemente, izrađen je korištenjem računalnog programa AutoCAD.

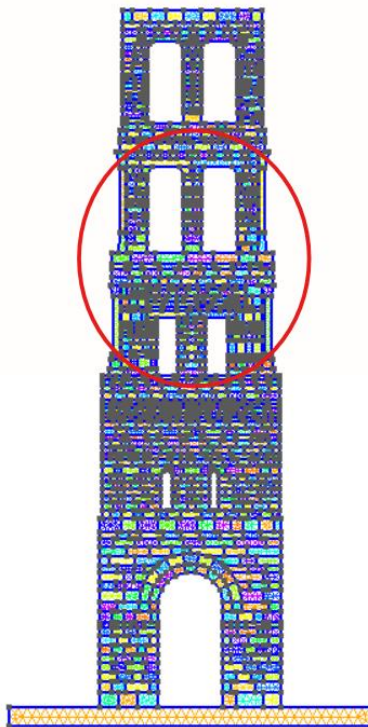


*Slika 11. Podjela zapadnog pročelja na diskretne elemente*

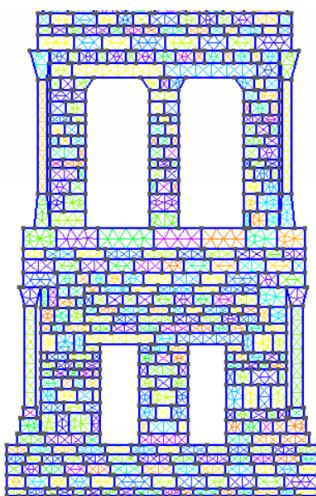


### 3.3. Diskretizacija modela

Tlocrtne dimenzije građevine su otprilike 7 x 7 m dok je visina tornja približno 38 m. Diskretizacija modela tornja napravljena je programom Gmash. [8]



Slika 12. Diskretizacija mrežom konačnih elemenata

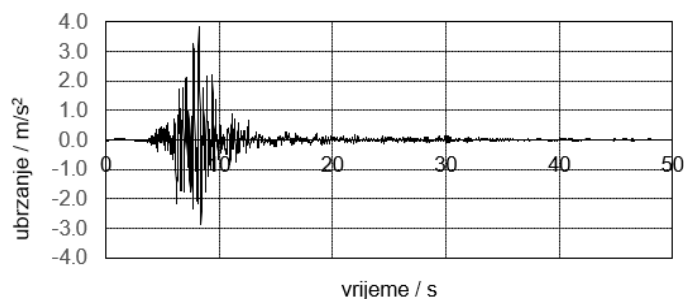


Slika 13. Prikaz detalja mreže konačnih elemenata

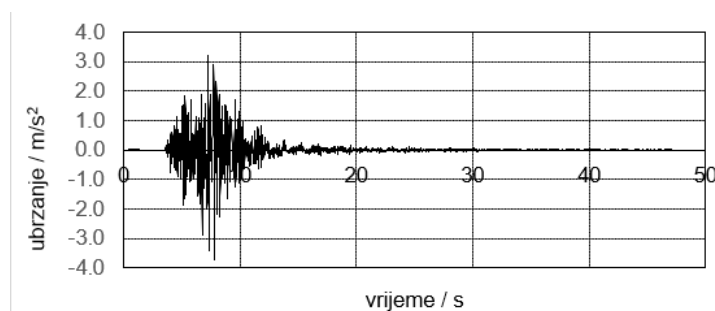
### 3.4. Potresna djelovanja na konstrukciju

Konstrukcija je izložena potresnim opterećenjima uz korištenje zapisa ubrzanja tla za tri različita potresa koji su se dogodili u prošlosti, a to su Petrovac (Crna Gora, 1979.), Campano Lucano (Italija, 1980.) i South Iceland (Island, 2000.). Priloženi dijagrami prikazuju vremenske zapise horizontalnih i vertikalnih komponenti ubrzanja za navedene potrese, koji su utjecali na konstrukciju.

#### *Petrovac*

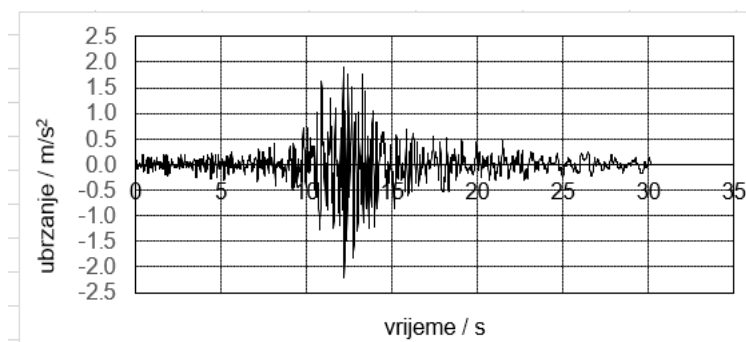


*Slika 14. a.) horizontalna komponenta*

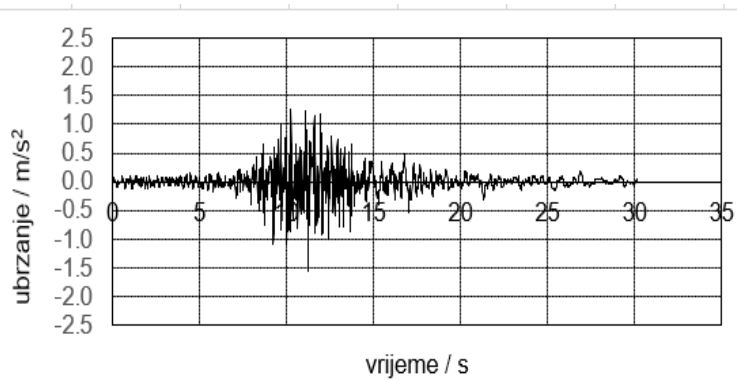


*Slika 15. b.) vertikalna komponenta*

#### *Campano Lucano*

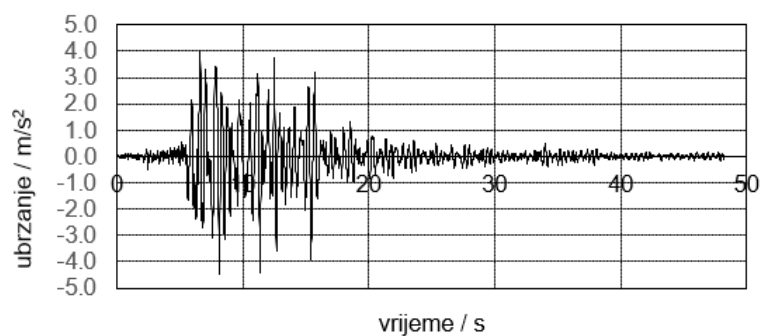


*Slika 16. a.) horizontalna komponenta*

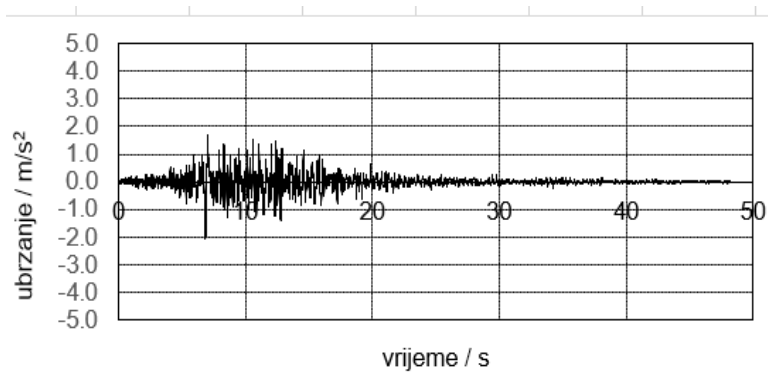


Slika 17. b.) vertikalna komponenta

South Iceland



Slika 18. a.) horizontalna komponenta

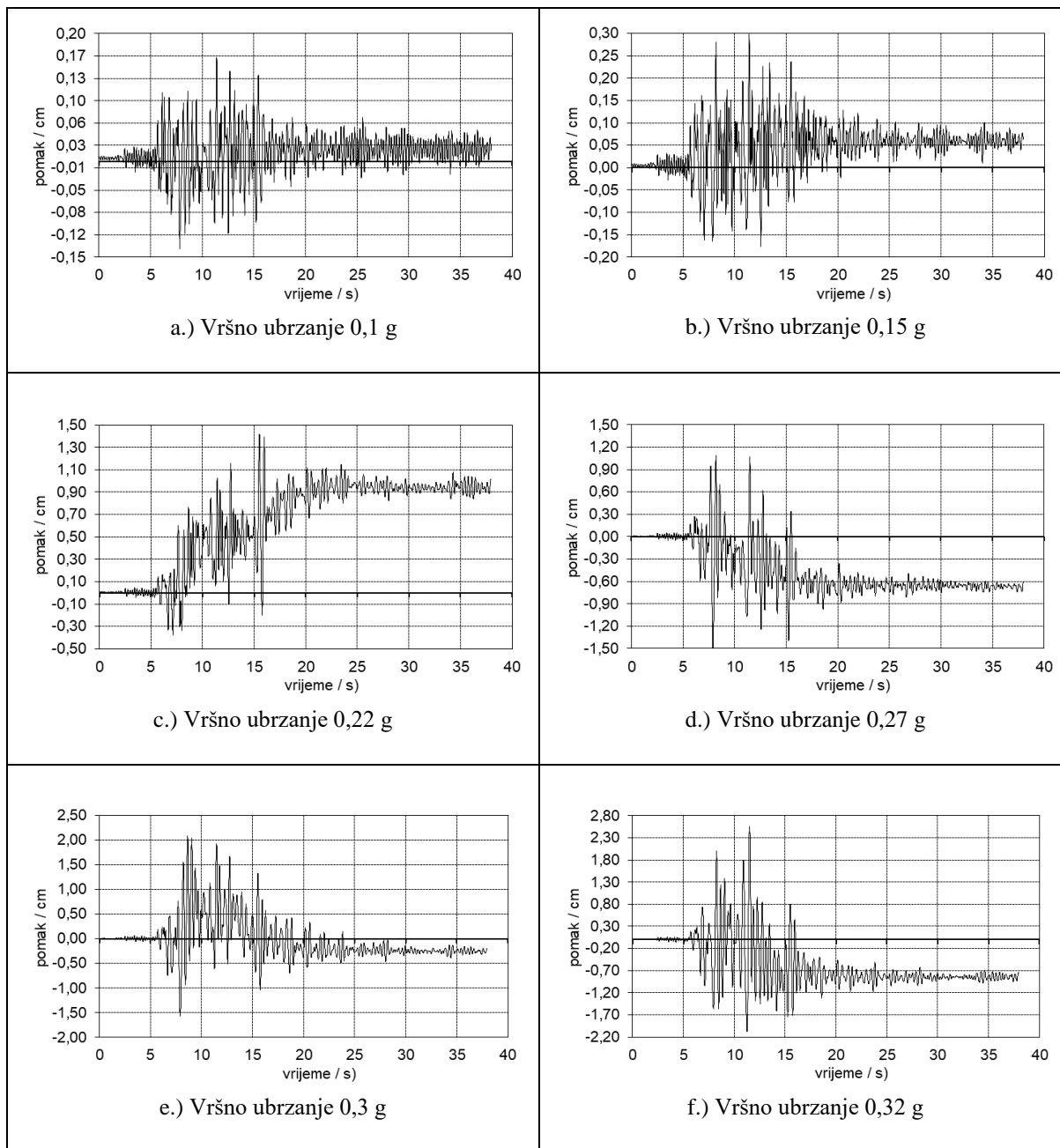


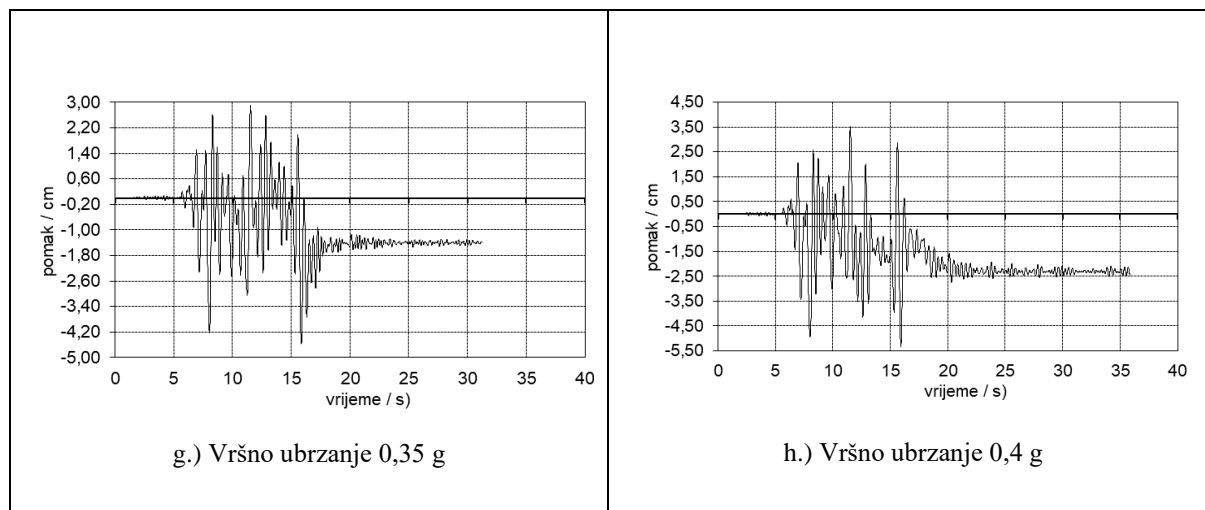
Slika 19. b.) vertikalna komponenta

## 4. REZULTATI NUMERIČKIH ANALIZA

### 4.1. Rezultati proračuna za potres Petrovac

U prilogu su slike za dana ubrzanja tla, koje prikazuju pomake u vremenu za zadani potres.





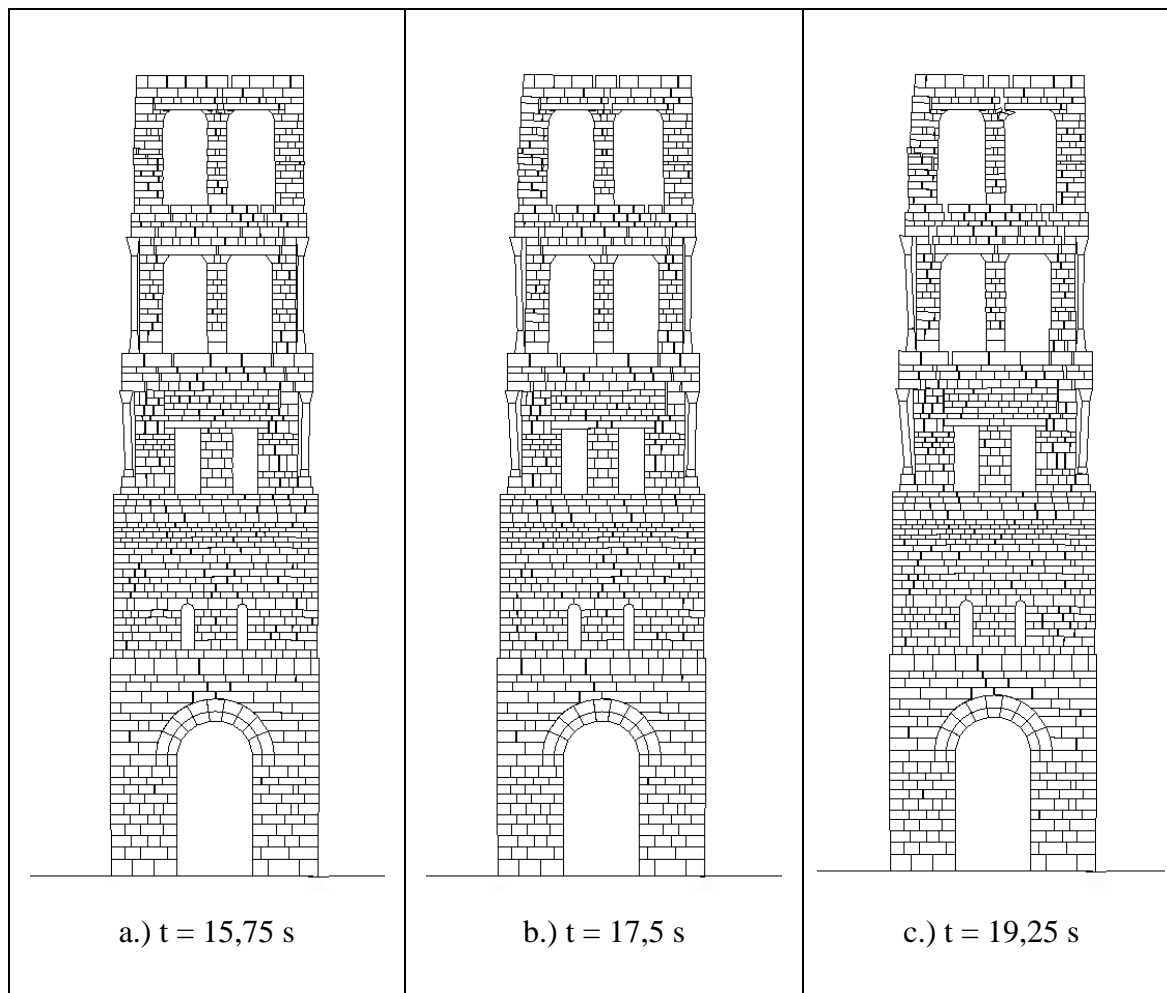
Slika 20. Prikaz zadanih vršnih ubrzanja za potres Petrovac

Na temelju dobivenih rezultata grafova koji prikazuju pomake u vremenu možemo zaključiti:

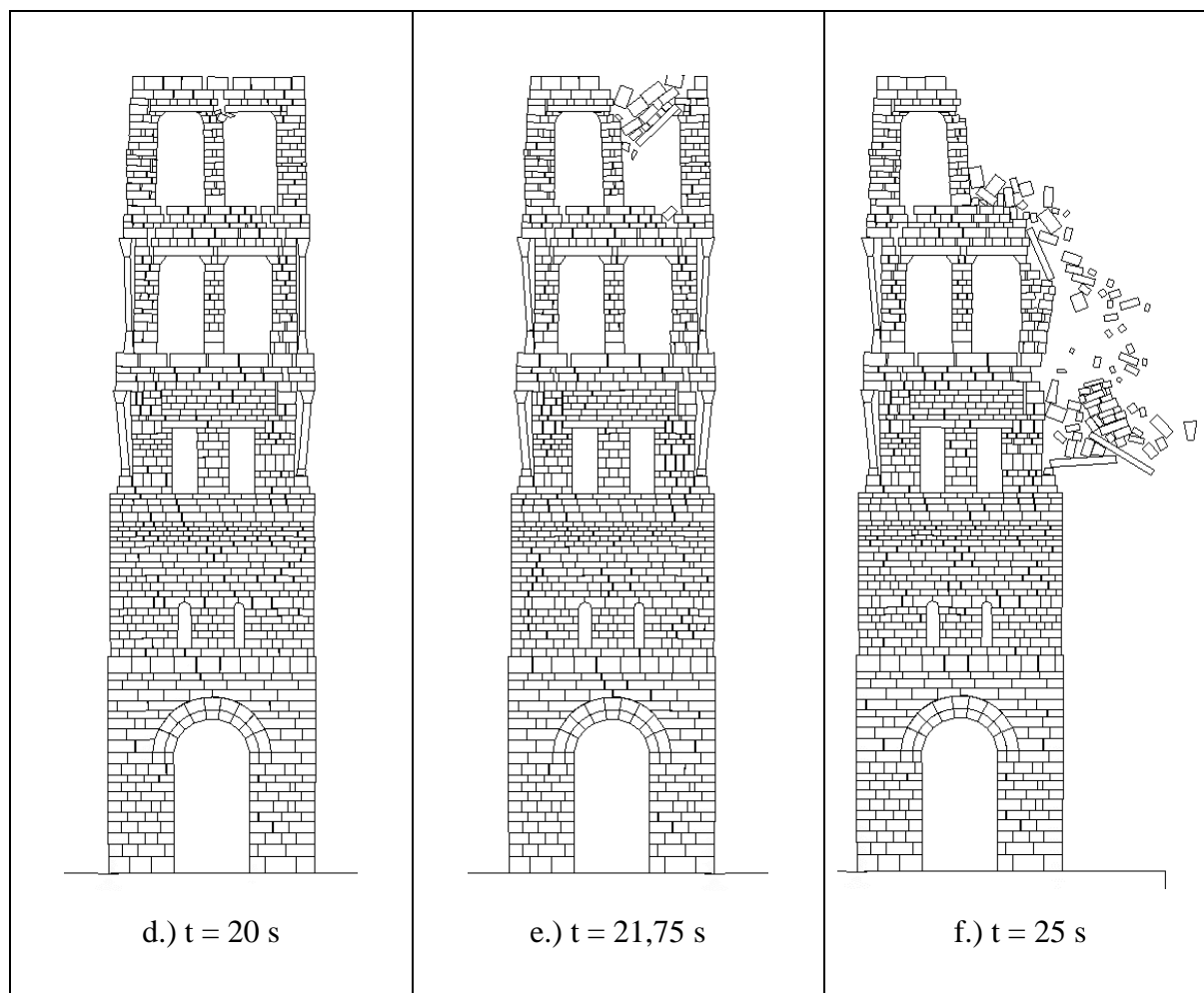
- a.)** za vršno ubrzanje 0,10 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 0,17 cm, nakon 16. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 0,05 cm (*slika a.*)
- b.)** za vršno ubrzanje 0,15 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 0,3 cm, nakon 20. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 0,1 cm (*slika b.*)
- c.)** za vršno ubrzanje 0,22 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 1,4 cm, nakon 20. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 1,0 cm (*slika c.*)
- d.)** za vršno ubrzanje 0,27 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 1,5 cm, nakon 17. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 0,7 cm (*slika d.*)
- e.)** za vršno ubrzanje 0,30 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 2,0 cm, nakon 25. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 0,3 cm (*slika e.*)
- f.)** za vršno ubrzanje 0,32 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 2,5 cm, nakon 20. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 0,9 cm (*slika f.*)
- g.)** za vršno ubrzanje 0,35 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 4,5 cm, nakon 18. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 1,5 cm (*slika g.*)

**h.)** za vršno ubrzanje 0,40 g maksimalni pomak konstrukcije iznosi otprilike 5,4 cm, nakon 20. sekunde konstrukcija dobiva trajni pomak koji iznosi otprilike 2,3 cm (*slika h.*)

Prikaz pojava pukotina kroz vrijeme za ubrzanje  $a_g = 0,35$  g:



*Slika 21. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 0,35g - potres Petrovac*

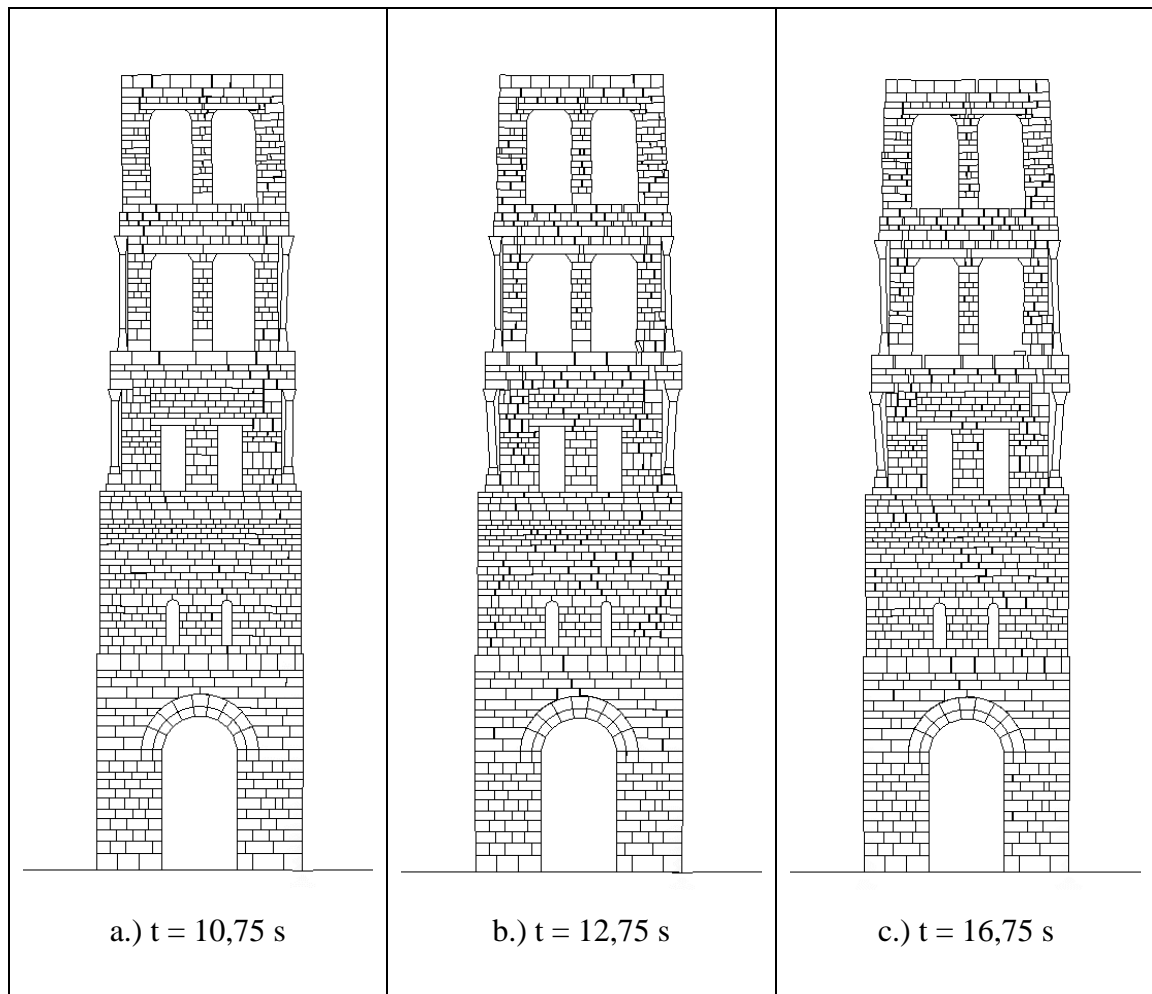


Slika 22. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 0,35g - potres Petrovac

U slikama u prilogu, za potres Petrovac, možemo uočiti da nam se otprilike između 15. i 16. sekunde (slika a.) pojavljuje prva pukotina i to prvenstveno na gornjem dijelu konstrukcije, a da nam nakon 21. sekunde dolazi do sloma same konstrukcije pod potresnim djelovanjem.

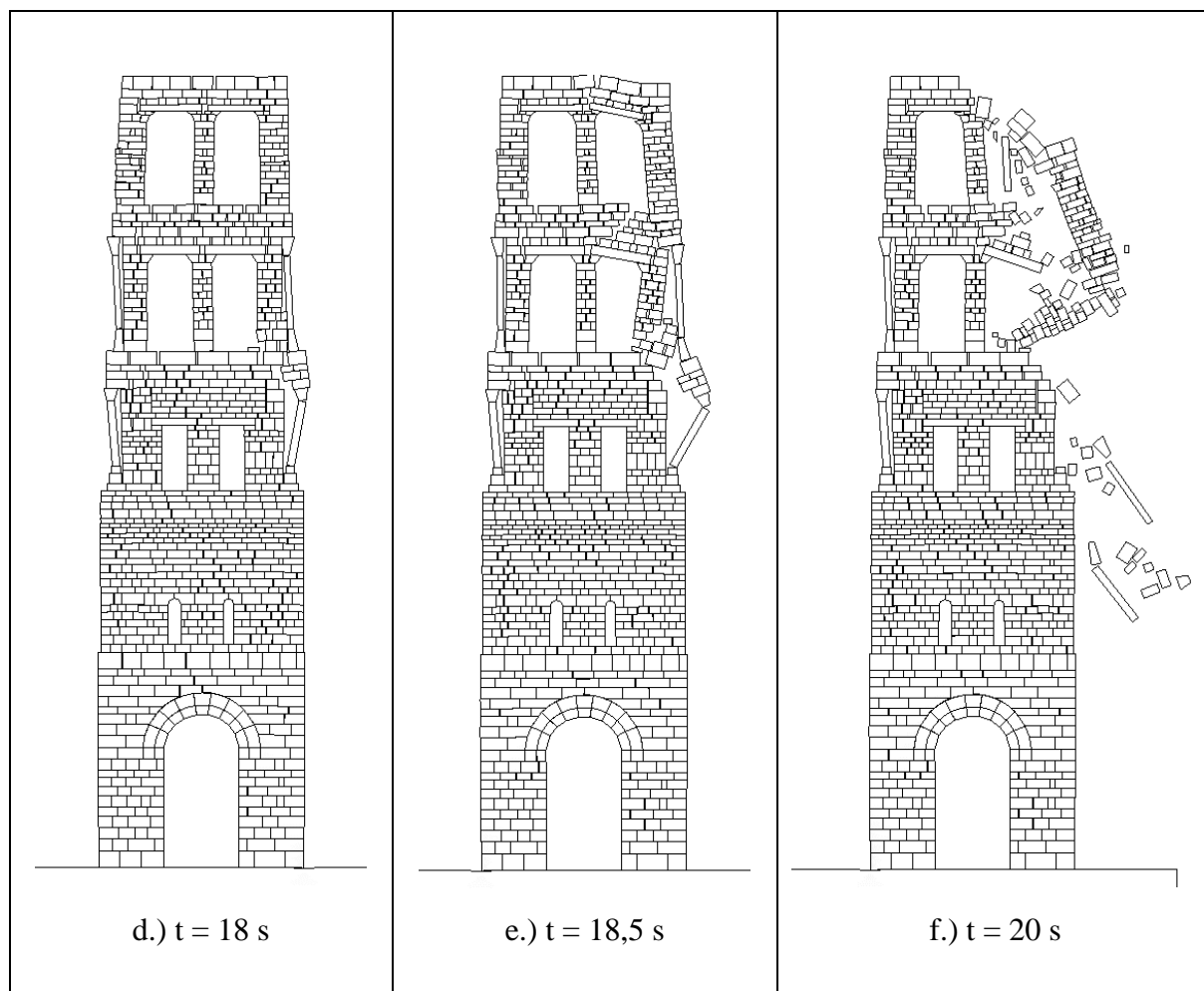
Slike između prikazuju razvoj pukotina kroz vrijeme do eventualnog sloma.

Prikaz pojava pukotina kroz vrijeme za ubrzanje  $a_g = 0,4 g$ :



Slika 23. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla  $0,4g$  - potres Petrovac





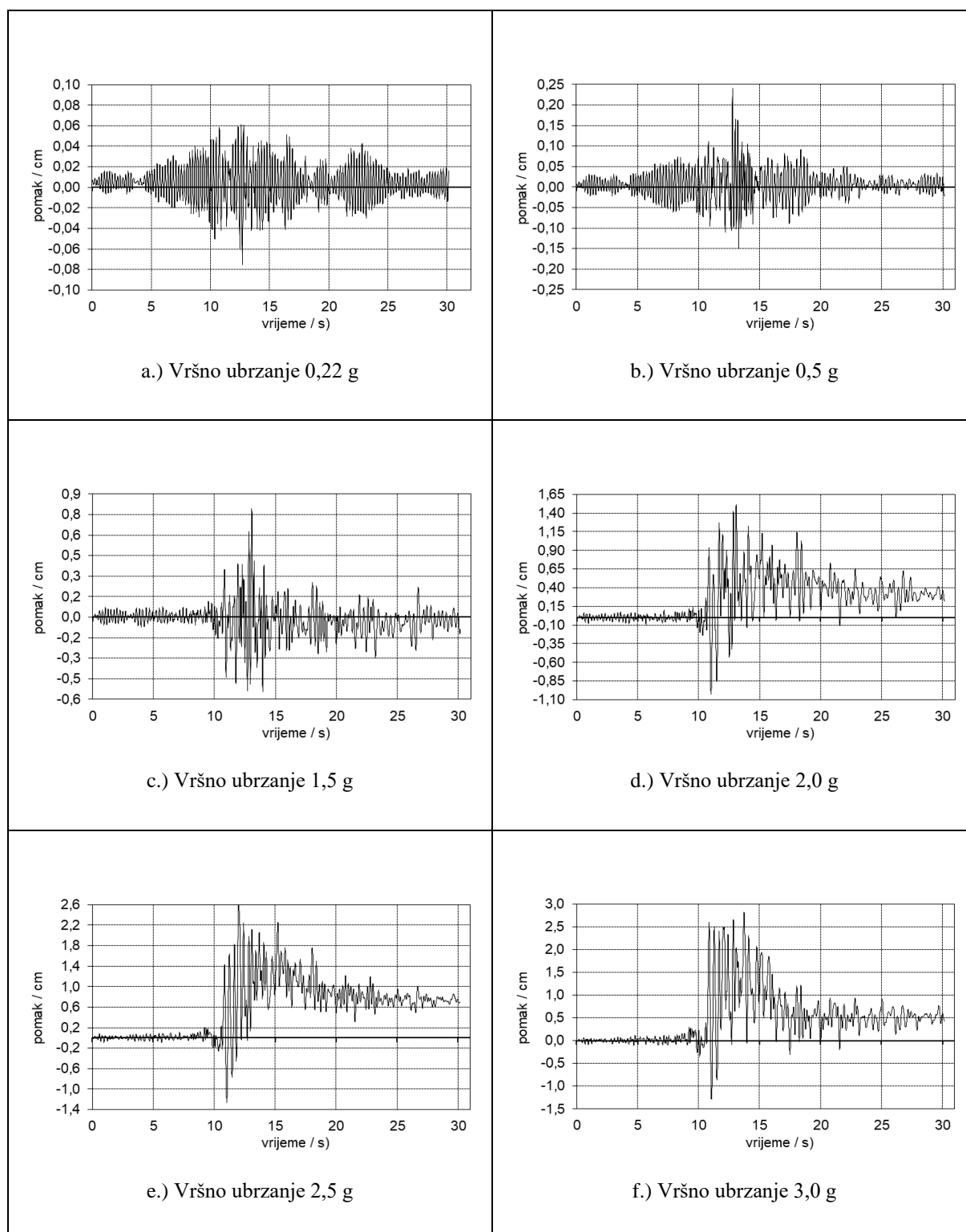
Slika 24. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 0,4g - potres Petrovac

U slikama u prilogu, za potres Petrovac, možemo uočiti da nam se otprilike između 10. i 11. sekunde (slika a.) pojavljuje prva pukotina i to prvenstveno na gornjem dijelu konstrukcije, a da nam nakon 18. sekunde dolazi do sloma same konstrukcije pod potresnim djelovanjem.

Slike između prikazuju razvoj pukotina kroz vrijeme do eventualnog sloma.

## 4.2. Rezultati proračuna za potres Campano Lucano

U prilogu su slike za dana ubrzanja tla, koje prikazuju pomake u vremenu za zadani potres.



Slika 23. Prikaz zadanih vršnih ubrzanja za potres Campano Lucano

Prema rezultatima dijagrama pomaka u vremenu za potres Campano Lucano možemo uočiti sljedeće karakteristike za različita vršna ubrzanja:

**a.)** Pomaci za vršno ubrzanje 0,22 g su relativno malog intervala, a maksimalna vrijednost pomaka iznosi 0,08 cm u intervalu između 10. i 15. sekunde (*slika a.*)).

**b.)** Za vrijednost vršnog ubrzanja od 0,5 g pomaci konstrukcije su nešto veći, a maksimalni iznosi približno 0,25 cm u intervalu između 10. i 15. sekunde (*slika b.*)).

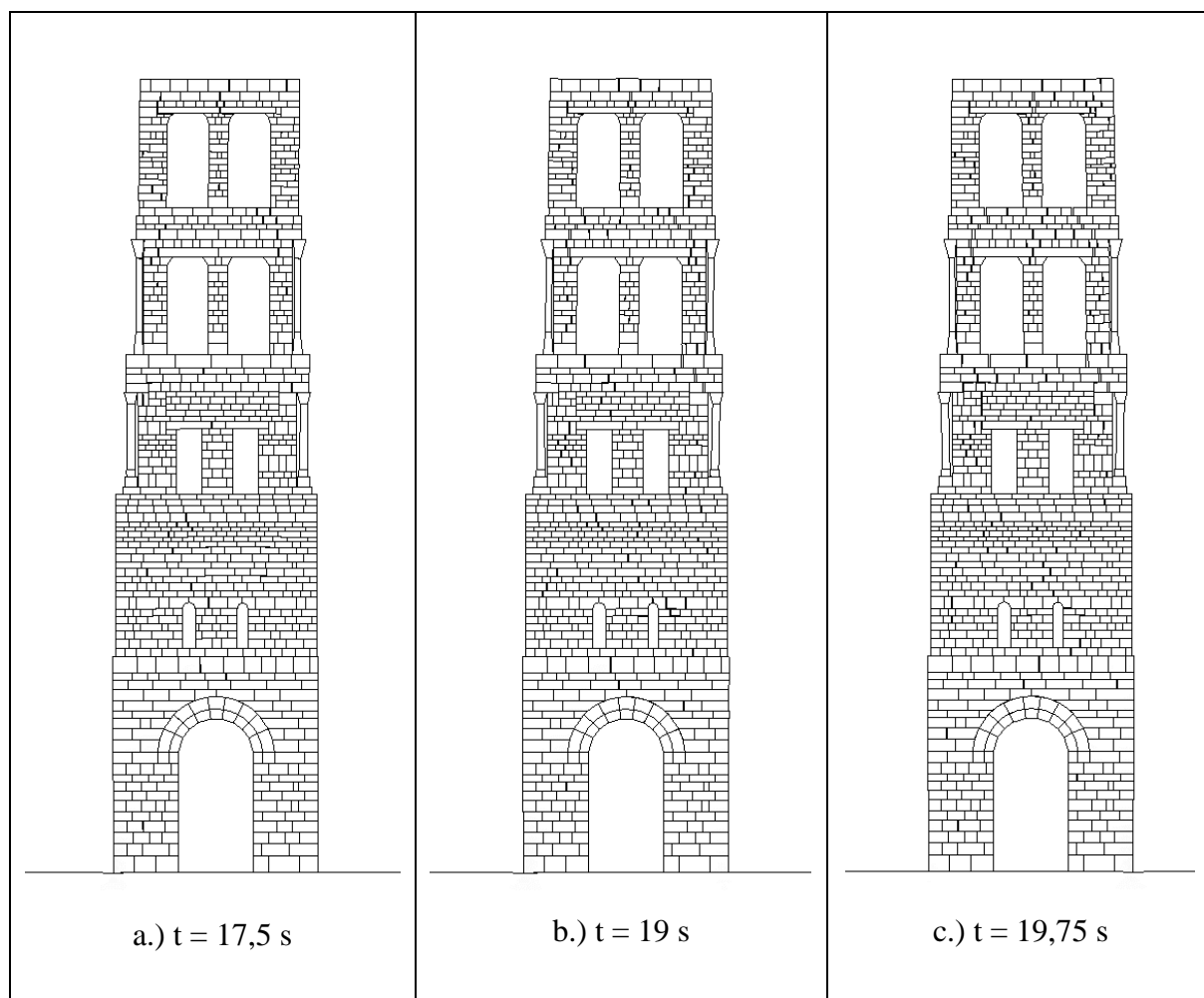
**c.)** Za vršno ubrzanje 1,5 g maksimalni pomak iznosi nešto više od 0,8 cm, u intervalu između 10. i 15. sekunde djelovanja potresnog opterećenja (*slika c.*)).

**d.)** Maksimalni pomak za vršno ubrzanje 2,0 g iznosi otprilike 1,5 cm u intervalu između 10. i 15. sekunde djelovanja potresnog opterećenja (*slika d.*)).

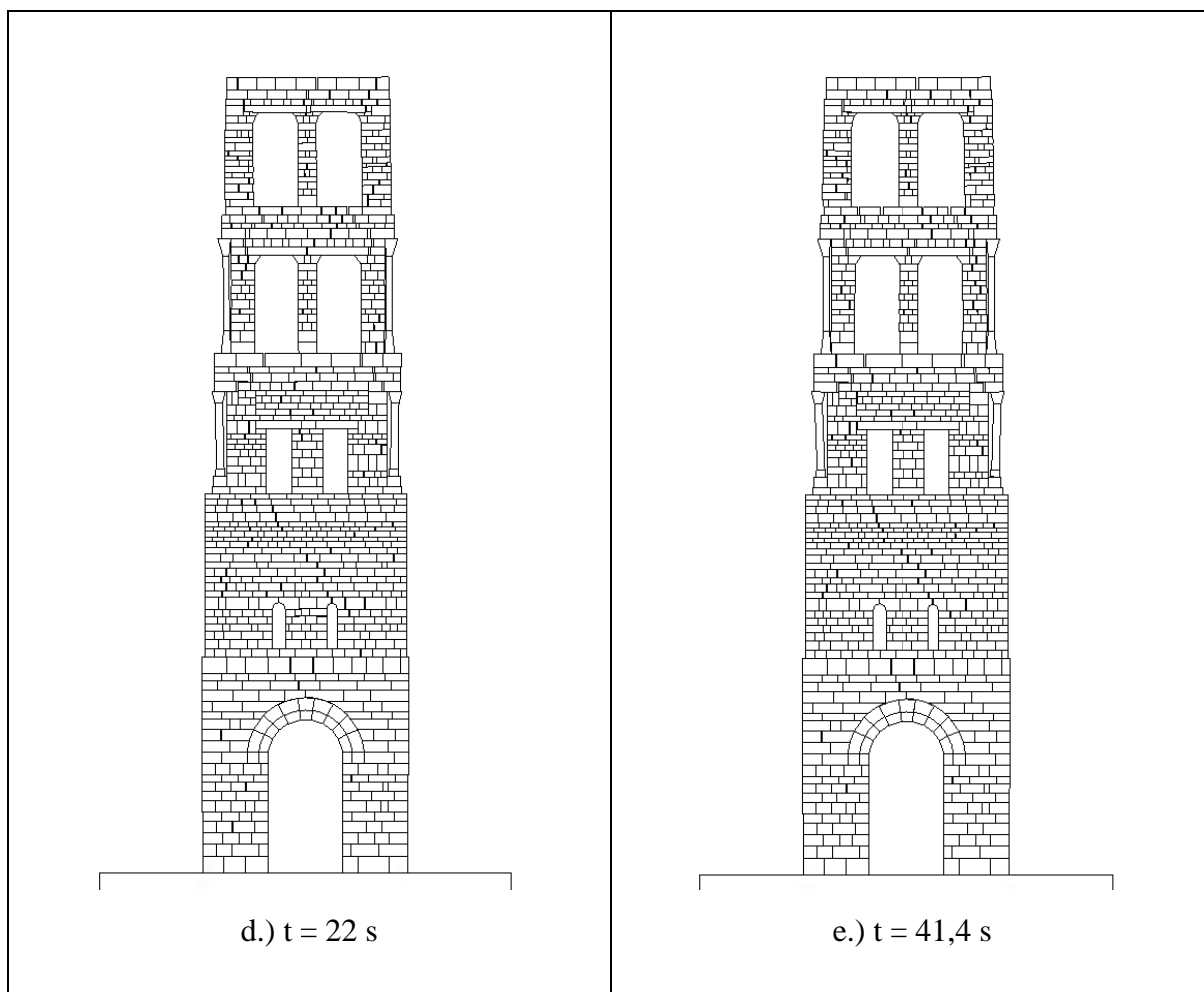
**e.)** Za zadano vršno ubrzanje od 2,5 g maksimalni pomak ima vrijednost približno 2,5 cm u intervalu između 10. i 15. sekunde, a nakon 20. sekunde konstrukcija poprima trajni pomak od približno 0,8 cm (*slika d.*)).

**f.)** Maksimalni pomak za vršno ubrzanje 3,0 g iznosi približno 2,8 cm koji konstrukcija ostvaruje oko 13. sekunde od početka djelovanja potresnog opterećenja, nakon 19. sekunde konstrukcija poprima trajni pomak koji iznosi otprilike 0,5 cm (*slika f.*)),

Prikaz pojava pukotina kroz vrijeme za ubrzanje  $a_g = 2,5 g$ :



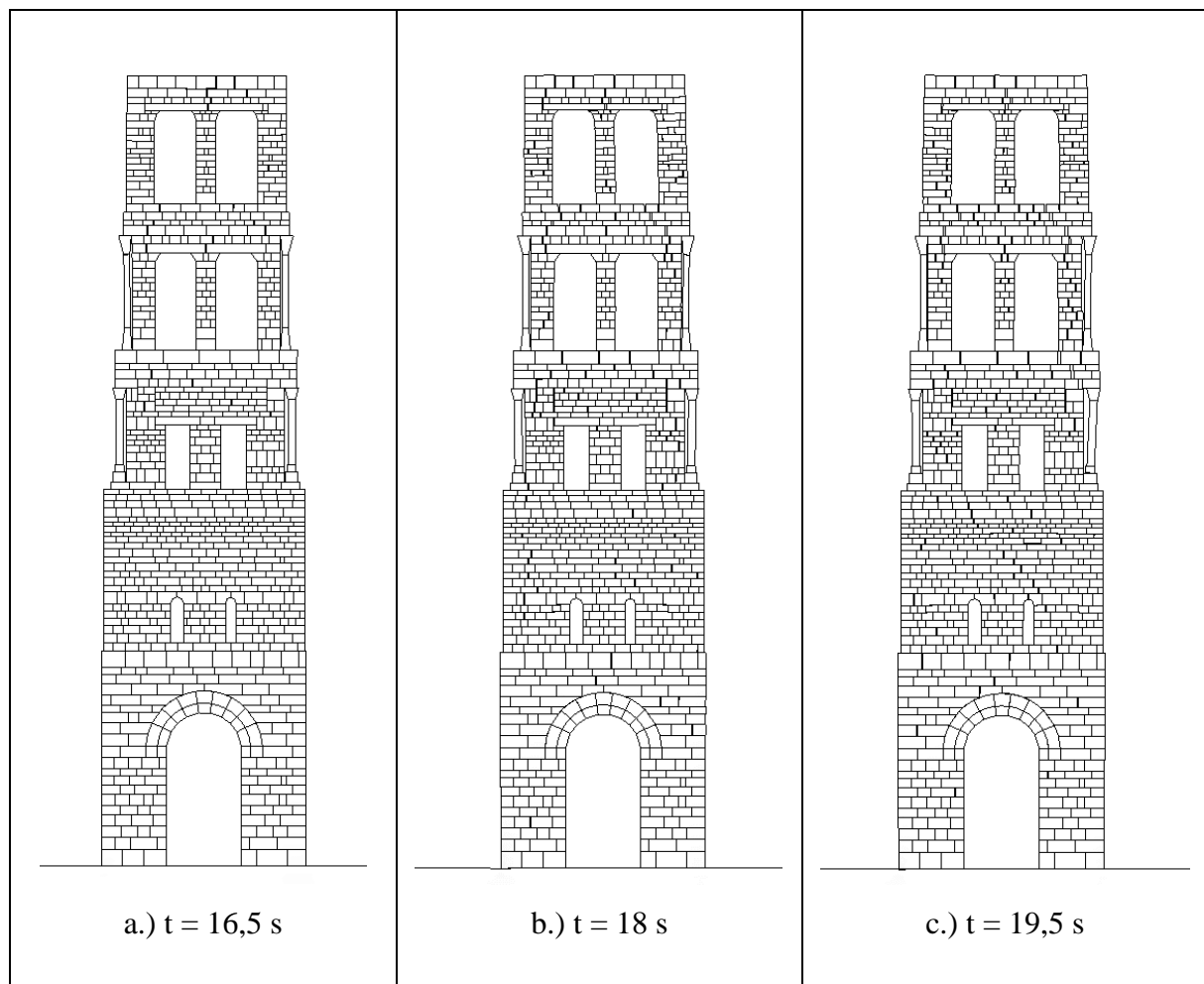
Slika 24. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla  $2,5 g$  - potres Campano Lucano



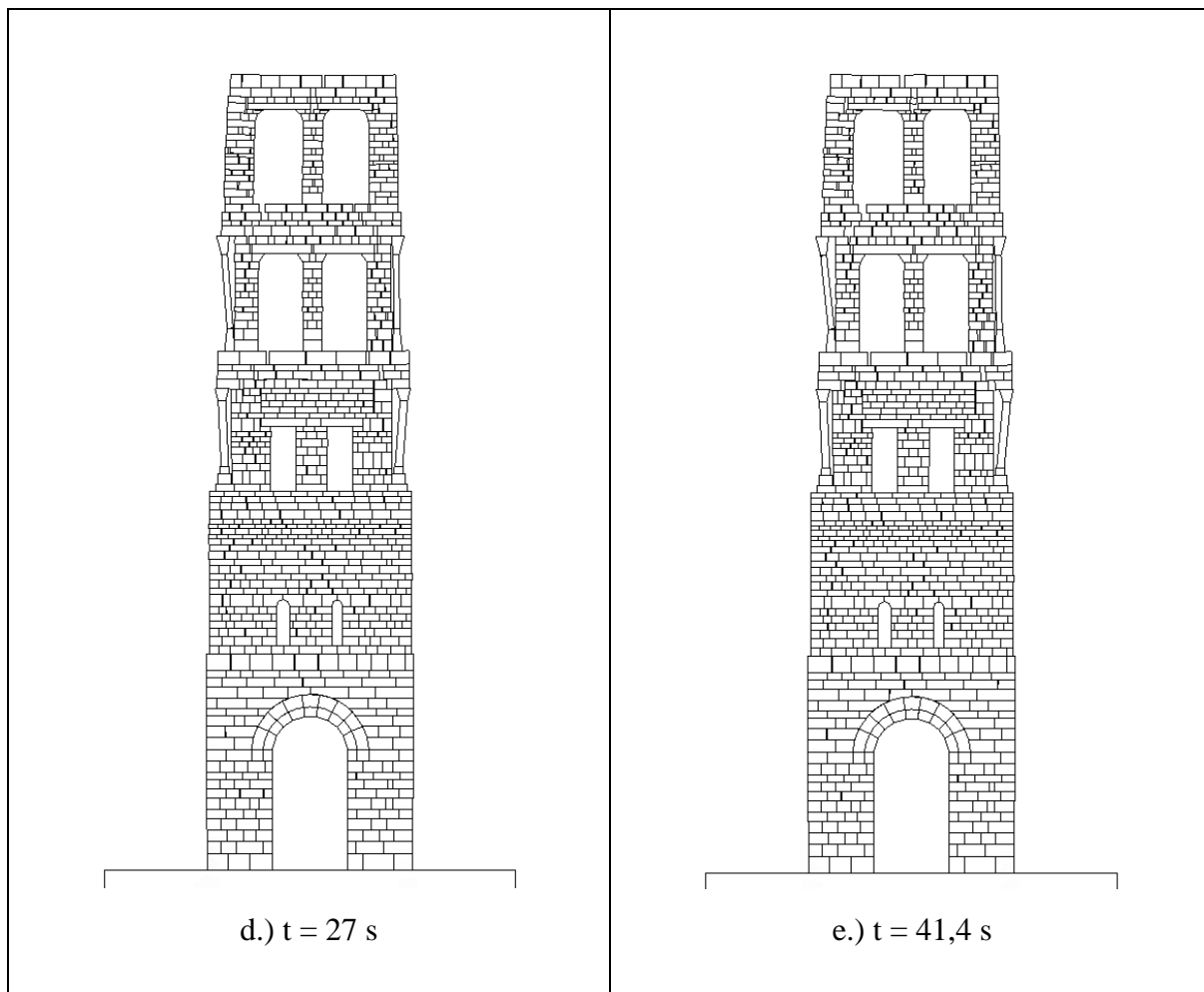
Slika 25. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 2,5 g - potres Campano Lucano

U slikama u prilogu, za potres Campano Lucano, možemo uočiti da nam se otprilike između 17. i 18. sekunde (slika a.) pojavljuje prva pukotina i to prvenstveno na gornjem dijelu konstrukcije, a da u periodu nakon 22. sekunde pa do kraja potresnog djelovanja možemo vidjeti maksimalne pomake. Slike između prikazuju razvoj pukotina kroz vrijeme do eventualnog sloma.

Prikaz pojava pukotina kroz vrijeme za ubrzanje  $a_g = 3,0 g$ :



Slika 26. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla  $3,0 g$  - potres Campano Lucano

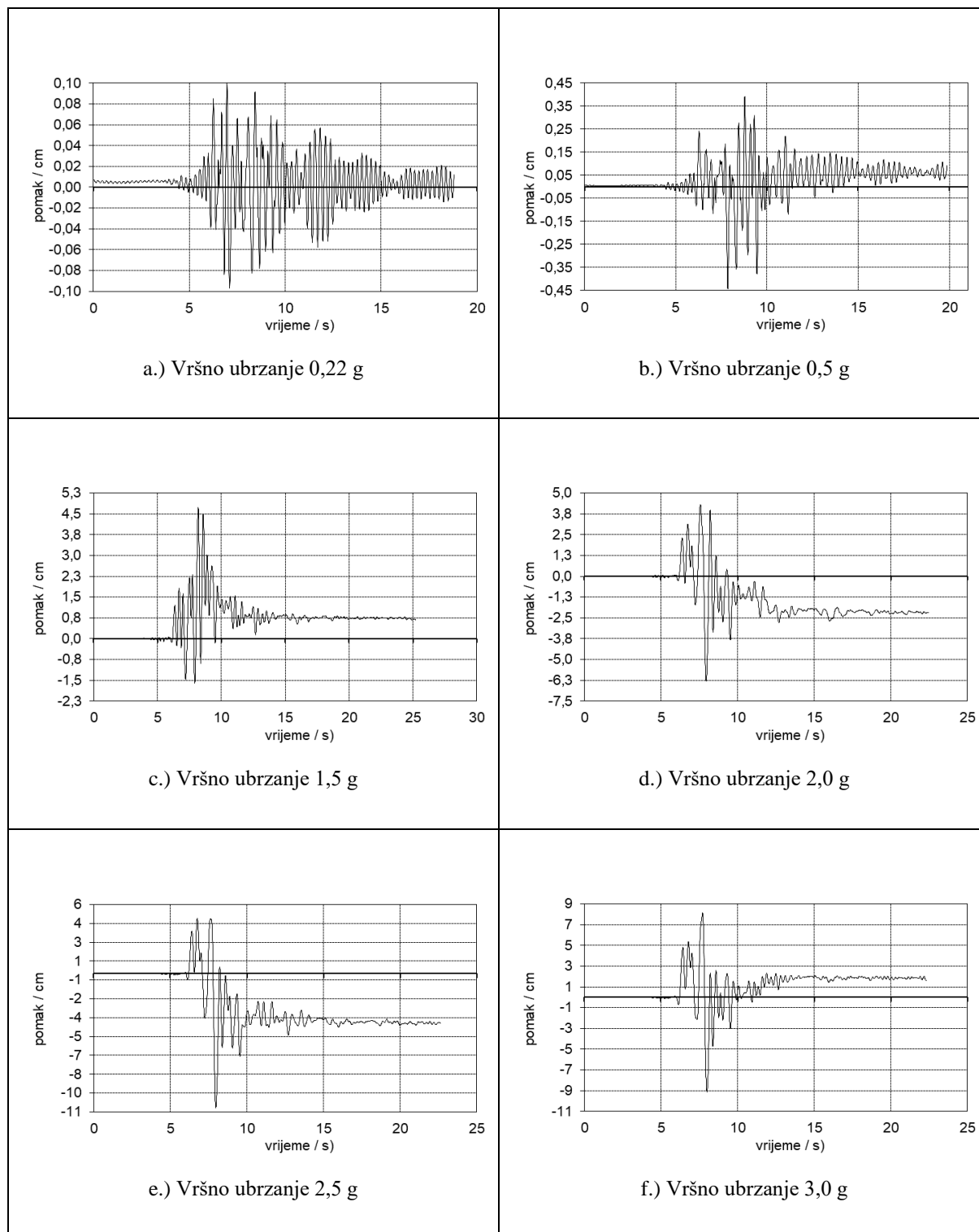


*Slika 27. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 3,0 g - potres Campano Lucano*

U slikama u prilogu, za potres Campano Lucano, možemo uočiti da nam se otprilike između 16. i 17. sekunde (*slika a.*) pojavljuje prva pukotina i to prvenstveno na gornjem dijelu konstrukcije, a da u periodu nakon 27. sekunde pa do kraja potresnog djelovanja konstrukcija ostvaruje maksimalne pomake. Slike između prikazuju razvoj pukotina kroz vrijeme do eventualnog sloma.

### 4.3. Rezultati proračuna za potres South Iceland

U prilogu su slike za zadana ubrzanja tla, koje prikazuju pomake u vremenu za zadani potres.



Slika 28. Prikaz zadanih vršnih ubrzanja za potres South Iceland



Na temelju dobivenih rezultata dijagrama pomaka u vremenu za potres South Iceland možemo zaključiti sljedeće:

**a.)** Za zadano vršno ubrzanje od 0,22 g možemo uočiti da se u intervalu od 5. do 10. sekunde ostvaruje maksimalni pomak konstrukcije koji iznosi približno 0,1 cm (*slika a.*)).

**b.)** Maksimalni pomak konstrukcije za vršno ubrzanje od 0,5 g iznosi približno 0,45 cm oko 8. sekunde od početka djelovanja potresnog opterećenja (*slika b.*)).

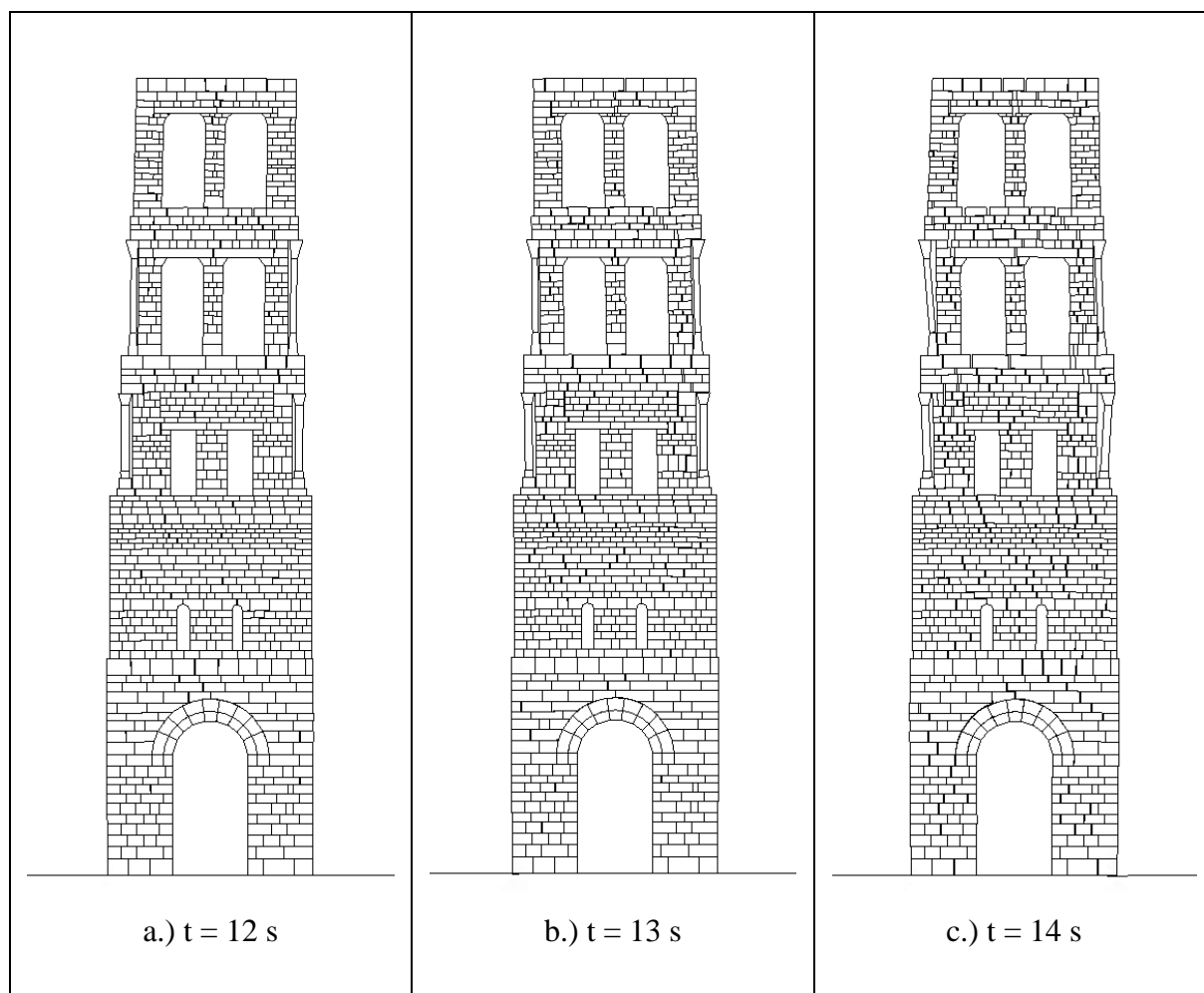
**c.)** Za vrijednost vršnog ubrzanja 1,5 g konstrukcija poprima maksimalni pomak koji iznosi otprilike 4,6 cm oko 8. sekunde potresnog djelovanja, a nakon 15. sekunde konstrukcija poprima trajni pomak od 0,8 cm (*slika c.*)).

**d.)** Za vršno ubrzanje od 2,0 g konstrukcija dobiva maksimalni pomak u vrijednosti od otprilike 6,3 cm, također oko 8. sekunde potresnog djelovanja, a nakon 13. sekunde ko konstrukcija poprima trajni pomak u vrijednosti od otprilike 2 cm (*slika d.*)).

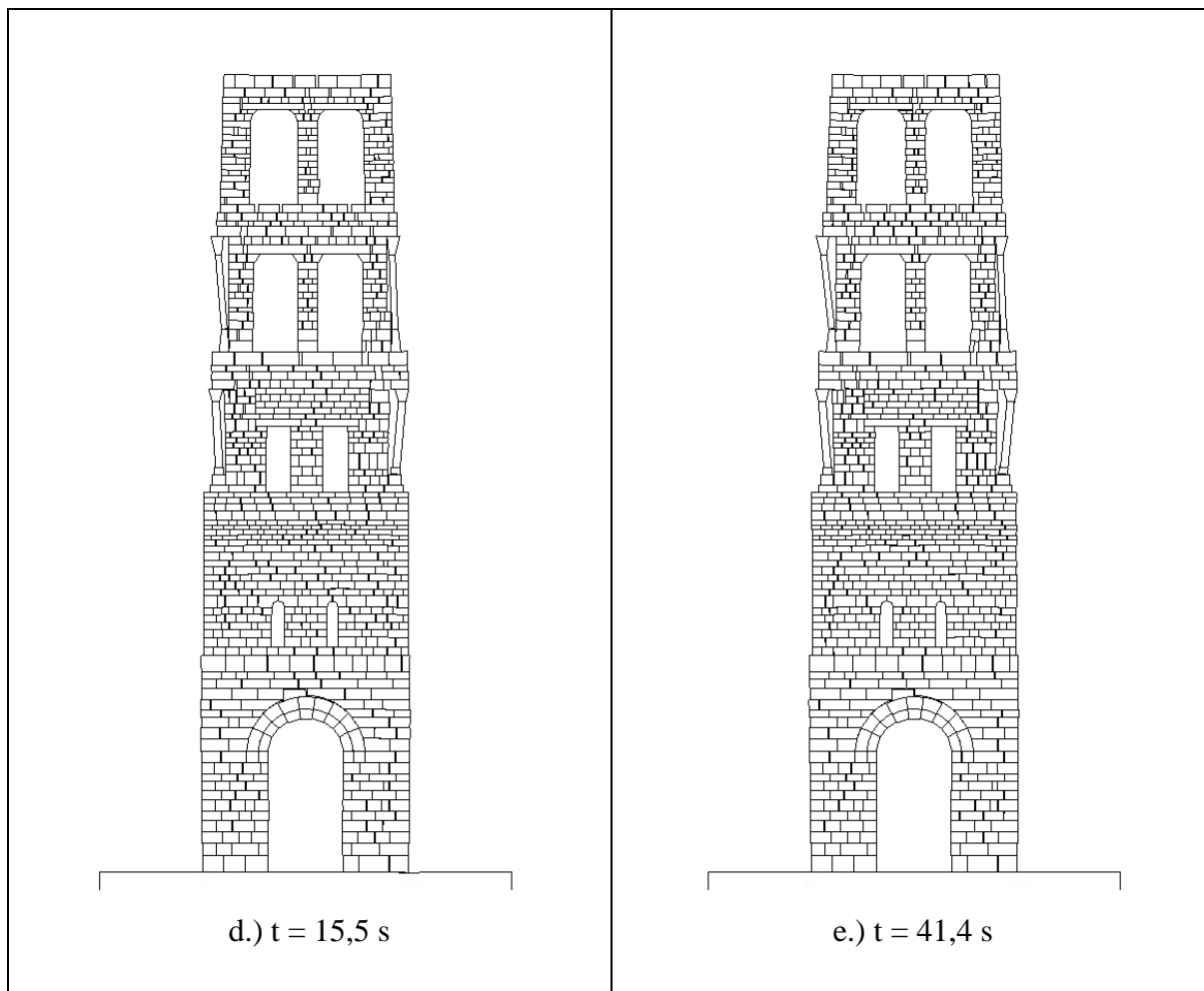
**e.)** Maksimalni pomak za vršno ubrzanje 2,5 g iznosi oko 10,8 cm, a nakon 15. sekunde konstrukcija poprima trajni pomak u vrijednosti od otprilike 4,2 cm (*slika e.*)).

**f.)** Za zadanu vrijednost vršnog ubrzanja od 3,0 g konstrukcija dobiva maksimalni pomak u vrijednosti od otprilike 9 cm, nakon 13. sekunde potresnog djelovanja konstrukcija poprima trajni pomak od otprilike 2 cm (*slika f.*)).

Prikaz pojava pukotina kroz vrijeme za ubrzanje  $a_g = 2,5 g$ :



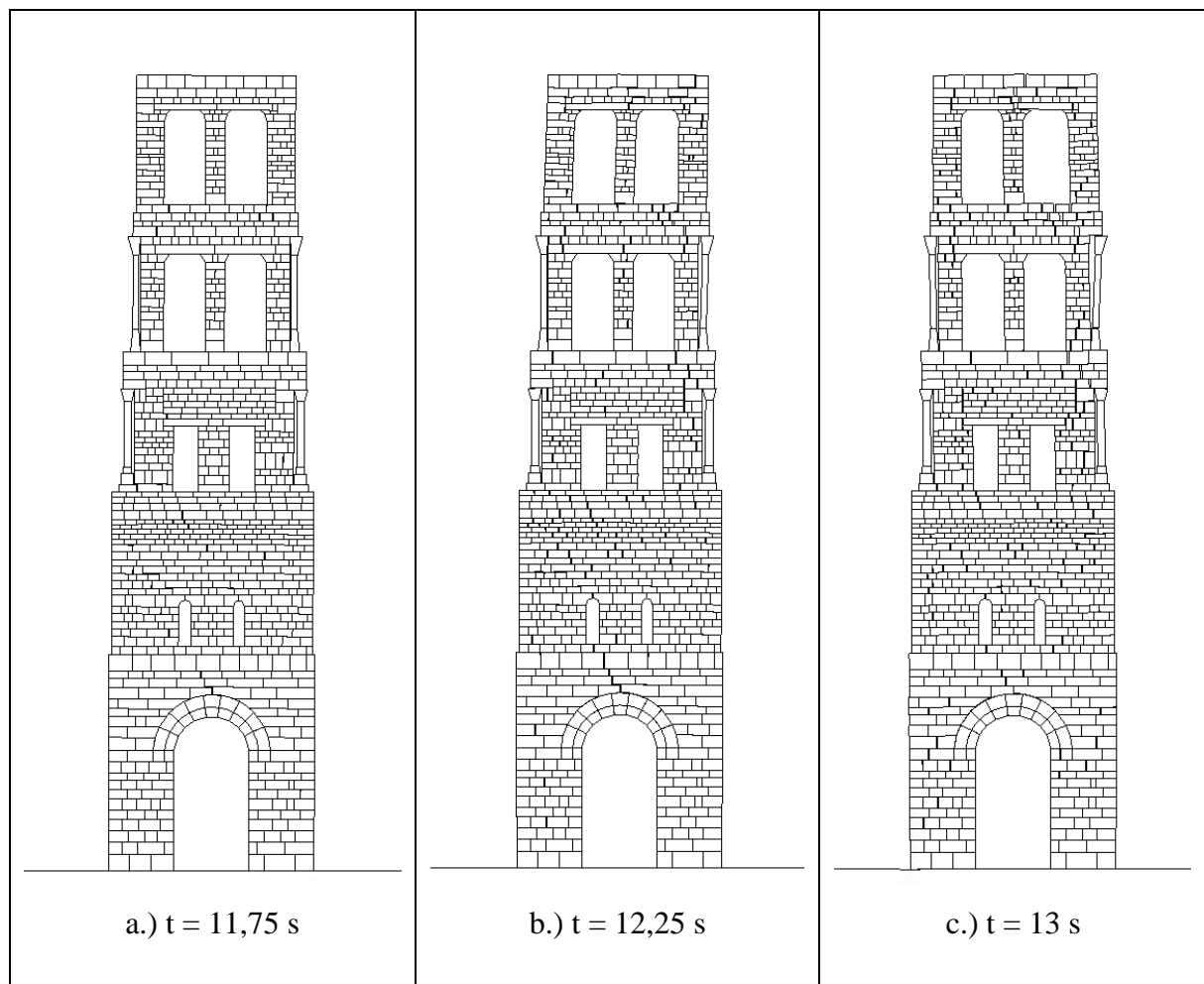
*Slika 29. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 2,5 g - potres South Iceland*



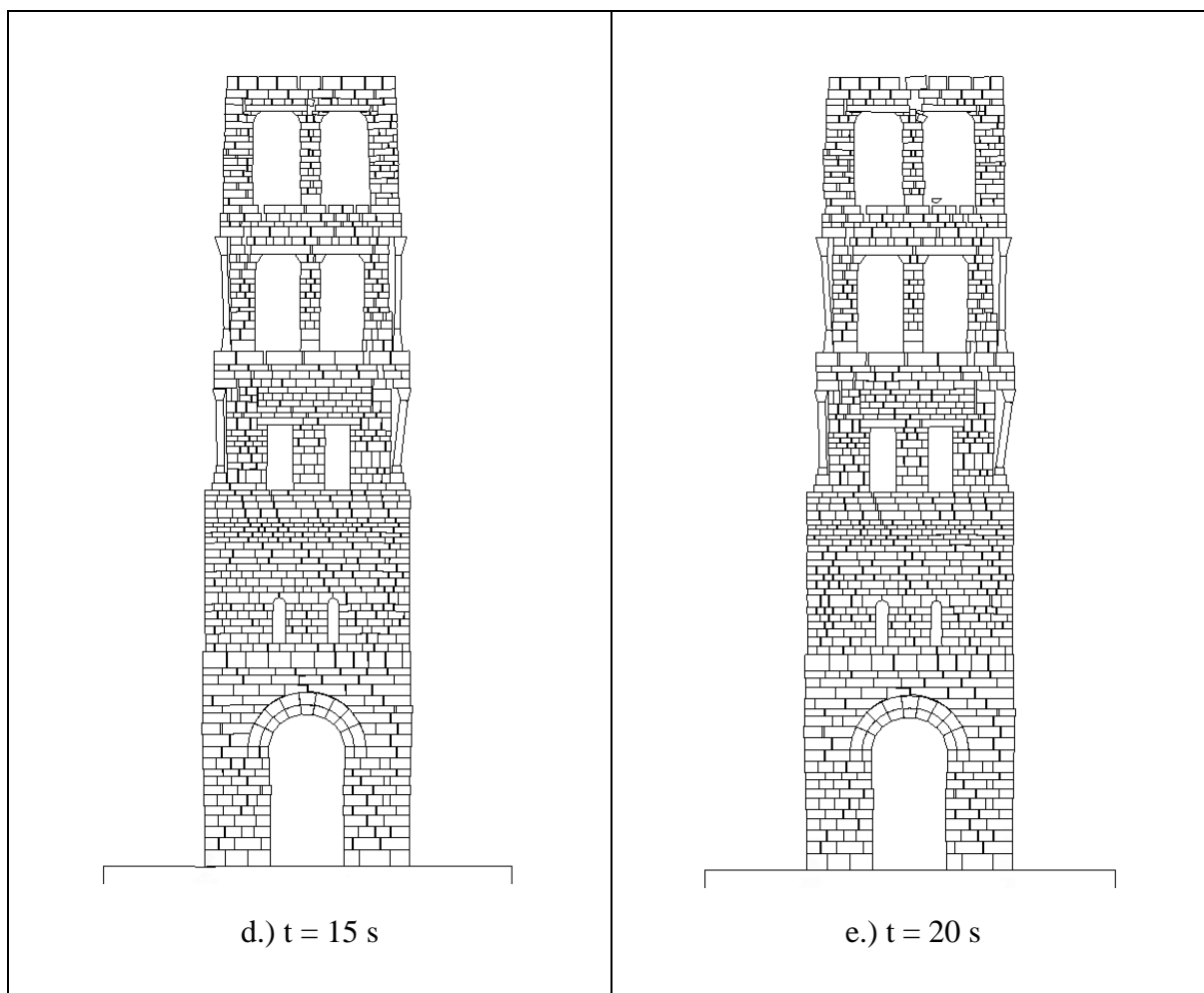
*Slika 30. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 2,5 g - potres South Iceland*

U slikama u prilogu, za potres South Iceland, možemo uočiti da nam se otprilike između 12. i 13. sekunde (*slika a.) i b.*) pojavljuje prva pukotina i to prvenstveno na gornjem dijelu konstrukcije, a da u periodu nakon 15. sekunde pa do kraja potresnog djelovanja možemo vidjeti maksimalne pomake. Slike između prikazuju razvoj pukotina kroz vrijeme do eventualnog sloma.

Prikaz pojava pukotina kroz vrijeme za ubrzanje  $a_g = 3,0 g$ :



Slika 31. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla  $3,0 g$  - potres South Iceland



*Slika 32. Prikaz pojave pukotina kroz vrijeme za ubrzanje tla 3,0 g - potres South Iceland*

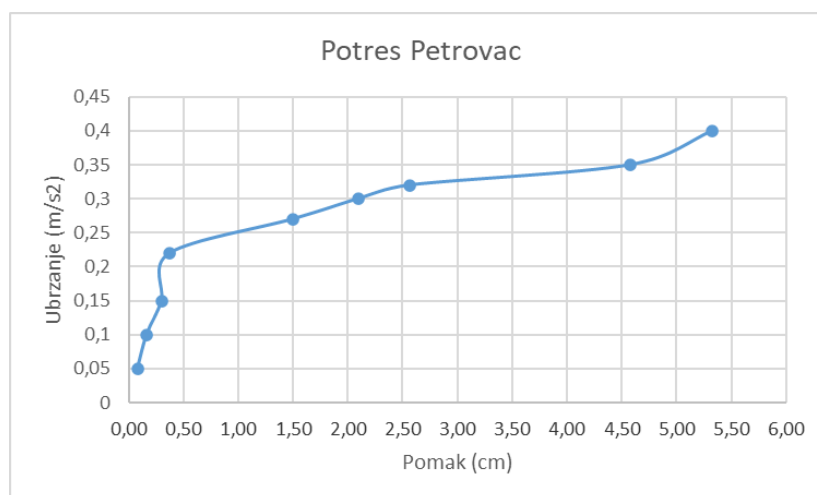
U slikama u prilogu, za potres South Iceland, možemo uočiti da nam se otprilike između 11. i 12. sekunde (*slika a.*) pojavljuje prva pukotina i to prvenstveno na gornjem dijelu konstrukcije, a da u periodu nakon 15. sekunde pa do kraja potresnog djelovanja možemo vidjeti maksimalne pomake.

Slike između prikazuju razvoj pukotina kroz vrijeme do eventualnog sloma.

## 5. ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA

U ovom poglavlju prikazujemo analizu prethodno obrađenih numeričkih rezultata te uz pomoć programa Microsoft Excel prikazujemo grafove pomaka za određena ubrzanja tla za pripadajuće zapise potresa, a to su Petrovac, Campano Lucano i South Iceland. Na temelju tih rezultata vrlo možemo očitati vrijednost pomaka za određeno ubrzanje tla te napraviti usporedbu na temelju istih.

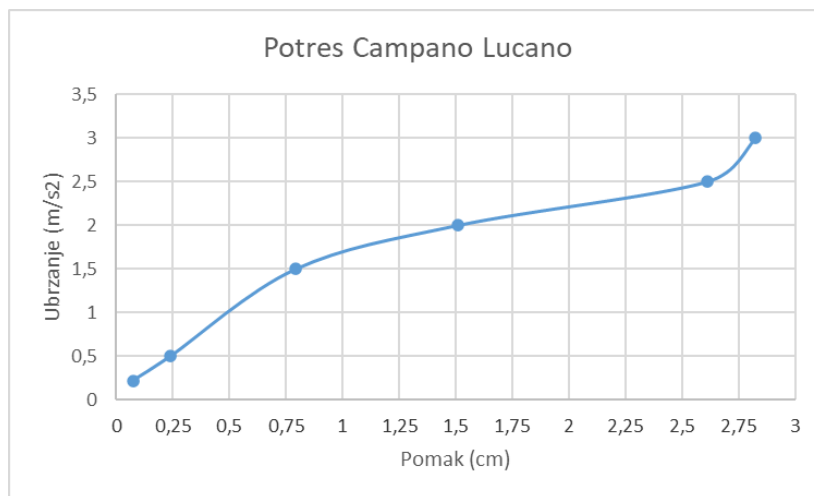
### 5.1. Analiza numeričkih rezultata za potres Petrovac



Graf 1. Graf ubrzanje – pomak za potres Petrovac

Na priloženom grafu vidljivo je da je za ubrzanja 0,05 – 0,22 g pomak kroz vrijeme nema velika odstupanja, tj. da je pomak relativno mali. Zatim, povećavajući vršna ubrzanja raste nam i veličina pomaka konstrukcije u vremenu. Vidljivo je da pomaci za ubrzanja 0,22, 0,27, 0,3, 0,32, 0,35, 0,4 su većih razmjera, tj. da su pomaci konstrukcije veći u odnosu na ubrzanja manja od 0,22 g. Za zadano vršno ubrzanje 0,4 g očitavamo i najveći pomak konstrukcije koji iznosi približno 4,4 cm.

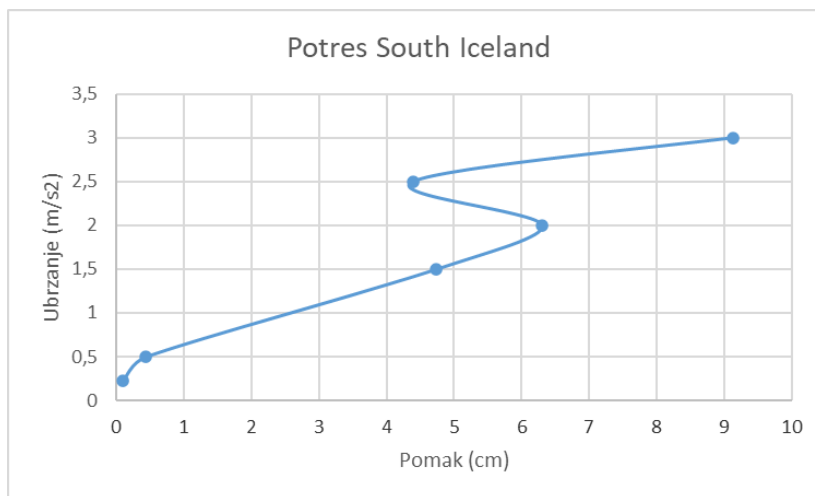
## 5.2. Analiza numeričkih rezultata za potres Campano Lucano



Graf 2. Graf ubrzanje – pomak za potres Campano Lucano

Na priloženom grafu vidljiv je pomak konstrukcije u odnosu na zadano vršno ubrzanje tla. Možemo vidjeti da nam za ubrzanje od 0.25 do 0.5 g pomaci konstrukcije nisu velikih razmjera, nisu veliki. Za ubrzanja 1.5, 2.0 i 2.5 primjetno je odstupanje u veličini pomaka kod ta tri ubrzanja, tj. veći je rad pomaka. Možemo vidjeti da između ubrzanja 2.5 g i 3.0 g dolazi do promjene u nagibu krivulje, nagib je veći u odnosu na ubrzanja od prije, samim time i smanjuje se veličina pomaka. Za zadano vršno ubrzanje 3.0 g očitavamo najveći pomak konstrukcije koji iznosi približno 3.8 cm.

### 5.3. Analiza numeričkih rezultata za potres South Iceland

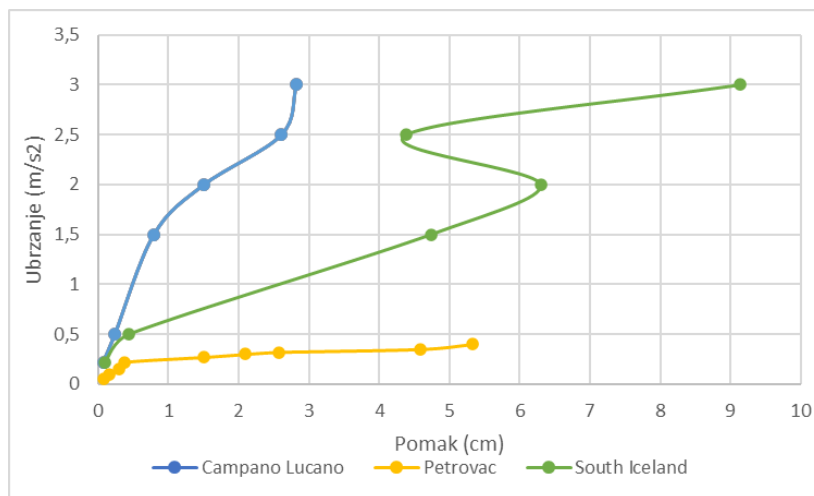


Graf 3. Graf ubrzanje – pomak za potres South Iceland

Na priloženom grafu možemo vidjeti da nam je za ubrzanja 0.25 i 0.5 g pomak konstrukcije relativno mali, dok nam za ubrzanja od 0.5 do 2.0 g konstrukcija doživljava pomake većeg reda, a između ubrzanja 2.0 i 2.5 g dolazi do odlamanja dijelova konstrukcije. Za zadano ubrzanje tla od 3.0 g očitavamo najveći pomak konstrukcije koji iznosi približno 9.1 cm.



#### 5.4. Prikaz pomaka konstrukcije pri povećanju vršnog ubrzanja za sva tri potresa



Graf 4. Sumarni graf ubrzanje – pomak za sva tri zapisa potresa

Na grafu u prilogu sumirani su rezultati pomaka pri povećanju vršnih ubrzanja za sva tri zapisa potresa. Na priloženom vidljivo je da je za potres South Iceland ostvaren najveći pomak od približno 9,1 cm, a za potres Campano Lucano najmanji pomak od približno 2,8 cm.

Također, mogli smo uočiti da nam za potrese Campano Lucano i South Iceland ne dolazi do sloma konstrukcija ni za velika vršna ubrzanja, kao npr. za naše krajnje 3,0 g vršno ubrzanje, pa zbog toga nismo ni išli u daljnju analizu, tj. nismo uzimali veća vršna ubrzanja jer je mala vjerojatnost da će se takav potres na takvo vršno ubrzanje dogoditi.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu je uz pomoć kombinirane metode konačno – diskretnih elemenata provedena seizmička 2D analiza zapadnog pročelja zvonika sv. Dujma u Splitu. Primjenom te metode mogli smo dobiti uvid na ponašanje konstrukcije na djelovanje potresnog opterećenja. Konstrukcija je izložena djelovanjem 3 potresa, pobude, a to su Petrovac, Campano Lucano i South Iceland. Za svaki potres izvršene su analize za različita vršna ubrzanja. Kao rezultat tih analiza dobili smo pomake konstrukcije u vremenu za različita vršna ubrzanja, a rezultate smo usporedili u prethodnom poglavlju 5.

Prema rezultatima analize, konstrukcija trpi najveća oštećenja i konačni slom tijekom potresnog opterećenja u Petrovcu, te ga možemo uzeti kao mjerodavnog za analizu. Pri ubrzanjima od 0,35 g i 0,4 g, gubitak stabilnosti javlja se u gornjem dijelu konstrukcije, što dovodi do njenog potpunog urušavanja. U slučajevima potresa Campano Lucano i South Iceland, primijenjena su znatno veća ubrzanja nego kod Petrovca, ali ni pri maksimalnom ubrzanju od 3,0 g nije došlo do sloma konstrukcije, već samo do trajnih pomaka. Daljnja analiza za ova dva potresa nije provedena zbog niske vjerojatnosti pojave takvih potresa s takvim vršnim ubrzanjima na području gdje se nalazi katedrala sv. Dujma. Zaključili bismo da bi za ovakav tip konstrukcije najveću štetu bi uzrokovalo pojava više uzastopnih manjih potresa, nego jedan veći potres. Povijesne građevine, posebno one koje su izgrađene od kamena bez modernih seizmičkih zaštita kao u našem primjeru, često su osjetljivije na kumulativne učinke više manjih potresa. Svaki manji potres može uzrokovati mikroskopska oštećenja koja se ne mogu odmah primijetiti, ali koja s vremenom oslabe strukturu građevine. Zvonik poput Svetog Dujma ima mnogo spojeva i veza između kamenih blokova i drugih elemenata. Više manjih potresa mogu postupno oslabiti ove veze. Također, više manjih potresa može uzrokovati umor materijala. Umor je proces koji se događa kada se materijal izlaže ponovljenim ciklusima naprežanja, što može dovesti do mikroskopskih pukotina koje se s vremenom šire i uzrokuju lom.

Eurokod 8 (EC8) [9] bavi se projektiranjem seizmički otpornih konstrukcija i postavlja smjernice za analizu seizmičkih efekata. Nelinearna dinamička analiza, poznata i kao Time History analiza, je razrađena metoda koja se koristi za detaljno modeliranje i analizu odgovora konstrukcija na stvarne ili generirane potrese. Ova metoda uzima u obzir nelinearno ponašanje

materijala i konstrukcijskih elemenata pod dinamičkim opterećenjima. Uzima u obzir nelinearno ponašanje konstrukcijskih materijala, poput pukotina u betonu ili plastičnih deformacija u čeliku, ili u našem slučaju pomaka kod zidanih konstrukcija koje se javljaju pri visokim razinama opterećenja. Ovo omogućuje stvarnu procjenu kapaciteta i sigurnosti konstrukcije. Analiza se provodi u vremenskim koracima, simulirajući stvarni potres u realnom vremenu. To znači da se konstrukcija podvrgava seriji dinamičkih opterećenja koja se mijenjaju s vremenom. Prema Eurokodu 8 (EC8) zahtjeva se korištenje vremenskih zapisa koji odgovaraju karakteristikama potresa za određeno područje. Minimalan broj potresa za ispitivanje konstrukcija prema Eurokodu 8 (EC8) je 3 vremenska zapisa, ako u obzir uzimamo najnepovoljniji rezultat. Ako se koristi manje od 7 zapisa, mora se uzeti u obzir najnepovoljniji rezultat za dimenzioniranje konstrukcije. U slučaju korištenja 7 ili više zapisa, može se koristiti prosječna vrijednost rezultata, što omogućuje uravnoteženiju procjenu seizmičkog ponašanja konstrukcije. Možemo zaključiti da je u ovakvim analizama važno uzeti što više zapisa potresa jer se pokazalo da postoji velik rasap rezultata između pojedinih zapisa potresa kako je vidljivo u analizama.

Analize su pokazale da kombinirana metoda konačnih i diskretnih elemenata omogućava precizno predviđanje ponašanja konstrukcije tijekom potresa, uključujući nastanak i širenje pukotina te gubitak stabilnosti. Iako je metoda vrlo precizna, neophodno je stalno razvijati nove tehnologije za još pouzdanije predviđanje kako bi se zaštitili ljudski životi, kulturna baština i smanjile materijalne štete uzrokovane potresima.

## 7. LITERATURA

- [1] Boško D. Stevanović, Zidane konstrukcije, Materijali i konstrukcije, 2005.
- [2] Hrvoje Smoljanović, Nikolina Živaljić, Željana Nikolić, Pregled metoda za modeliranje povijesnih zidanih konstrukcija, 2013.
- [3] Antonio Munjiza, The combined finite-discrete element method, Jhon Wiley & Sons Ltd, The atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, 2004.
- [4] Hrvoje Smoljanović, Seizmička analiza zidanih konstrukcija metodom konačno-diskretnih elemenata, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2013
- [5] Zvonik sv. Duje s mjerama; Arhitektonski snimak postojećeg stanja s kraja 19. stoljeća u mj 1:40 ; Alois Hauser
- [6] Zvonik sv. Duje; Detalj arhitektonskog snimka povijesne jezgre Splita iz 1970-ih godina u mj 1:200; Zavod za zaštitu spomenika kulture u Splitu
- [7] Antonio Munjiza, Y: FEM/DEM COMPUTER PROGRAM, Copyright (C) 2000
- [8] Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post processing facilities
- [9] Eurokod 8; EN 1998; Projektiranje konstrukcija otpornih na djelovanje potresa