

# Seizmička analiza tornja sa satom u Italiji

---

Šoljić, Ante Radovan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:192801>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-17**



*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**

**Ante Radovan Šoljić**

**Split 2022.**

SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I  
GEODEZIJE

**Ante Radovan Šoljić**

**Seizmička analiza tornja sa satom u Italiji**

**Diplomski rad**

Akad. godina: 2021./2022.

Student: Ante Radovan Šoljić



Zahvaljujem se mentorima, na pristupačnosti tijekom izrade, i na svim savjetima kojim su mi unaprijedili i olakšali moju izradu rada. Zahvaljujem se FGAG-ovim „knjižničarkama“, Dijani i Nikolini, jer su mi dali uvid u dodatni svijet knjiga . Zahvaljujem se prijateljima, na pomoći i potpori tijekom izrade rada. Te na kraju najveću zahvalu dugujem svojoj obitelji. Oni su moja najveća potpora.

SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: **Ante Radovan Šoljić**

MATIČNI BROJ (JMBAG) :**0083218301**

KATEDRA: **Katedra za teoriju konstrukcija**

PREDMET: **Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo**

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: **Seizmička analiza tornja sa satom u Italiji**

Opis zadatka: Na temelju zadane geometrije modela zidanog tornja sa satom u Italiji potrebno je napraviti analizu seizmičke otpornosti predmetne građevine koristeći kombiniranu metodu konačno-diskretnih elemenata (FEM/DEM). Seizmičku analizu provesti za zapise tri potresa: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland. Provesti analizu za četiri različita rubna uvjeta: slobodnostojeći toranj na elastičnoj podlozi, upeti toranj u krutoj podlozi, slobodnostojeći toranj na krutoj podlozi i ukopani toranj u elastičnoj podlozi, analizirati dobivene rezultate i donijeti zaključke o prednostima i nedostacima različitih načina oslanjanja tornja na podlogu.

U Splitu, ožujak.2022

Voditelj diplomskog rada:  
Izv.prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović

Izv.prof. dr.sc. Nikolina Živaljić

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Izv. prof. dr. sc. Ivo Andrić

## Seizmička analiza tornja sa satom u Italij

**Sažetak:** Za zidani toranj sa satom koji se nalazi u pokrajini Ferrera u Italiji izvršene su seizmičke analize preko kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata (FEM/DEM) za tri potresa na lokacijama (Petrovac, Campano Lucano, South Iceland) s četiri rubna uvjeta. Seizmičkom analizom su dobiveni rezultati. Iz tih rezultata utvrdilo se koji rubni uvjet je najpovoljniji za zidani toranj, koji je postigao najveća ubrzanja i najveće pomake, odnosno koji je izdržao najduže do konačnog urušavanja.

**Ključne riječi:** seizmička analiza, zidani toranj, sat, parametarska analiza, FEM/DEM, ubrzanje, pomaci

## Seismic analysis of a tower with cloak in Italy

**Abstract:** For the masonry tower with cloak located in the province of Ferrera in Italy, seismic analyzes were performed using the combined finite-discrete element method (FEM / DEM) for three earthquakes at locations (Petrovac, Campano Lucano, South Iceland) with four boundary conditions. The results were obtained by seismic analysis. From these results, it was determined which boundary condition is the most favorable for the masonry tower, which achieved the greatest accelerations and the greatest displacements, that is, which lasted the longest until the final collapse.

**Keywords:** seismic analysis, masonry tower, cloak, parametric analysis, FEM/DEM, acceleration, displacements

1.	Uvod .....	1
1.1.	Općenito.....	1
1.2.	Razmatrana konstrukcija.....	2
1.3.	O numeričkim postupcima. ....	3
1.3.1.	Općenito .....	3
1.3.2.	Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata.....	5
2.	Geometrija i svojstva.....	9
2.1.	Geometrija konstrukcije.....	9
2.2.	Svojstva konstrukcije.....	9
2.3.	Računski model konstrukcije.....	11
2.4.	Opterećenje sustava.....	12
3.	Numerička analiza.....	12
3.1.	Općenito.....	13
3.2.	Rezultati numeričke analize : pomaci konstrukcije.....	14
3.2.1.	Model slobodno oslonjenje konstrukcije na elastičnoj podlozi.....	14
3.2.2.	Model upete konstrukcije u tlo.....	23
3.2.3.	Model slobodno oslonjenje konstrukcije na krutoj podlozi .....	30
3.2.3.	Model ukopane konstrukcije u tlo.....	36
3.3.	Rezultati numeričke analize : progresivan slom konstrukcije.....	44
3.3.1.	Model slobodno oslonjenje konstrukcije na elastičnoj podlozi.....	44
3.3.2.	Model upete konstrukcije u tlo.....	48
3.3.3.	Model slobodno oslonjenje konstrukcije na krutoj podlozi .....	56
3.3.3.	Model ukopane konstrukcije u tlo.....	61
4.	Usporedba rezultata.....	72
4.1.	Usporedba pomaka konstrukcije prema rubnim uvjetima oslanjanja.....	72
4.1.1.	Model slobodno oslonjenje konstrukcije na elastičnoj podlozi.....	72
4.1.2.	Model upete konstrukcije u tlo.....	73
4.1.3.	Model slobodno oslonjenje konstrukcije na krutoj podlozi .....	74
4.1.4.	Model ukopane konstrukcije u tlo.....	75
4.2.	Usporedba pomaka konstrukcije prema seizmičkoj pobudi .....	76
4.2.1.	Campano Lucano.....	76
4.2.2.	South Iceland.....	77
4.2.3.	Petrovac .....	78



5. Zaključak.....	79
6. Literatura.....	80

## 1. Uvod

### 1.1. Općenito

Veliki aspekt znanstvenog polja građevinskog inženjerstva odnosi se na sigurnost konstrukcija i seizmičku procjenu zidanih konstrukcija [1], posebno odnoseći se na povijesne građevine kako bi se očuvale njihove arhitektonske značajke u kulturnoj baštini. Većina povijesnih zidanih konstrukcija izgrađenih u Italiji, izgrađene su na temelju praktičnih pravila, bez uvažavanja seizmičkih proračunskih koncepata [2]. Sami materijal zida, je kompozitni, heterogeni medij koji proizlazi iz spajanja prirodnih ili umjetnih blokova pomoću slojeva morta ili suhih fuga [3], pri čemu je sam odgovor materijala na vanjsku pobudu ili djelovanje karakterizirano sa kompleksnim mehaničkim odgovorom, neovisno dali se radi o statičkom ili čak seizmičkom djelovanju.



Slika 1. Povijesne talijanske zidane građevine (<https://www.pikist.com/free-photo-vijiv>)

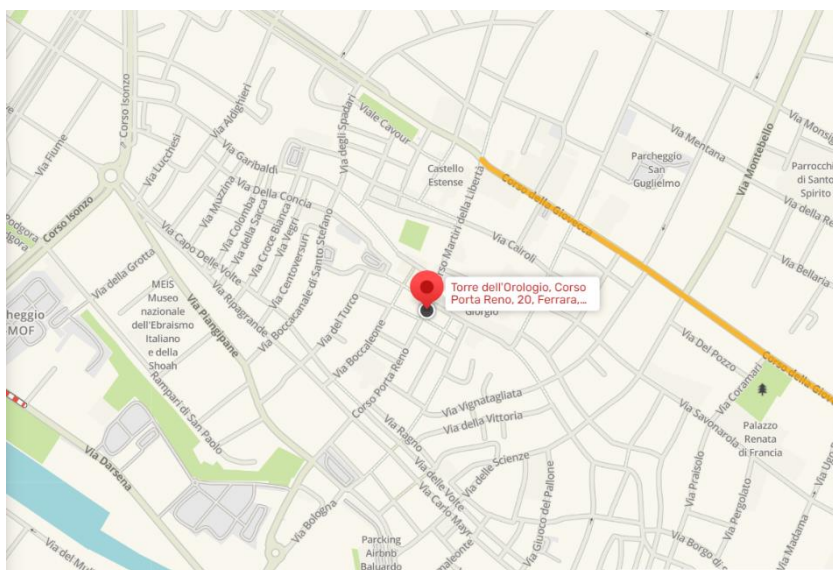
U posljednja dva desetljeća, značajan broj građevina je teško oštećen, posebno izdvajajući tornjeve i zvonike, od talijanskih potresa kao što su Umbria-Marche 1997-1998, Abruzzo 2009, Emilia-Romagna 2012 ; središnja Italija 2016; i drugih.

Zidani tornjevi su rasprostranjeni po cijelom području Italije, te čine značajnu ulogu u arhitektonskoj povijesnoj baštini svoje zemlje. Zbog svog značaja i doprinosa arhitektonskoj i kulturnoj baštini, njihova sigurnost i procjena protiv potresa, je dan danas od iznimnog značaja. U prošlim vremenima, tornjevi su bili građeni da uglavnom podnose i odupiru se vertikalnim

opterećenjima, dok u novija vremena, preko internacionalnih standarda i kodova koji su nametnuli ocijenjivanje građevinske performanse u prisutnost horizontalnih opterećenja, kao što je u slučaju simuliranja potresom. Zbog same kompleksnosti odgovora konstrukcije, koja ovisi o kompleksnoj prirodi zida, primjenjuju se razne numeričke metode za analizu zidanih konstrukcija, koje ovise o vrsti djelovanja i vrsti konstrukcije koja se razmatra.

## 1.2. Razmatrana konstrukcija

U Talijanskoj pokrajini Ferrara, na području Corso Porta Reno, na samom kraju trga Trente e Trieste nalazi se toranj sa satom, visine od 30 metara. Toranj se nalazi u sklopu palazzo della Ragione u samom centru grada.



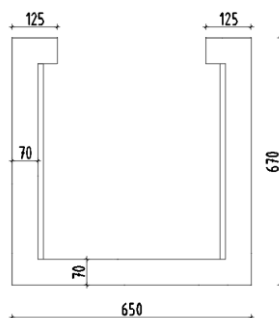
**Slika 2.** Lokacija tornja sa satom (google maps)

Toranj sa satom, datira iz petnaestog stoljeća, a prema različitim autorima, izgrađen je u drugoj polovici šesnaestog stoljeća, kada je tamo postavljeno zvono Razuma. Proširenjem Corso Porta Reno 1950-ih, toranj se našao na sredini ulaza u cestu i između dva nadvožnjaka. Zbog seizmičkih događaja iz 2012. Godine, pokrenut je plan postpotresne obnove povijesne građevine 2019 godine [4], čiji je cilj bio postpotresna lokalna sanacija i ojačanje zgrade, kako bi se povećala sigurnost cijele strukture koju čine niz građevina i tornjeva.



**Slika 3.** Toranj sa satom u sklopu palače Razuma (<https://www.alamy.it/piazza-del-municipio-di-ferrara-con-torre-dell-orologio-image367230092.html>)

Toranj ima veliki otvor u podnožju jednog obodnog zida i dvostruki zvonik na vrhu. Drveni pod se nalazi odmah iznad prvog otvora u podnožju. U području zvonika nalazi se kat, čiji je pod napravljen od jednostavnog svoda, dok je pod ispod sata napravljen od glinenih cigla i drvenih greda.



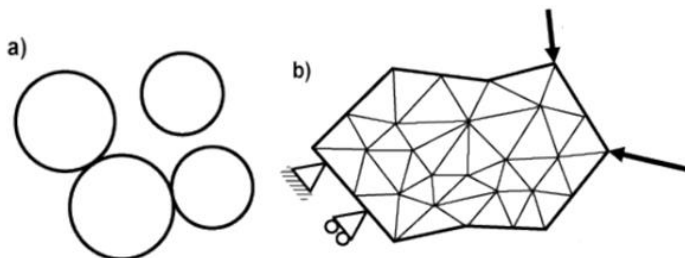
**Slika 4.** Tlocrt tornja sa satom

### 1.3. O numeričkim postupcima

#### 1.3.1. Općenito

S obzirom na složenost mehaničkog ponašanja zidane konstrukcije, koje slove zbog kompozitnog ponašanja kamena, žida, šupljina i morta, točna procjena nelinearnog ponašanja zidanih konstrukcija kod postojećih građevina, i dalje predstavlja složen problem u analizi zidanih konstrukcija, zbog čega su potrebni pouzdani i učinkoviti numerički alati čija složenost i komputacijska moć, trebaju biti prikladni za praktične svrhe. Od raznih numeričkih metoda

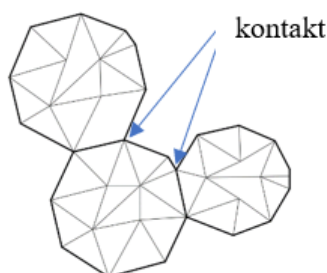
koje su razvijene danas ovisno o potrebi i zahtjevima koji se nude, najrasprostranjenija je metoda konačnih elemenata. Metodom konačnih elemenata (MKE) konstrukciju zida simuliramo kao ortotropni kontinuum (slika 5.b) u kojem je srednja veza između napreznja i deformacija dobivena eksperimentalno ili tehnikama homogeniziranja [5]. Nedostatak MKE u analizi zidanih konstrukcija se izražava u nemogućnosti simuliranja mehaničke interakcije između više blokova, što je veliki nedostatak zbog nelinearnog ponašanja konstrukcije tijekom seizmičkih pobuda. Osim MKE, prisutna je metoda diskretnih elemenata koja je našla veliku primjenu kod zidanih konstrukcija iz razloga, jer omogućuje prikazati konstrukciju kao skup diskretnih elemenata međusobno povezani kontaktnim elementima (slika 5.a). Nedostatak metode diskretnih elemenata (DEM) leži u nemogućnosti opisivanja stanja napreznja i deformacija unutar diskretnih elemenata.



**Slika 5.** Simuliranje materijala preko :

a) Metode diskretnih elemenata    b) Metode konačnih elemenata

U načinu da se iskoriste prednosti ovih dvaju metoda (FEM i DEM), realizirana je nova metoda, koja se zove kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata. Kombinacijom ovih dvaju metoda, čvrsta tijela se mogu modelirati kao kolekcija deformabilnih čestica koje su međusobno povezane (slika 6). Kombinirana metoda konačno diskretnih elemenata predstavlja jedini numerički pristup koji može precizno simulirati sustave koji se sastoje od milijuna deformabilnih diskretnih elemenata [6].



**Slika 6.** Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata

### 1.3.2. Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata

#### (i) Osnovne karakteristike modela

Kako je MKE programirana da prati kontinuum pristup ponašanja, svaki diskretni element je diskretiziran u trokutne konačne elemente, s čime su oblici i pozicije elemenata u vremenu i prostoru dane preko trenutnih kordinata čvorova konačnih elemenata :

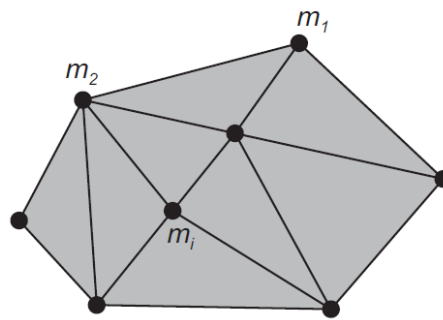
$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}, v = \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix}, a = \dot{v} = \ddot{x} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \dots \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$x_i$  – vektori pomaka čvorova

$\dot{x}_i$  – vektori brzina čvorova

$\ddot{x}_i$  – vektori ubrzanja čvorova

Gdje  $n$  predstavlja ukupan broj stupnjeva slobode za pojedinačan element. Naprezanja u elementu se mogu proračunati prema generaliziranom postupku iz mehanike kontinuuma, koristeći tenzore deformacija i konstitutivne zakone materijala. Nakon procjene stanja naprezanja, može se sastaviti vektor unutrašnjih sila  $F_{int}$  tako da se reduciraju i koncentriraju unutrašnje sile na čvorove konačnih elemenata. Interakcija susjednih diskretnih elemenata, je opisana preko kontaktnih detekcijskih i interakcijskih algoritama, a kao rezultat mehaničke interakcije, kontaktne sile između diskretnih elemenata se mogu procjeniti. Sve kontaktne sile se mogu sastaviti u vektor vanjskih sila  $F_{ext}$  koje uključuju vanjske sile koje djeluju direktno na diskretne elemente. Kombinirana metoda konačnih-diskretnih elemenata (CFDEM) ima odliku da se diskretni elementi mogu slomiti i fragmentirati, a to ponašanje se može opisati preko spojnih elemenata koji su implementirani u mrežu konačnih elemenata, a sile koje se prenose kroz spojne elemente sastavljamo u vektor zglobnih sila  $F_{joint}$ . Korišteni model može uključivati neki oblik efekata prigušenja, koja se mogu razmatrati matrici prigušenja  $C$ . Da bi se maksimalno smanjila komputacijska zahtjevnost, najjednostavniji pristup tome leži u diskretizaciji masa u grupiranju mase u takozvane kvržice (lumps). Pretpostavlja se da su mase grupirane u kvržice u čvorovima mreže konačnih elemenata (slika 7.)



Slika 7. Model grupiranih kvržica masa [5]

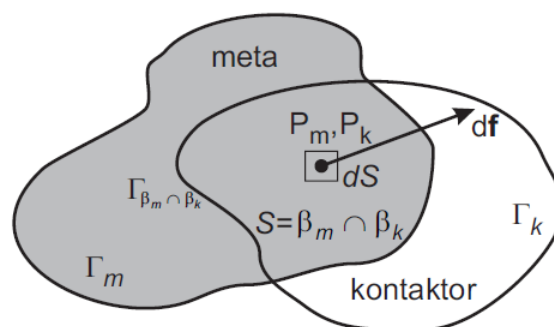
$$m = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \dots \\ m_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

U konačnom obliku, jednačba gibanja (4), se rješava za svaki pojedinačni element :

$$\mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{F}_{int} - \mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{joint} = \mathbf{0} \quad (3)$$

(ii) Detekcija i interakcija kontakta

Da bi se identificirao kontakt između susjednih diskretnih elemenata, trebaju postojati jaki i robusni algoritmi za detekciju kontakta između susjednih diskretnih elemenata, koji će identificirati one koji su u kontaktu, te eliminirati one koji su predaleko te više nisu u kontaktu. Nakon identifikacije kompatibilnih (susjednih) elemenata, određuju se kontaktne sile između dva diskretna elementa, od kojih se jedan proglašava kontaktorom a drugi meta (slika 8.).



Slika 8. Kontaktna diferencijalna sila u okolini točaka Pm i Pk. [5]

Kontaktne sile se u algoritmu detekcije određuju penalty metodom, koja je zasnovana na principu potencijalnih kontaktnih sila. Tijekom kontakta dvaju diskretnih elementa, kontaktor i meta omeđuju površinu  $S$ , te ukupna kontaktna diferencijalna sila na kontaktoru  $d\mathbf{f}_k$ :

$$d\mathbf{f}_k = [\text{grad}\varphi_k(P_m) - \text{grad}\varphi_m(P_k)]dS \quad (4)$$

$P_m, P_k$  – preklapajuće točke mete i kontaktora

$\varphi_m, \varphi_k$  – odgovarajuće funkcije potencijala

Integracijom jednadžbe (4) preko cijele preklapajuće površine  $S$ , dobiva se ukupna kontaktna sila:

$$\mathbf{f}_k = \int_{S=\beta_m \cap \beta_k} [\text{grad}\varphi_k - \text{grad}\varphi_m]dS \quad (5)$$

### (iii) Deformabilnost elemenata

U opisu deformacija diskretnih elemenata, koriste se klasične jednadžbe i tenzori iz mehanike kontinuum, te trenutni položaj koordinata  $x$  od materijala imaju referentni vektor položaja  $\mathbf{p}$  koji se može napisati u obliku:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p} + \mathbf{u}(\mathbf{p}) \quad (6)$$

$\mathbf{u}(\mathbf{p})$  – pomak materijalne točke

Deformacije se opisuju uz pomoć tenzora deformacije koji se proračunava preko gradijenta deformacija  $\mathbf{F}(\mathbf{p})$ :

$$\mathbf{F}(\mathbf{p}) = \nabla \mathbf{x} = \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u} \quad (7)$$

Iako u većini slučajeva, dovoljno je posmatrati male deformacije, u slučajevima kad su protegnuća mala, a rotacije i pomaci veliki, praktično je da se gradijent tenzora deformacija dekompozira u obliku:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{U} = \mathbf{V}\mathbf{R} \quad (8)$$

$\mathbf{U}$  – lijevi tenzor protegnuća (deformacija)

$\mathbf{V}$  - desni tenzor protegnuća (deformacija)



$R$  – ortogonalni rotacijski tenzor

Prateći polarnu dekompoziciju gradijenta tenzora deformacija, desni Green-st.Venant tenzor deformacija  $\bar{E}$  se može izraziti :

$$\bar{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{U}^T \mathbf{U} - \mathbf{I}) \quad (9)$$

Primjena U desnog tenzora protegnuća, fizički ukazuje da dolazi prvo do protegnuća (stretching) u glavnim smjerovima što je popraćeno sa rotacijom. Inverzni postupak prikazan jednažbom (10), u kojoj je korišten lijevi Green-st.Venant tenzor deformacija :

$$\tilde{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{V}\mathbf{V}^T - \mathbf{I}) \quad (10)$$

Primjena V lijevog tenzora protegnuća, rotacija se događa prije protegnuća.

Pošto se diskretizacija konačnih elemenata koristi za obradu kontaktnih interakcija, radi što bolje učinkovitosti, koristi se što jednostavnija geometrija konačnih elemenata. Zbog te činjenice , uglavnom se koriste za 2D analizu, trokutasti konačni elementi dok za 3D analizu se koriste tereadarski elementi.

(iv) Vremenska integracija

Vremenska integracija jednažbe gibanja pojedinog čvora (3), provodi se eksplicitnim putem koristeći metodu konačnih razlika (MKR) koja je uvjetno stabilna i čija stabilnost i točnost ovisi o izboru vremenskog koraka. Osnovni pristup MKR se može prikazati u obliku :

$$v_{i,t+\frac{\Delta t}{2}} = v_{i,t-\frac{\Delta t}{2}} + \Delta t a_{i,t/m_i} \quad (11)$$

$$v_{i,t+\Delta t} = x_{i,t} + \Delta t v_{i,t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (12)$$

$x_i$  – vektor položaja čvora

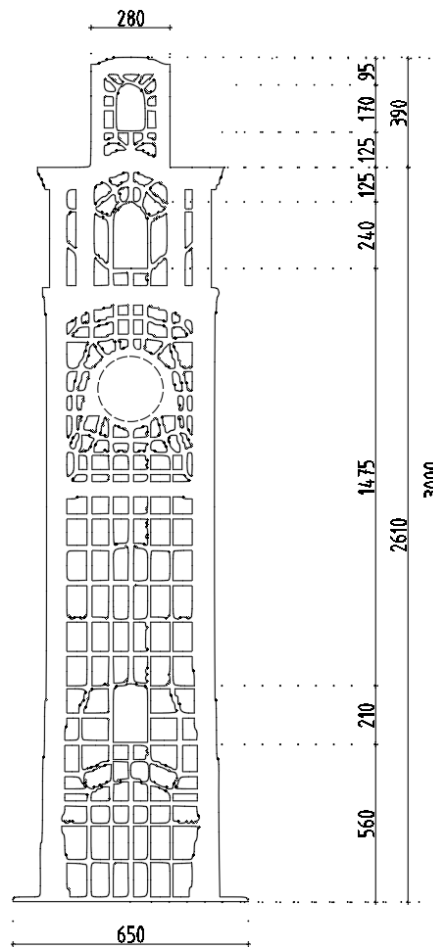
$v_i$  – vektor brzine čvora

$a_i$  – vektor ubrzanja čvora

$\Delta t$  – vremenski korak

## 2. Geometrija i svojstva

### 2.1. Geometrija konstrukcije

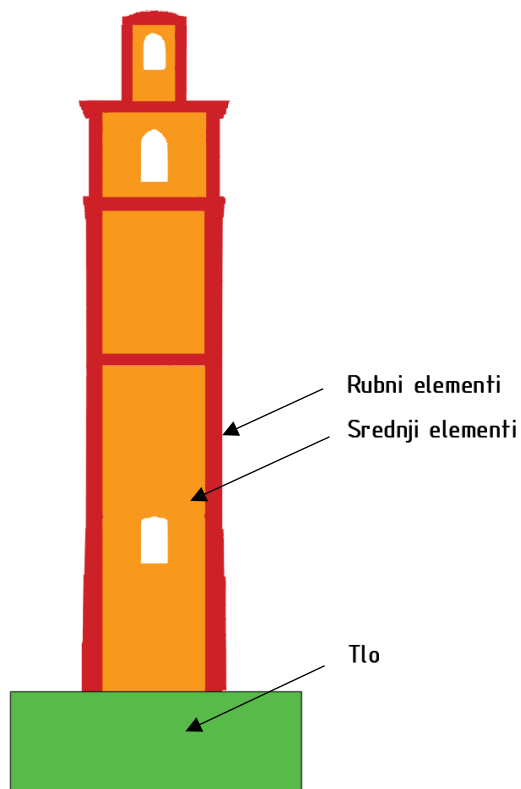


Slika 9. Geometrijski model konstrukcije.

### 2.2. Svojstva konstrukcije

Konstrukcija je modelirana sa tri različita elementa, rubni elementi koji simuliraju obodne zidove, srednji elementi koji simuliraju unutrašnjost konstrukcije, te elementi tla, koji simuliraju tlo za koje se pretpostavlja da nema mogućnost pucanja (slika 10).

Konstrukcija je analizirana za četiri različita modela, koji se razlikuju prema rubnim uvjetima na koju je konstrukcija povezana sa tлом. Različiti modeli rubnih uvjeta za koju je konstrukcija analizirana su : konstrukcija slobodno oslonjena na elastičnoj podlozi, konstrukcija upeta sa tлом, konstrukcija slobodno oslonjena na krutoj podlozi i konstrukcija ukopana u tlo.



**Slika 10.** Različiti elementi za pripadajuću konstrukciju

Svojstva materijala konstrukcije i tla prikazana su u tablici 1.

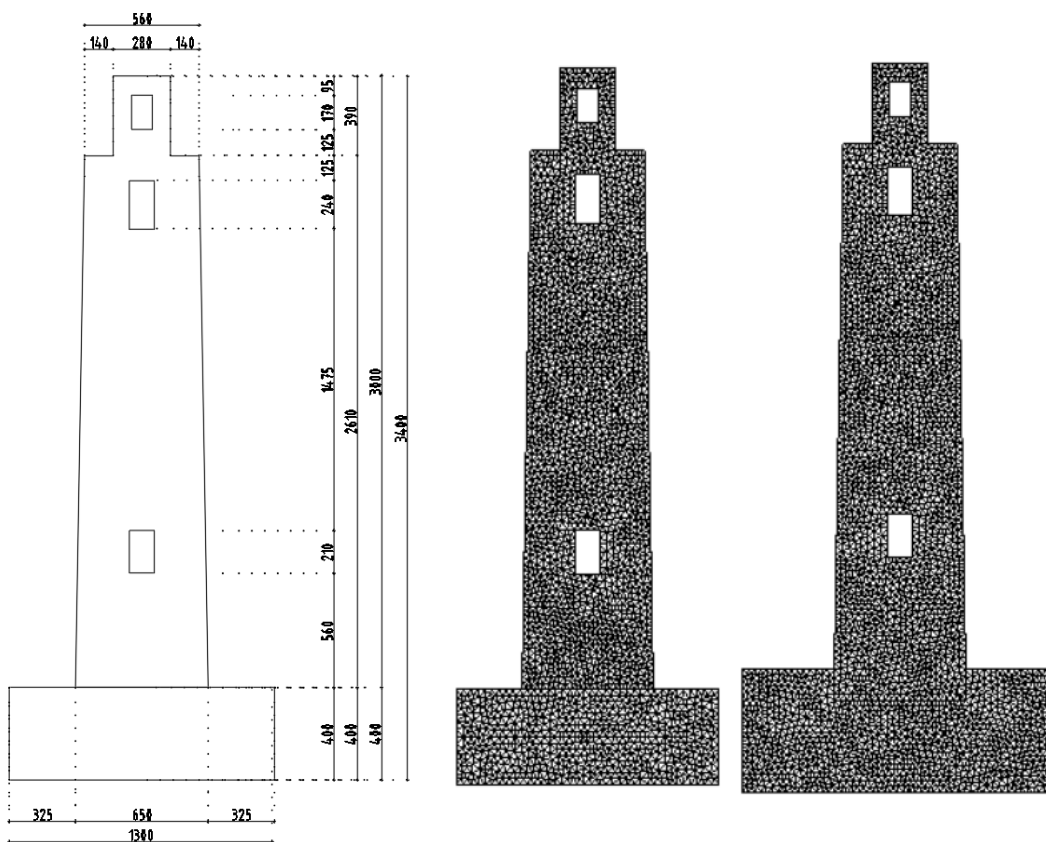
Karakteristike materijala	Konstrukcija	Tlo
Modul elastičnosti, $E$ (MPa)	2250	70
Poissonov koeficijent, $\nu$	0.30	0.20
Vlačna čvrstoća, $f_t$ (MPa)	0.27	-
Posmična čvrstoća, $f_s$ (MPa)	1.08	-
Energija loma u vlaknu $G_{f,t}$ (N/m)	140	-
Energija loma u posmiku $G_{f,s}$ (N/m)	560	-
Gustoća, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1800	1800
Koeficijent trenja, $\mu$	0.70	0.70
Prigušenje, $\zeta$	0.2	0.4

**Tablica 1.** Svojstva materijala

### 2.3. Računski model konstrukcije

Radi bržeg i efikasnijeg proračuna, konstrukcija od početne geometrije, modelirana sa pojednostavljenima, po visini je modelirana sa blagim zakošenjem, primjenjena je simetrija preko vertikalne osi, te su otvoru simulirani preko pravilnih pravokutnika.

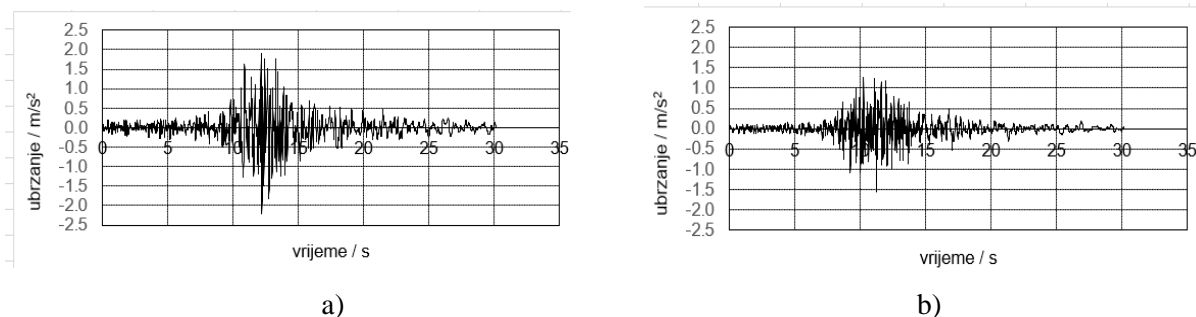
Proračun konstrukcije preko kombinirane metode konačnih-diskretnih elemenata provoden je u software-u Y-FDEM, gdje su elementi konstrukcije modelirani sa trokutnim konačnim elementima sa tri čvora i dva stupnja slobode u čvoru. Konstrukcija se sastoji od 5038 elemenata i 2714 čvorova. Debljina elemenata variraju, od debljine rubnih elemenata od 6.7 m, debljine srednjih elemenata 1.4 m i debljine tla 12.9936 m.



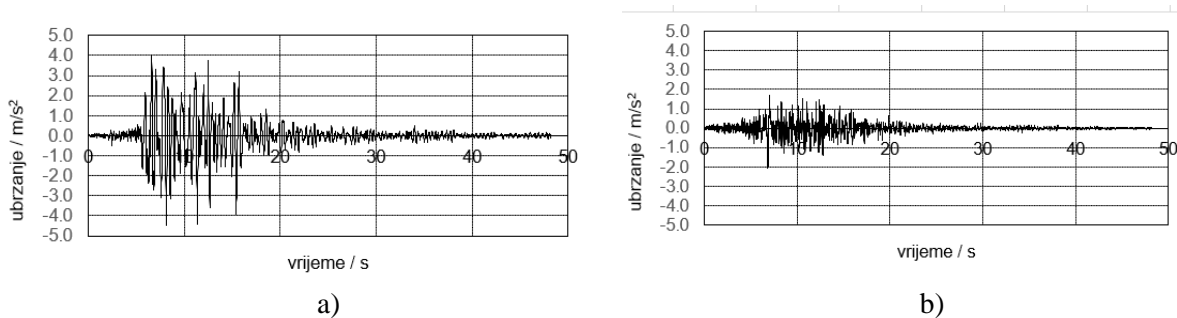
**Slika 11.** a) Pojednostavljeni računski model b) diskretiziran model za model sa slobodnim oslanjanjem na elastičnoj podlozi, krutoj podlozi i upete u tlo c) diskretiziran model sa ukopanim rubnim uvjetima

## 2.4. Opterećenje sustava

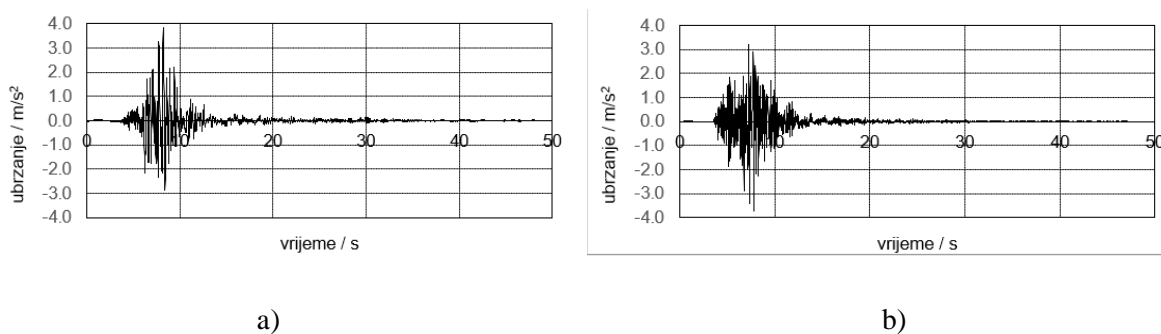
Za opterećenje konstrukcije izdvojene su tri seizmička zapisa na lokacijama : Campano Lucano (slika 12.), Petrovac (slika 13.) i South Iceland zapis (slika 14.). U nastavku su vidljivi akceleroگرامи за potrese na horizontalnoj i vertikalnoj komponenti.



Slika 12. Campano Lucano zapis, a) horizontalna i b) vertikalna komponenta



Slika 13. South Iceland zapis, a) horizontalna i b) vertikalna komponenta



Slika 14. Petrovac zapis, a) horizontalna i b) vertikalna komponenta

### **3. Numerička analiza**

#### **3.1. Općenito**

Numeričkom analizom, dobiveni su rezultati za sva četiri modela koji se razlikuju prema rubnim uvjetima navedenim ranije, za sva tri zapisa potresa. Rezultati obuhvaćaju dijagrame u kojima su izloženi pomaci vrha konstrukcije (zvonika) za zadana opterećenje i grafički crteži koji predočavaju nastanak i širenje pukotina u konstrukciji. Dijagrami su predočeni do maksimalnog vršnog ubrzanja tla, koju konstrukcija podnosi prije nastupanja sloma zvonika, dok su grafički crteži predočeni od trenutka pojave prve pukotine, te širenja pukotine kroz konstrukciju, do eventualnog kolapsa cijele konstrukcije za zadano opterećenje.

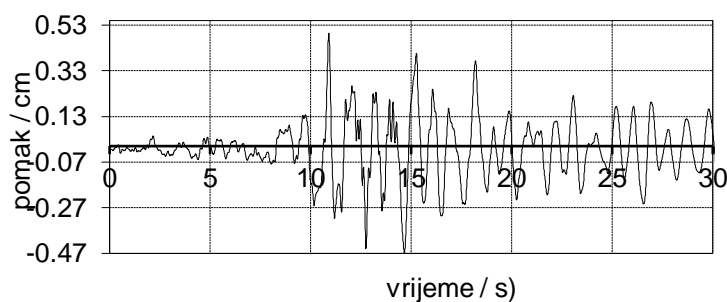
## 3.2. Rezultati numeričke analize : pomaci konstrukcije

### 3.2.1. Model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi

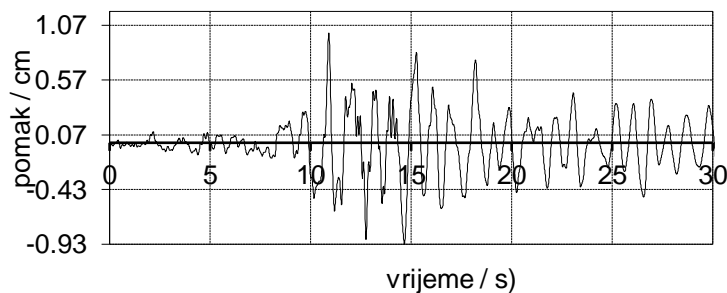
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka konstrukcije za analiziranu konstrukciju koja je modelirana kao slobodno oslonjena konstrukcija na elastičnoj podlozi, u ovisnosti o opterećenja na koju je izložena konstrukcija.

(i) Campano Lucano

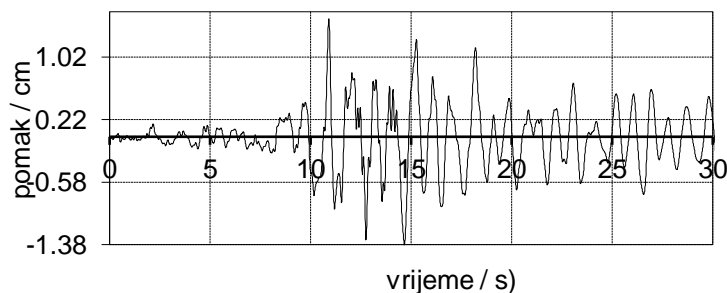
Na slikama od 15. do 28. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Campano Lucano, počevši od 0.20 g do trenutka loma zvonika za 3.00 g.



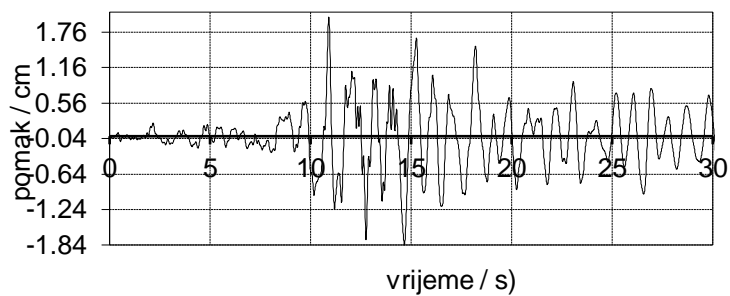
**Slika 15.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20$  g za Campano Lucano



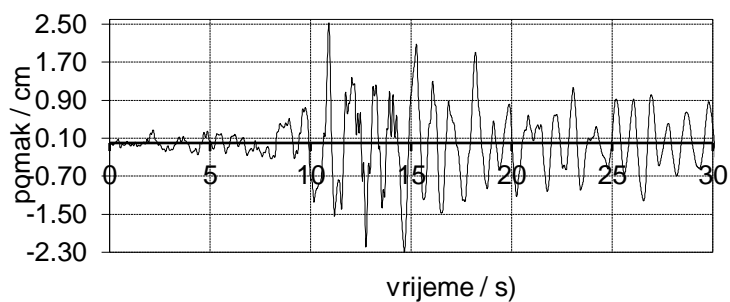
**Slika 16.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40$  g za Campano Lucano



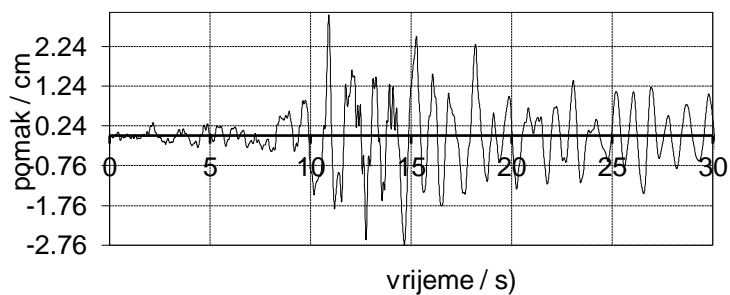
**Slika 17.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60$  g za Campano Lucano



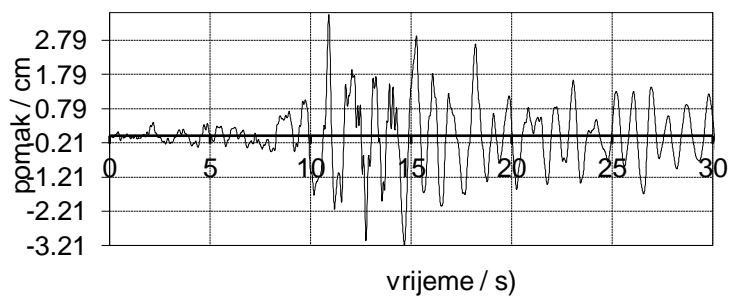
Slika 18. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za Campano Lucano



Slika 19. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za Campano Lucano

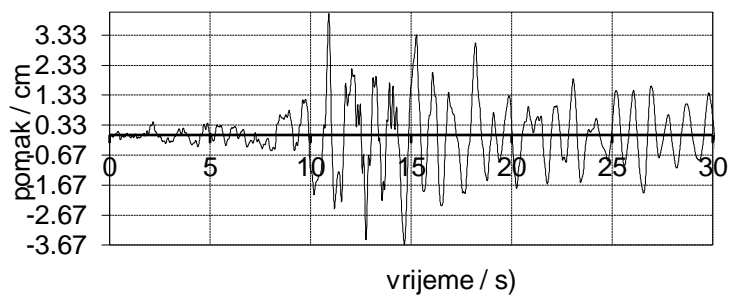


Slika 20. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za Campano Lucano

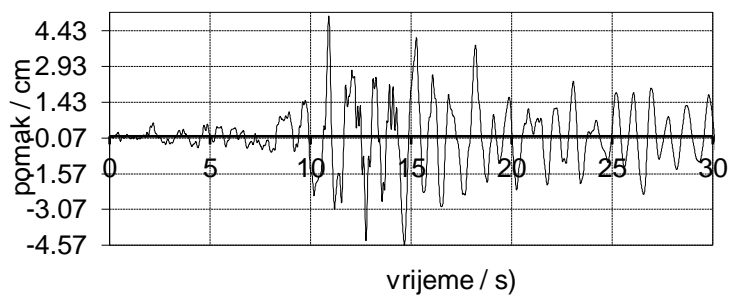


Slika 21. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za Campano Lucano

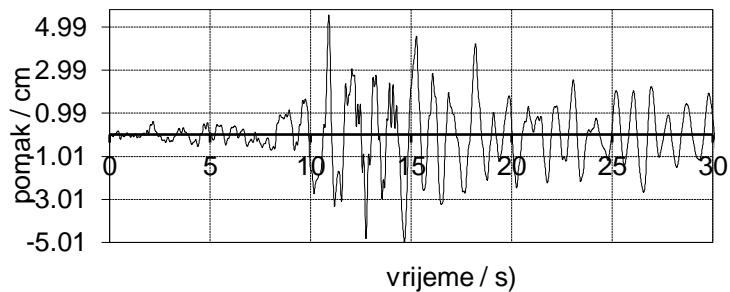




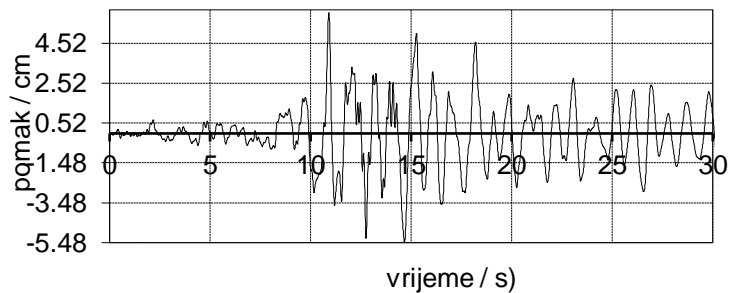
**Slika 22.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.60$  g za Campano Lucano



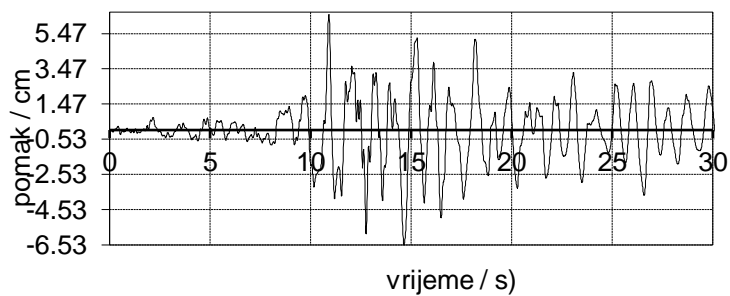
**Slika 23.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.80$  g za Campano Lucano



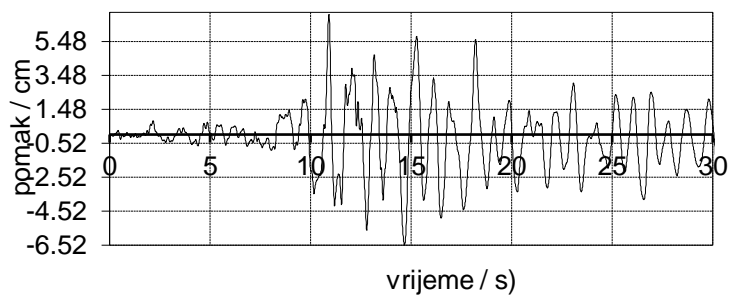
**Slika 24.** Vršno ubrzanje  $a_g = 2.00$  g za Campano Lucano



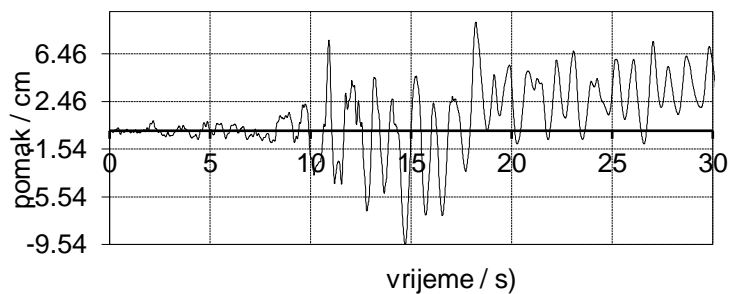
**Slika 25.** Vršno ubrzanje  $a_g = 2.20$  g za Campano Lucano



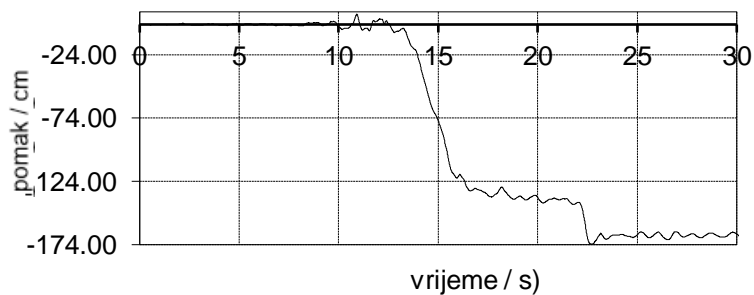
Slika 25. Vršno ubrzanje  $a_g = 2.40$  g za Campano Lucano



Slika 26. Vršno ubrzanje  $a_g = 2.60$  g za Campano Lucano



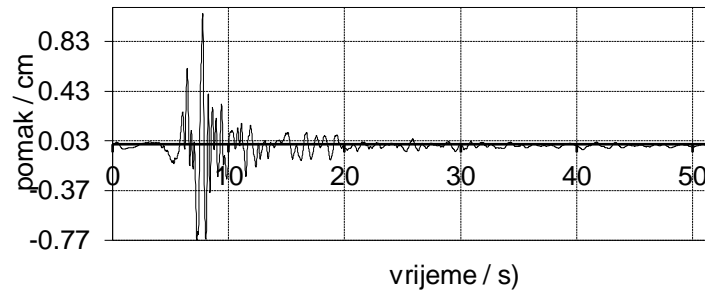
Slika 27. Vršno ubrzanje  $a_g = 2.80$  g za Campano Lucano



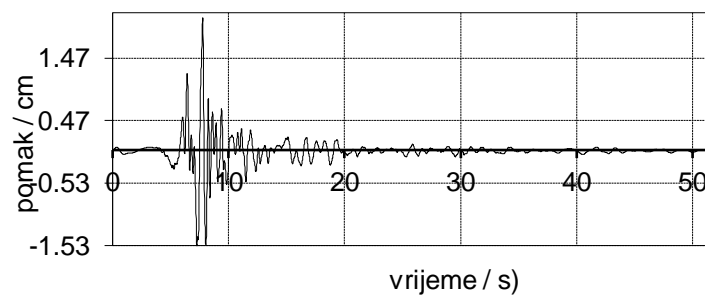
Slika 28. Vršno ubrzanje  $a_g = 3.00$  g za Campano Lucano, kompletan slom

## (ii) South Iceland

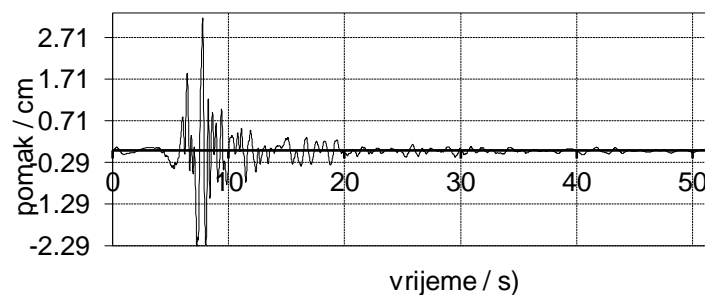
Na slikama od 29. do 36. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa South Iceland, počevši od 0.20 g do trenutka loma zvonika 1.60 g.



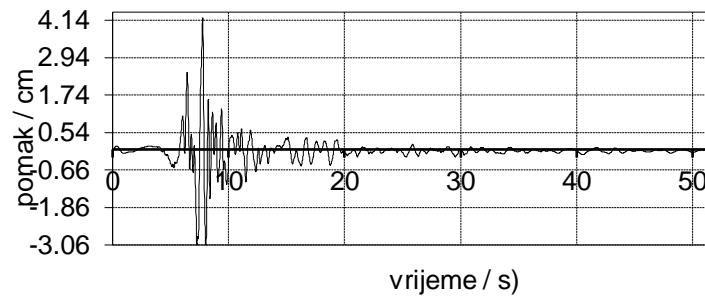
Slika 30. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za South Iceland



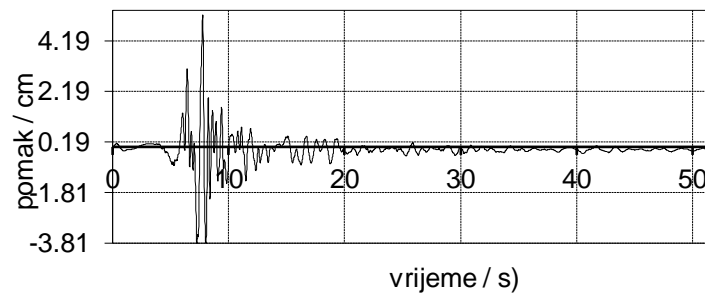
Slika 30. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za South Iceland



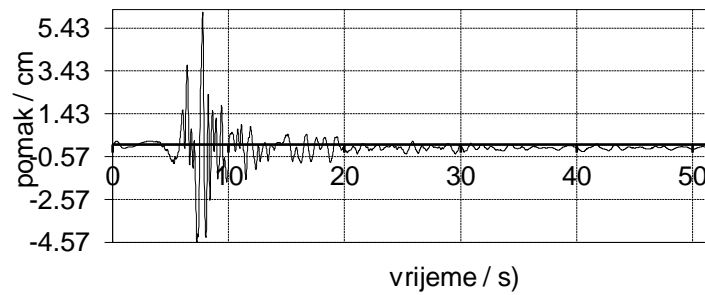
Slika 31. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za South Iceland



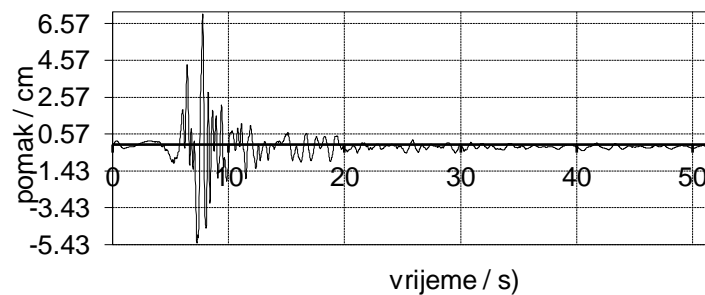
Slika 32. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za South Iceland



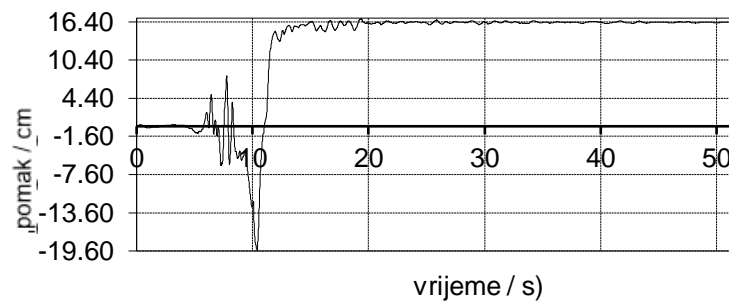
Slika 33. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za South Iceland



Slika 34. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za South Iceland



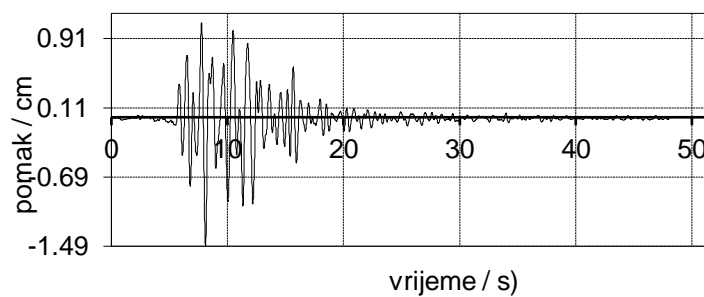
Slika 35. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za South Iceland



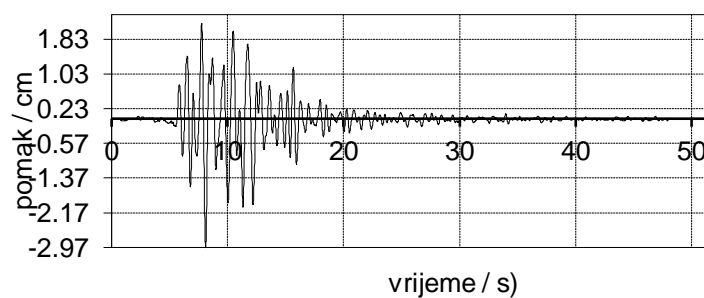
**Slika 36.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$  za South Iceland, kompletan slom

(iii) Petrovac

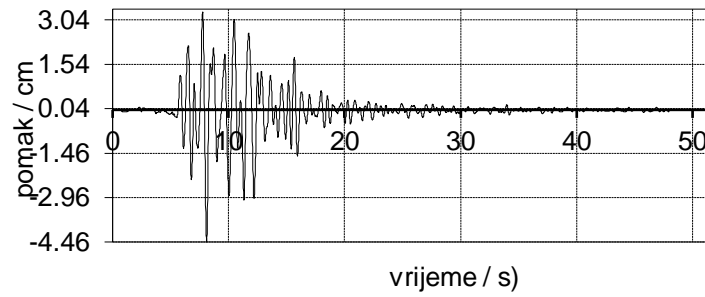
Na slikama od 37. do 47. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Petrovac, počevši od  $0.05 g$  do trenutka loma zvonika za  $0.52 g$ .



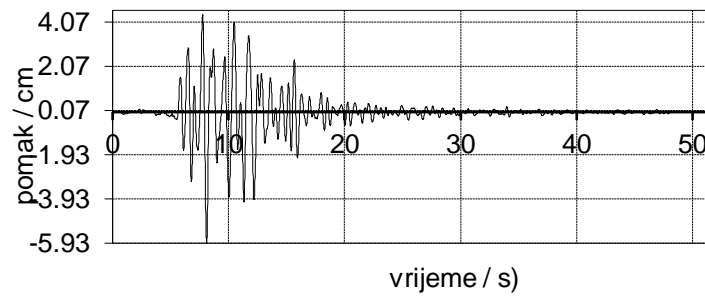
**Slika 37.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.05 g$  za Petrovac



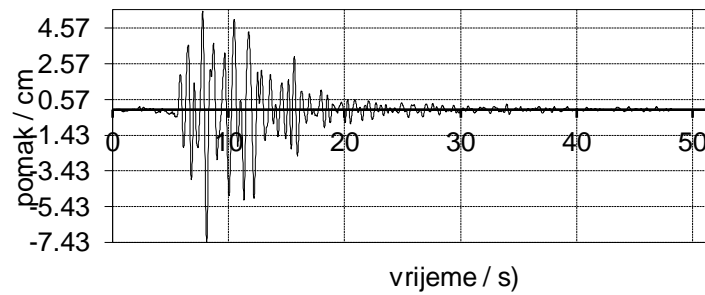
**Slika 38.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.10 g$  za Petrovac



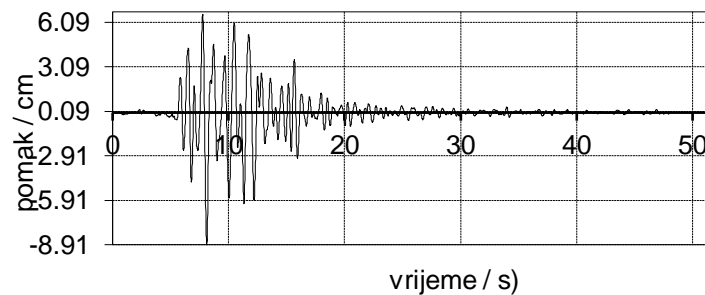
**Slika 39.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.15 g$  za Petrovac



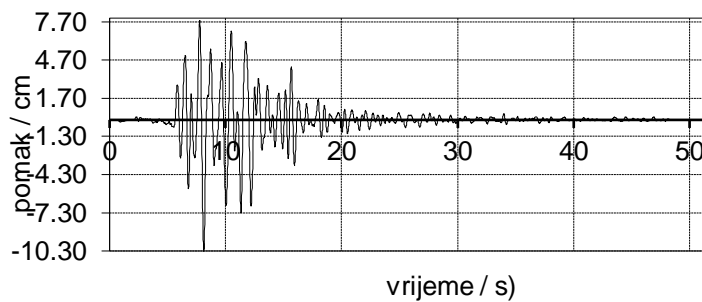
**Slika 40.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za Petrovac



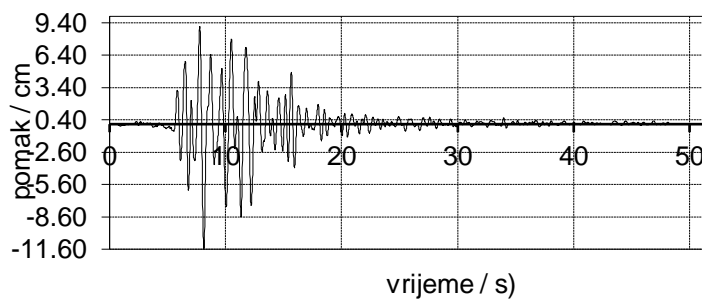
**Slika 41.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.25 g$  za Petrovac



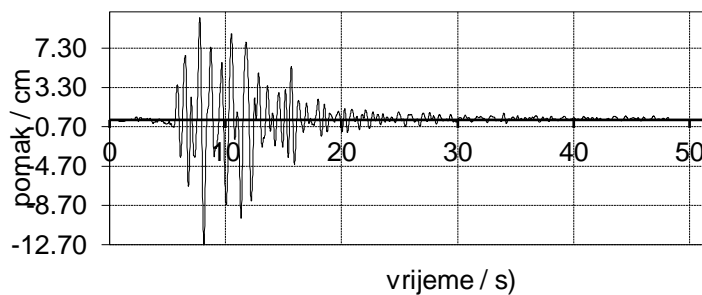
**Slika 42.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.30 g$  za Petrovac



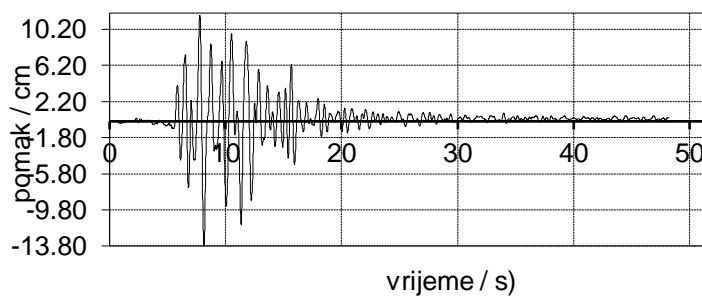
Slika 43. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.35 g$  za Petrovac



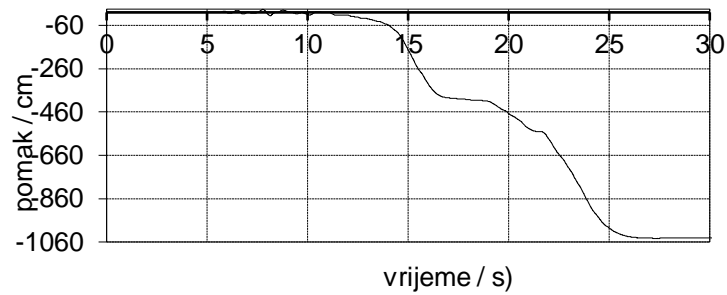
Slika 44. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za Petrovac



Slika 45. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.45 g$  za Petrovac



Slika 46. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.50 g$  za Petrovac



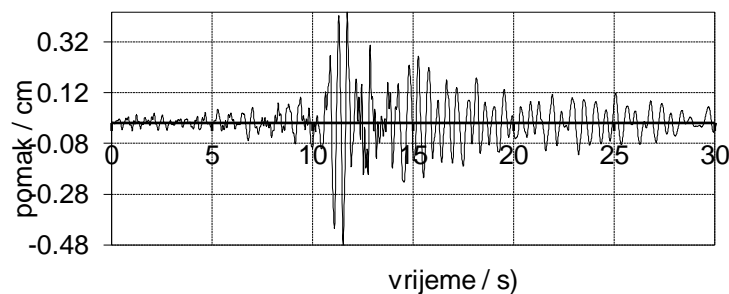
**Slika 47.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.52 g$  za Petrovac, kompletan slom

### 3.2.2. Model upete konstrukcije u tlo

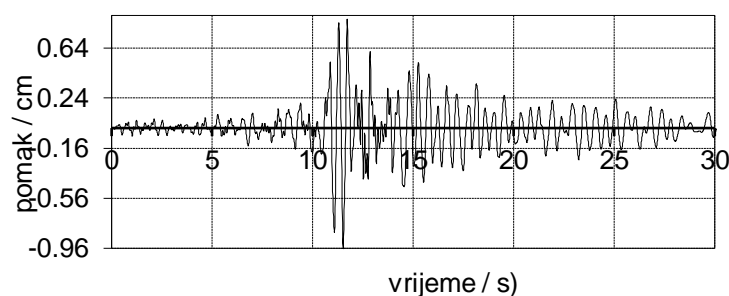
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka konstrukcije za analiziranu konstrukciju koja je modelirana kao upeto oslonjena konstrukcija sa tlom, u ovisnosti o opterećenja na koju je izložena konstrukcija.

#### (i) Campano Lucano

Na slikama od 48. do 57. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model upete konstrukcije, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Campano Lucano, počevši od 0.20 g do trenutka loma zvonika za 2.00 g.

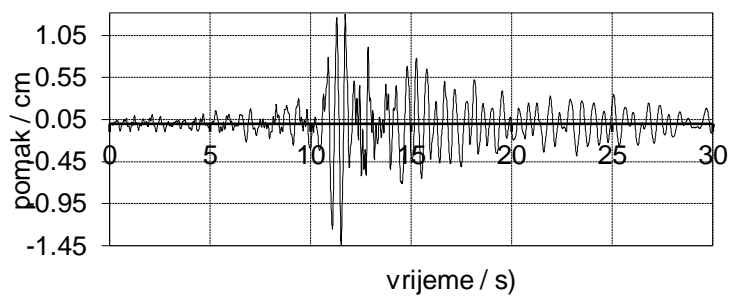


**Slika 48.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za Campano Lucano

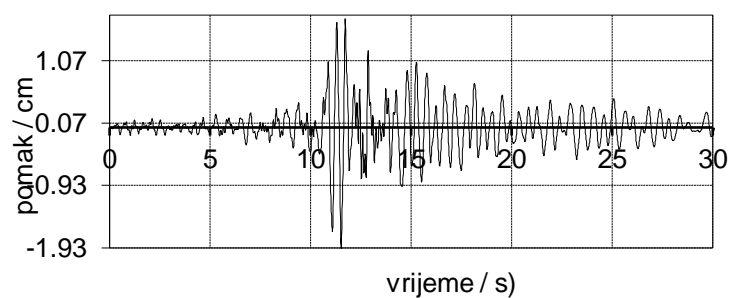


**Slika 49.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za Campano Lucano

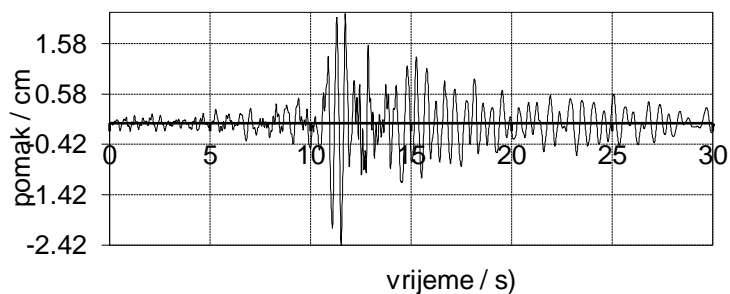




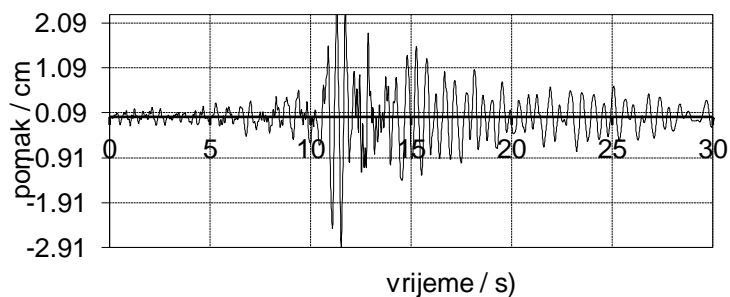
**Slika 50.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za Campano Lucano



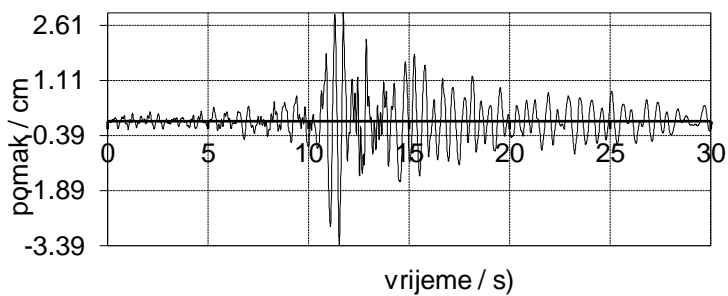
**Slika 51.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za Campano Lucano



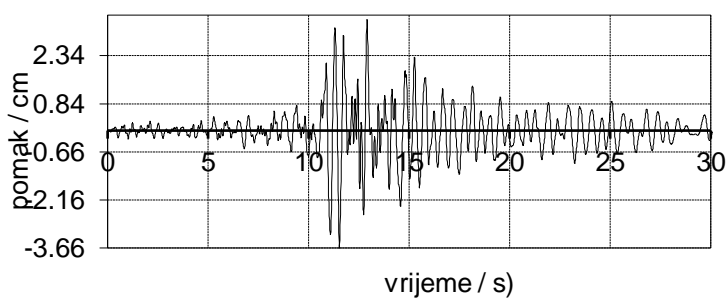
**Slika 52.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za Campano Lucano



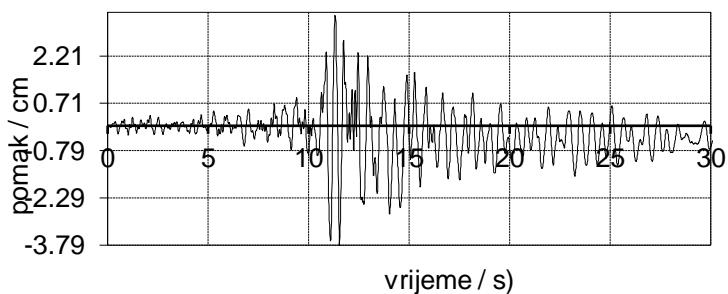
**Slika 53.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za Campano Lucano



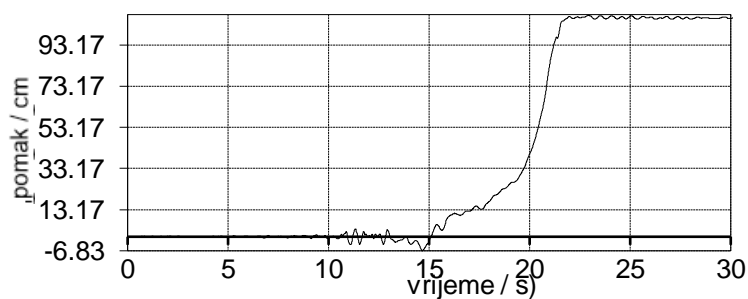
Slika 54. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za Campano Lucano



Slika 55. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$  za Campano Lucano



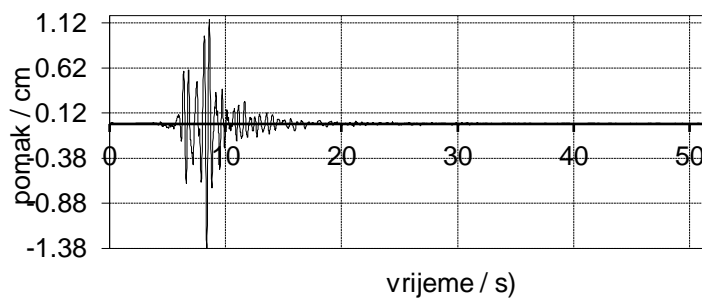
Slika 56. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.80 g$  za Campano Lucano



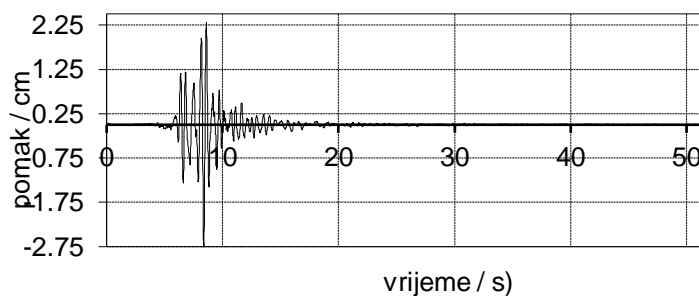
Slika 57. Vršno ubrzanje  $a_g = 2.00 g$  za Campano Lucano, kompletan slom

## (ii) South Iceland

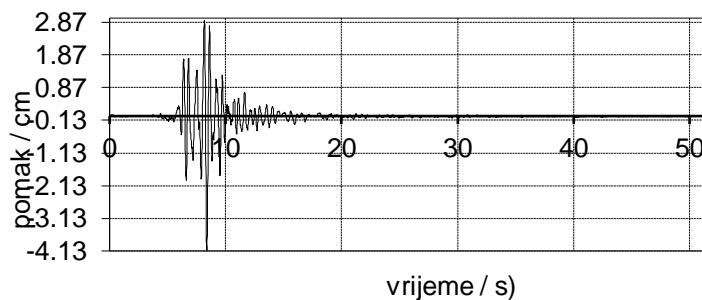
Na slikama od 58. do 65. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model upete konstrukcije, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Petrovac, počevši od 0.20 g do trenutka loma zvonika za 1.20 g.



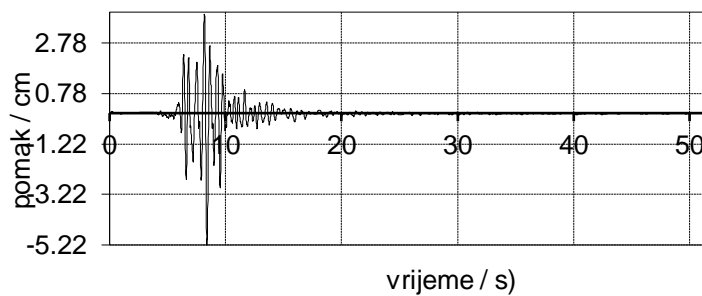
Slika 58. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za South Iceland



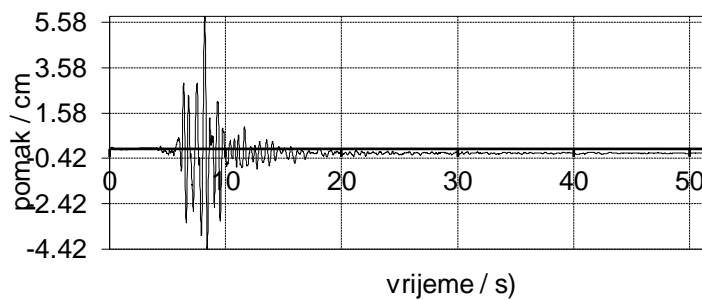
Slika 59. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za South Iceland



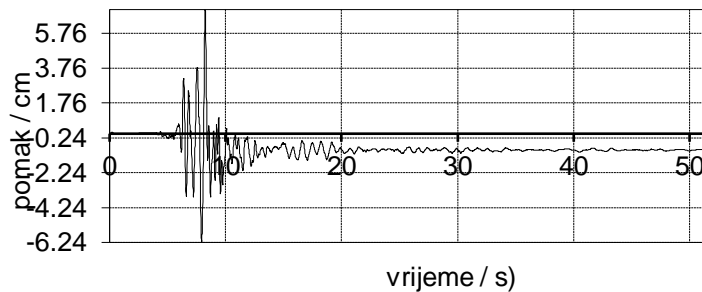
Slika 60. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za South Iceland



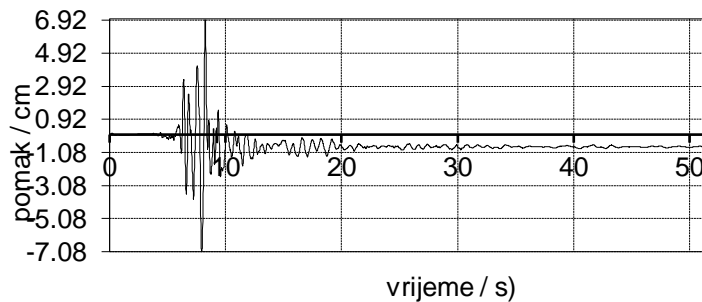
**Slika 61.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za South Iceland



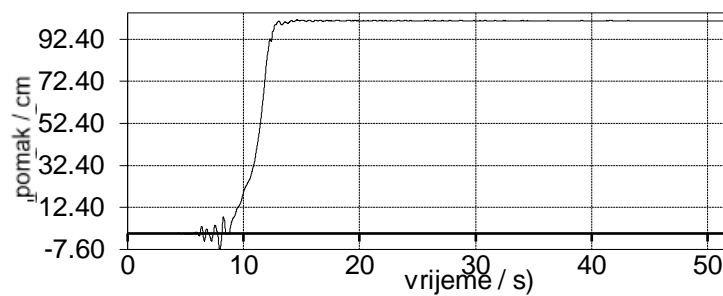
**Slika 62.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za South Iceland



**Slika 63.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.10 g$  za South Iceland



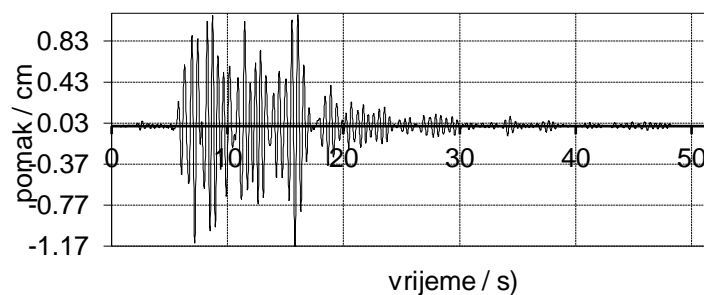
**Slika 64.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.15 g$  za South Iceland



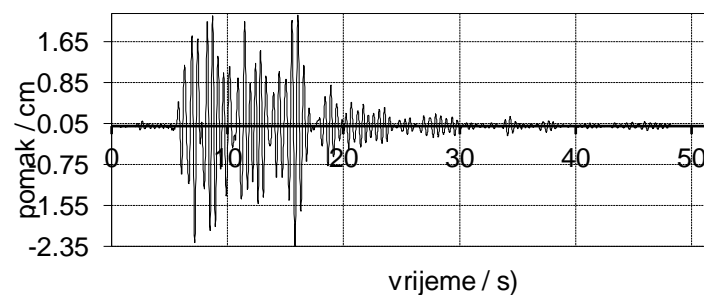
**Slika 65.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za South Iceland, potpuni slom

(iii) Petrovac

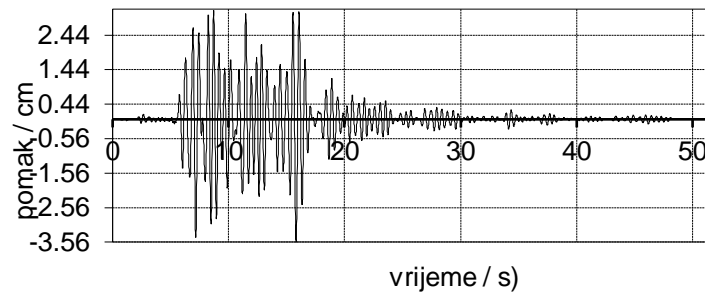
Na slikama od 66. do 71. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model upete konstrukcije u tlo, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Petrovac, počevši od  $0.05 g$  do trenutka loma zvonika za  $0.35 g$ .



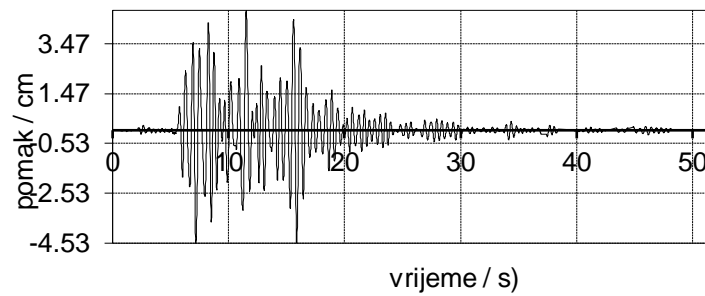
**Slika 66.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.05 g$  za Petrovac



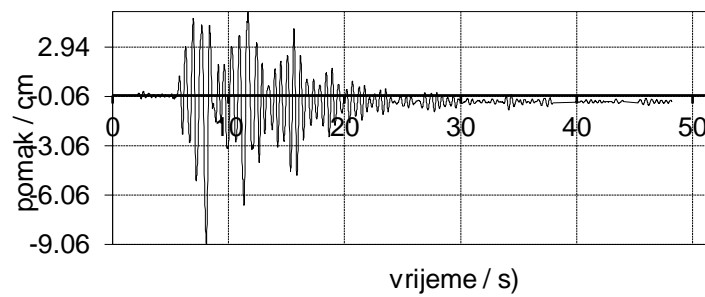
**Slika 67.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.10 g$  za Petrovac



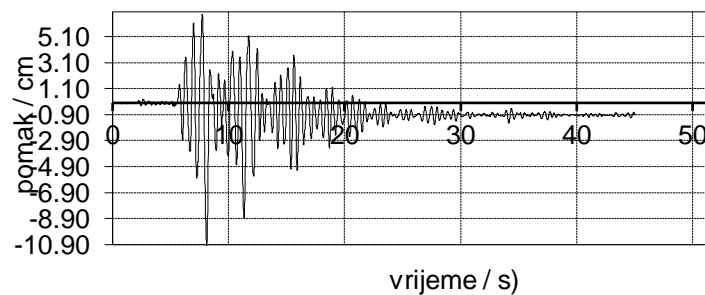
Slika 68. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.15 g$  za Petrovac



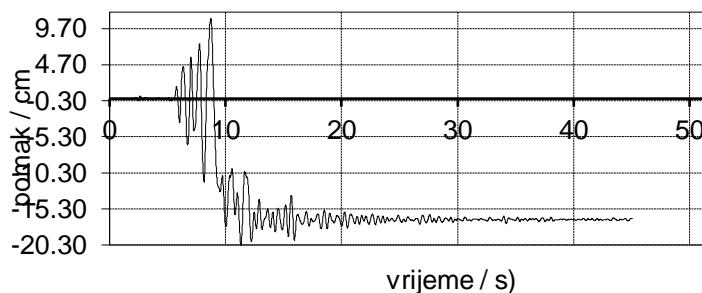
Slika 69. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za Petrovac



Slika 70. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.25 g$  za Petrovac



Slika 71. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.30 g$  za Petrovac



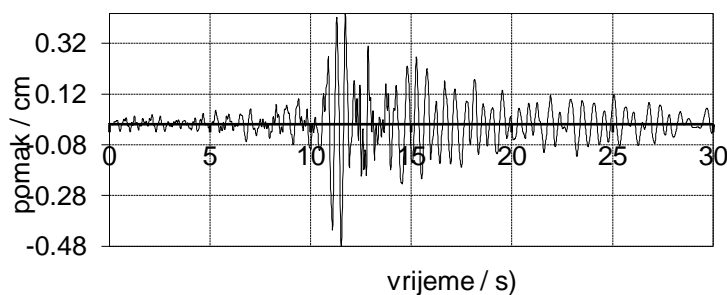
Slika 71. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.35 g$  za Petrovac, potpuni slom

### 3.2.3. Model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi

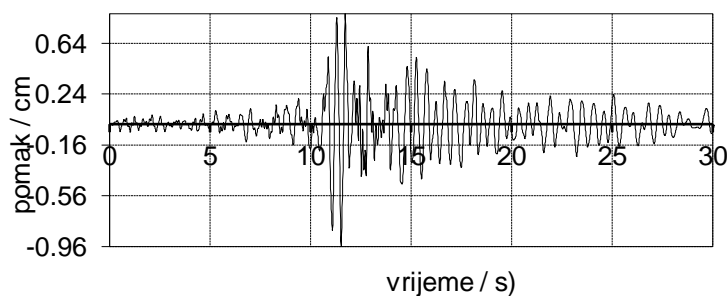
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka konstrukcije za analiziranu konstrukciju koja je modelirana kao slobodno oslonjena konstrukcija na krutoj podlozi tla, u ovisnosti o opterećenja na koju je izložena konstrukcija.

#### (i) Campano Lucano

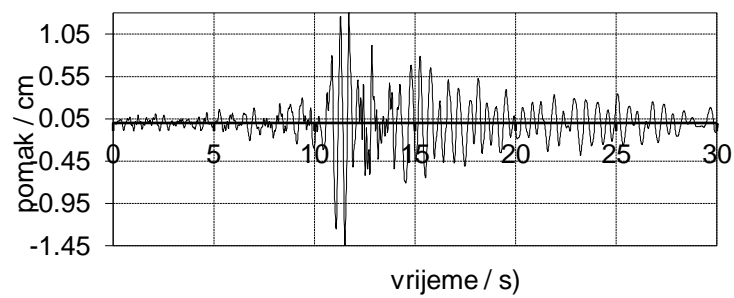
Na slikama od 72. do 79. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Campano Lucano, počevši od 0.20 g do trenutka loma zvonika za 1.60 g.



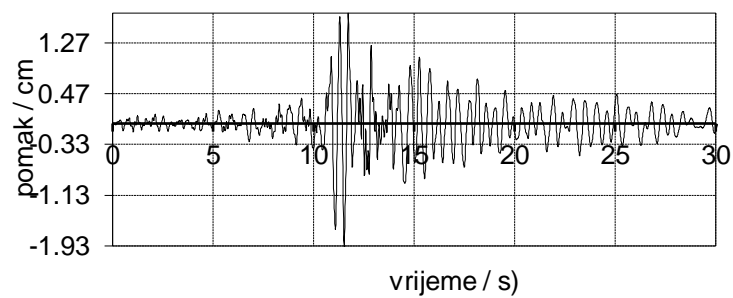
Slika 72. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za Campano Lucano



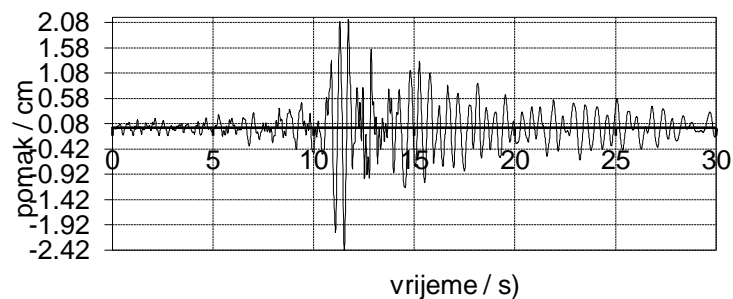
Slika 73. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za Campano Lucano



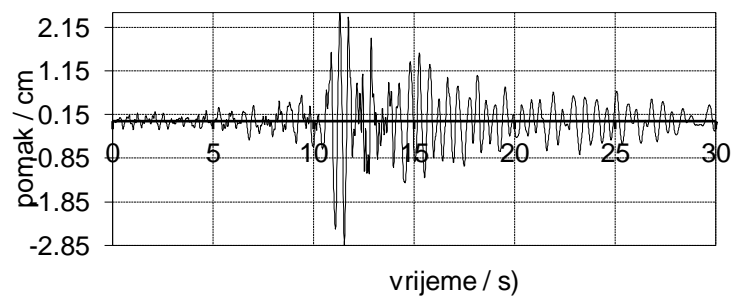
Slika 74. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za Campano Lucano



Slika 75. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za Campano Lucano

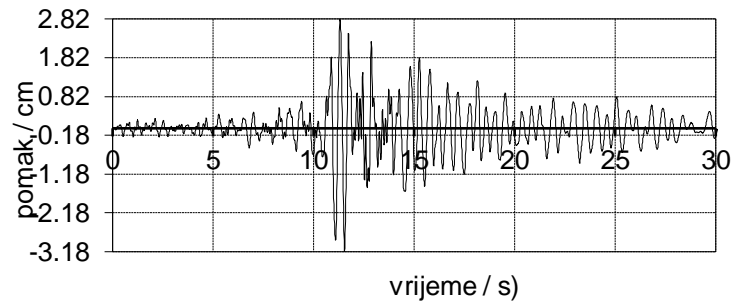


Slika 76. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za Campano Lucano

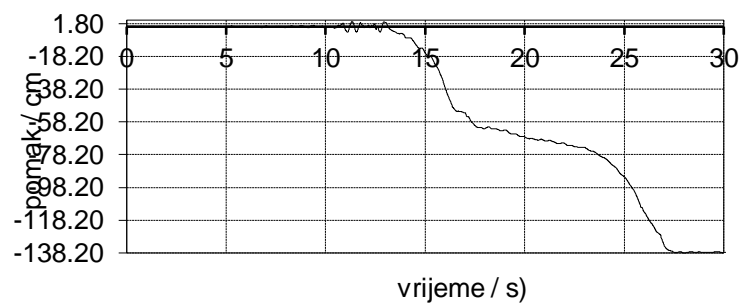


Slika 77. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za Campano Lucano





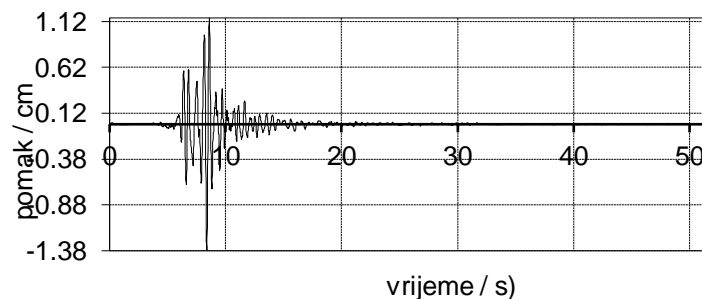
Slika 78. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za Campano Lucano



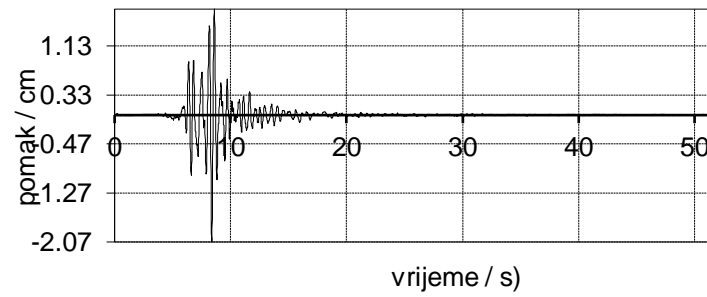
Slika 79. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$  za Campano Lucano, potpuni slom

(ii) South Iceland

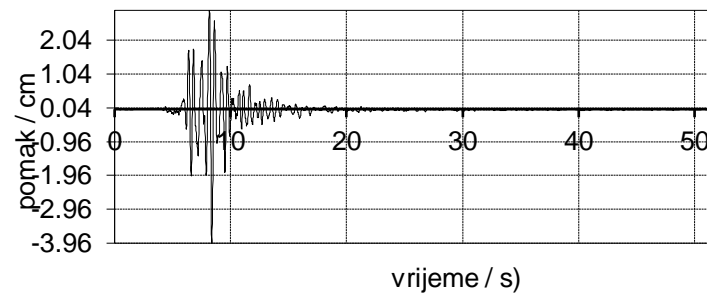
Na slikama od 80. do 86. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa South Iceland, počevši od  $0.20 g$  do trenutka loma zvonika za  $1.20 g$ .



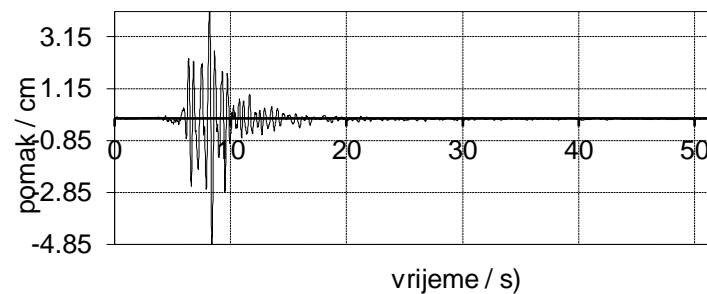
Slika 80. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za South Iceland



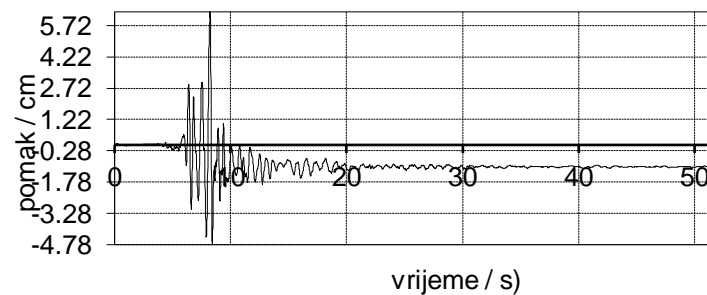
**Slika 81.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za South Iceland



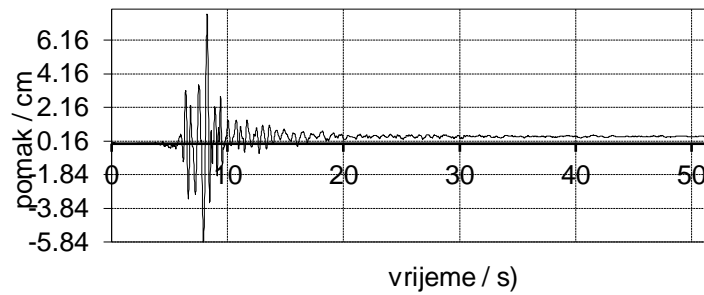
**Slika 82.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za South Iceland



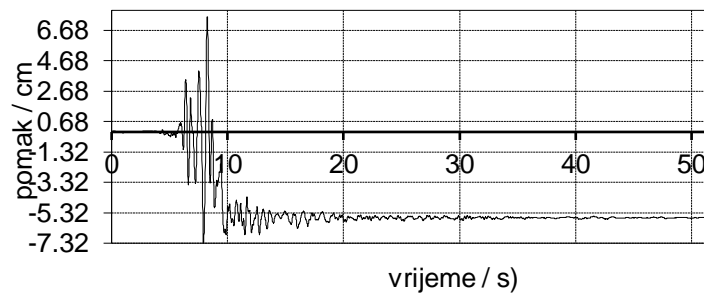
**Slika 83.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za South Iceland



**Slika 84.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za South Iceland



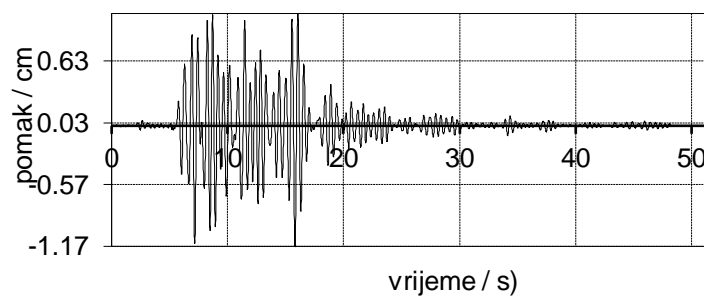
Slika 85. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.10 g$  za South Iceland



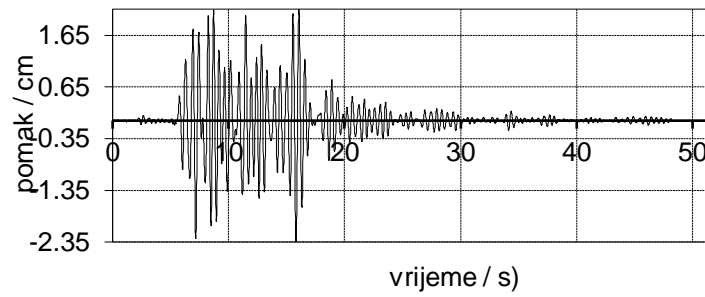
Slika 86. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za South Iceland, potpuni slom

(iii) Petrovac

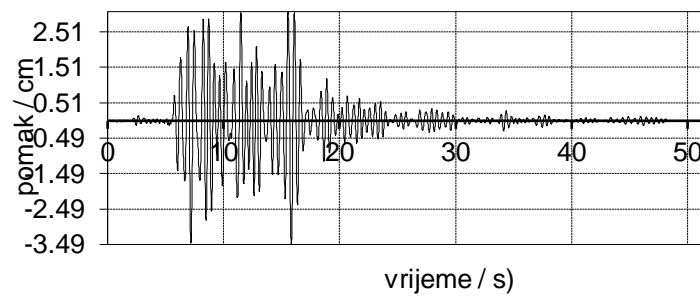
Na slikama od 87. do 93. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Petrovac, počevši od 0.05 g do trenutka loma zvonika za 0.33 g.



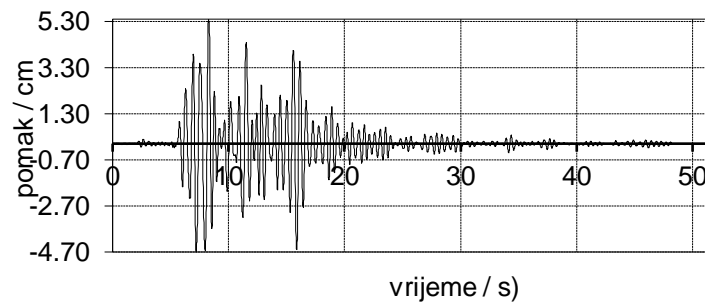
Slika 87. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.05 g$  za Petrovac



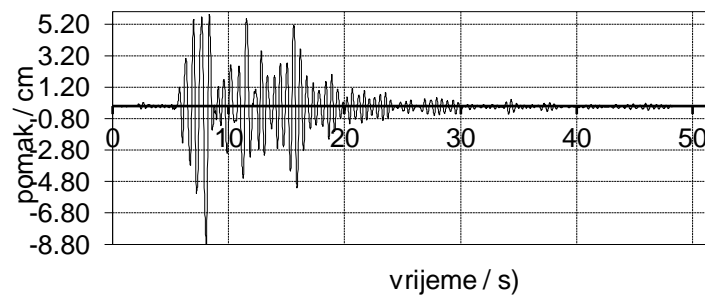
**Slika 88.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.10 g$  za Petrovac



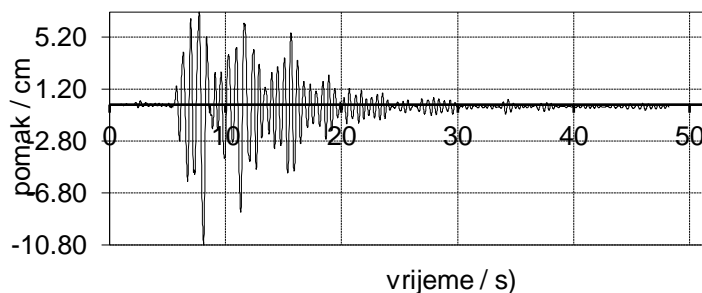
**Slika 89.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.15 g$  za Petrovac



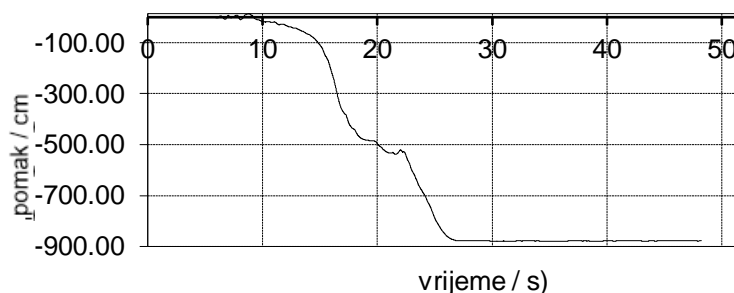
**Slika 90.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za Petrovac



**Slika 91.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.25 g$  za Petrovac



Slika 92. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.30 g$  za Petrovac



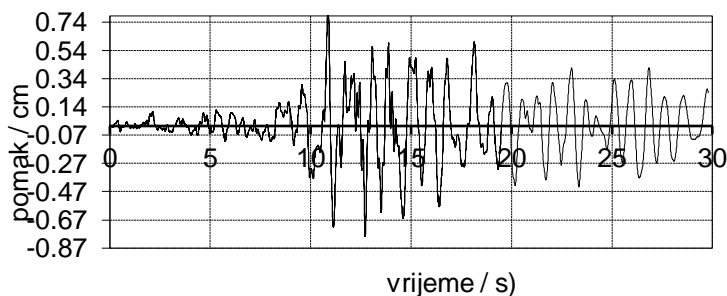
Slika 93. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.33 g$  za Petrovac, potpuni slom

### 3.2.4. Model ukopane konstrukcije u tlo

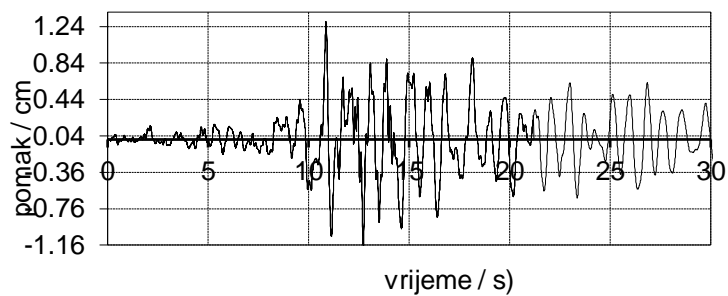
U nastavku su prikazani dijagrami pomaka konstrukcije za analiziranu konstrukciju koja je modelirana kao ukopana konstrukcija u tlo, u ovisnosti o opterećenja na koju je izložena konstrukcija

(i) Campano Lucano

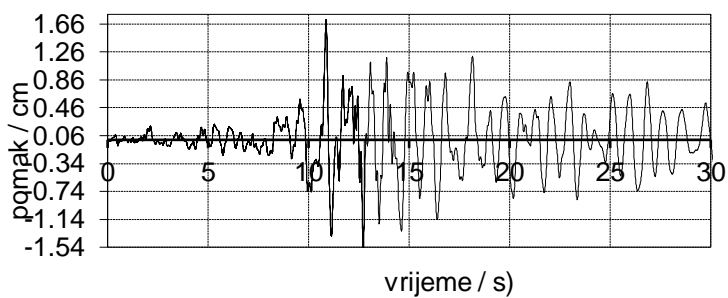
Na slikama od 94. do 105. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model ukopane konstrukcije u tlo uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Campano Lucano, počevši od  $0.40 g$  do trenutka loma zvonika za  $2.60 g$ .



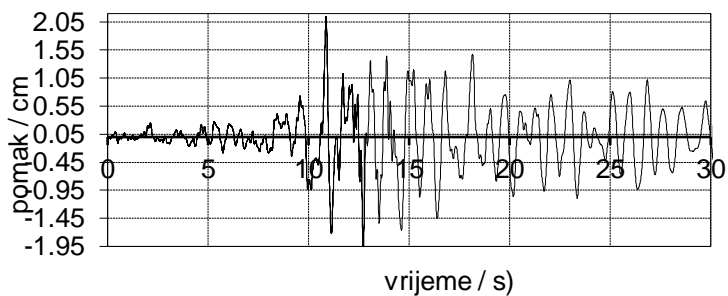
Slika 94. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za Campano Lucano



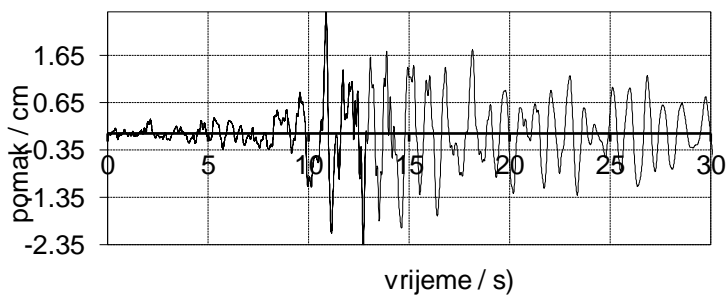
Slika 95. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za Campano Lucano



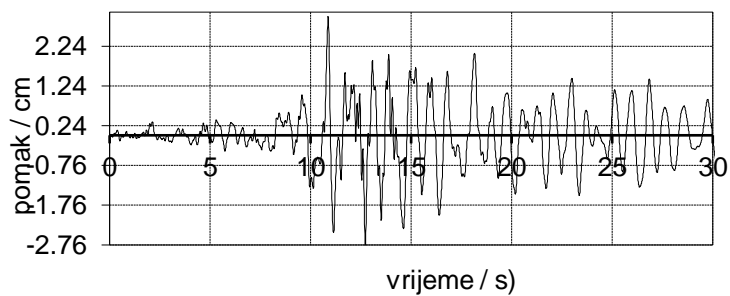
Slika 96. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za Campano Lucano



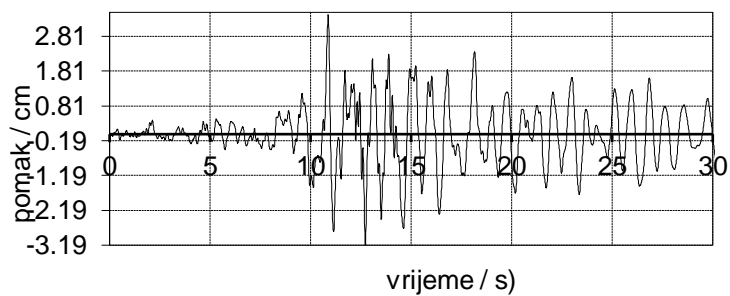
Slika 97. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za Campano Lucano



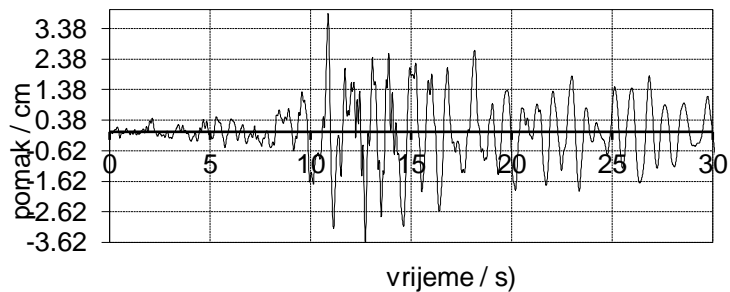
Slika 98. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za Campano Lucano



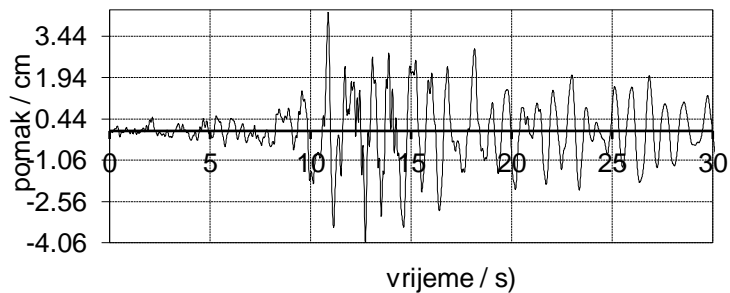
Slika 99. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za Campano Lucano



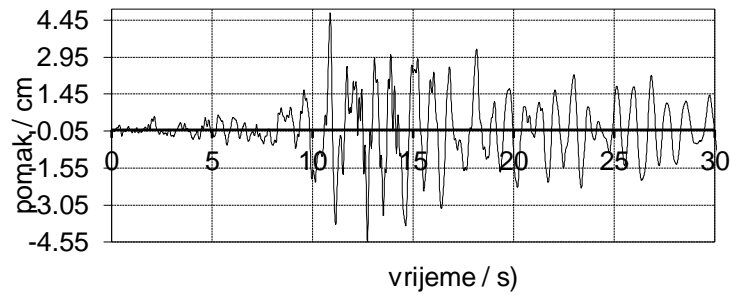
Slika 100. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$  za Campano Lucano



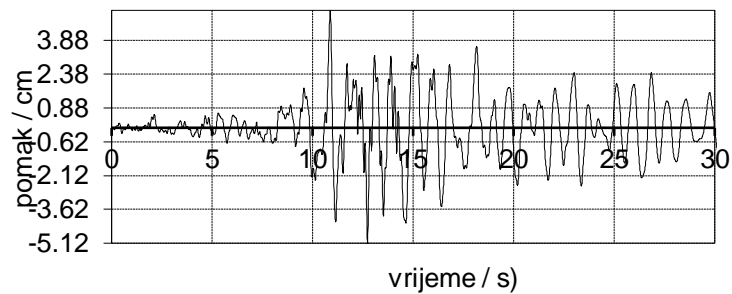
Slika 101. Vršno ubrzanje  $a_g = 1.80 g$  za Campano Lucano



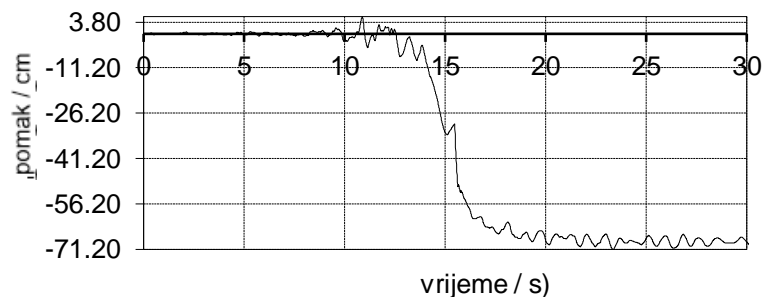
Slika 102. Vršno ubrzanje  $a_g = 2.00 g$  za Campano Lucano



**Slika 103.** Vršno ubrzanje  $a_g = 2.20 g$  za Campano Lucano



**Slika 104.** Vršno ubrzanje  $a_g = 2.40 g$  za Campano Lucano

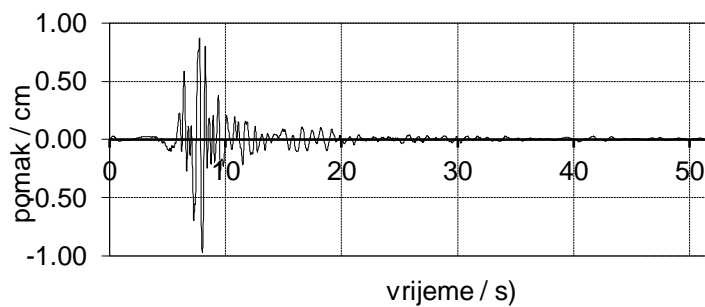


**Slika 105.** Vršno ubrzanje  $a_g = 2.60 g$  za Campano Lucano, potpuni slom

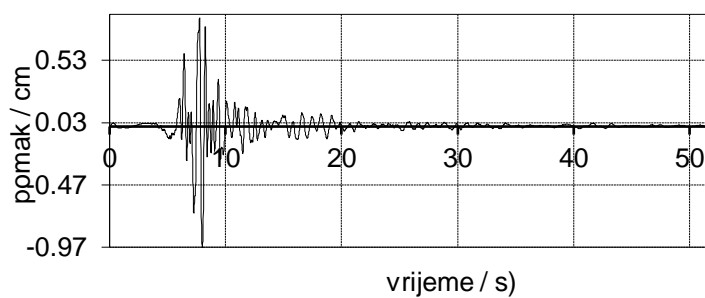
(ii) South Iceland

Na slikama od 106. do 112. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model ukopane konstrukcije u tlo, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa South Iceland, počevši od 0.20 g do trenutka loma zvonika za 1.40 g.

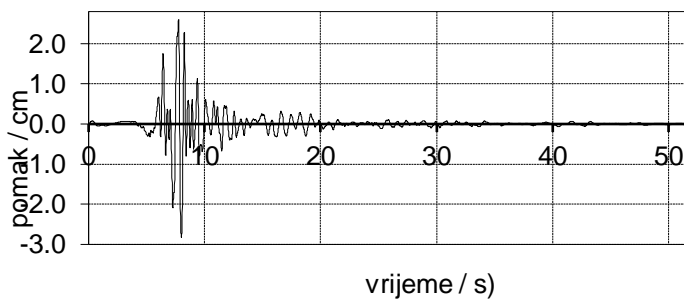




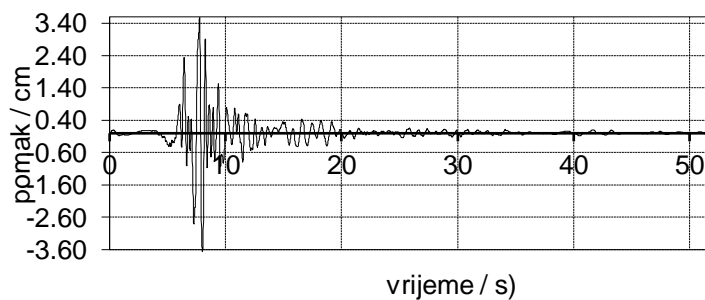
**Slika 106.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za South Iceland



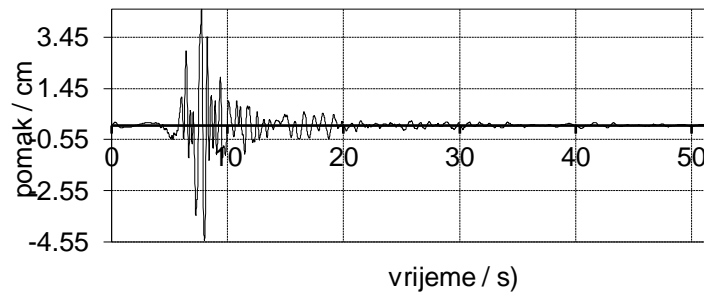
**Slika 107.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za South Iceland



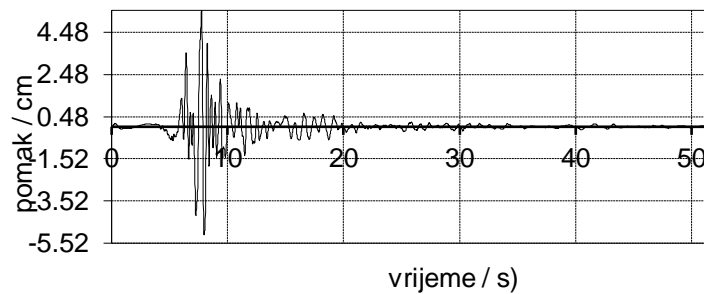
**Slika 108.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za South Iceland



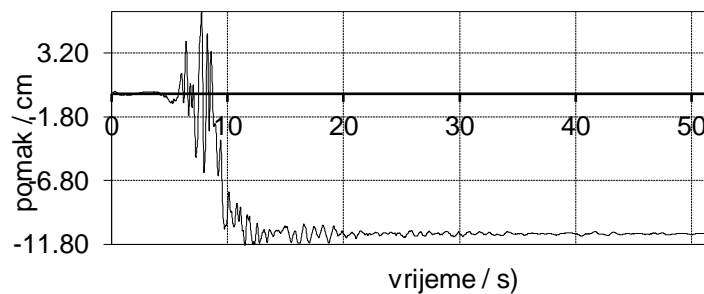
**Slika 109.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za South Iceland



**Slika 110.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.00 g$  za South Iceland



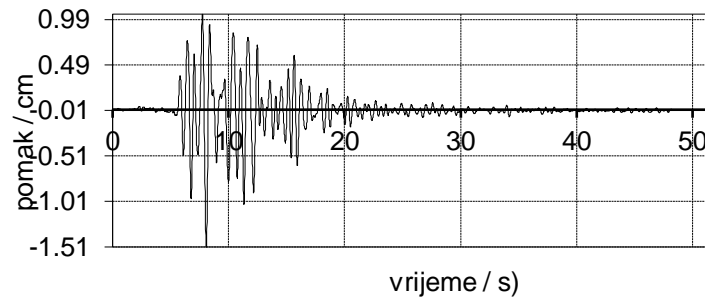
**Slika 111.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.20 g$  za South Iceland



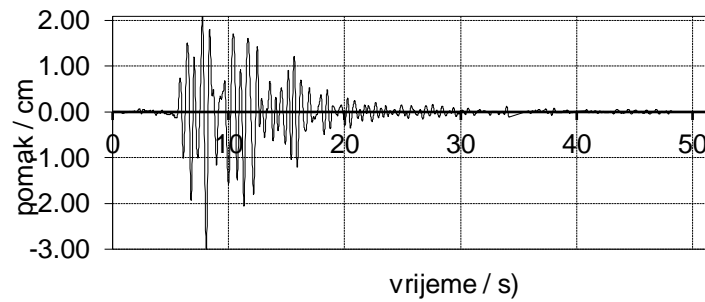
**Slika 112.** Vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za South Iceland, potpuni slom

(iii) Petrovac

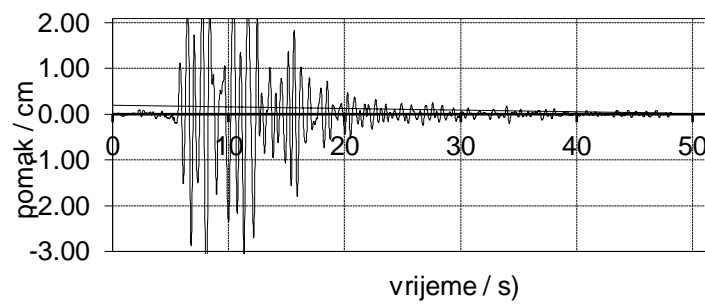
Na slikama od 113. do 123. prikazani su rezultati pomaka vrha konstrukcije za model ukopane konstrukcije u tlo, uz postepeno povećanje vršnog ubrzanja tla za djelovanje potresa Petrovac, počevši od 0.05 g do trenutka loma zvonika za 0.48 g.



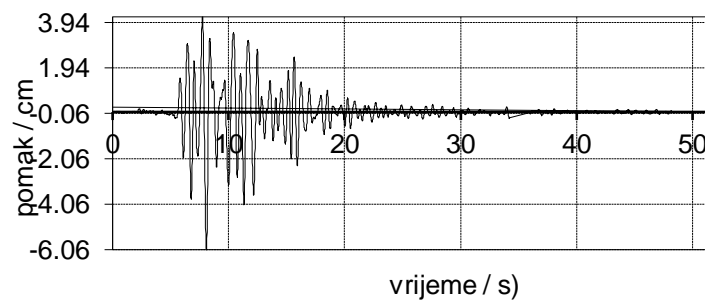
**Slika 113.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.05 g$  za Petrovac



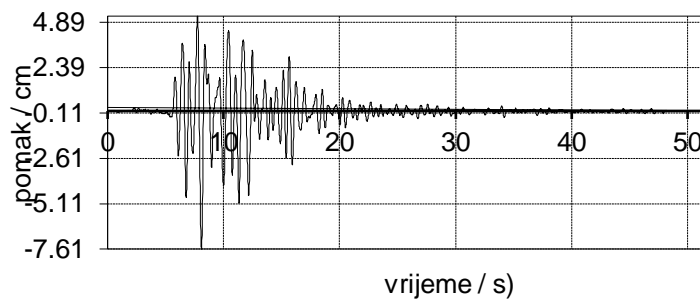
**Slika 114.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.10 g$  za Petrovac



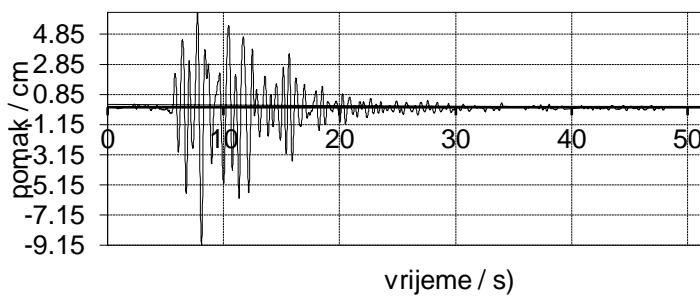
**Slika 115.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.15 g$  za Petrovac



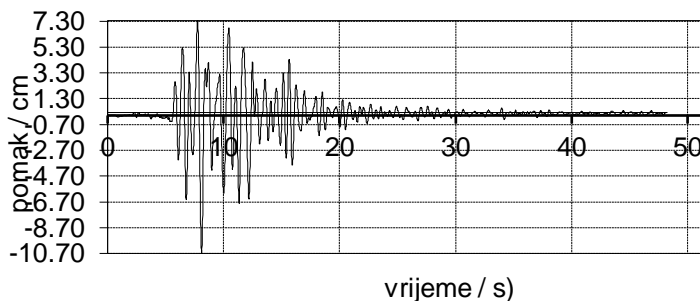
**Slika 116.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.20 g$  za Petrovac



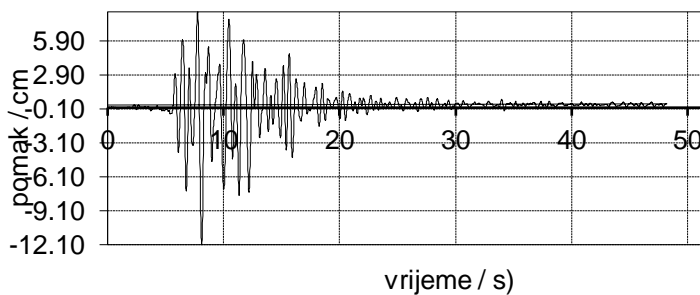
**Slika 117.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.25 g$  za Petrovac



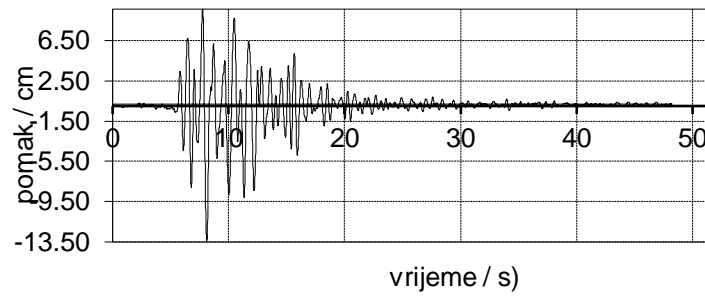
**Slika 118.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.30 g$  za Petrovac



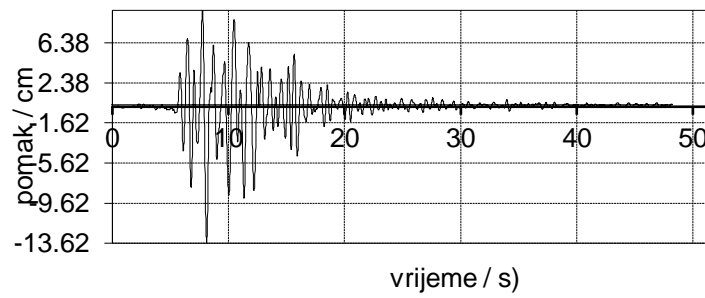
**Slika 119.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.35 g$  za Petrovac



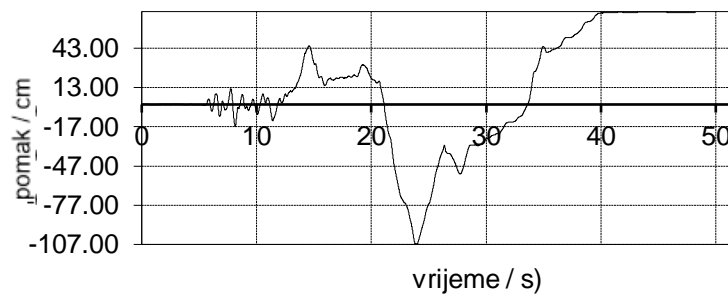
**Slika 120.** Vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za Petrovac



Slika 121. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.45$  g za Petrovac



Slika 122. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.46$  g za Petrovac



Slika 123. Vršno ubrzanje  $a_g = 0.48$  g za Petrovac

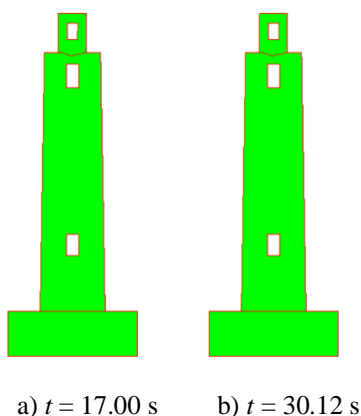
### 3.3. Rezultati numeričke analize : progresivan slom konstrukcije

U nastavku su prikazani crteži koji prikazuju nastanak i progresiju pukotina u konstrukciji do eventualnog potpunog sloma konstrukcije.

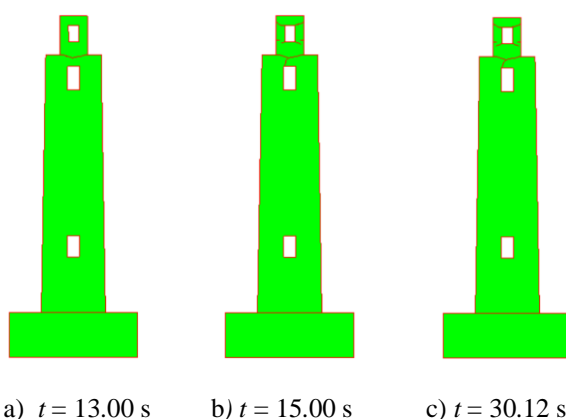
#### 3.3.1. Model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi

##### (i) Campano Lucano

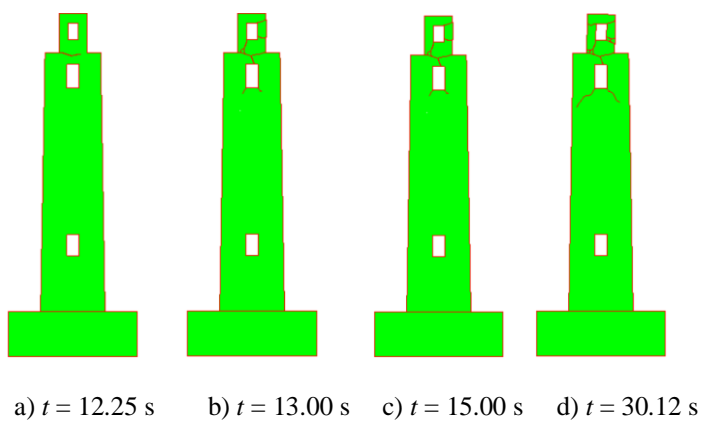
Za potres Campano Lucano, na slikama od 124. do 128. prikazan je progresivan slom za model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi, sa pojavom prve pukotine u obliku polegnuća zvonika u 17.00 sekundi, na vršnom ubrzanju tla  $a_g = 2.60 g$ , sve do vršnog ubrzanja  $a_g = 3.30 g$  gdje u 12.25 sekundi dolazi , sve do trenutka kolapsa cijele konstrukcije u 22.00 sekundi .



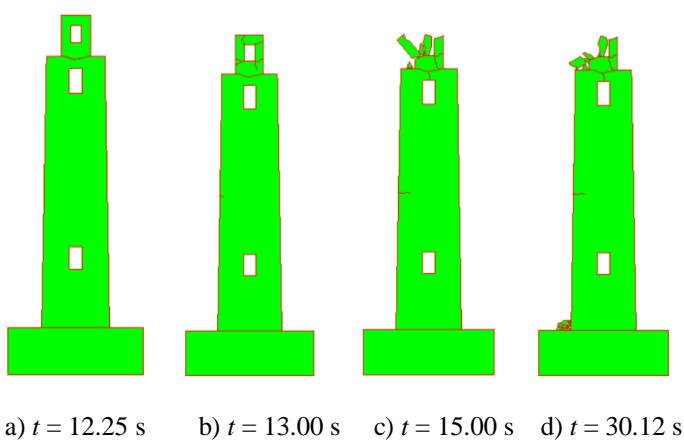
**Slika124.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.60 g$  za Campano Lucano



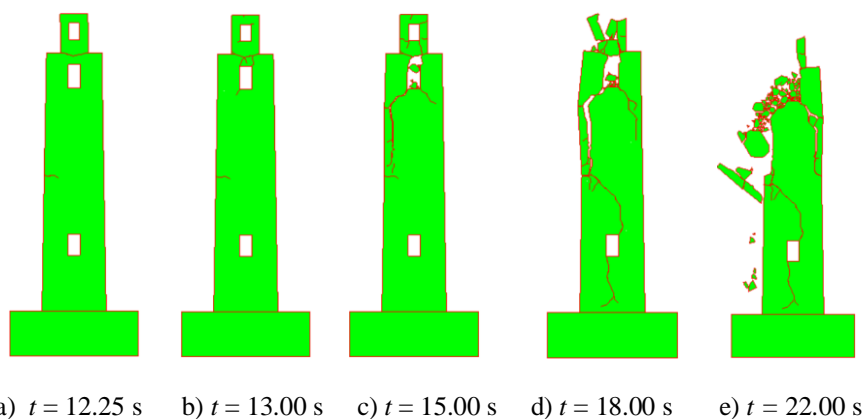
**Slika125.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.80 g$  za Campano Lucano



**Slika 126.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 3.00$  g za Campano Lucano



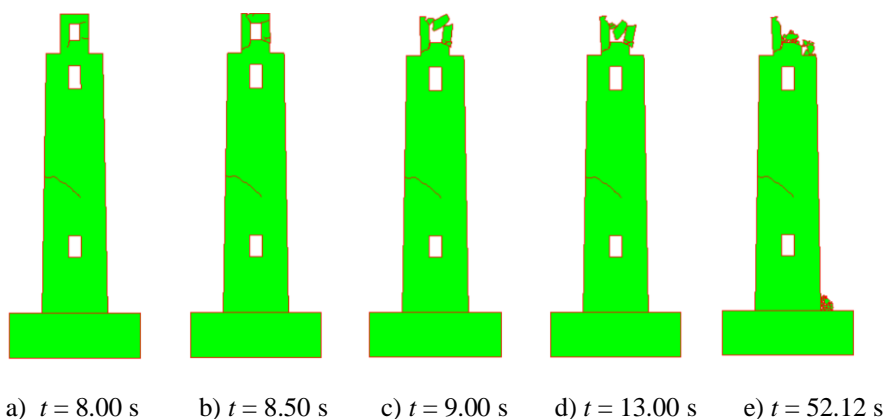
**Slika 127.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 3.20$  g za Campano Lucano



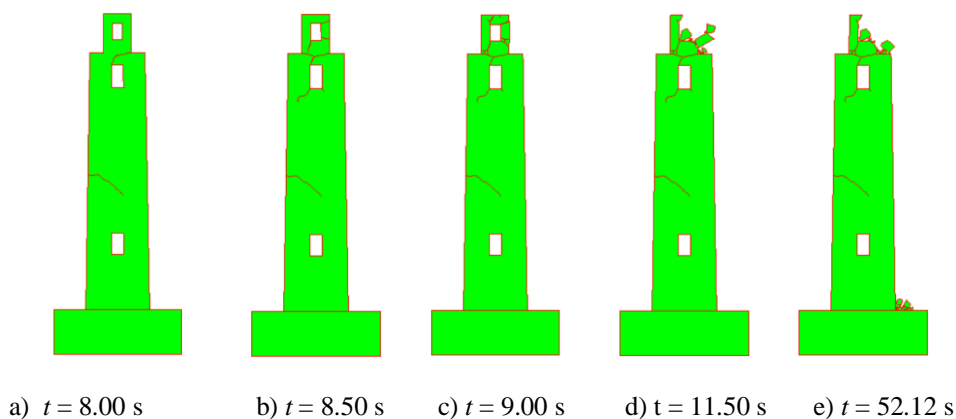
**Slika 128.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 3.30$  g za Campano Lucano

## (ii) South Iceland

Za potres South Iceland, na slikama od 129. do 133. prikazan je progresivan slom za model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi, sa pojavom prve pukotine u unutrašnjosti konstrukcije u 8 sekundi, za vršno ubrzanje tla  $a_g = 1.70 g$  gdje se postepeno počinju razvijati i pukotine oko zvonika, koji se ruši već na 9.00 sekundi. Za vršno ubrzanje  $a_g = 1.95 g$  u 11.00 sekundi dolazi do širenja pukotina u unutrašnjosti, oko donjeg otvora, koje se naknadno počinju širiti prema vrhu zvonika i gornjeg otvora, te dolazi do potpunog razaranja unutrašnjosti konstrukcije u 15.50 sekundi, nakon čega dolazi do rušenja zvonika.

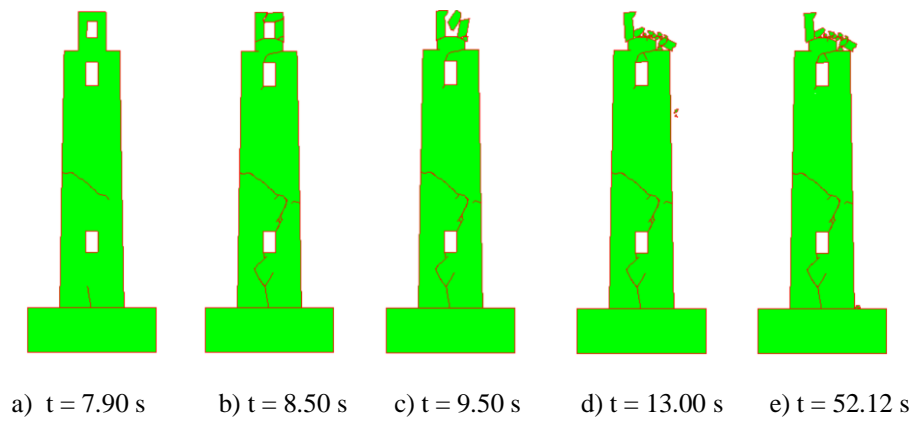


**Slika 129.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.70 g$  za South Iceland

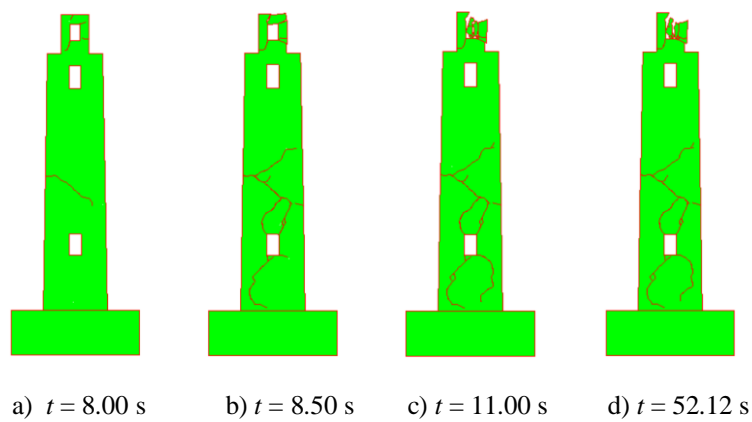


**Slika 130.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.80 g$  za South Iceland

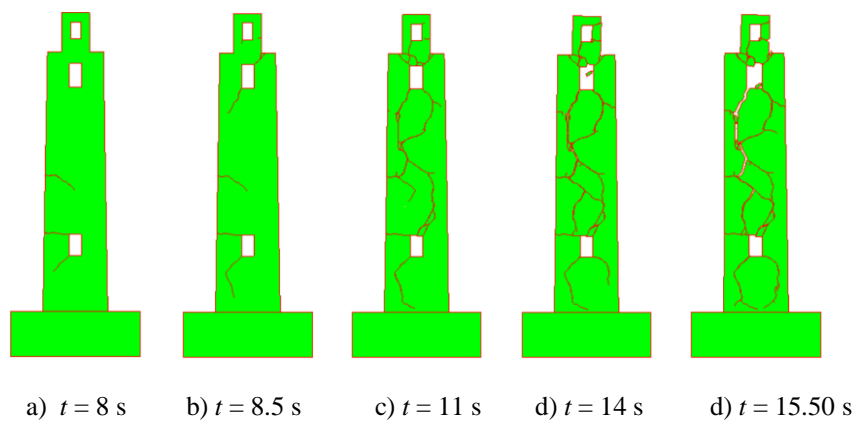




**Slika 131.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.85 \text{ g}$  za South Iceland



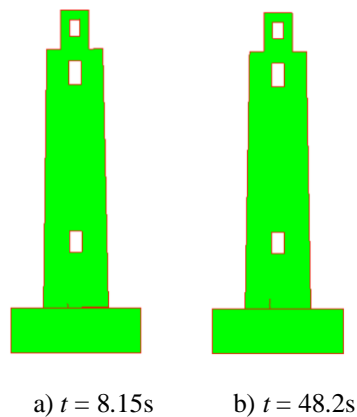
**Slika 132.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.90 \text{ g}$  za South Iceland



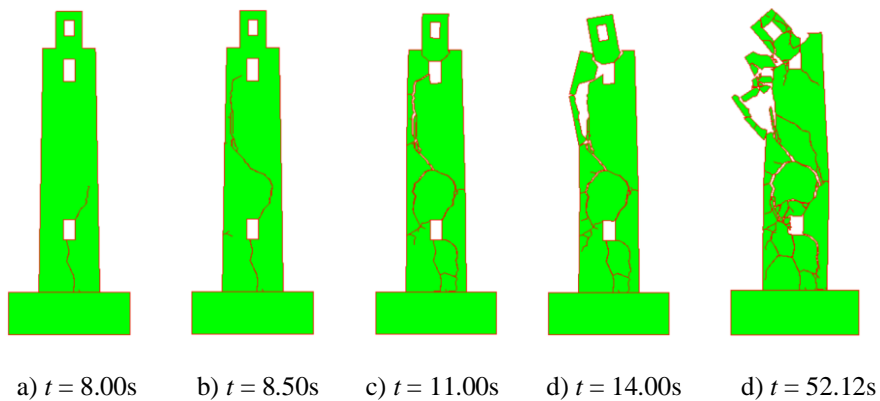
**Slika 133.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.95 \text{ g}$  za South Iceland

## (iii) Petrovac

Za potres Petrovac, na slikama od 134. i 135. prikazan je progresivan slom za model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlozi, gdje dolazi do prve pukotine na spoju konstrukcije i tla za vršno ubrzanje  $a_g = 0.50 g$ , koje eventualno se za povećanje vršnog ubrzanja do  $0.52 g$ , se širi prema unutrašnjosti jednog otvora, te u 8.50 sekundi dolazi do gornjeg otvora, gdje u 11.00 sekundi dolazi do propadanja zvonika, te eventualno odlamanja cijele konstrukcije.



**Slika 134.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.50 g$  za Petrovac

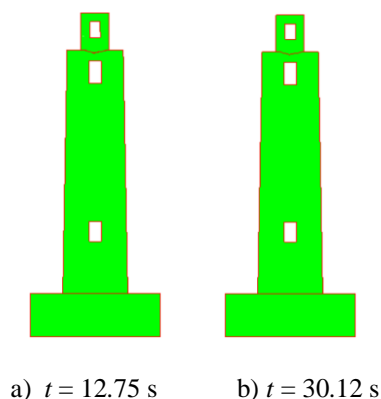


**Slika 135.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.52g$  za Petrovac

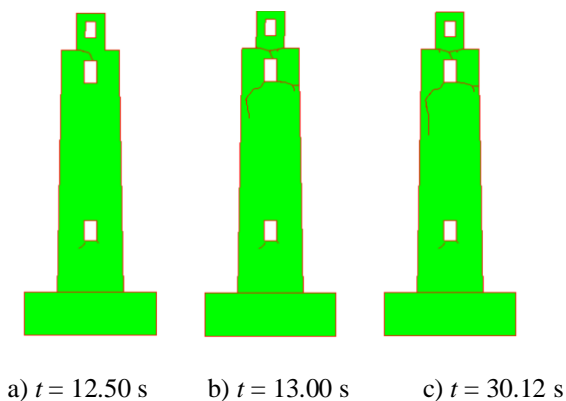
### 3.3.2. Model upete konstrukcije u tlo

#### (i) Campano Lucano

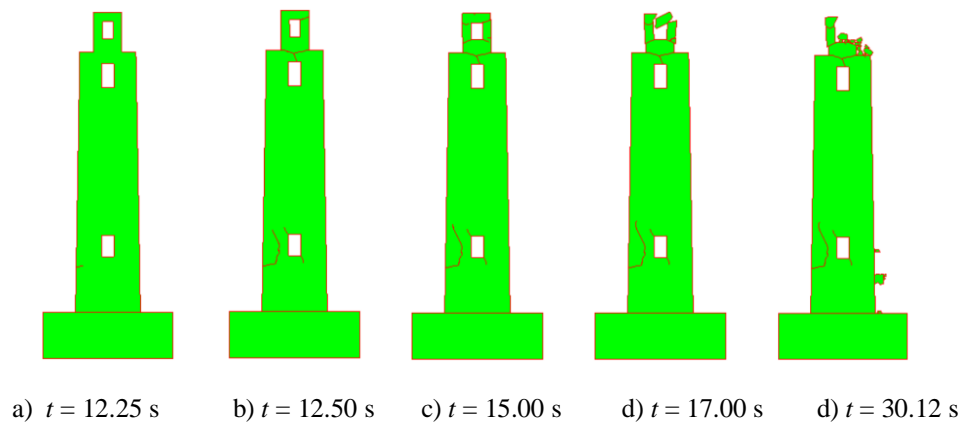
Za potres Petrovac, na slikama od 136. do 143. prikazan je progresivan slom za model upete konstrukcije u tlo, gdje dolazi do prve pukotine u obliku ulegnuća zvonika za vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$ , u 12.50 sekundi. Povećanje vršnog ubrzanja tla, pukotine se manifestiraju između zvonika i gornjeg otvora, gdje za vršno ubrzanje od  $a_g = 2.00 g$ , dolazi do sloma zvonika. Povećanjem vršnog ubrzanja do  $a_g = 2.50 g$ , dolazi do koncentracije pukotina oko gornjeg otvora, gdje se pukotine šire na sve strane, te eventualan kolaps gornjeg djela konstrukcije u 28.25 sekundi djelovanja potresa.



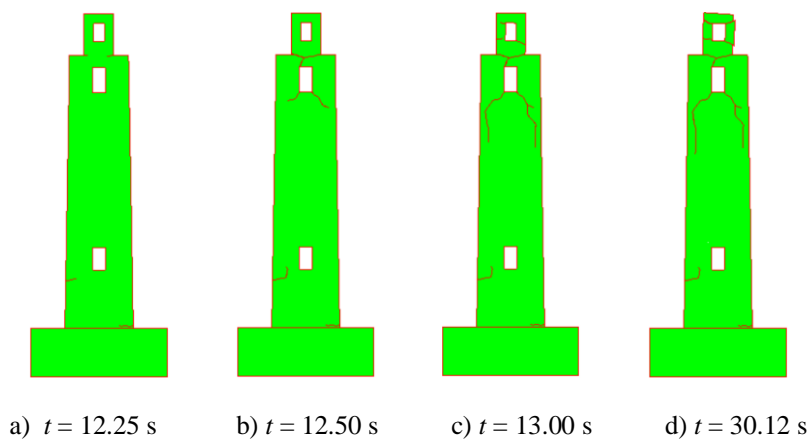
Slika 136. Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$  za Campano Lucano



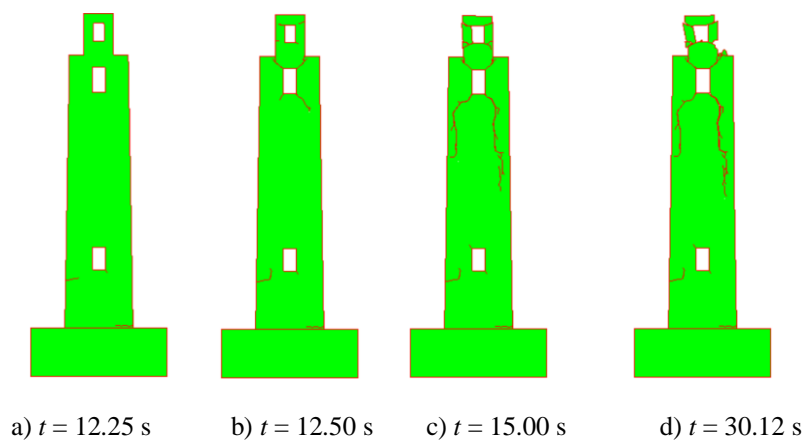
Slika 137. Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.80 g$  za Campano Lucano



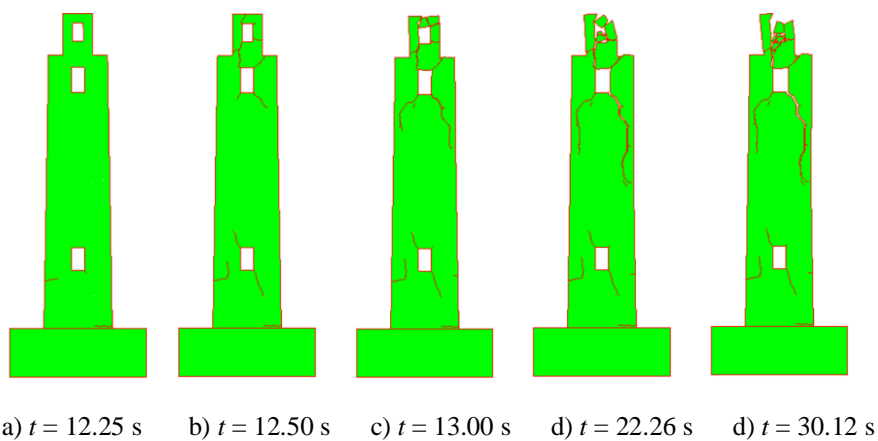
**Slika 138.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.00$  g za Campano Lucano



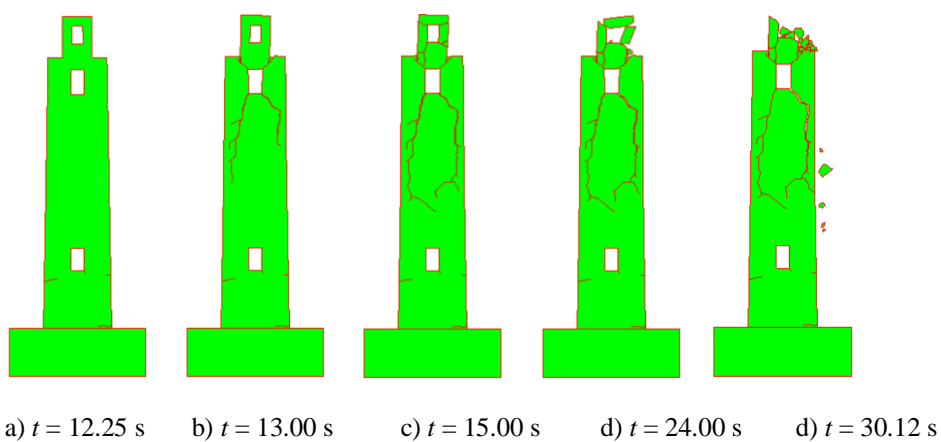
**Slika 139.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.20$  g za Campano Lucano



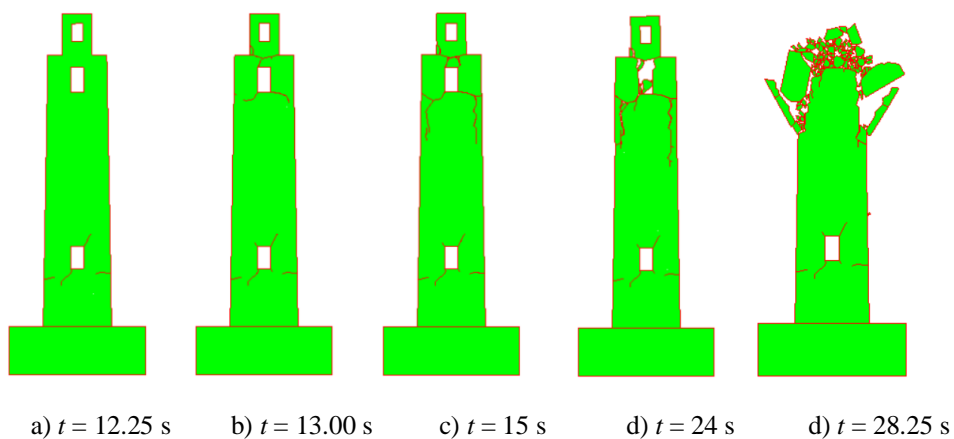
**Slika 140.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.30$  g za Campano Lucano



**Slika 141.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.40$  g za Campano Lucano



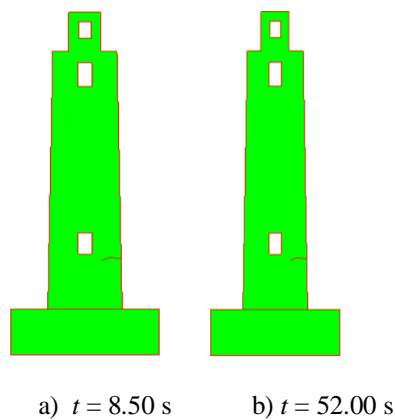
**Slika 142.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.45$  g za Campano Lucano



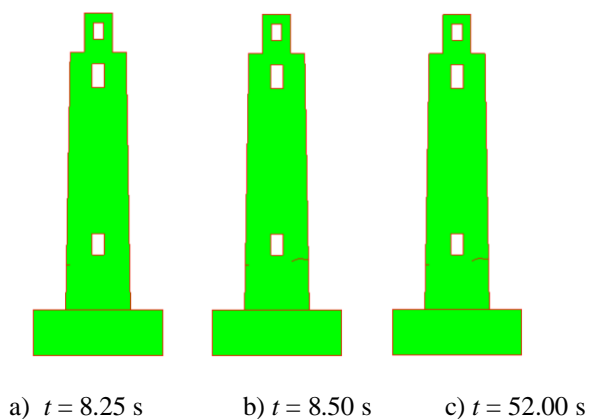
**Slika 143.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.50$  g za Campano Lucano

## (ii) South Iceland

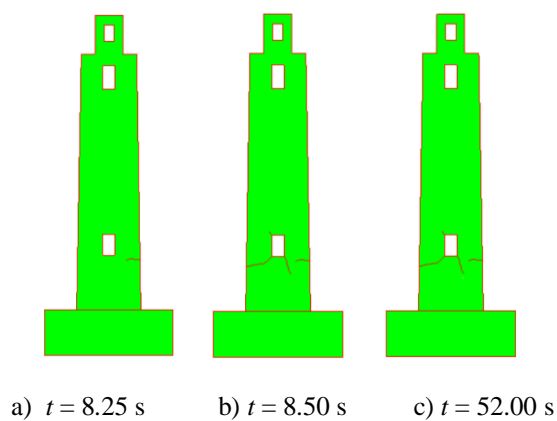
Za potres South Iceland, na slikama od 144. do 153. prikazan je progresivan slom za model upete konstrukcije, gdje se prva pukotina pojavljuje pored donjeg otvora za vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$ , u 8.50 sekundi. Povećanjem vršnog ubrzanja, pukotine se počinju formirati oko donjeg otvora, te za vršno ubrzanje od  $a_g = 1.20 g$ , počinju širiti prema gornjem djelu konstrukcije, gdje nastupa ulegnuće zvonika, i te eventualni slom zvonika kod  $a_g = 1.25 g$ , u 12.00 sekundi. Daljnjim povećanjem vršnog ubrzanja, pukotine se potpuno šire kroz unutrašnjost konstrukcije, te u 10.50 sekundi za vršno ubrzanje od  $a_g = 1.50 g$ , konstrukcija se počinje odvajati, da bi u 11.00 sekundi nastupio potpuni kolaps.



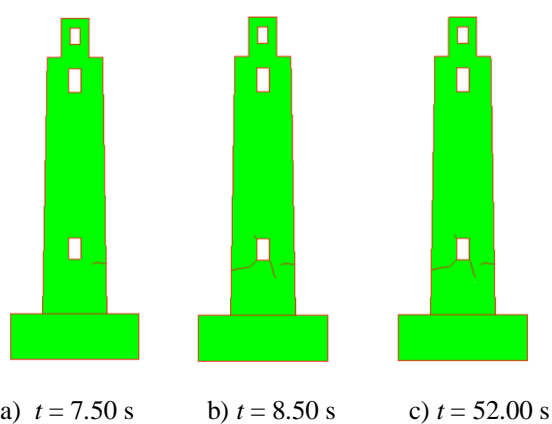
**Slika 144.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.60 g$  za South Iceland



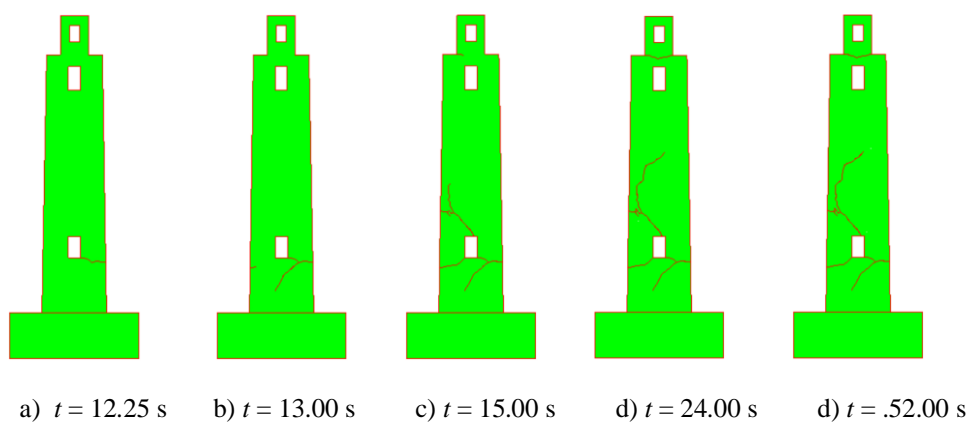
**Slika 145.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.80 g$  za South Iceland



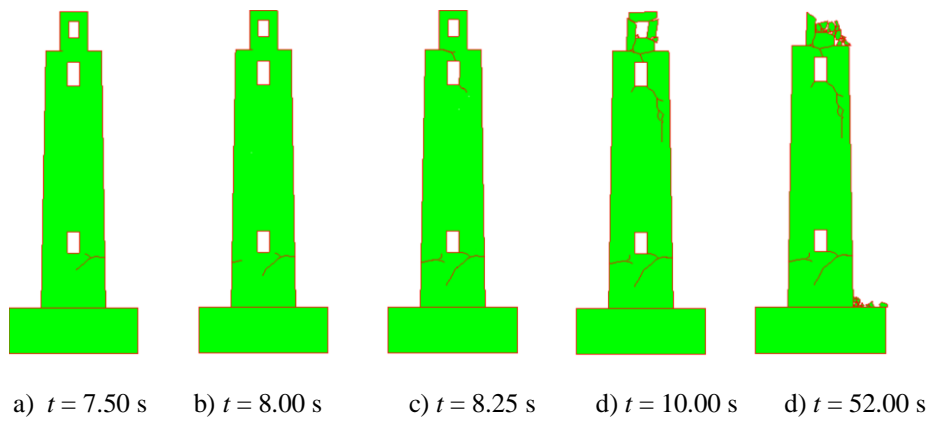
**Slika 146.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.00$  g za South Iceland



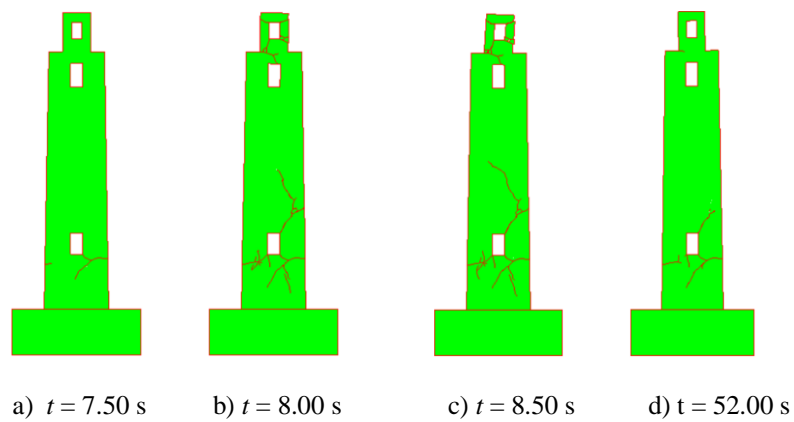
**Slika 147.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.10$  g za South Iceland



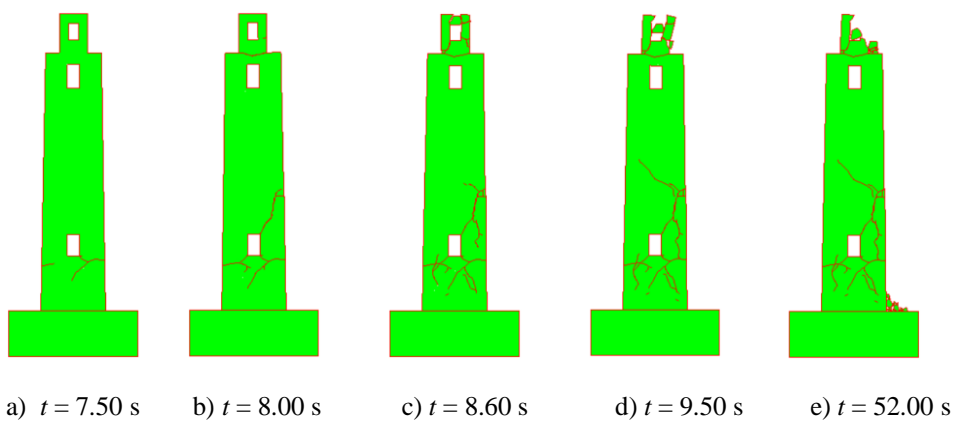
**Slika 148.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.20$  g za South Iceland



**Slika 149.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.25$  g za South Iceland

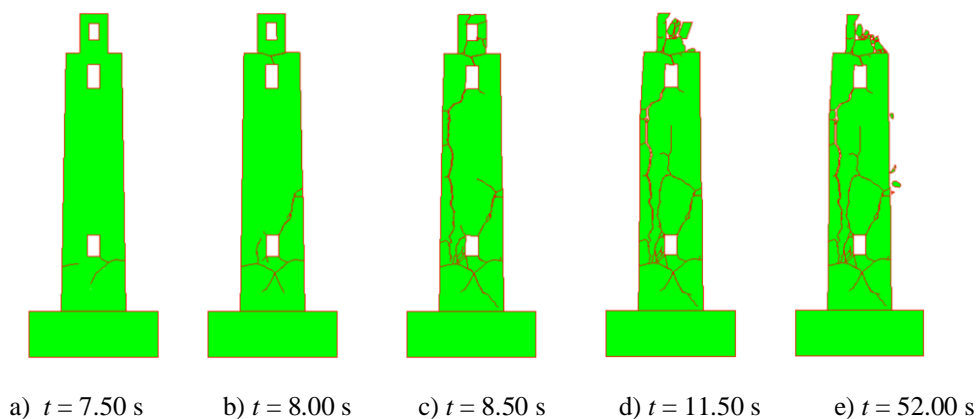


**Slika 150.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.30$  g za South Iceland

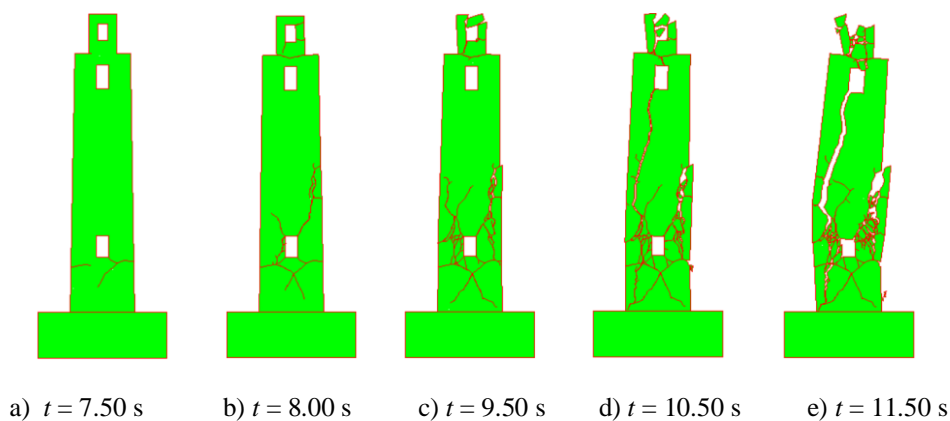


**Slika 151.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.40$  g za South Iceland





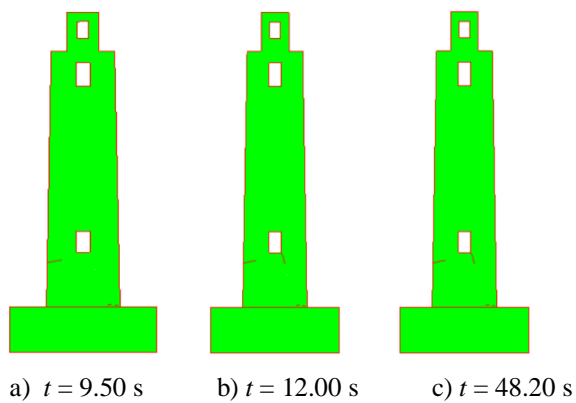
**Slika 152.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.45$  g za South Iceland



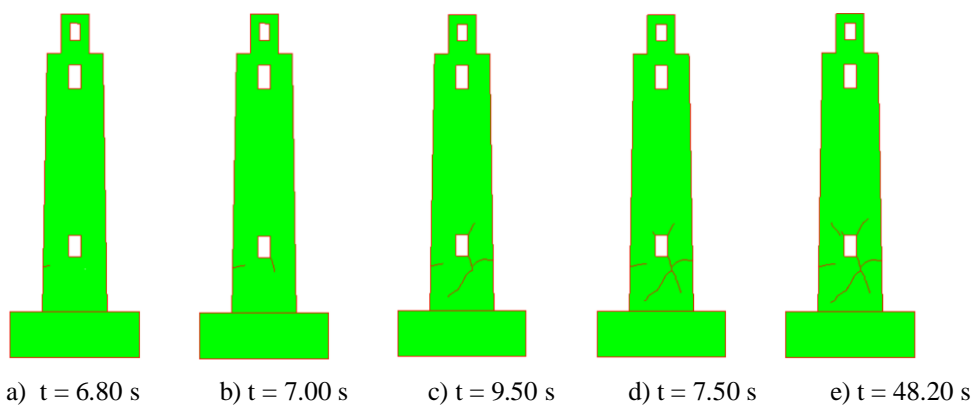
**Slika 153.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.50$  g za South Iceland, potpuni slom

(iii) Petrovac

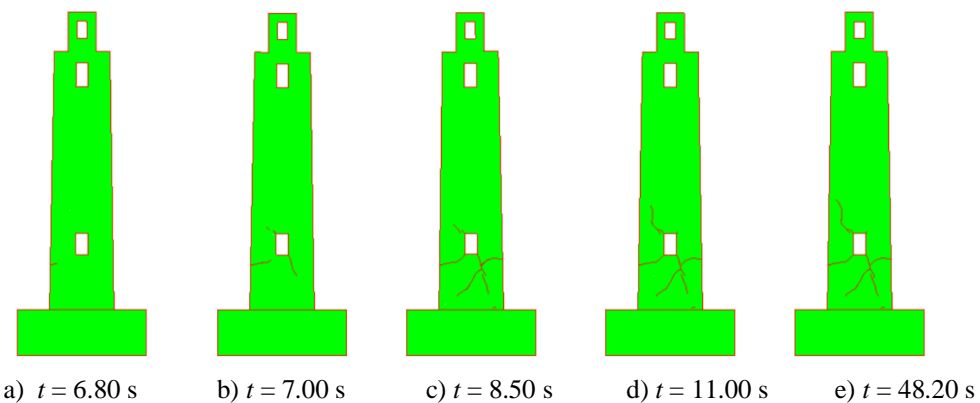
Za potres Petrovac, na slikama od 154. do 158. prikazan je progresivan slom za model upete konstrukcije u tlo, gdje se prva pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.20$  g, pojavljuje u donjem dijelu konstrukcije, ispod otvora u 9.50. sekundi. Pukotine nadalje se formiraju oko otvora, gdje se nastavljaju širiti prema unutrašnjosti konstrukcije, te u 9.60. sekundi za vršno ubrzanje od  $a_g = 0.35$  g, pukotine dolaze do samog spoja konstrukcije sa tлом, te se nastavljaju kretati u unutrašnjosti prema gornjem otvoru. U 12.00 sekundi za vršno ubrzanje od  $a_g = 0.40$  g, pukotine dostižu gornji otvor, gdje se konstrukcija kompletno lomi između dva otvora u 14.00 sekundi.



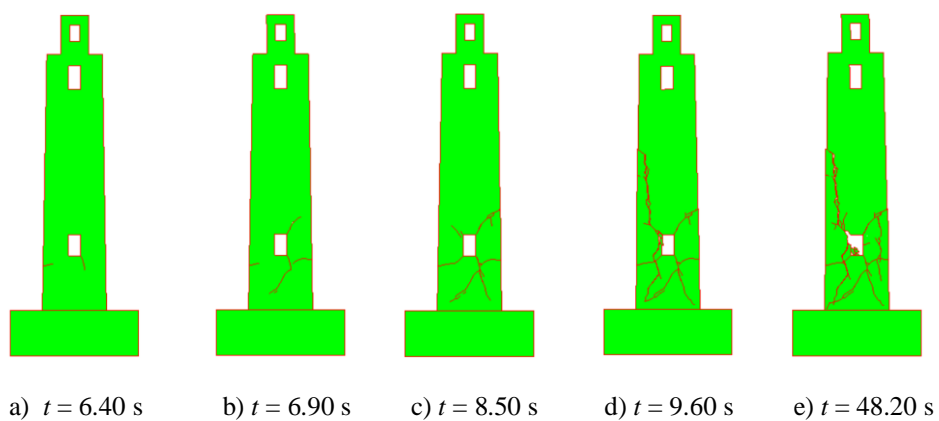
**Slika 154.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.20$  g za Petrovac



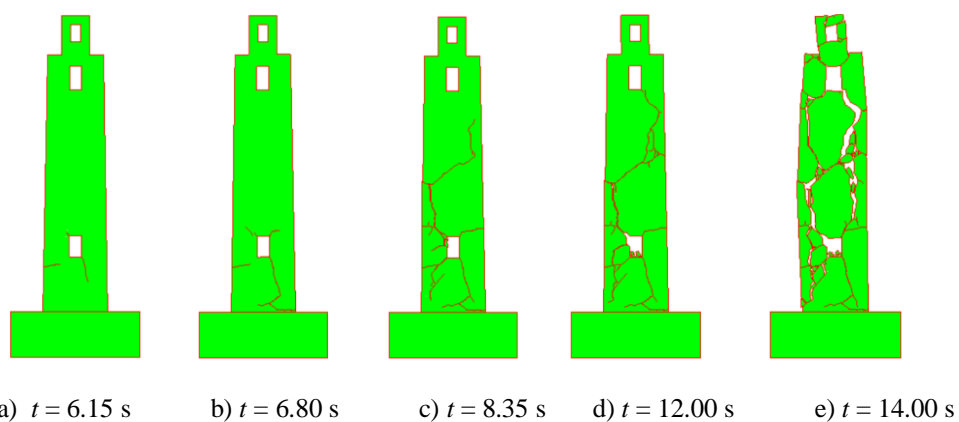
**Slika 155.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.25$  g za Petrovac



**Slika 156.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.30$  g za Petrovac



**Slika 157.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.35$  g za Petrovac

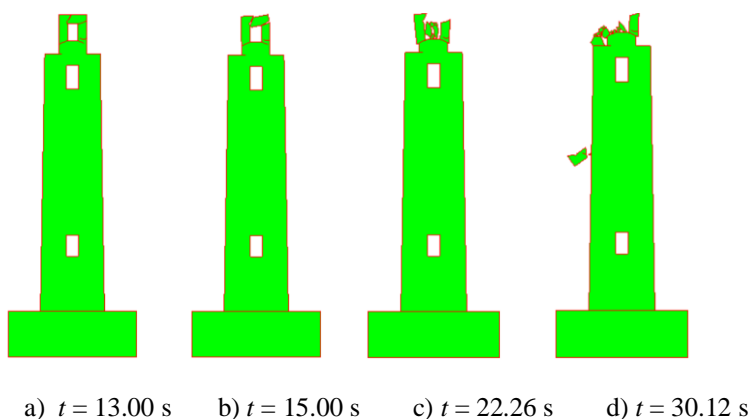


**Slika 158.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.40$  g za Petrovac, potpuni slom

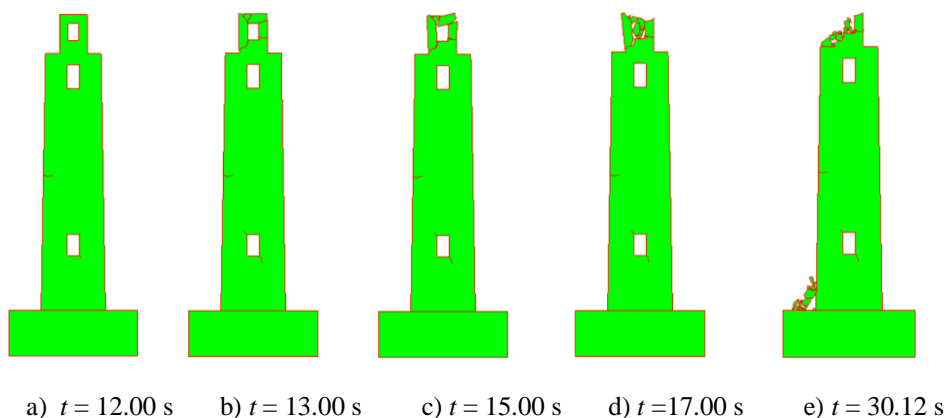
## Model slobodno oslonjenje na krutoj podlozi tla

### (i) Campano Lucano

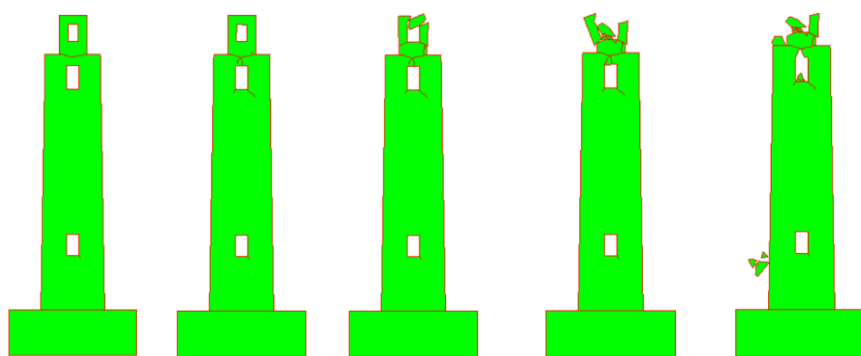
Za potres Campano Lucano, na slikama od 159. do 164. prikazan je progresivan slom za model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi, gdje za vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$ , prva pukotina se formira oko zvonika, u 13.00 sekundi dok u 22.26. sekundi dolazi do loma vrha zvonika i odlamanje rubnih zidova zvonika. Povećanjem vršnog ubrzanja, počinju se formirati pukotine na obodnim zidovima te oko donjeg otvora, a za vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$ , ok 13.00 sekunde počinju se pukotine formirati i oko gornjeg otvora. Te daljnjim povećanjem vršnog ubrzanja, pukotine se šire prema unutrašnjosti, te kod vršnog ubrzanja  $a_g = 2.60 g$ , pukotine kompletno obavijaju gornji otvor u 15.00. sekundi, te do 17.75. sekunde, nastupa potpuni lom gornjeg dijela konstrukcije oko otvora.



**Slika 159.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.60 g$  za Campano Lucano

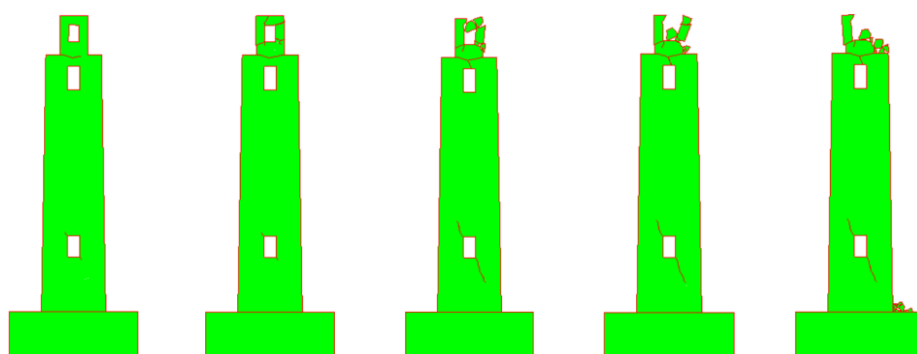


**Slika 160.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.80 g$  za Campano Lucano



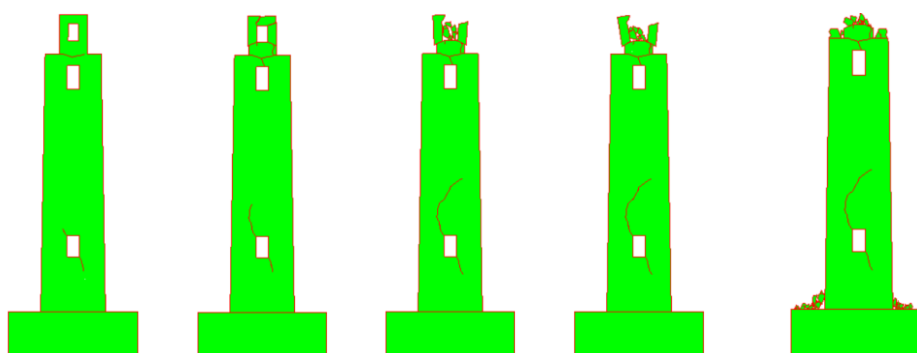
a)  $t = 12.50$  s    b)  $t = 13.00$  s    c)  $t = 15.00$  s    d)  $t = 22.00$  s    e)  $t = 30.12$  s

**Slika 161.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.00$  g za Campano Lucano



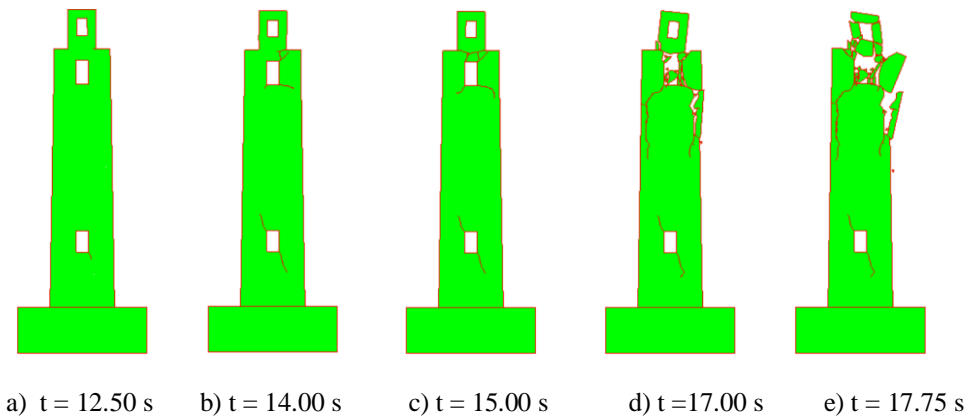
a)  $t = 12.50$  s    b)  $t = 13.00$  s    c)  $t = 14.00$  s    d)  $t = 15.00$  s    e)  $t = 30.12$  s

**Slika 162.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.20$  g za Campano Lucano



a)  $t = 12.40$  s    b)  $t = 13.00$  s    c)  $t = 15.00$  s    d)  $t = 17.00$  s    e)  $t = 30.12$  s

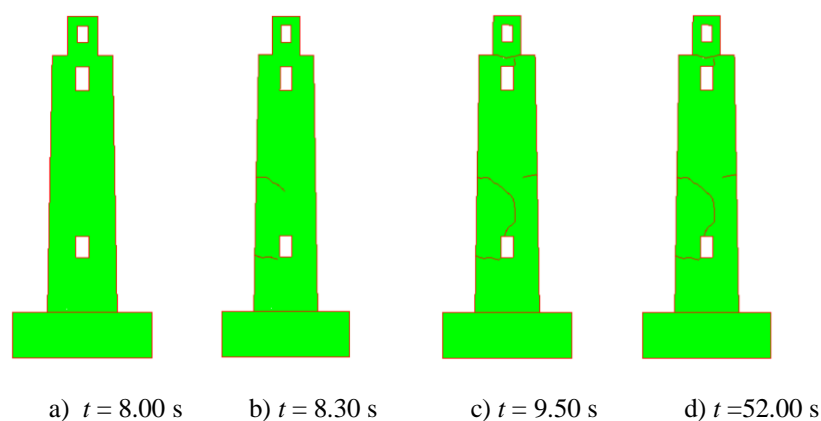
**Slika 163.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.40$  g za Campano Lucano



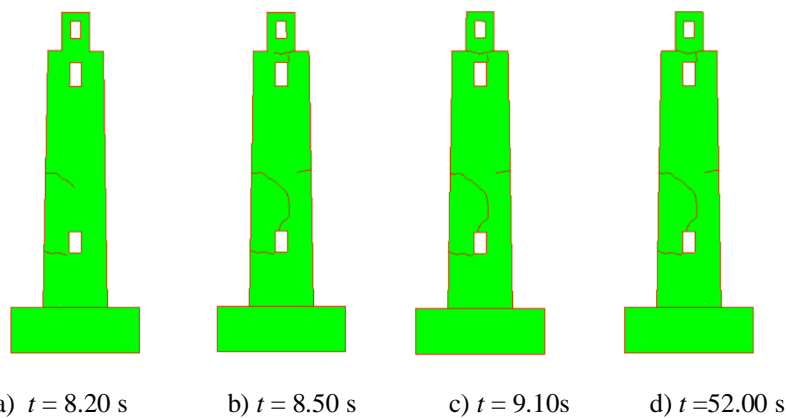
**Slika 164.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.60$  g za Campano Lucano

(ii) South Iceland

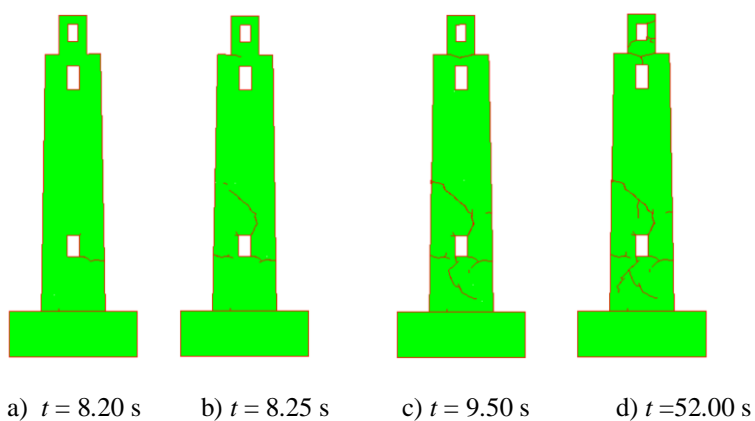
Za potres South Iceland, na slikama od 165. do 169. prikazan je progresivan slom za model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi, gdje se prva pukotina pojavljuje na vršnom ubrzanju  $a_g = 1.00$  g, u 8.00. sekundi u samom spoju podloge i konstrukcije. U 8.30. sekundi, dodatne pukotine se pojavljuju u unutrašnjosti konstrukcije i u 9.00. sekundi, dolazi do ulegnuća zvonika i okruživanje donjeg otvora sa pukotinama s jedne strane. Daljnim povećanjem vršnog ubrzanja do  $a_g = 1.30$  g, pukotine su se u 10.50. sekundi proširile na gornji otvor, gdje nastupa i otkazivanje obodnih zidova zvonika, te za  $a_g = 1.60$  g, nastupa u 11.50. sekundi potpuni slom konstrukcije.



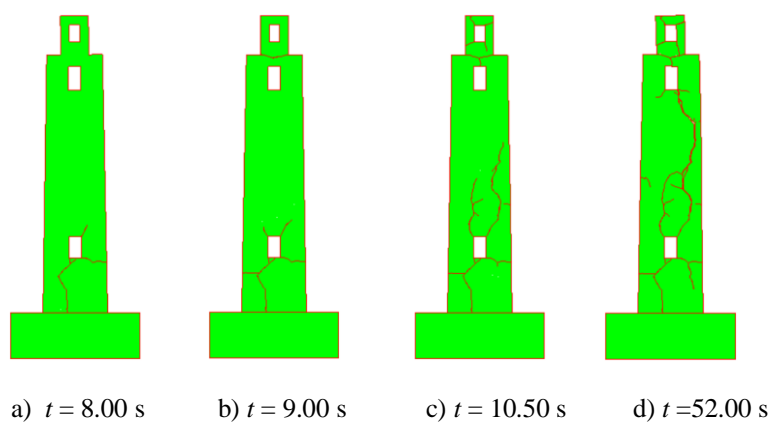
**Slika 165.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.00$  g za South Iceland



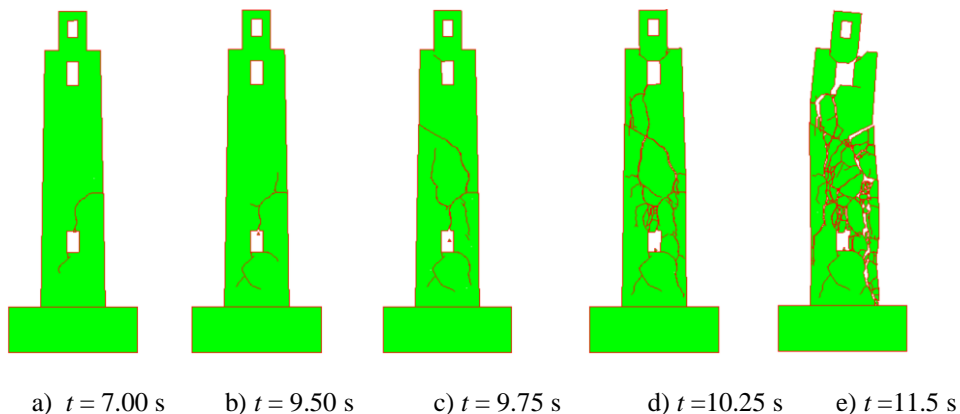
**Slika 166.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 1.10$  g za South Iceland



**Slika 167.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 1.20$  g za South Iceland



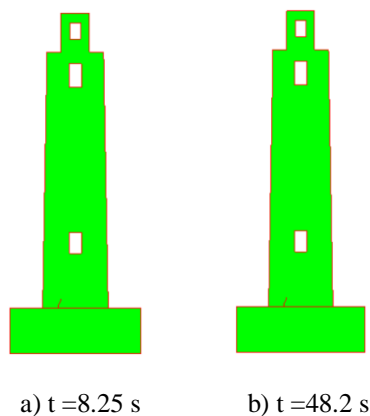
**Slika 168.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 1.40$  g za South Iceland



**Slika 169.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 1.60$  g za South Iceland, potpuni slom

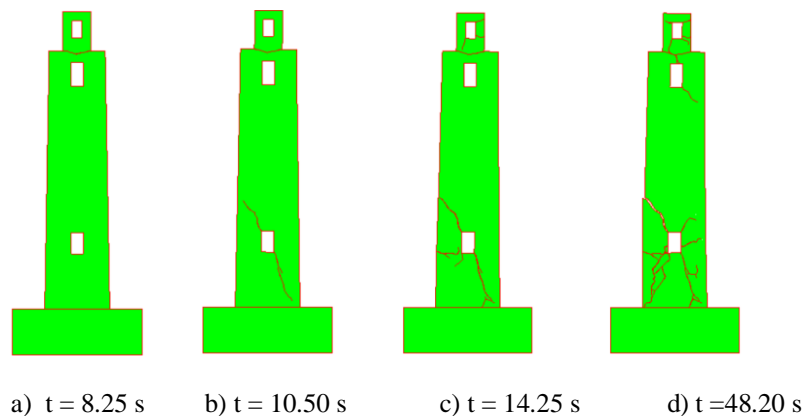
(iii) Petrovac

Za potres Petrovac, na slikama od 170. do 172. prikazan je progresivan slom za model slobodne na KP, gdje u 8.25. sekundi za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 0.30$  g, se pojavljuje prva pukotina u spoju sa tлом. Povećanjem vršnog ubrzanja, pukotine se šire prema unutrašnjosti, te za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 0.33$  g, dostižu donji otvor u 10.00. sekundi, Te kompletan slom nastupa za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 0.35$  g, gdje su pukotine se proširile u unutrašnjosti, između dva otvora, te u 14.50. sekundi kompletna konstrukcija se odvaja i lomi.

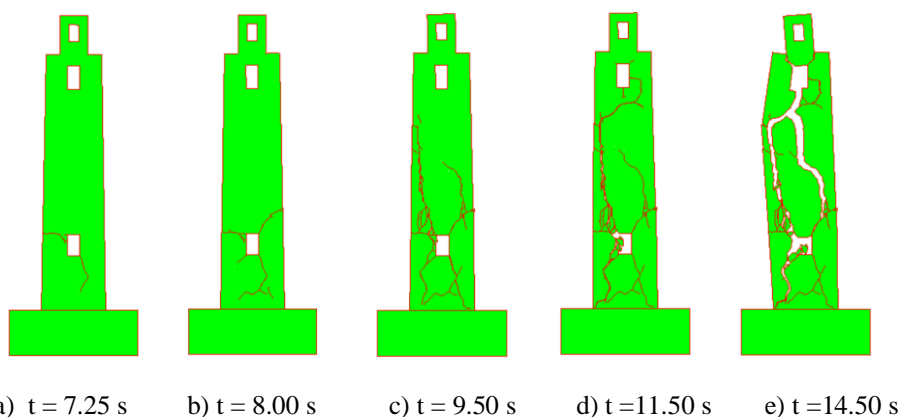


**Slika 170.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 0.30$  g za Petrovac





Slika 171. Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 0.33$  g za Petrovac

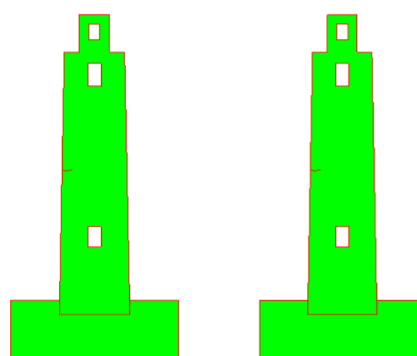


Slika 172. Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 0.35$  g za Petrovac, potpuni slom

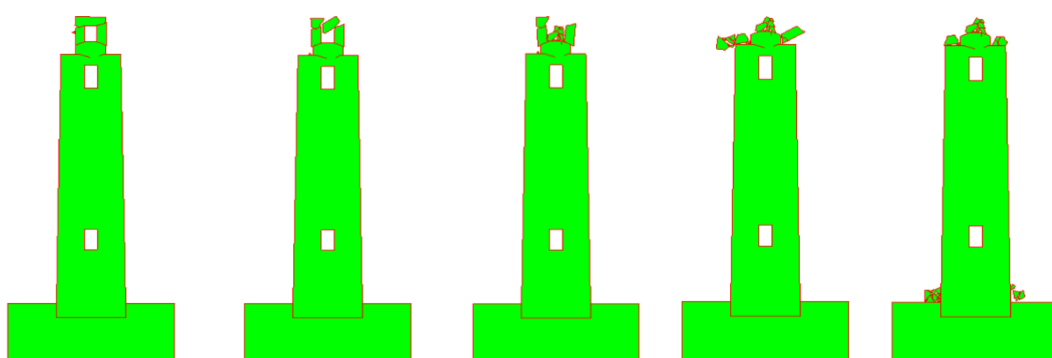
### 3.3.3. Model ukopane konstrukcije u tlo

#### (i) Campano Lucano

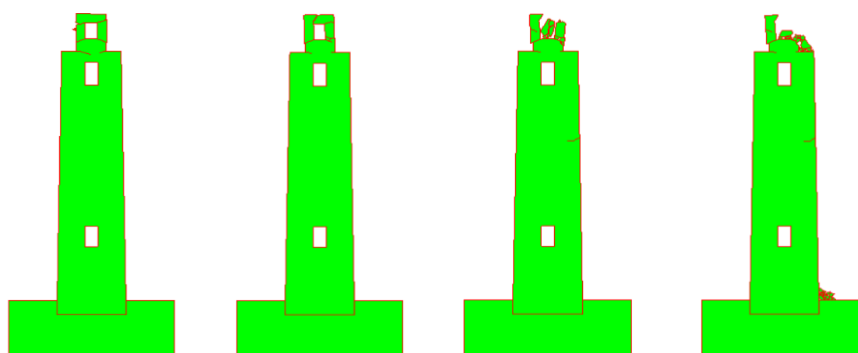
Za potres Campano Lucano, na slikama od 173. do 181. prikazan je progresivan slom za model ukopane konstrukcije u tlo, gdje za vršno ubrzanje tla  $\mathbf{a}_g = 2.40$  g, manifestira se prva pukotina na polovici visine konstrukcije, te povećanje vršnog ubrzanja tla, pukotine se prvobitno pojavljuju na zvoniku konstrukcije, gdje dolazi do loma obodnih zidova zvonika već na vršnom ubrzanju  $\mathbf{a}_g = 2.60$  g u 15.20 sekundi, te eventualnim povećanjem vršnog ubrzanja do  $\mathbf{a}_g = 3.70$  g, pukotine se počinju širiti oko gornjeg otvora, te eventualno za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 3.75$  g u 15.00 sekundi, pukotine oko gornjeg otvora se šire do samih rubova, te dolazi do sloma gornjeg djela konstrukcije u 16.15 sekundi.

b)  $t = 14.15$  sc)  $t = 30.12$  s

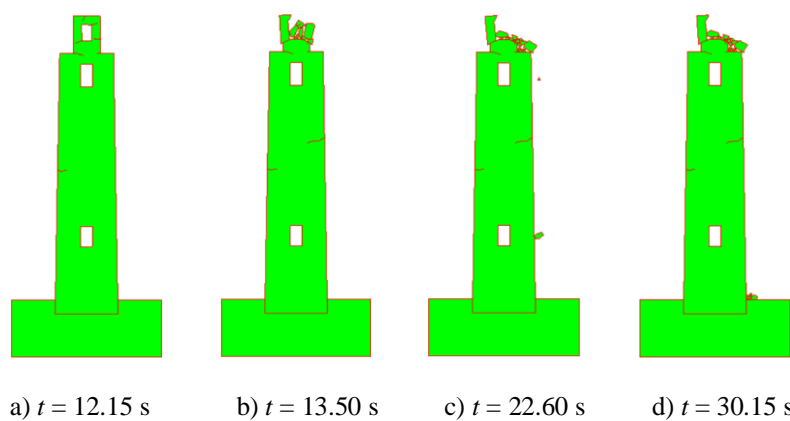
**Slika 173.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.40$  g za Campano Lucano

a)  $t = 13.00$  sb)  $t = 15.12$  sc)  $t = 17.00$  sd)  $t = 22.60$  se)  $t = 30.15$  s

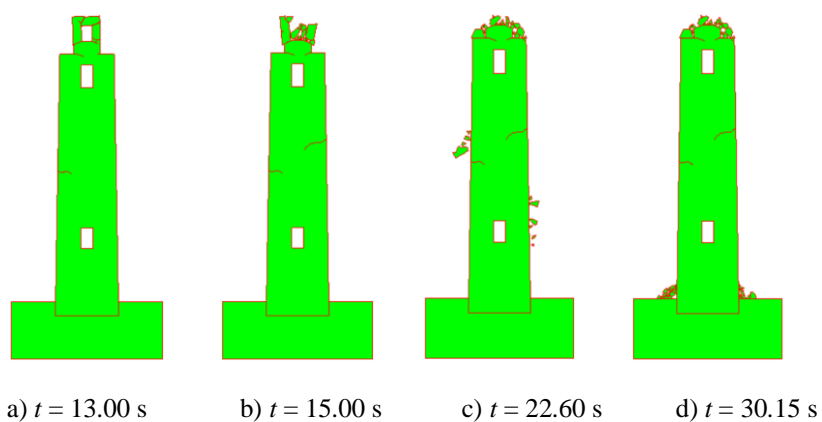
**Slika 174.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.60$  g za Campano Lucano

a)  $t = 12.15$  sb)  $t = 13.00$  sc)  $t = 15.00$  sd)  $t = 30.15$  s

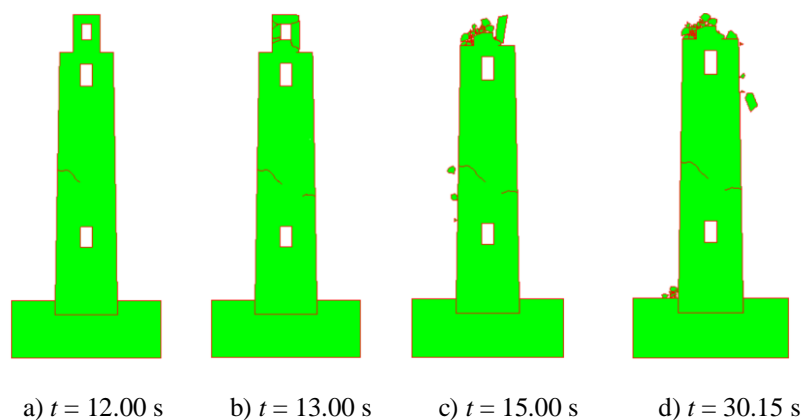
**Slika 175.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 2.80$  g za Campano Lucano



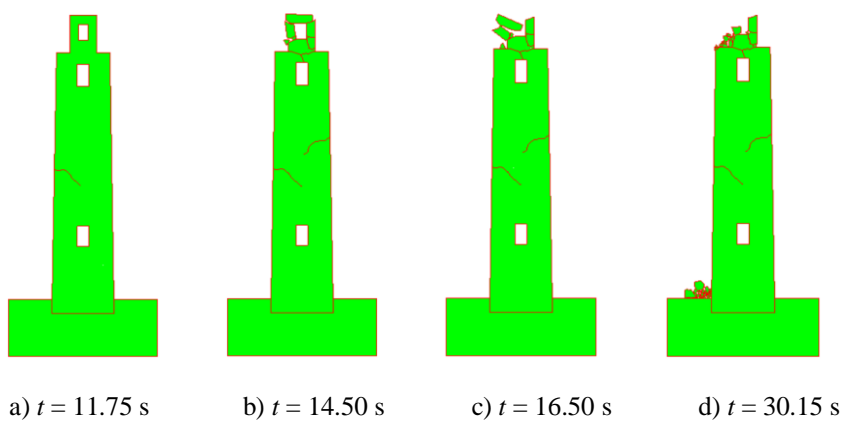
**Slika 176.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 3.00$  g za Campano Lucano



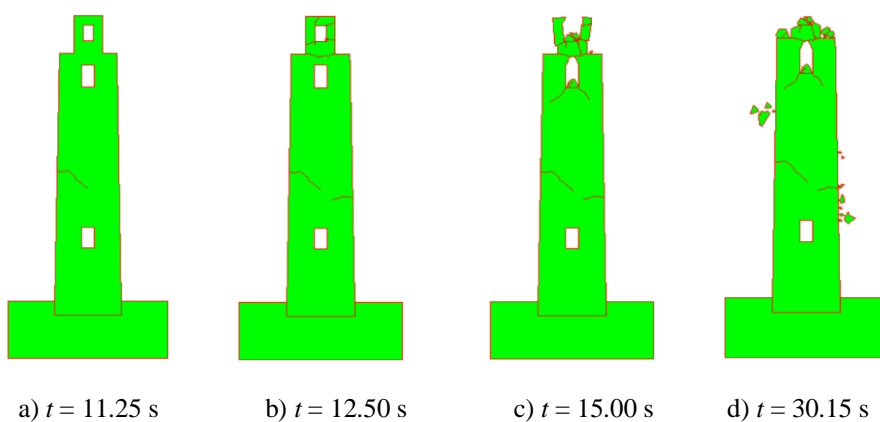
**Slika 177.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 3.20$  g za Campano Lucano



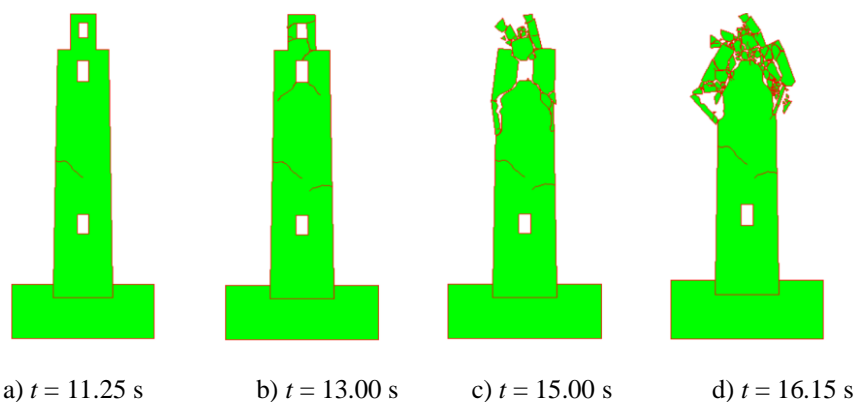
**Slika 178.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\mathbf{a}_g = 3.40$  g za Campano Lucano



**Slika 179.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 3.60$  g za Campano Lucano



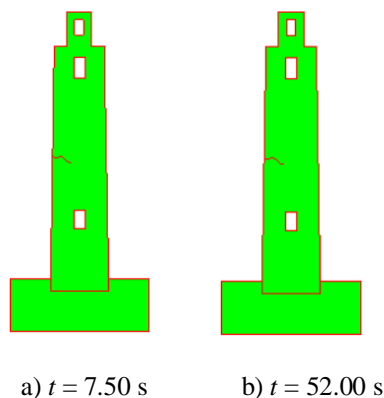
**Slika 180.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 3.70$  g za Campano Lucano



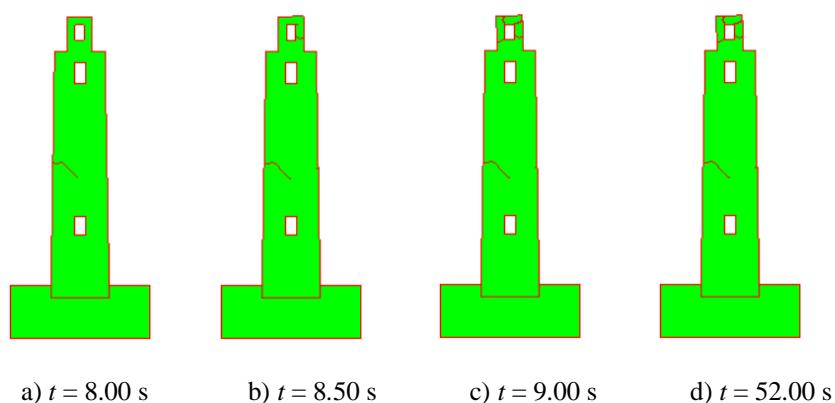
**Slika 181.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 3.75$  g za Campano Lucano,

## (ii) South Iceland

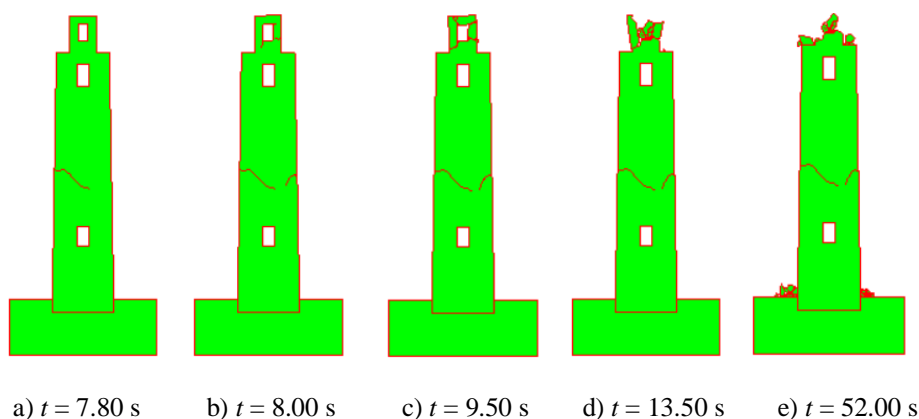
Za potres South Iceland, na slikama od 182. do 186. prikazan je progresivan slom za model ukopane konstrukcije u tlo, sa pojavom prve pukotine na polovici konstrukcije u 7.50 sekundi za vršno ubrzanje  $a_g = 1.30 g$ . Povećanje vršnog ubrzanja tla, pukotine se manifestiraju sa objiju strana, na polovici visine konstrukcije, te se šire prema unutrašnjosti, gdje za vršno ubrzanje  $a_g = 1.50 g$  dolazi do rušenja obodnih zidova zvonika, i naposljetku za vršno ubrzanje  $a_g = 1.65 g$  u 9.50 sekundi, dolazi do koncentracije pukotina na gornjem otvoru, te u 10.50 sekundi dolazi do potpunog rušenja gornjeg djela konstrukcije koje povlači i slom zvonika.



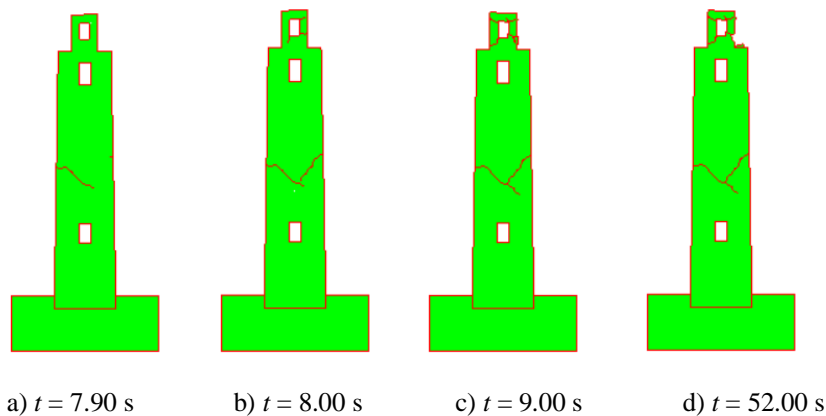
**Slika 182.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.30 g$  za South Iceland



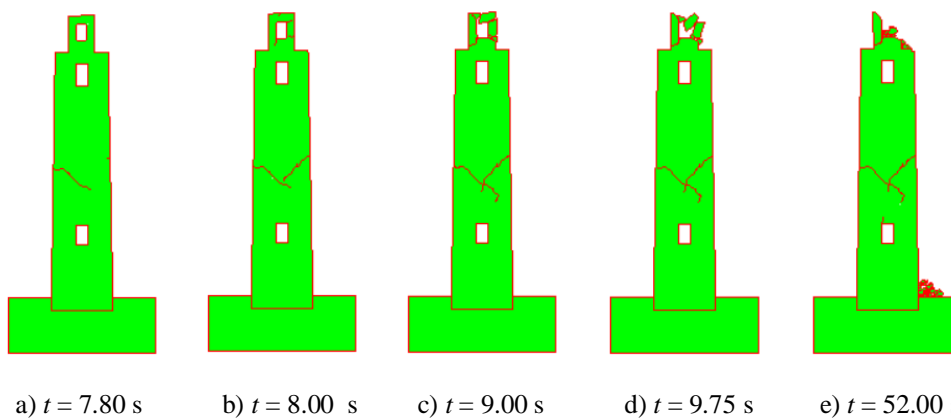
**Slika 183.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.40 g$  za South Iceland



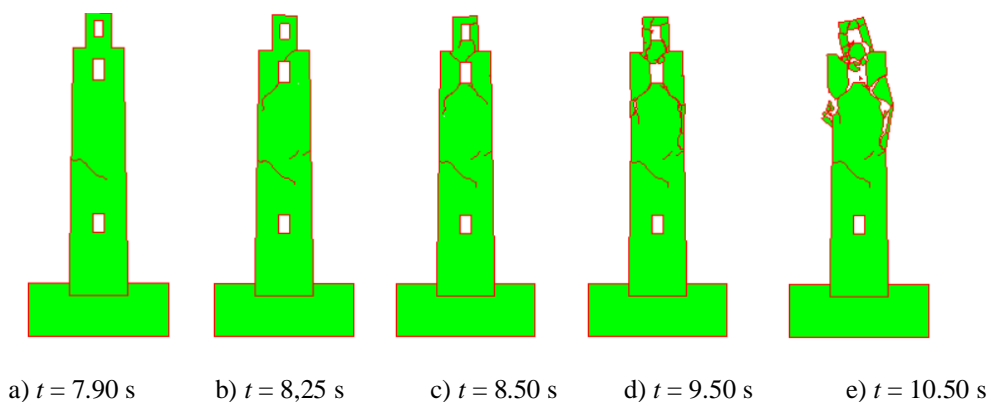
**Slika 184.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.50 g$  za South Iceland



**Slika 185.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.55$  g za South Iceland



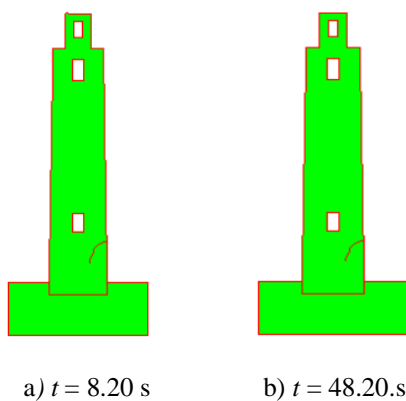
**Slika 186.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.60$  g za South Iceland



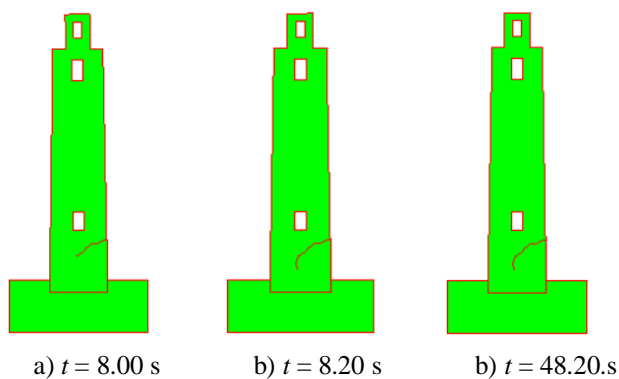
**Slika 187.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 1.65$  g za South Iceland, potpuni slom

## (iii) Petrovac

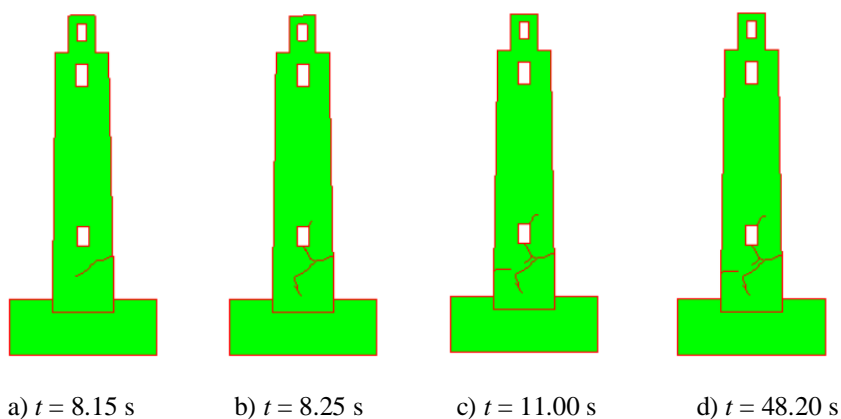
Za potres Petrovac, na slikama od 188. do 192. prikazan je progresivan slom za model ukopane konstrukcije u tlo, sa pojavom prve pukotine u 8.20 sekundi za vršno ubrzanje od  $a_g = 0.35 g$ , gdje se prva pukotina manifestira u unutrašnjosti konstrukcije oko donjeg otvora, te se šire prema unutrašnjosti. Povećanje vršnog ubrzanja tla, pukotine se šire u unutrašnjosti konstrukcije, prvo oko donjeg otvora, te propagiraju do gornjeg otvora, dok za vršno ubrzanje od  $a_g = 0.48 g$ , u 14.50 sekundi razara zvonik, te u 15.00 sekundi lomi cijelu konstrukciju.



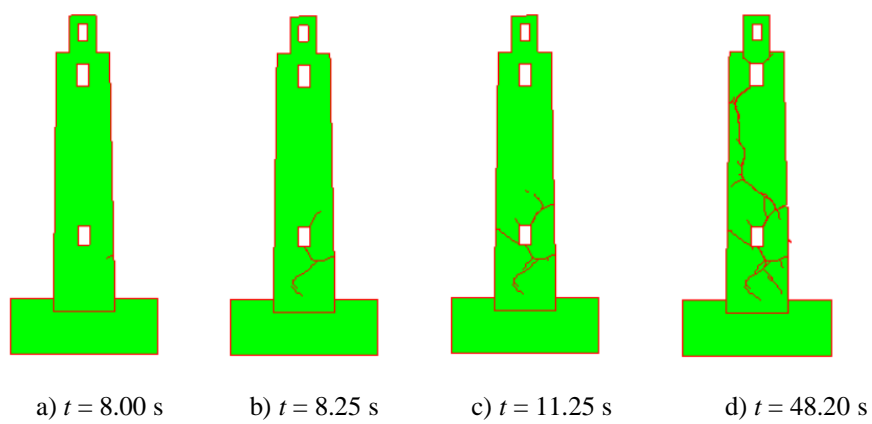
**Slika 188.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.35 g$  za Petrovac



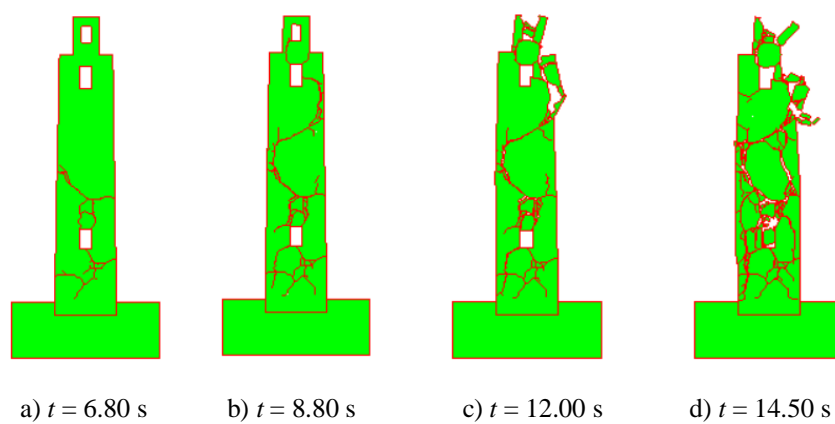
**Slika 189.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.40 g$  za Petrovac



**Slika 190.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $a_g = 0.45 g$  za Petrovac



**Slika 191.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\alpha_g = 0.46$  g za Petrovac



**Slika 192.** Širenje i nastanak pukotina za vršno ubrzanje  $\alpha_g = 0.48$  g za Petrovac

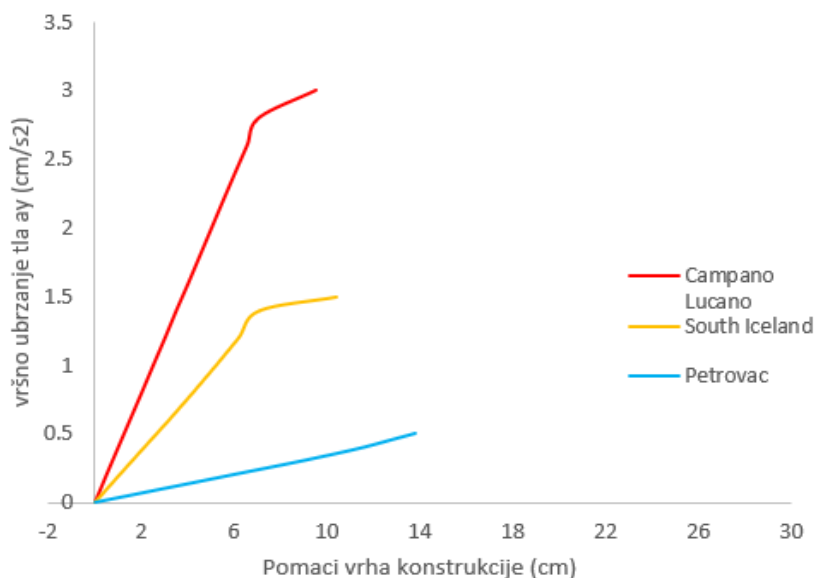


## 4. Usporedba rezultata

U nastavku su predočene usporedbe rezultata numeričke analize. U prvom segmentu su prikazane usporedbe odgovora konstrukcije prema rubnim uvjetima konstrukcije a u drugom segmentu usporedbe prema seizmičkoj pobudi.

### 4.1. Usporedba pomaka konstrukcije prema rubnim uvjetima

#### 4.1.1. Model slobodno oslonjene konstrukcije na elastičnoj podlzi



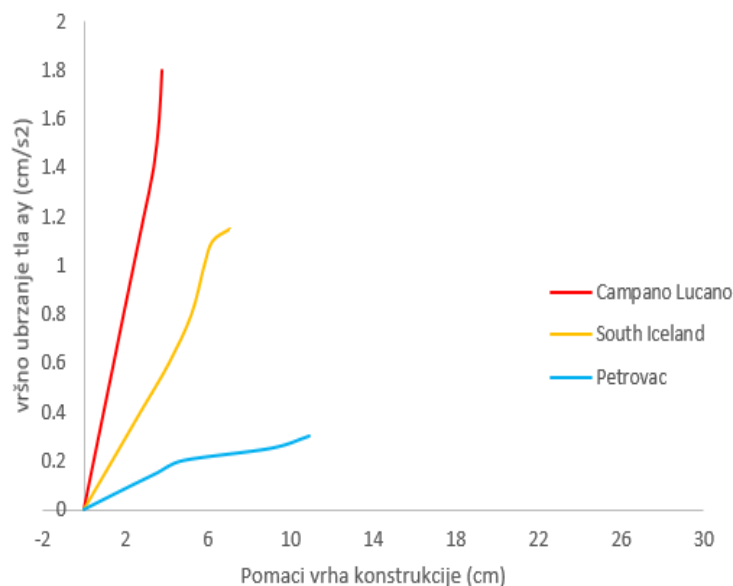
**Slika 193.** Pomaci vrha konstrukcije za slobodno oslonjenu na elastičnoj podlozi

Prema grafu, konstrukcija izdrži najveće vršno ubrzanje od potresa Campano Lucano u iznosu od 3.0 g, s pomakom od 9.54 cm. Zatim ga sljedi South Iceland, s vršnim ubrzanjem 1.4 g za pomake u iznosu do 7.08 cm. Za opterećenje od Petrovca, konstrukcija može pretrpjeti najveće pomake, u iznosu od 13.80 cm ali uz najmanje vršno ubrzanje, u iznosu od 0.50 g.

Slobodno oslonjena na elastičnoj podlozi					
CL		SI		P	
ag	pomak (cm)	ag	pomak (cm)	ag	pomak (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	0.49	0.20	1.05	0.05	1.49
0.40	1.00	0.40	2.11	0.10	2.97
0.60	1.51	0.60	3.18	0.15	4.46
0.80	2.02	0.80	4.21	0.20	5.93
1.00	2.52	1.00	5.21	0.25	7.43
1.20	3.03	1.20	6.18	0.30	8.91
1.40	3.52	1.40	7.08	0.35	10.30
1.60	4.04			0.40	11.60
1.80	4.57			0.45	12.70
2.00	5.04			0.50	13.80
2.20	5.54				
2.40	6.05				
2.60	6.57				
2.80	7.08				
3.00	9.54				

**Tablica 2.** Prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri zapisa potresa za 1. model

#### 4.1.2. Model upete konstrukcije u tlu



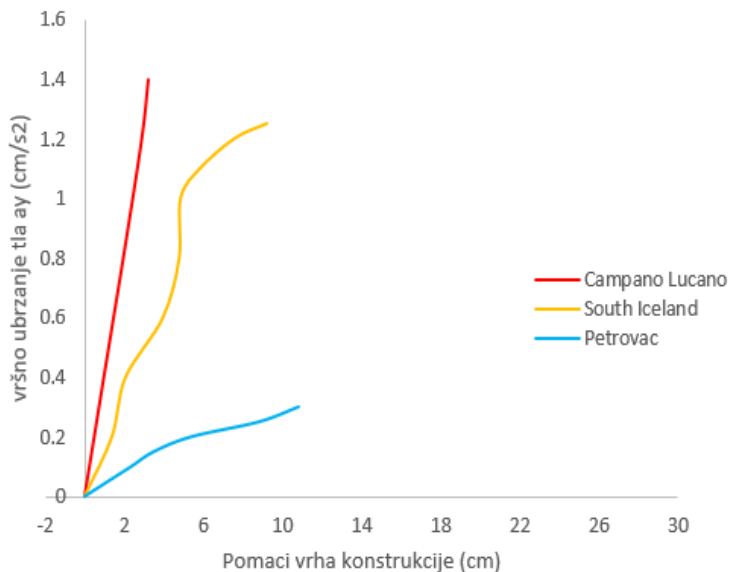
Slika 194. Pomaci vrha konstrukcije drugog modela za tri različita potresa

Prema grafu, konstrukcija izdrži najveće vršno ubrzanje od potresa Campano Lucano u iznosu od 1.80 g, s pomakom od 3.79 cm. Zatim ga sljedi South Iceland, s vršnim ubrzanjem od 1.15 g, za pomake u iznosu do 7.08 cm. Za opterećenje od Petrovac, konstrukcija može pretrpjeti najveće pomake, u iznosu od 10.90 cm ali uz najmanje vršno ubrzanje u iznosu od 0.30 g.

Upeta u tlo					
CL		SI		P	
ag	pomak (cm)	ag	pomak (cm)	ag	pomak (cm)
0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
0.20	0.48	0.20	1.38	0.05	1.17
0.40	0.96	0.40	2.75	0.1	2.35
0.60	1.45	0.60	4.13	0.15	3.56
0.80	1.93	0.80	5.22	0.2	4.81
1.00	2.42	1.00	5.84	0.25	9.05
1.20	2.91	1.10	6.24	0.3	10.9
1.40	3.39	1.20	7.08		
1.60	3.66				
1.80	3.79				

Tablica 3. Prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri zapisa potresa za 2. model

### 4.1.3. Model slobodno oslonjene konstrukcije na krutoj podlozi



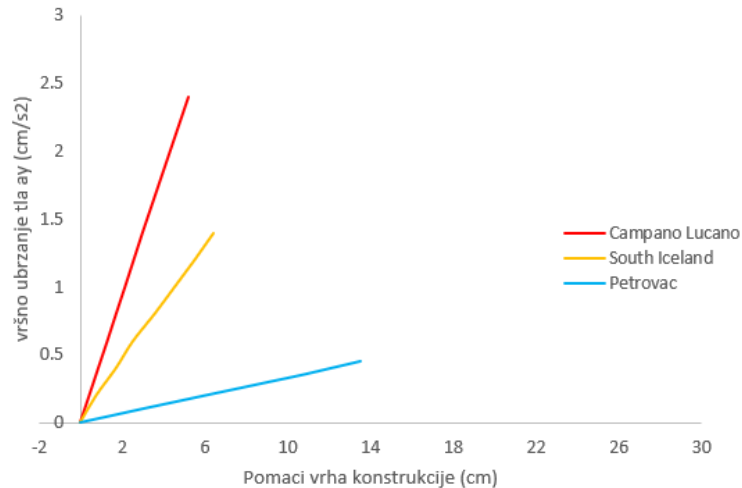
**Slika 195.** Pomaci vrha konstrukcije za slobodno oslonjenu na krutoj podlozi

Prema grafu, konstrukcija izdrži najveće vršno ubrzanje od potresa Campano Lucano u iznosu od 1.40 g, s pomakom od 3.18 cm. Zatim ga sljedi South Iceland, s vršnim ubrzanjem od 1.10 g, za pomake u iznosu do 5.84 cm. Za opterećenje od Petrovac, konstrukcija može pretrpjeti najveće pomake, u iznosu od 10.80 cm ali uz najmanje vršno ubrzanje u iznosu od 0.30 g.

Slobodno oslonjena na krutoj podlozi					
CL		SI		P	
$a_g$	pomak (cm)	$a_g$	pomak (cm)	$a_g$	pomak (cm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	0.48	0.20	1.38	0.05	1.17
0.40	0.96	0.40	2.07	0.10	2.35
0.60	1.45	0.60	3.96	0.15	3.49
0.80	1.93	0.80	4.78	0.20	5.39
1.00	2.42	1.00	4.85	0.25	8.80
1.20	2.85	1.10	5.84	0.30	10.80
1.40	3.18	1.20	7.57		

**Tablica 4.** Prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri zapisa potresa za 3. model

#### 4.1.4. Model ukopane konstrukcije u tlu



**Slika 196.** Pomaci vrha konstrukcije za ukopanu konstrukciju

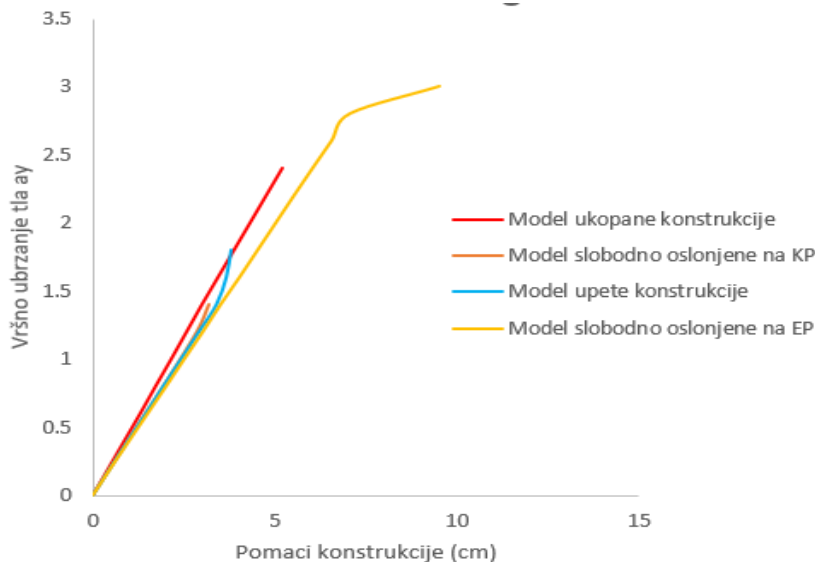
Prema grafu, konstrukcija izdrži najveće vršno ubrzanje od potresa Campano Lucano u iznosu od 2.40 g, s pomakom od 5.14 cm. Zatim ga sljedi South Iceland, s vršnim ubrzanjem od 1.20 g, za pomake u iznosu do 5.52 cm. Za opterećenje od Petrovac, konstrukcija može pretrpjeti najveće pomake, u iznosu od 13.50 cm ali uz najmanje vršno ubrzanje u iznosu od 0.46 g.

Ukopana konstrukcija u tlo					
CL		SI		P	
ag	pomak (cm)	ag	pomak (cm)	ag	pomak (cm)
0.00	0	0.00	0	0	0
0.20	0.435	0.20	0.77	0.05	1.51
0.40	0.865	0.40	1.72	0.1	2.997
0.60	1.3	0.60	2.54	0.15	4.53
0.80	1.72	0.80	3.58	0.2	6.06
1.00	2.15	1.00	4.55	0.25	7.61
1.20	2.57	1.20	5.52	0.3	9.15
1.40	2.99			0.35	10.7
1.60	3.43			0.4	12.1
1.80	3.87			0.46	13.5
2.00	4.31				
2.20	4.75				
2.40	5.19				

**Tablica 5.** Prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri zapisa potresa za 4. model

## 4.2. Usporedba pomaka konstrukcije prema seizmičkoj pobudi

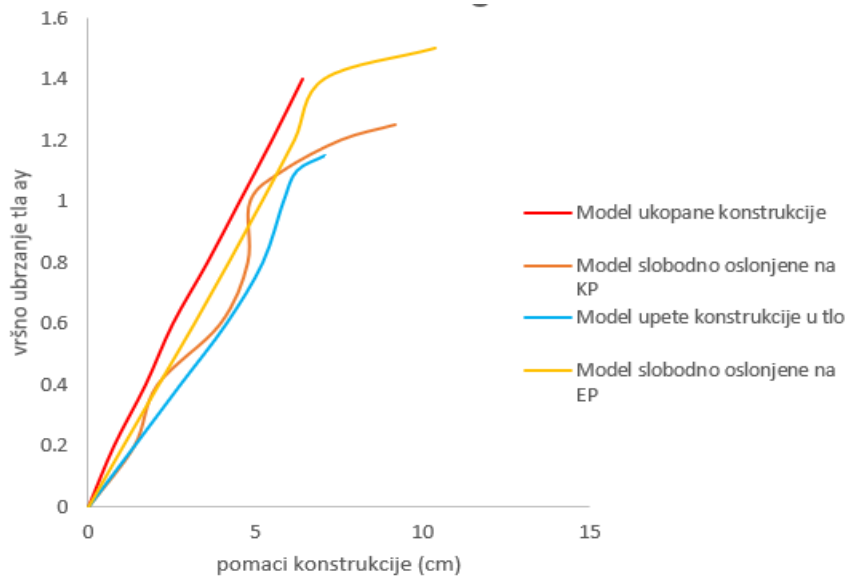
### 4.2.1. Campano Lucano



**Slika 197.** Pomaci vrha konstrukcije za Campano Lucano

Iz grafa Campano Lucano, vidljivo je da najbolji odgovor na zadano opterećenje, pokazuje model sa slobodnim oslanjanjem na elastičnoj podlozi. Pomaci vrha konstrukcije za vršno ubrzanje od 3.00 g, iznose oko 9.54 cm, što predstavlja veću deformabilnost konstrukcije prije nastupanja sloma na zadano opterećenje, u usporedbi sa ostalim modelima konstrukcije, koji daju manju deformabilnost i manje pomake prije nastupanja sloma zvonika. Najnepovoljniji odgovor daje model sa slobodnim oslanjanjem na krutoj podlozi, uz vršno ubrzanje od 1.4 g, za pomake od 3.18 cm.

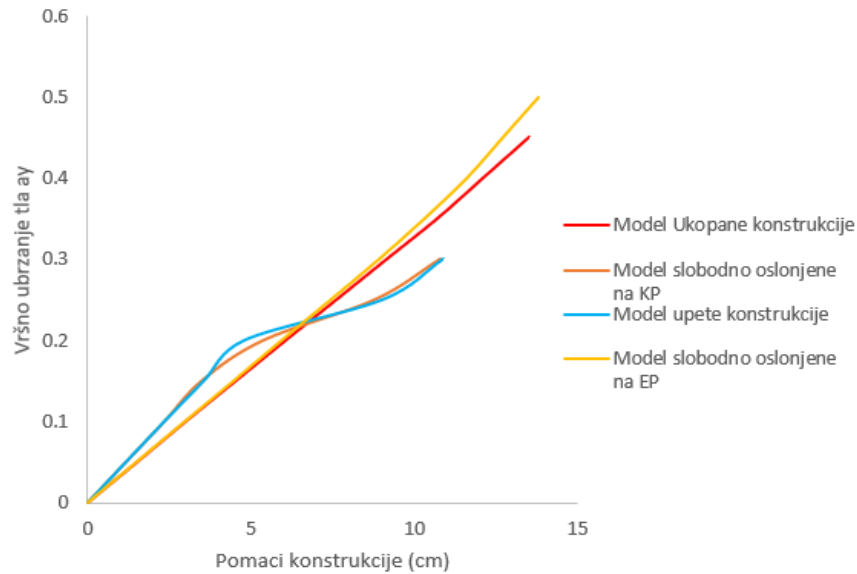
#### 4.2.2. South Iceland



**Slika 198.** Pomaci vrha konstrukcije za South Iceland

Iz grafa South Iceland, vidljivo je da modeli konstrukcija sa upetim i slobodnim oslanjanjem (na elastičnoj i krutoj podlozi), imaju približno sličan odgovor na zadano opterećenje, gdje najbolji odgovor pokazuje model slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi, koji može izdržati uz vršno ubrzanje od 1.60 g, pomake od 12.80 cm, prije nastupajućeg sloma, dok nanepovoljni odgovor daju upeta konstrukcija sa 7.08 cm pomaka vrha, i ukopana konstrukcija sa nešto značajnim manjim pomacima od 5.52 cm, prije nastupanja sloma zvonika (vrha konstrukcije).

### 4.2.3. Petrovac



Slika 199. Pomaci vrha konstrukcije za Petrovac

Iz grafa Petrovac, modeli ukopane konstrukcije i slobodno oslonjene na elastičnoj podlozi, pokazuju slično ponašanje na dano opterećenje, uz napomenu da model sa slobodnim oslanjanjem na EP, pokazuje ipak bolju deformabilnost, jer dozvoljava veći pomak prije nego što nastupi slom zvonika. Model sa ukopanim uvjetima, za vršno ubrzanje 0.46 g, daje pomake od 13.50 cm prije nastupajućeg sloma, dok slobodno oslonjena na elastičnoj podlozi pokazuje za vršno ubrzanje od 0.50 g, pomake od 13.80 cm. Model upete konstrukcije i slobodno oslonjenje na krutoj podlozi, pokazuju malu razliku u ponašanju u razlici od 1 milimetra u pomaku vrha za vršno ubrzanje od 0.30 g, te predstavljaju loše nepovoljne izbore oslanjanja konstrukcije.

## 5. Zaključak

Provedena je numerička analiza da se analizira utjecaj različitih rubnih uvjeta oslanjanja konstrukcije na tlo. Analiza je provedena za tri različita zapisa seizmičke pobude, Campano Lucano, South Iceland i Petrovac. U analizi, proveden je utjecaj pomaka vrha zvonika konstrukcija za različite modele, izloženi različitim opterećenjima (zapisima) i prikaz progresivnog nastanka i širenja pukotina do trenutka kolapsa konstrukcije. Cilj analize, je utvrđivanje najpovoljnijeg odgovora i odabira rubnih uvjeta (modela) za zadanu konstrukciju. Model sa slobodnim oslanjanjem na elastičnu podlogu, je ispio najpovoljniji rubni uvjet, uz to što je izdržao najveće vršno ubrzanje za sva tri potresa. Campano Lucano se srušio kod vršnog ubrzanja od 3.00 g, South Iceland za 1.60 g, i Petrovac za 0.52 g. Suprotno od toga, najnepovoljniji rubni uvjet (modeli konstrukcije) su ispali upeta konstrukcija u tlo i slobodno oslonjena na krutoj podlozi.

Izvršena numerička analiza, poslužit će za buduća projektiranja zidanih tornjeva, i pristupanju reustaracijama ili potencijalnim projektima ojačanja zidanih tornjevate te dati prikaz načinu pristupanja kod mogućih budućih numeričkih analizi zidanih tornjeva.



## 6. Literatura :

1. Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy ; Siro Casolo, Gabriele Milani, Claudio Alessandri
2. The combine Finite-Discrete Element Method ; A.Munjiza
3. Analiza stabilnosti suho zidanih kamenih nadvoja kombiniranom metodom konačno-diskretnih elemenata ; Emil Zubanović; Hrvoje Smoljanović; Boris Trogrlić
4. <https://www.cronacacomune.it/notizie/37060/di-nuovo-funzione-le-lancette-sulla-torre-dellorologio-ferrara.html>
5. Metoda konačno-diskretnih elemenata za seizmičku 2D analizu AB konstrukcija : disertacija ; Nikolina Živaljić
6. [https://epito.bme.hu/sites/default/files/page/150520\\_1\\_Introduction%20to%20the%20Combined%20Finite%20Discrete%20Element%20Method.pdf](https://epito.bme.hu/sites/default/files/page/150520_1_Introduction%20to%20the%20Combined%20Finite%20Discrete%20Element%20Method.pdf)
7. Proceedings of the Workshop on the Structural Cracking of the Cupola of Santa Maria del Fiore ; De Lorenzi-Venneri Giulia; lee Richard Cacy; Edward Casteel and others.