

# Seizmička analiza zvonika crkve sv. Martina u dolini rijeke Po - Italija

---

Tokalić, Franela

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:123:514129>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*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**

**Franela Tokalić**

**Split, 2022.**

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

**Franela Tokalić**

**Seizmička analiza zvonika crkve sv. Martina u dolini  
rijeke Po – Italija**

**Diplomski rad**

**Split, 2022.**

## **Seizmička analiza zvonika crkve sv. Martina u dolini rijeke Po**

### ***Sažetak:***

U radu je prikazana analiza potresnog djelovanja na zidanu konstrukciju. Primjenjena je kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata. Uspoređuju se utjecaji tri realna potresa i kombinacija četiri rubna uvjeta. Rezultat rada je predviđanje načina potpunog sloma konstrukcije i opis ponašanja konstrukcije izložene dinamičkom djelovanju.

### ***Ključne riječi:***

Zidarstvo, kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata, pukotine, pomak, seizmičko djelovanje

## **Seismic analysis of the belfry of the church of St. Martin in the Po river valley**

### ***Abstract:***

The paper presents the analysis of the earthquake effect on the masonry structure. The combined finite-discrete elements method was applied. The impacts of three real earthquakes and a combination of four boundary conditions are compared. The result of the work is the prediction of the complete collapse of the structure and the description of the behavior of the structure exposed to dynamic action.

### ***Keywords:***

Masonry, combined finite-discrete elements method, cracks, displacement, seismic activity

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

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: **Franela Tokalić**

MATIČNI BROJ (JMBAG): **0083217762**

KATEDRA: **Katedra za teoriju konstrukcija**

PREDMET: **Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo**

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Seizmička analiza zvonika crkve sv. Martina u dolini rijeke Po – Italija

Opis zadatka: Na temelju zadane geometrije modela zidanog zvonika crkve sv. Martina u dolini rijeke Po na području Italije 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 zvonik na elastičnoj podlozi, upeti zvonik u krutoj podlozi, slobodnostojeći zvonik na krutoj podlozi i ukopani zvonik u elastičnoj podlozi, analizirati dobivene rezultate i donijeti zaključke o prednostima i nedostacima različitih načina oslanjanja tornja na podlogu.

U Splitu, ožujak 2022.

Voditelji Diplomskog rada:  
Izv. prof. dr. sc. Nikolina Živaljić

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović

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

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. KOMBINIRANA METODA KONAČNO-DISKRETNIH ELEMENATA .....	3
3. PRIMJENA FEM/DEM METODE U ANALIZI ZVONIKA .....	7
3.1. Geometrija zvonika.....	7
3.2. Diskretizacija i svojstva materijala.....	8
4. PRIKAZ NUMERIČKIH REZULTATA .....	10
4.1. Rezultati analiza zvonika izloženog potresu Campano Lucano .....	10
4.1.1. Zvonik slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi .....	10
4.1.2. Zvonik pridržan za podlogu .....	13
4.1.3. Zvonik slobodno oslonjen na krutoj podlozi.....	16
4.1.4. Zvonik ukopan u podlogu .....	18
4.2. Rezultati analiza zvonika izloženog potresu Petrovac .....	20
4.2.1. Zvonik slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi .....	20
4.2.2. Zvonik pridržan za podlogu .....	22
4.2.3. Zvonik slobodno oslonjen na krutoj podlozi.....	24
4.2.4. Zvonik ukopan u podlogu .....	26
4.3. Rezultati analiza zvonika izloženog potresu South Iceland .....	28
4.3.1. Zvonik slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi .....	28
4.3.2. Zvonik pridržan za podlogu .....	31
4.3.3. Zvonik slobodno oslonjen na krutoj podlozi.....	33
4.3.4. Zvonik ukopan u podlogu .....	35
5. ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA I ZAKLJUČCI.....	37
5.1. Usporedba četiri rubna uvjeta.....	37
5.2. Usporedba tri potresa.....	39
6. ZAKLJUČAK .....	42
7. LITERATURA.....	43

## 1. UVOD

Najstariji oblik gradnje koji se upotrebljava i danas je zidarstvo. Zidanjem odnosno jednostavnim slaganjem kamenih ili glinenih elemenata jedan na drugi i mogućim međusobnim povezivanjem mortom, gradile su se povijesne građevine stare nekoliko stotina i tisuća godina. Takve građevine imaju veliku važnost za kulturnu baštinu pa su potrebna ispitivanja njihovih ponašanja uslijed različitih djelovanja opterećenja.

Najčešća stradanja povijesnih kao i suvremenih zidanih konstrukcija se događa uslijed potresa. U uvjetima seizmičkog opterećenja problem predstavljaju sljubnice između blokova koje pokazuju nelinearno i kompleksno mehaničko ponašanje konstrukcije.

Nelinearnom analizom moguće je pratiti ponašanje konstrukcije sve do sloma s točnošću koja varira ovisno o metodi. Većina modela je zasnovana na metodi konačnih elemenata. U modeliranju zidanih konstrukcija razlikujemo, s obzirom na stupanj jednostavnosti i točnosti, mikro modeliranje, pojednostavljeno mikro modeliranje te makro modeliranje.

Najzastupljeniji pristup u praksi je makro modeliranje. Kod makro modeliranja sve točke konstrukcije imaju jednaka svojstva. Homogeniziranjem reprezentativnog volumena dovoljno velike veličine i osrednjavanjem veze između naprezanja i deformacija ostvaruje se jednak zakon ponašanja svih elemenata. Tako sva svojstva morta i svojstva blokova postaju dio homogenog anizotropnog kontinuuma. Ovakav pristup pogodan je za analizu većih konstrukcija jer je proračunski najmanje zahtjevan.

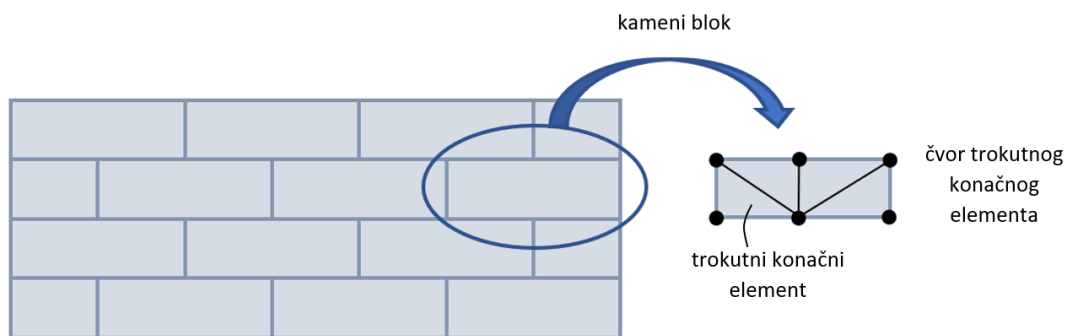
Ukoliko je reprezentativni volumen reda veličine jednog bloka i manje, riječ je o detaljnom mikro modeliranju. Blok i mort su u tom slučaju diskretizirani s konačnim elementima, a veza bloka i morta predstavljena je s kontaktnim elementima. Ovakav pristup omogućava proučavanje ponašanja zasebno morta od bloka, ali zbog kompliciranog proračuna prikladniji je za niže razine konstrukcijskih detalja, a manje za realne konstrukcije.

U pojednostavljenom mikro modeliranju prošireni blok modeliran je s konačnim elementima, a veza između morta i bloka opisuje se kontaktnim elementima koji ukazuju na mjesta potencijalnih pukotina. Na taj način smanjena je točnost proračuna jer se zanemaruje prisutnost Poissonovog koeficijenta u mortu, koji se značajno odražava na tlačnu čvrstoću zidane konstrukcije.

Modeliranje pomoću kontinuuma stvara nemogućnost opisa velikih diskontinuiteta u polju pomaka. Taj problem se može riješiti uvođenjem kontaktnih elemenata u mreži konačnih elemenata. Materijal se u konačnom elementu ponaša linearno elastično, a u kontaktnim elementima ostvaruje se materijalna nelinearnost. Nedostatak metode konačnih elemenata je nemogućnost simuliranja interakcije između više tijela i stvaranja realnih pukotina.

Točke deformabilnog tijela mijenjaju svoj položaj u prostoru što izaziva pomake i rotaciju demormabilnog tijela. Zbog mehaničke interakcije više tijela sa velikim pomacima i rotacijom koriste se modeli temeljeni na metodi diskretnih elemenata. Njena glavna prednost je prikaz konstrukcije podijeljene na diskretne elemente koji su međusobno povezani kontaktnim elementima. Na taj način omogućen je prikaz kolapsa konstrukcije zbog rotacije, klizanja i udarnog opterećenja. Nedostatak modela temeljenih na metodi diskretnih elemenata je nepostojanje mogućnosti prikaza stanja naprezanja i deformacije.

Kako bi se iskoristile prednosti gore navedenih metoda, razvijena je objedinjena metoda konačno-diskretnih elemenata (FEM/DEM). Tako je svaki diskretni element diskretiziran vlastitom mrežom konačnih elemenata. Prednost kombinirane metode je mogući prikaz i opis promjena u linearno elastičnoj fazi koje nastaju uslijed dinamičkog opterećenja kao i pojava i razvoj pukotina te međudjelovanja elemenata. U ovom radu primjenjena je kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata u analizi potresene otpornosti zidanog tornja.



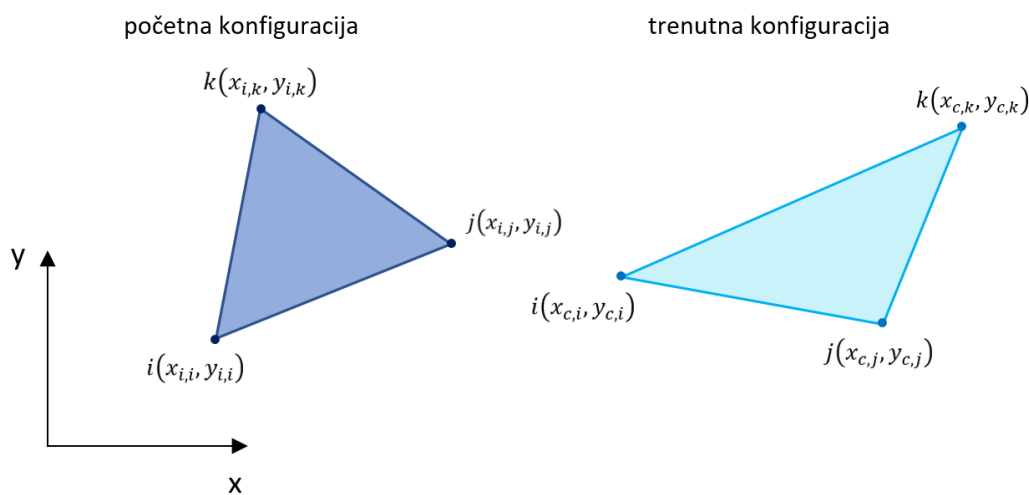
*Slika 1. Diskretizacija zidane konstrukcije [1]*



## 2. KOMBINIRANA METODA KONAČNO-DISKRETNIH ELEMENATA

Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata (FEM/DEM) zasniva se na simulaciji diskretnih elemenata u međusobnoj interakciji. Pomoću mreže konačnih elemenata omogućena je deformabilnost na način da točke deformabilnog tijela mijenjaju položaj u prostoru.

Proračun kontaktnih sila pojednostavljen je odabirom trokutnog tročvornog konačnog elementa. Geometrija je definirana globalnim koordinatama svakog čvora  $(x, y)$ , čime koordinate  $(x_i, y_i)$  predstavljaju početni položaj, a koordinate  $(x_c, y_c)$  trenutni položaj. Pomaci diskretnih elemenata se mogu razložiti na dvije komponente: pomake diskretnih elemenata kao krutih tijela uključujući translaciju i rotaciju te pomake koji uzrokuju deformaciju odnosno promjenu oblika i volumena. Rotacija i deformacija u okolini neke točke određene su gradijentom deformiranja  $F$ .



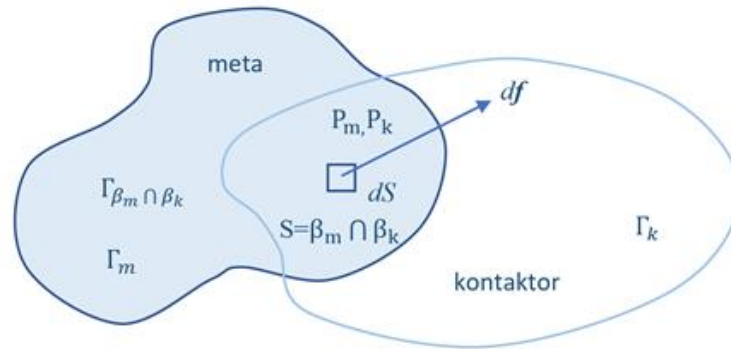
Slika 2. Trokutni konačni element u početnoj i deformiranoj konfiguraciji [2]

Veza između naprezanja i deformacija u konačnom trokutnom elementu primijenjena je Hookeovim zakonom prema izrazu

$$\mathbf{T} = \frac{E}{1+\nu} \check{\mathbf{E}}_d + \frac{E}{1-2\nu} \check{\mathbf{E}}_s + \bar{\mu} \mathbf{D} \quad (1)$$

Gdje je  $\mathbf{T}$  Cauchyev tenzor naprezanja,  $E$  modul elastičnosti,  $\nu$  Poissonov koeficijent,  $\check{\mathbf{E}}_d$  dio Green-St.Venantova tenzora deformacija koji se odnosi na promjenu oblika,  $\check{\mathbf{E}}_s$  dio tenzora deformacija koji se odnosi na promjenu volumena,  $\bar{\mu}$  koeficijent prigušenja i  $\mathbf{D}$  tenzor brzine deformacija.

Da bi se detektirali susjedni parovi diskretnih elemenata u kontaktu i eliminirali parovi koji su predaleko i ne mogu više biti u kontaktu, koristi se algoritam detekcije kontakta. Ukupno vrijeme potrebno za detekciju svih kontaktnih parova proporcionalno je ukupnom broju diskretnih elemenata. Nakon detekcije parova diskretnih elemenata, koristi se algoritam kontaktne interakcije čime se određuje kontaktna sila između njih. Jedan od elemenata proglašava se kontaktorom, a drugi metom.



Slika 3. Kontaktna diferencijalna sila u okolini točaka  $P_m$  i  $P_k$  [2]

Kontaktori i meta se u kontaktu preklapaju preko površine  $S$  koja je omeđena vanjskim rubom  $\Gamma_{\beta_m \cap \beta_k}$ . Ukupna kontaktna diferencijalna sila na kontaktoru  $d\mathbf{f}_k$  definirana je kao

$$d\mathbf{f}_k = [\mathbf{grad}\varphi_k(\mathbf{P}_m) - \mathbf{grad}\varphi_m(\mathbf{P}_k)]dS \quad (2)$$

Gdje su  $P_m$  i  $P_k$  točke preklapanja mete i kontaktora, a  $\varphi$  odgovarajuća funkcija potencijala.

Integracijom preklapajuće površine  $S$  dobije se ukupna kontaktna sila

$$\mathbf{f}_k = \int_{S=\beta_m \cap \beta_k} [\mathbf{grad}\varphi_k - \mathbf{grad}\varphi_m] dS \quad (3)$$

Koja se može zapisati u obliku

$$\mathbf{f}_k = \oint_{\Gamma_{\beta_m \cap \beta_k}} \mathbf{n}_\Gamma [\varphi_k - \varphi_m] d\Gamma \quad (4)$$

Gdje je  $\mathbf{n}_\Gamma$  jedinična vanjska normala na rubu  $\Gamma$  preklapajuće površine  $S$ . Za ukupnu kontaktnu silu provodi se isti postupak sa zamjenom uloga kontaktora i mete.

Algoritmom kontaktnih sila integriran je Coulomb-ov model suhog trenja kod posmičnih sila

$$\mathbf{f}_t = -k_t \boldsymbol{\delta}_t \quad (5)$$

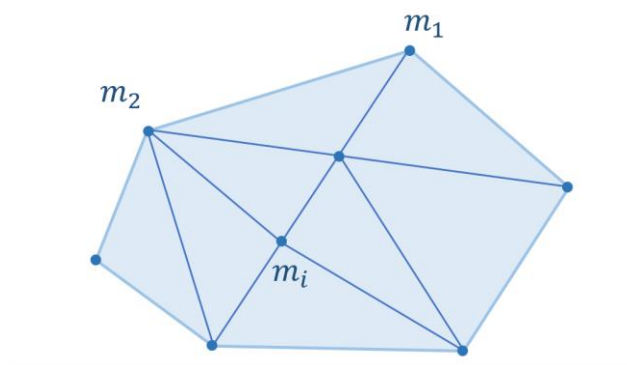
Gdje je  $\mathbf{f}_t$  tangencijalna elastična kontaktna sila,  $k_t$  je penalty koeficijent za trenje, a  $\boldsymbol{\delta}_t$  je tangencijalni vektor pomaka između dva elementa.

Ukoliko je  $\mathbf{f}_t$  veća od maksimalne sile trenja definirane Coulomb-ovim zakonom,  $|\mathbf{f}_t| > \mu|\mathbf{f}_n|$  elementi klize jedan uz drugog dok se posmična sila između njih definira pomoću elastične normalne sile  $\mathbf{f}_n$

$$\mathbf{f}_t = -\mu \mathbf{f}_n \quad (6)$$

gdje je  $\mu$  koeficijent trenja.

Oblik i položaj svakog diskretnog elementa opisan je trenutnim koordinatama čvorova konačnih elemenata. Za njihovo određivanje potrebno je poznavati masu sustava zbog pojavljivanja inercijalnih sila. U kombiniranoj metodi konačno-diskretnih elemenata masa sustava koncentrirana je u čvorovima konačnih elemenata.



**Slika 4.** Model koncentriranih masa [2]

Jednadžba gibanja pojedinog čvora u vremenu integrira se po vremenu eksplicitnom metodom konačnih razlika koja je uvjetno stabilna i čija stabilnost i točnost ovise o izboru vremenskog koraka. Sile koje se pojavljuju u čvorovima su nastale interakcijom dva ili više elementa u kontaktu, deformiranjem konačnog elementa, utjecajem vanjskih sila i sila prigušenja. Osnovna shema metode konačnih razlika prikazana je kao

$$a_n = \frac{f_n}{m} \quad (7)$$

$$v_{n+1} = v_n + a_n h \quad (8)$$

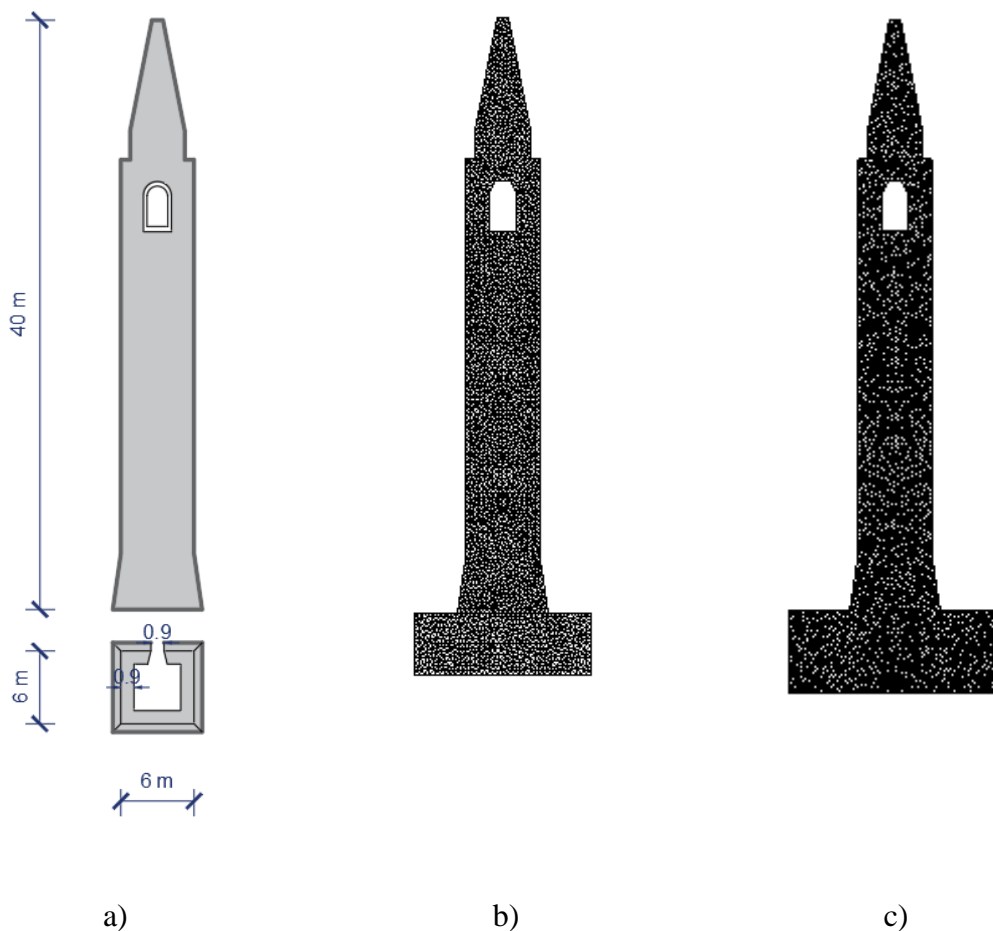
$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} h \quad (9)$$

Gdje je  $f_n$  suma sila između dva ili više elementa u kontaktu, sila uslijed deformiranja konačnog elementa, vanjskih sila i sila prigušenja,  $m$  su mase vezane za svaki stupanj slobode, a  $h$  veličina vremenskog koraka.

### 3. PRIMJENA FEM/DEM METODE U ANALIZI ZVONIKA

#### 3.1. Geometrija zvonika

Za seizmičku analizu odabran je zidani zvonik na području sjeverne Italije u dolini rijeke Po. S obzirom da je sjever Italije seizmički aktivno područje, od važnosti je utvrditi razinu oštećenja, procijeniti seizmičku otpornost oštećenih konstrukcija i ukoliko je potrebno predložiti metodu za rekonstrukciju i obnovu zvonika. Zvonici starih crkava i samostana okarakterizirani su kao seizmički osjetljivi zbog njihove strukture, geometrijske konfiguracije i opadanja mehaničkih svojstava materijala. Zvonik je izgrađen tijekom 17. stoljeća, umjerene vitkosti sa jednim otvorom u zvonarskoj prostoriji i uskim vrhom te kvadratnog tlocrta. Zidanje se uglavnom radilo od sitnih glinenih opeka s niskom do umjerenom tlačnom čvrstoćom (6–10 MPa) i mortom s niskom vlačnom čvrstoćom (0,05 MPa). Korištene su male glinene cigle dimenzija vrlo sličnih modernim (25x5,5x12 cm). [3]



*Slika 5. a) geometrija modela b) diskretizacija zvonika za rubne uvjete na elastičnoj podlozi i slobodno oslonjen na krutoj podlozi c) diskretizacija zvonika za ukopani model*

Za potrebe ovog rada usvojena je promijenjena geometrija u odnosu na izvornu na način da je svaka linija zvonika osno simetrična s obzirom na vertikalnu os koja prolazi središtem zvonika. Razlog je pojednostavljenje diskretizacije mrežom konačnih elemenata i proračuna.

### 3.2. Diskretizacija i svojstva materijala

Diskretizacija je provedena programom Gmsh [4]. Usvojena je pojednostavljena 2D diskretizacija, a u proračun su uzete u obzir različite dimenzije zvonika na način da je debljina konačnih elemenata tla 12 m, na rubovima tornja 6 m, a debljina središnjih konačnih elemenata je 1.8 m. Na taj način ostvareno je realistično ponašanje zvonika unutar 2D diskretizacije. Geometrija tornja je opisana sa 5059 konačnih elemenata i 2736 čvorova gdje svaki trokutni konačni element sadrži 3 čvora i 2 stupnja slobode u čvoru.

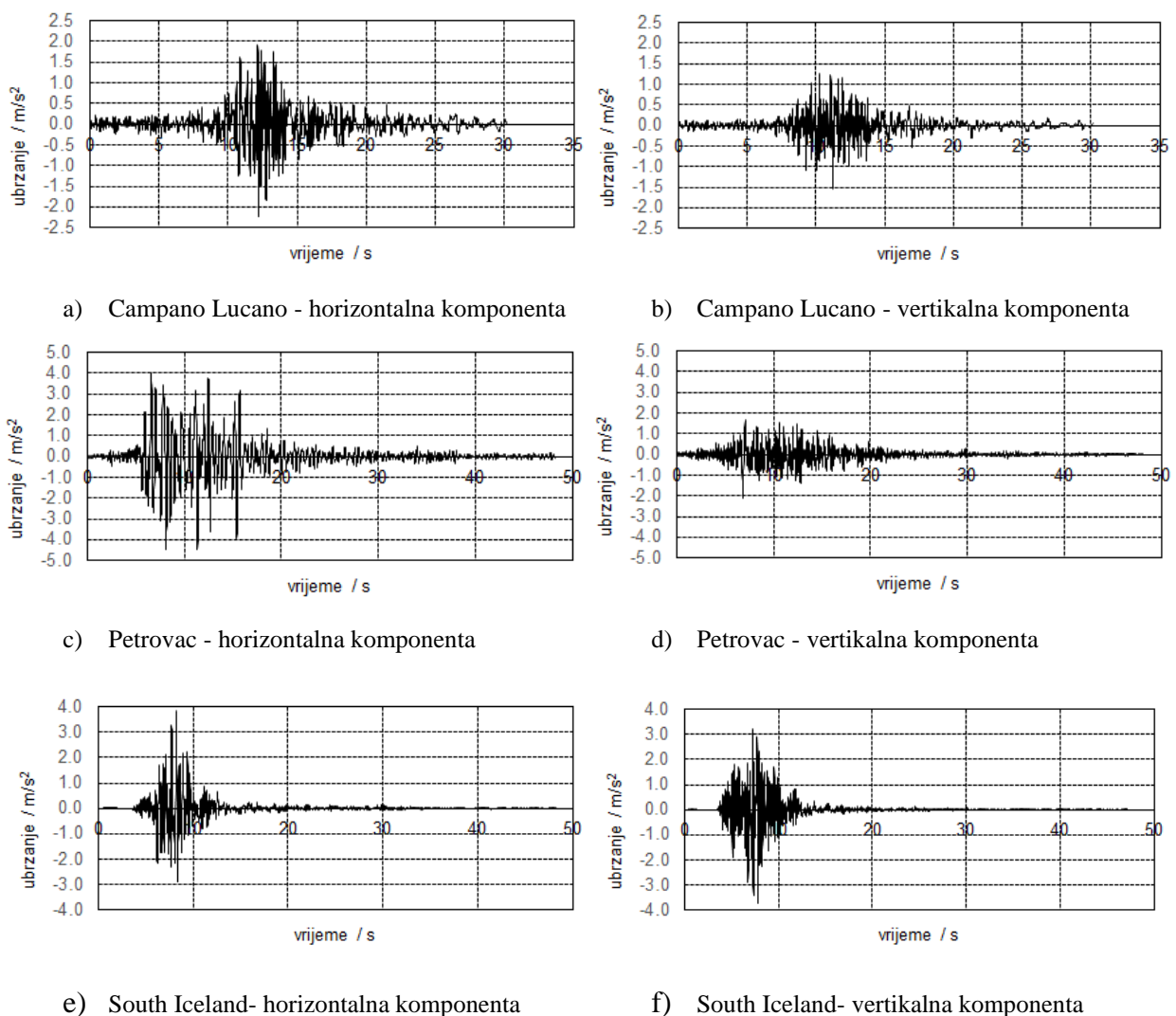
Model materijala u konačnim elementima je linearno viskoelastičan materijal. Materijalna nelinearnost, uključujući pukotine i fragmentaciju, osigurana je preko kontaktnih elemenata u mreži. U odsustvu aktualnijih podataka o materijalnim svojstvima konstrukcije, uzimajući u obzir arhitektonske karakteristike i tehniku građenja, uzete su vrijednosti iz literature [5].

**Tablica 1** Svojstva materijala

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 vlaklu $G_{f,t}$ (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

Energija loma jedan je od parametara mehanike loma. U energetskom pristupu razvijanje pukotine (lom) se događa kad energija potrebna za rast pukotine premaši otpor materijala. U ovom slučaju nije dana mogućnost pucanja tlu.

U nastavku je provedena analiza stabilnosti zvonika izloženog potresu. Korišteni su zapisi ubrzanja tla za vrijeme potresa u Campanu Lucanu (Italija) 1980., Petrovcu (Crna Gora) 1979. i South Iceland (Island) 2000. Konstrukcija je izložena horizontalnom i vertikalnom ubrzanju tla. Ubrzanje se gradualno povećavalo sve do sloma konstrukcije [6].

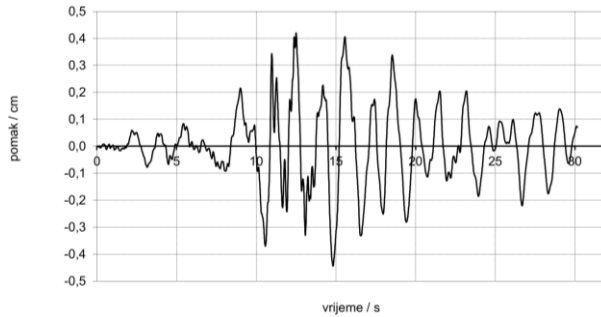


*Slika 6. Zapisi ubrzanja tla tri realna potresa*

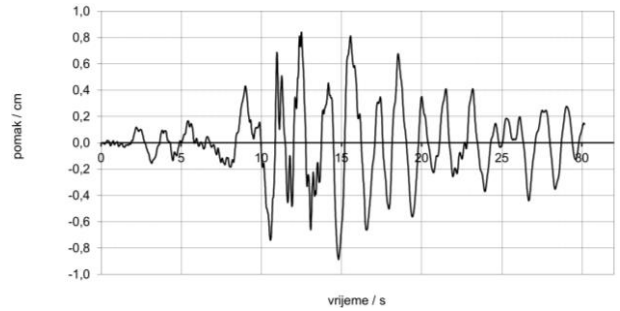
## 4. PRIKAZ NUMERIČKIH REZULTATA

### 4.1. Rezultati analiza zvonika izloženog potresu Campano Lucano

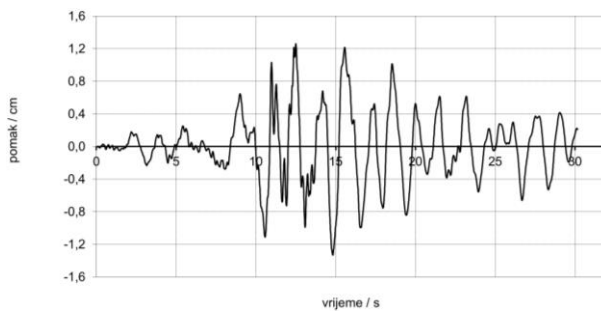
#### 4.1.1. Zvonik slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi



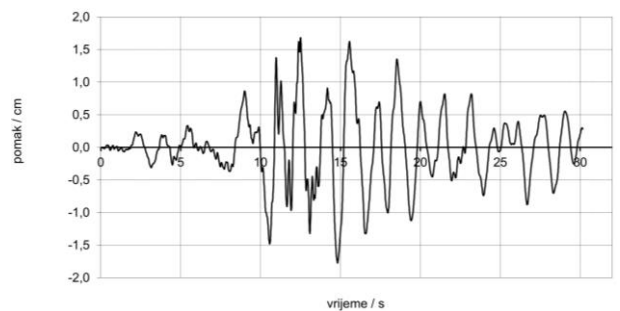
a) vršno ubrzanje 0.10 g



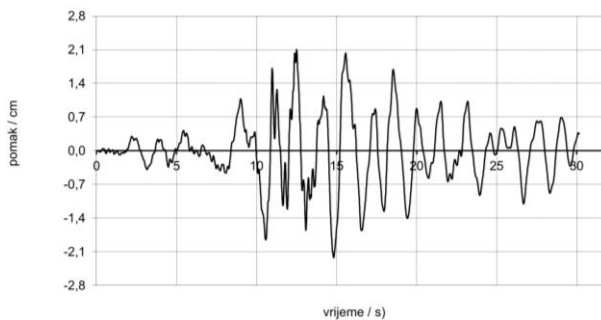
b) vršno ubrzanje 0.20 g



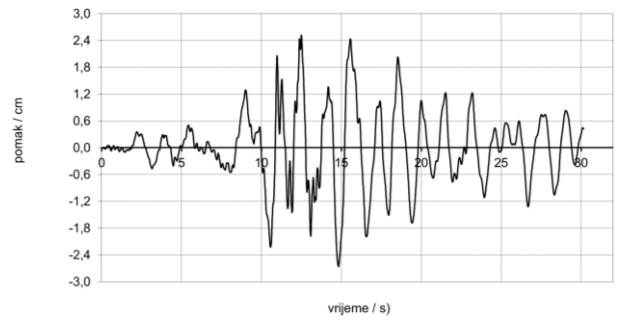
c) vršno ubrzanje 0.30 g



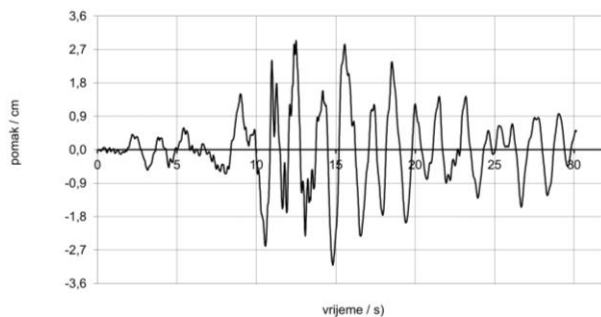
d) vršno ubrzanje 0.40 g



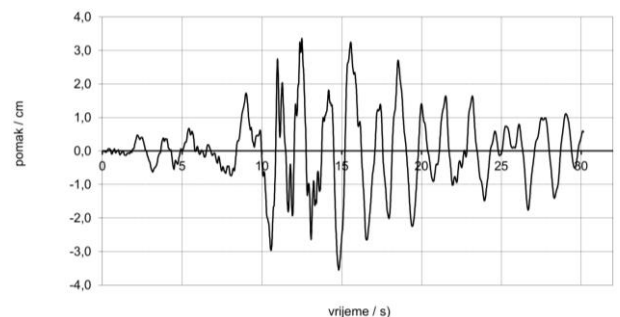
e) vršno ubrzanje 0.50 g



f) vršno ubrzanje 0.60 g

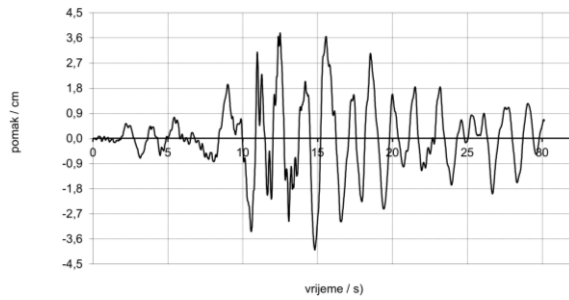


g) vršno ubrzanje 0.70 g

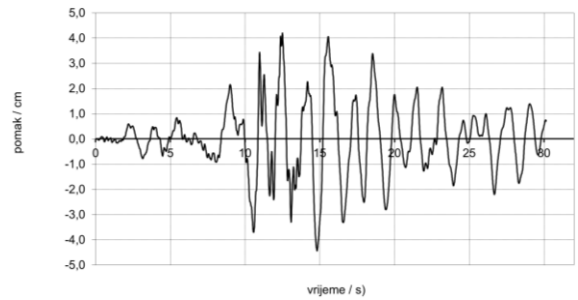


h) vršno ubrzanje 0.80 g

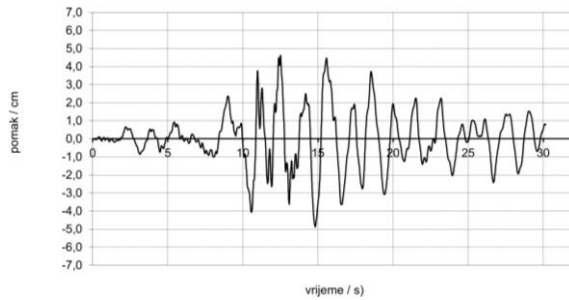




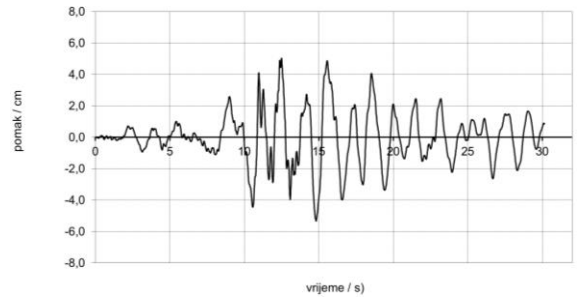
i) vršno ubrzanje 0.90 g



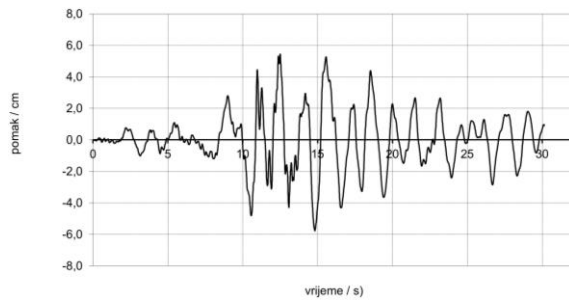
j) vršno ubrzanje 1.00 g



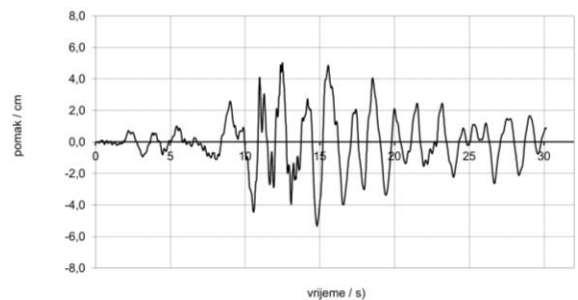
k) vršno ubrzanje 1.10 g



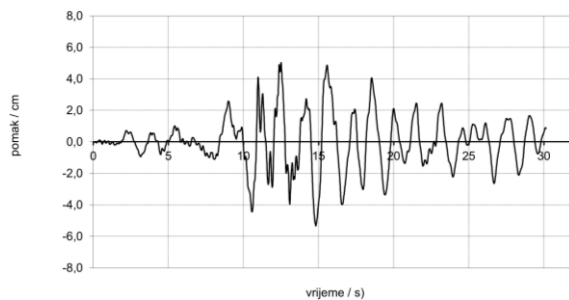
l) vršno ubrzanje 1.20 g



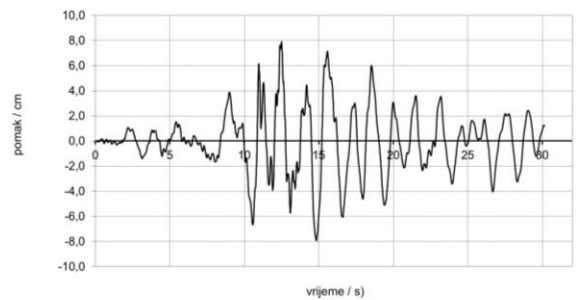
m) vršno ubrzanje 1.30 g



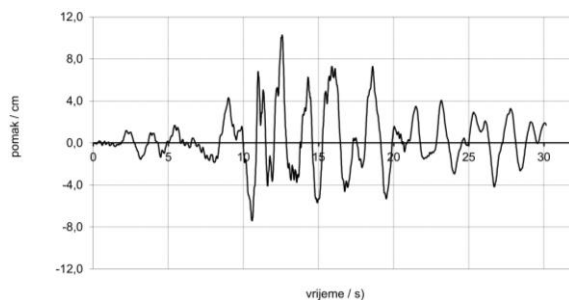
n) vršno ubrzanje 1.40 g



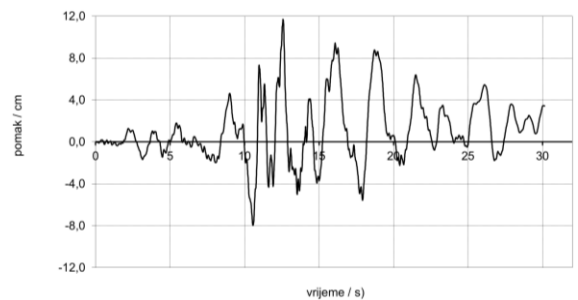
o) vršno ubrzanje 1.50 g



p) vršno ubrzanje 1.80 g

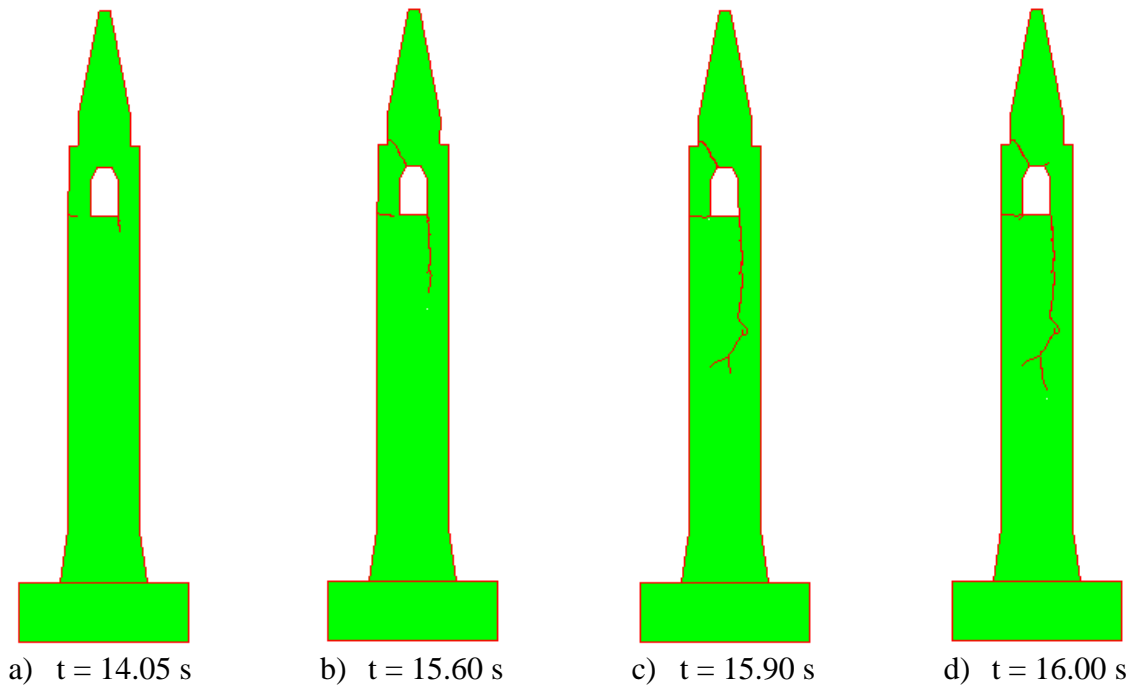
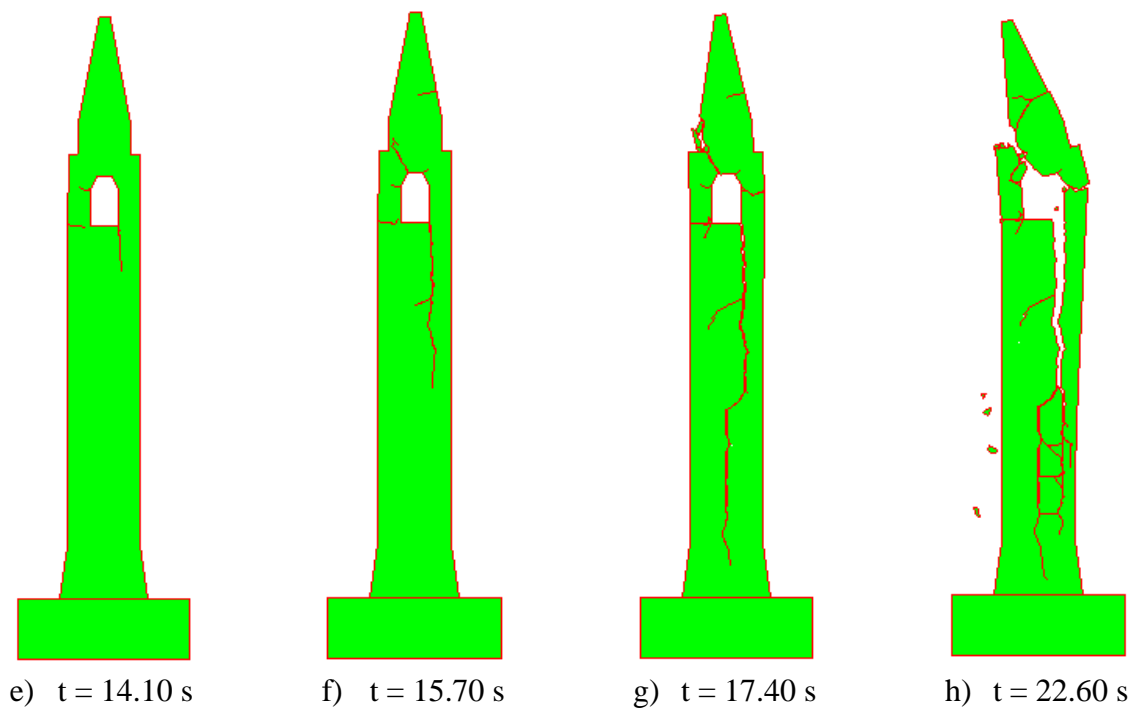


q) vršno ubrzanje 2.00 g

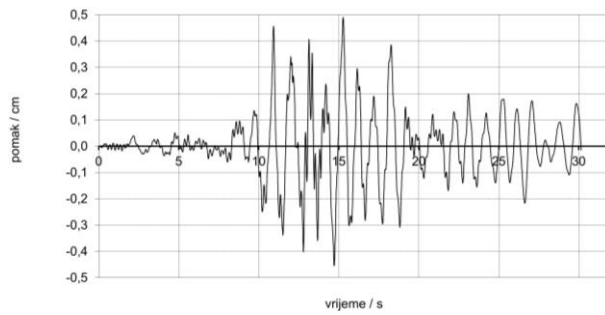


r) vršno ubrzanje 2.15 g

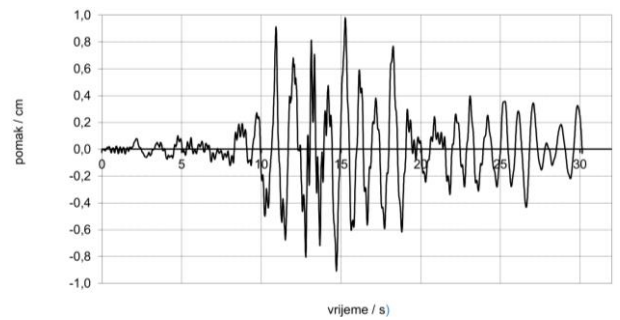
Slika 7. Pomaci nastali ubrzanjem podloge

**Campano Lucano: slobodno oslonjeni – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 2.00$  g***Slika 8. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje 2.00 g***Campano Lucano: slobodno oslonjeni – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 2.2$  g***Slika 9. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje 2.20 g*

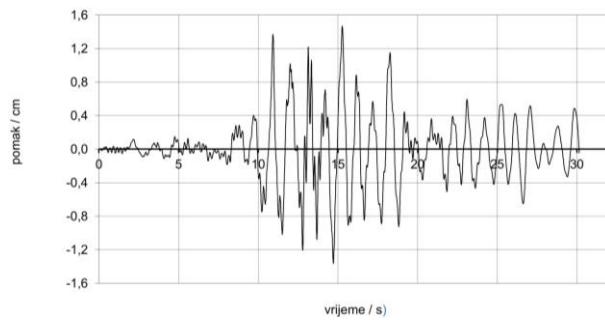
## 4.1.2. Zvonik pridržan za podlogu



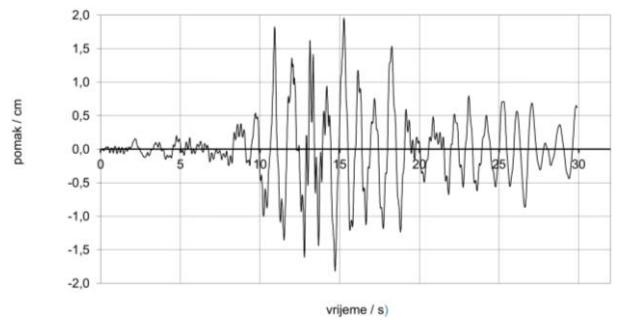
a) vršno ubrzanje 0.10 g



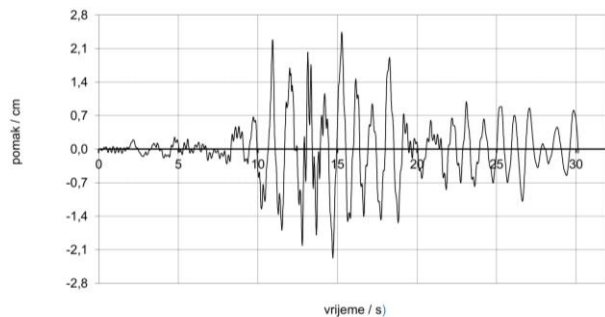
b) vršno ubrzanje 0.20 g



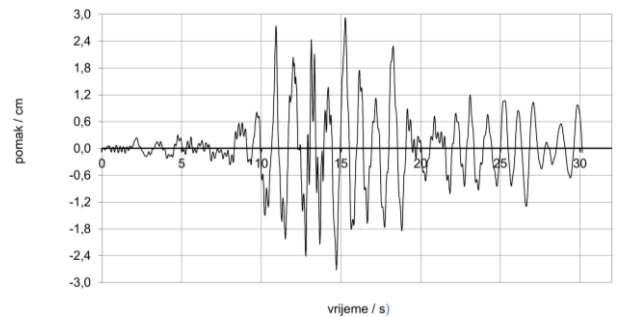
c) vršno ubrzanje 0.30 g



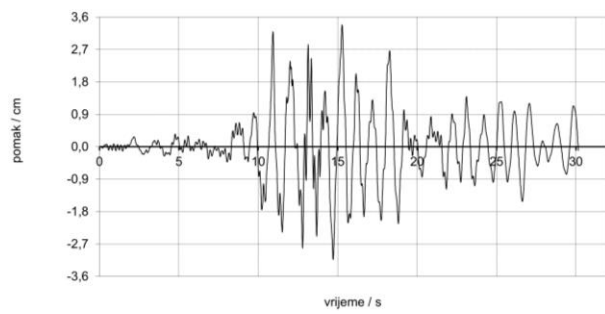
d) vršno ubrzanje 0.40 g



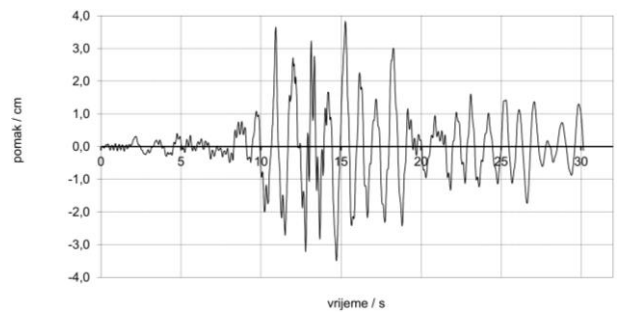
e) vršno ubrzanje 0.50 g



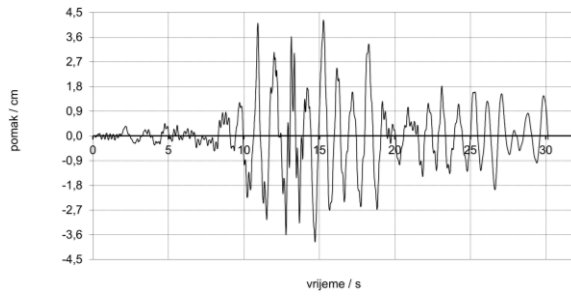
f) vršno ubrzanje 0.60 g



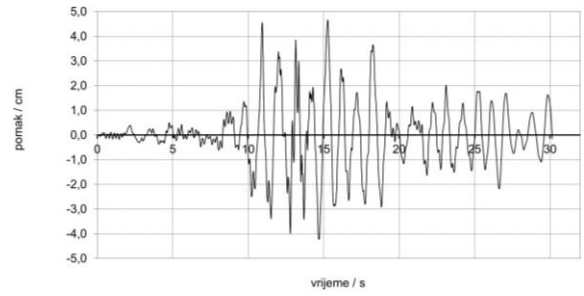
g) vršno ubrzanje 0.70 g



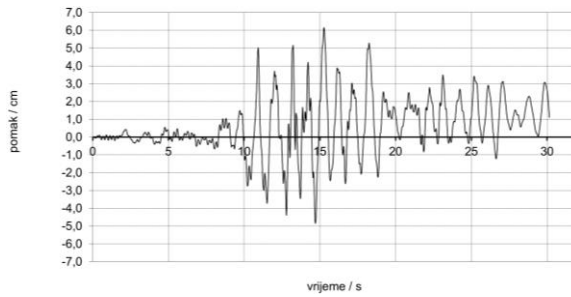
h) vršno ubrzanje 0.80 g



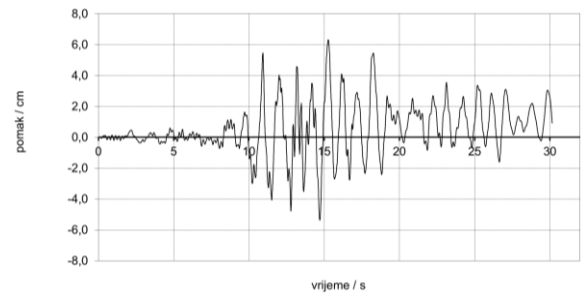
i) vršno ubrzanje 0.90 g



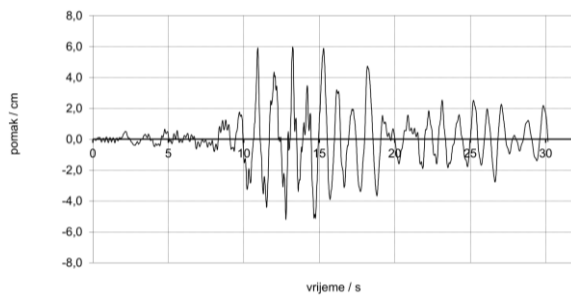
j) vršno ubrzanje 1.00 g



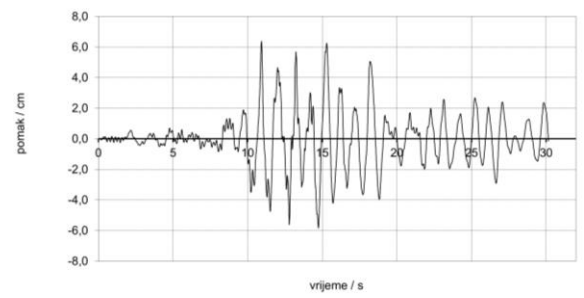
k) vršno ubrzanje 1.10 g



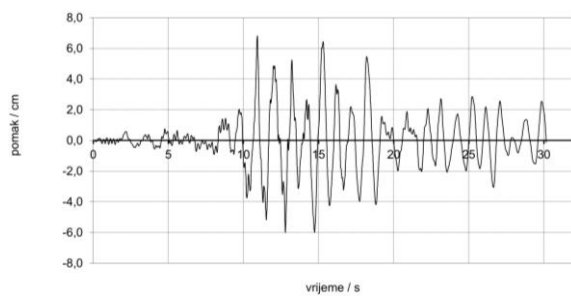
l) vršno ubrzanje 1.20 g



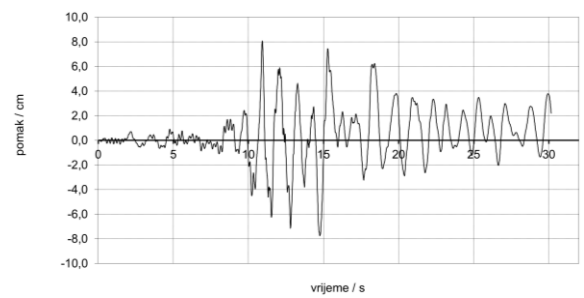
m) vršno ubrzanje 1.30 g



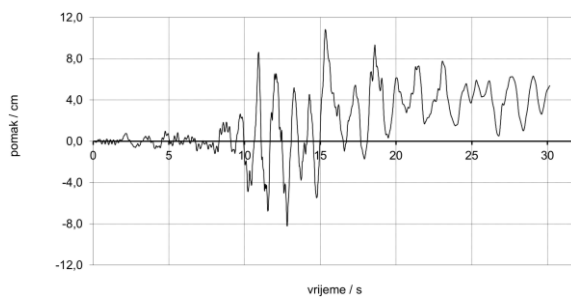
n) vršno ubrzanje 1.40 g



o) vršno ubrzanje 1.50 g

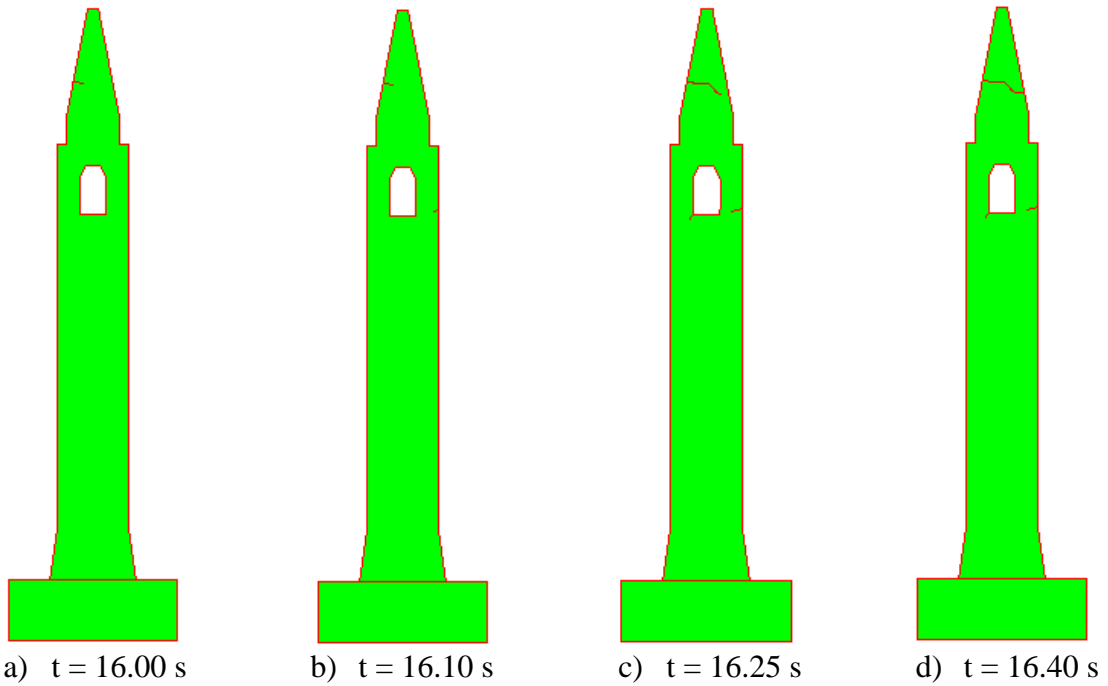


p) vršno ubrzanje 1.80 g

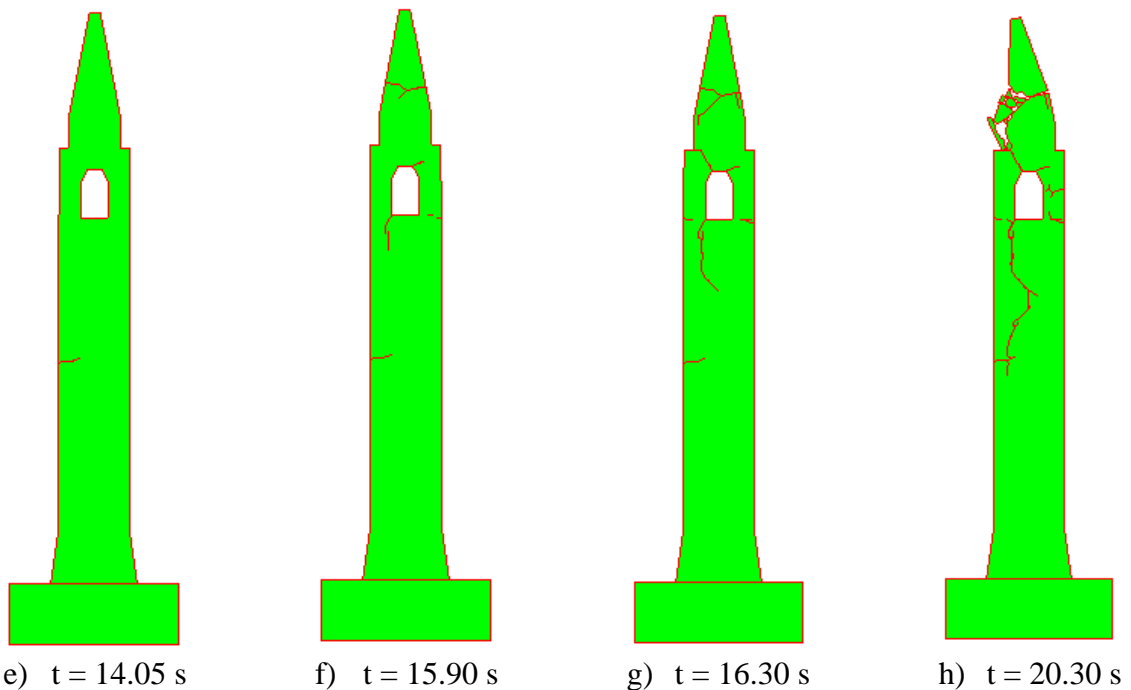


q) vršno ubrzanje 1.95 g

Slika 10. Pomaci nastali ubrzanjem podloge

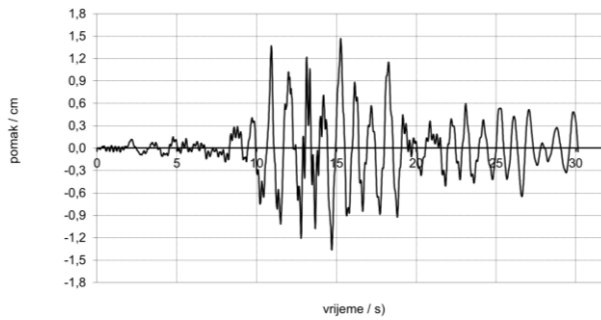
**Capano Lucano: pridržani za podlogu – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 1.10g$** 

*Slika 11. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $1.10 g$*

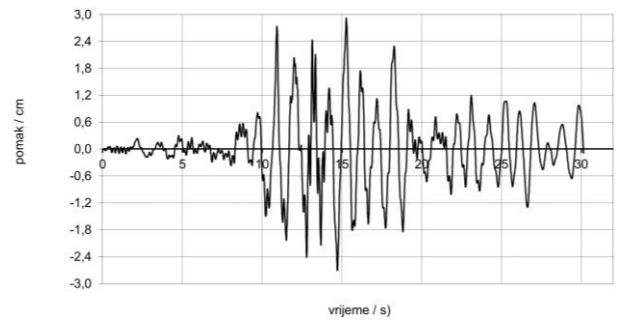
**Campano Lucano: pridržani za podlogu – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 2.00g$** 

*Slika 12. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $2.00 g$*

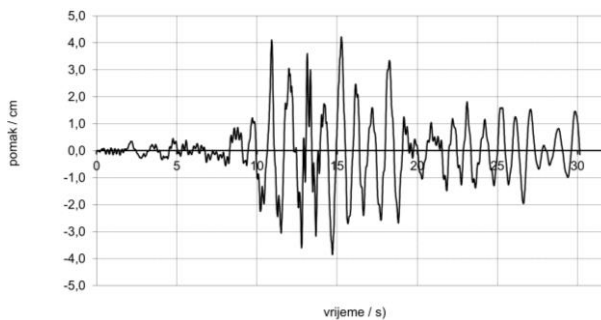
### 4.1.3. Zvonić slobodno oslonjen na krutoj podlozi



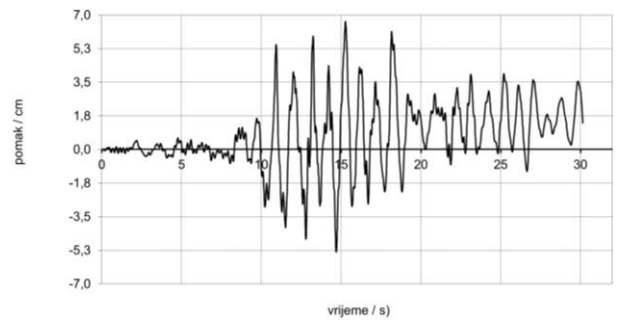
a) vršno ubrzanje 0.30 g



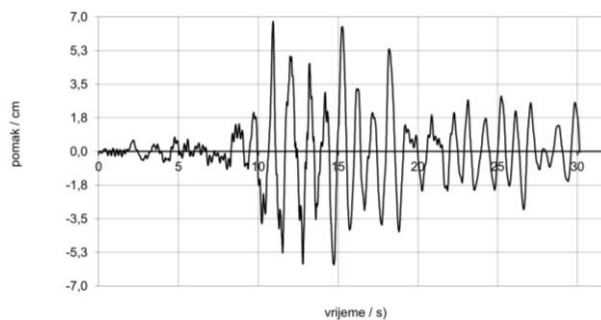
b) vršno ubrzanje 0.60 g



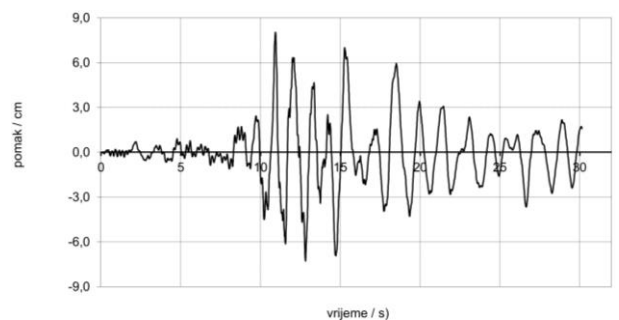
c) vršno ubrzanje 0.90 g



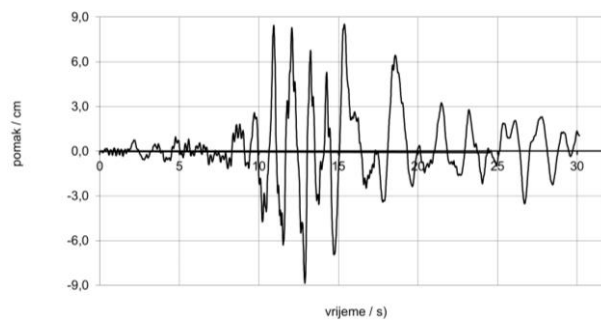
d) vršno ubrzanje 1.20 g



e) vršno ubrzanje 1.50 g

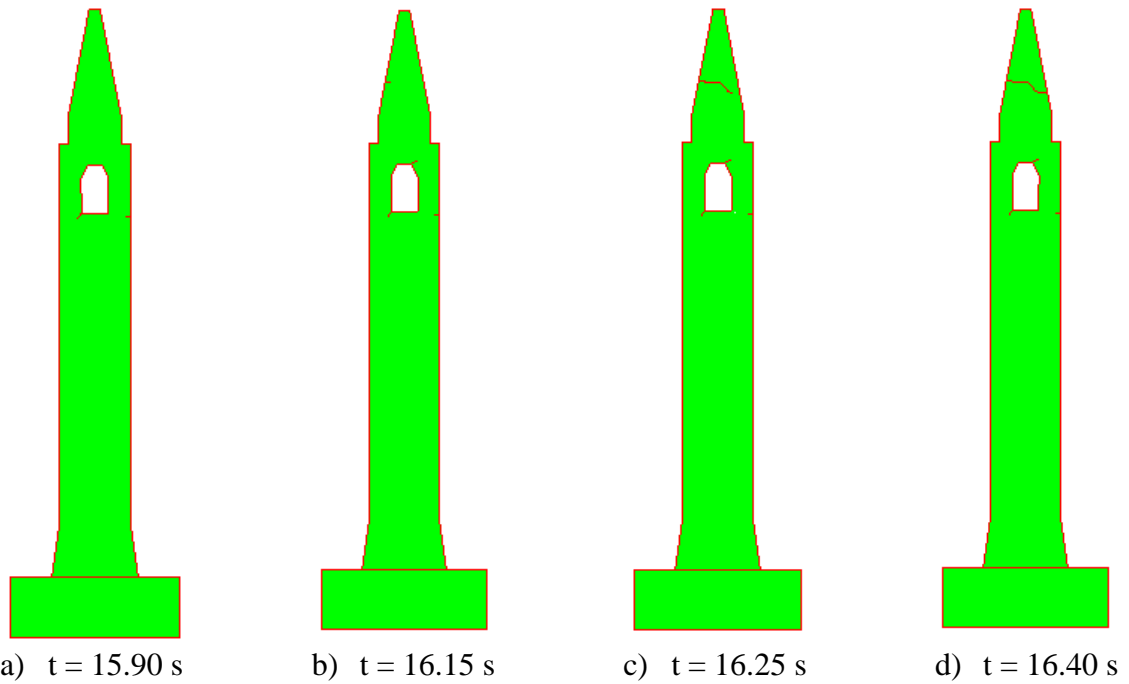


f) vršno ubrzanje 1.80 g

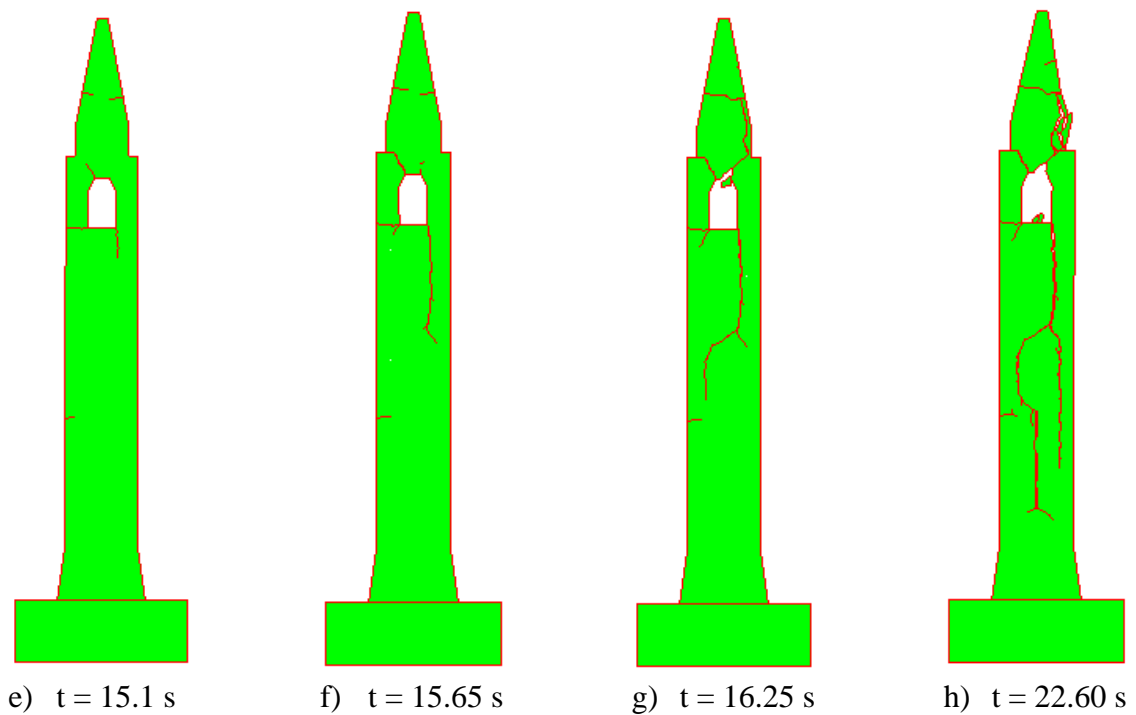


g) vršno ubrzanje 1.90 g

*Slika 13. Pomaci nastali ubrzanjem podloge*

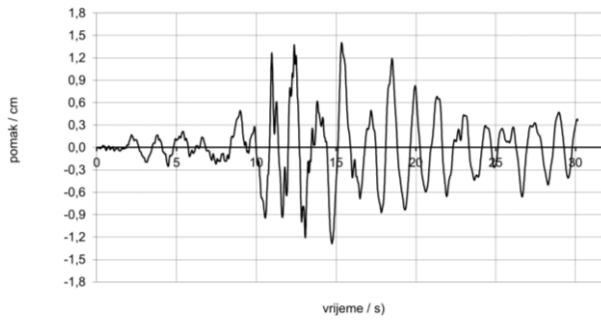
**Campano Lucano: slobodno oslonjeni – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 1.20 \text{ g}$** 

*Slika 14. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $1.20 \text{ g}$*

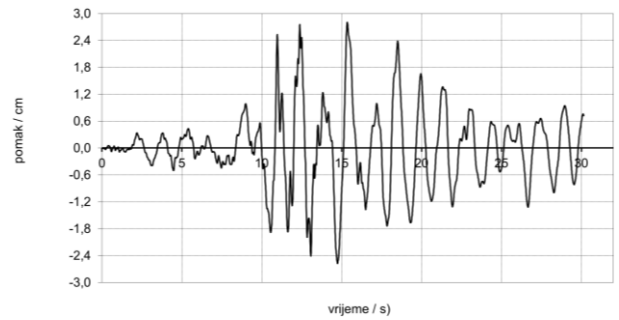
**Campano Lucano: slobodno oslonjeni – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 2.0 \text{ g}$** 

*Slika 15. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $2.00 \text{ g}$*

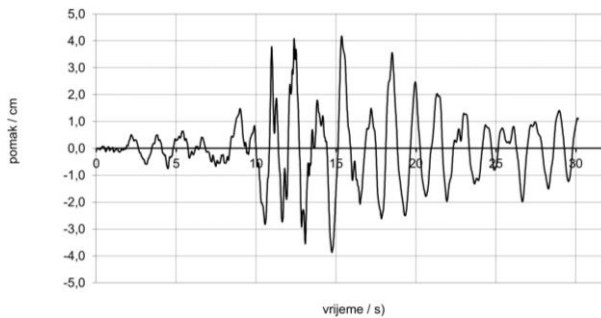
#### 4.1.4. Zvonik ukopan u podlogu



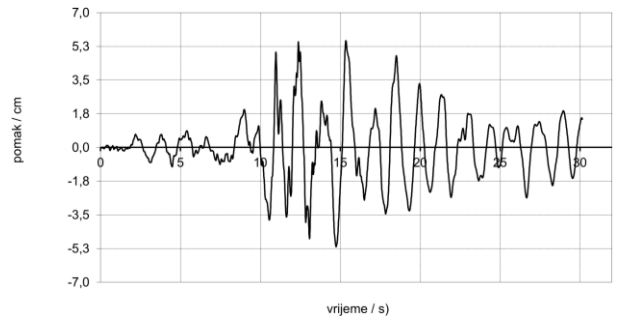
a) vršno ubrzanje 0.30 g



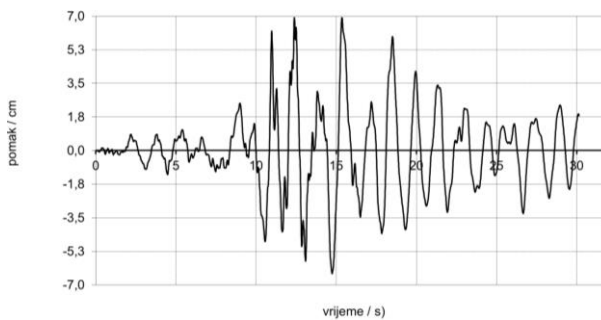
b) vršno ubrzanje 0.60 g



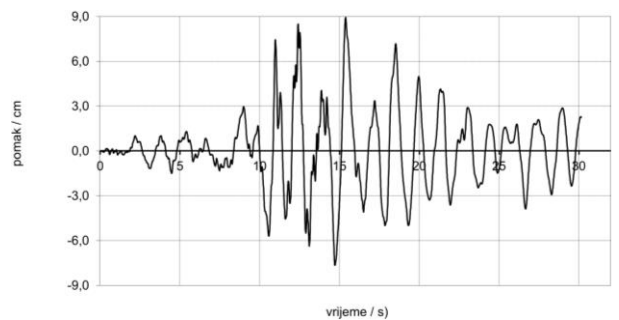
c) vršno ubrzanje 0.90 g



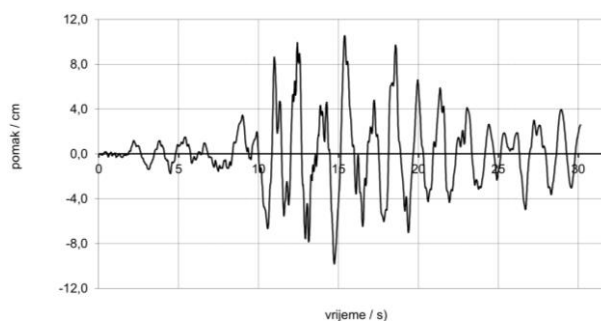
d) vršno ubrzanje 1.20 g



e) vršno ubrzanje 1.50 g



f) vršno ubrzanje 1.80 g

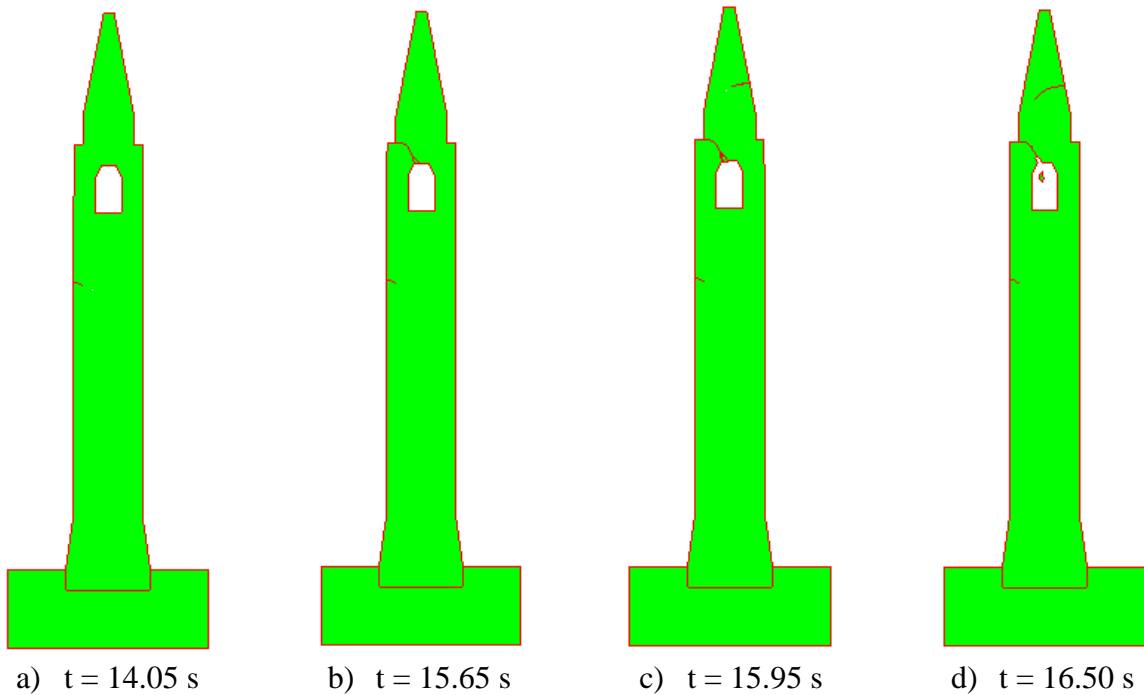


g) vršno ubrzanje 2.10 g

**Slika 16.** Pomaci nastali ubrzanjem podloge

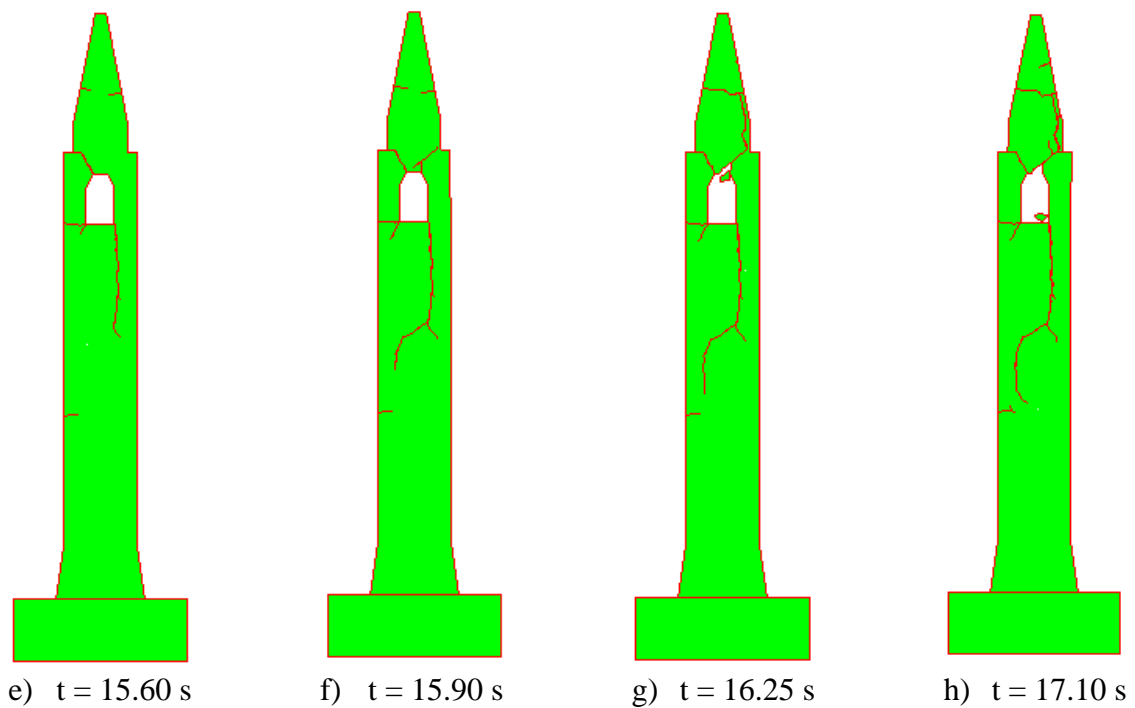


**Campano Lucano: zvonik ukopan u podlogu**– nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 1.80 g$



*Slika 17. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $1.80 g$*

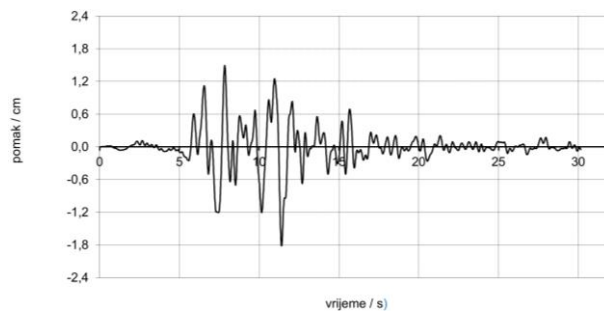
**Campano Lucano: zvonik ukopan u podlogu**–nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 2.20g$



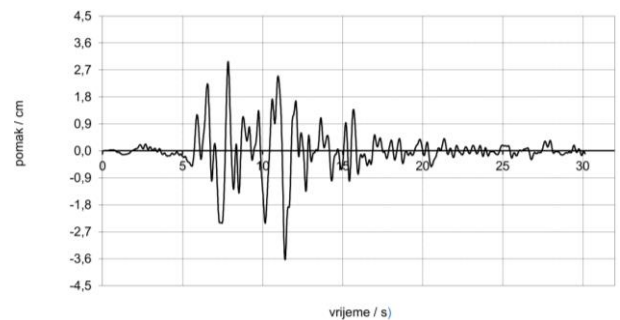
*Slika 18. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $2.20 g$*

## 4.2. Rezultati analiza zvonika izloženog potresu Petrovac

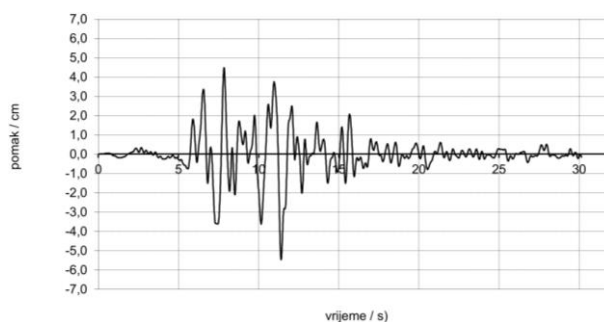
### 4.2.1. Zvonik slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi



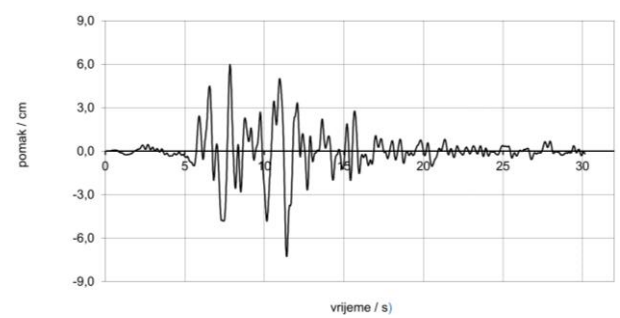
a) vršno ubrzanje 0.05 g



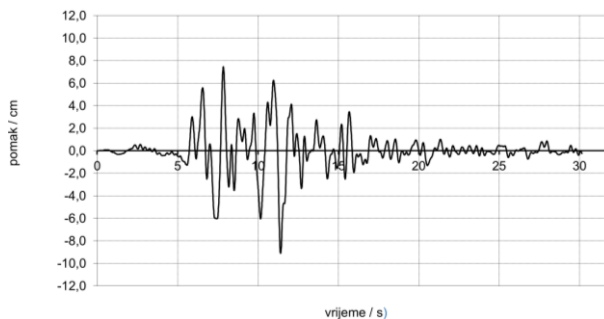
b) vršno ubrzanje 0.10 g



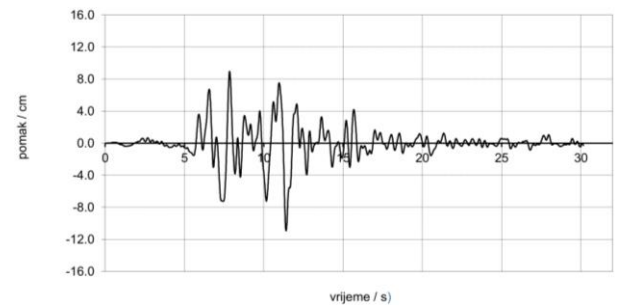
c) vršno ubrzanje 0.15 g



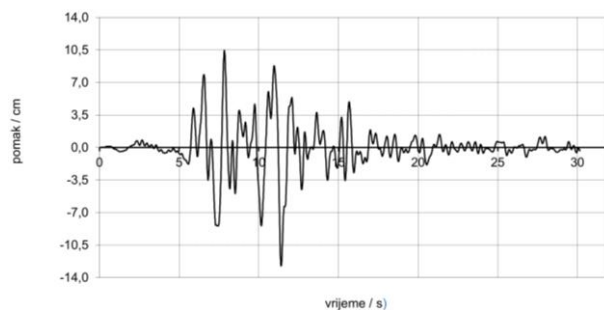
d) vršno ubrzanje 0.20 g



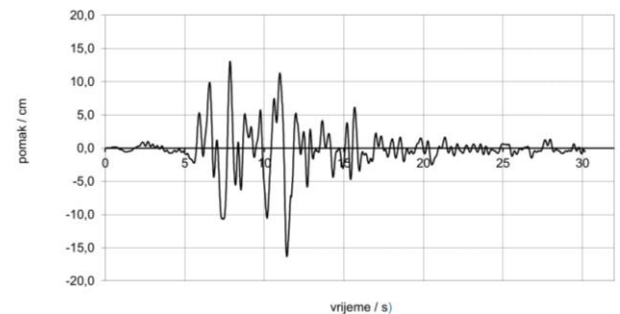
e) vršno ubrzanje 0.25 g



f) vršno ubrzanje 0.30 g



g) vršno ubrzanje 0.35 g

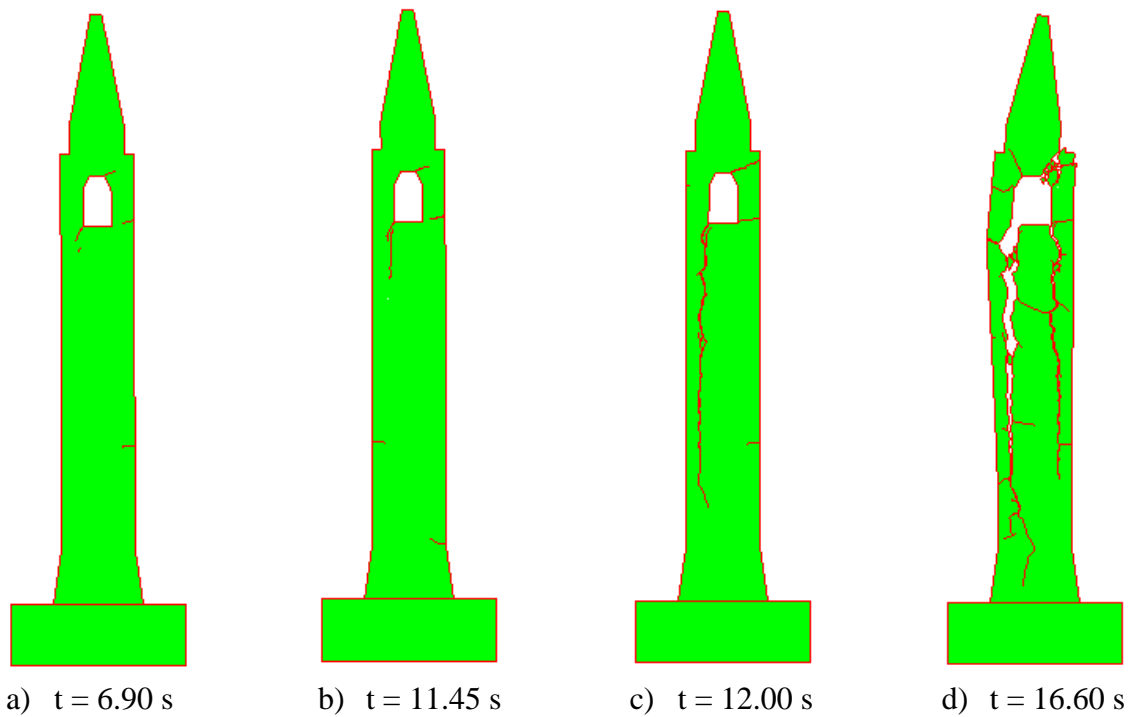


h) vršno ubrzanje 0.44 g

**Slika 19.** Pomaci nastali ubrzanjem podloge

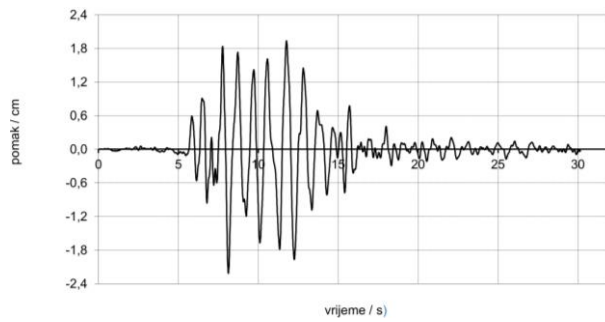
**Petrovac: slobodno oslonjeni** – Prva pukotina nastaje za ubrzanje  $a = 0.40 g$  u 11.5 s.

**Petrovac: slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.45 g$

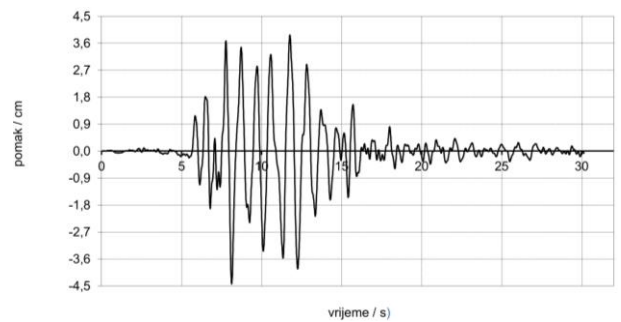


*Slika 20. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.45 g$*

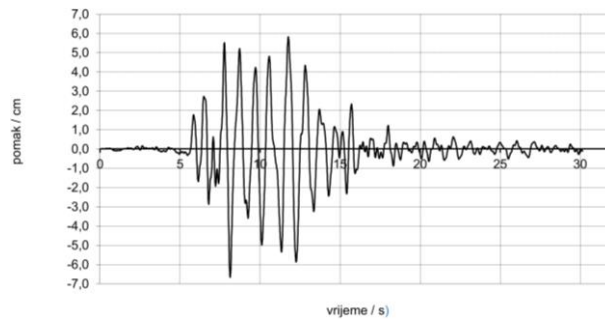
#### 4.2.2. Zvonik pridrzan za podlogu



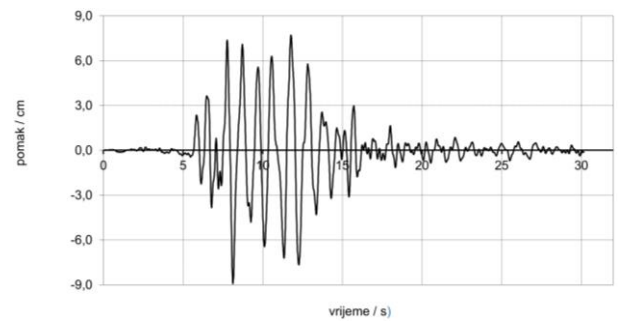
a) vršno ubrzanje 0.05 g



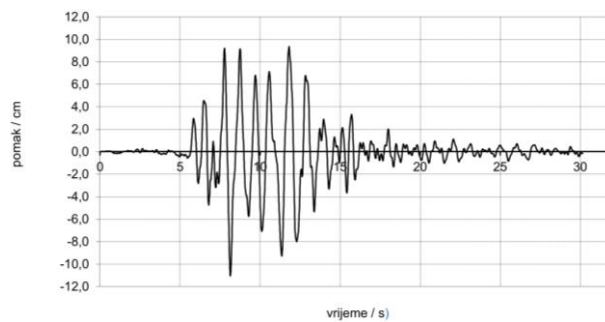
b) vršno ubrzanje 0.10 g



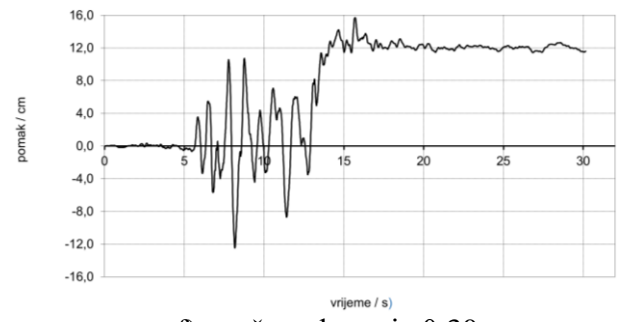
c) vršno ubrzanje 0.15 g



d) vršno ubrzanje 0.20 g



e) vršno ubrzanje 0.25 g

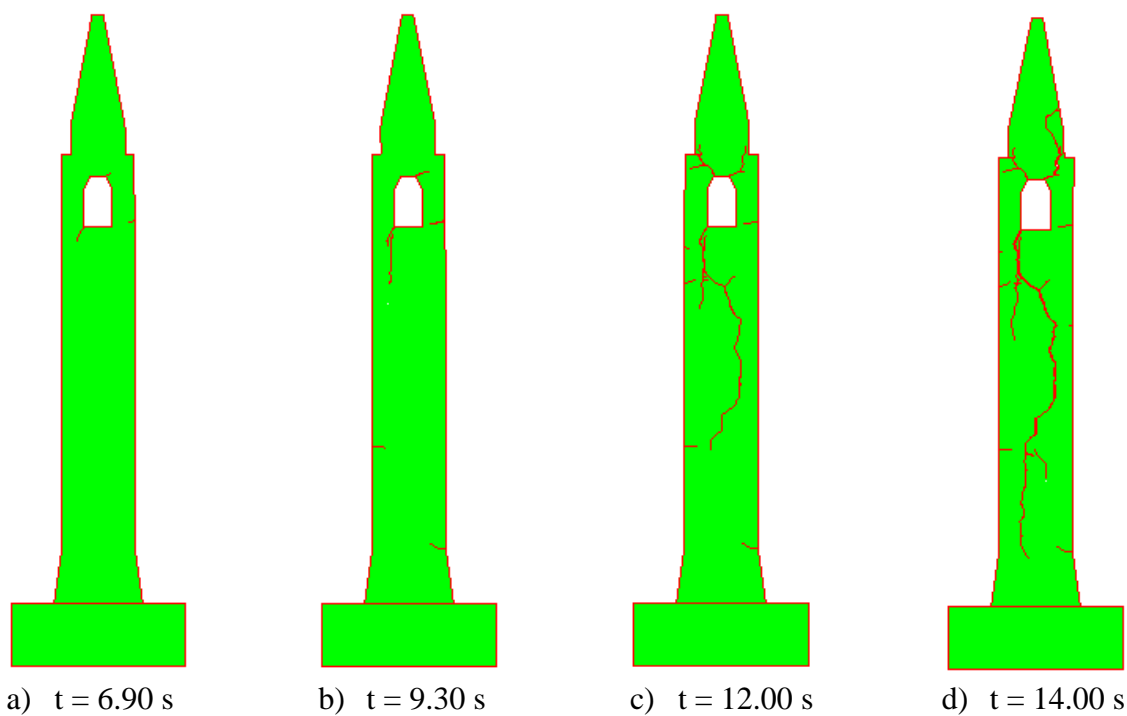


f) vršno ubrzanje 0.30 g

*Slika 21. Pomaci nastali ubrzanjem podloge*

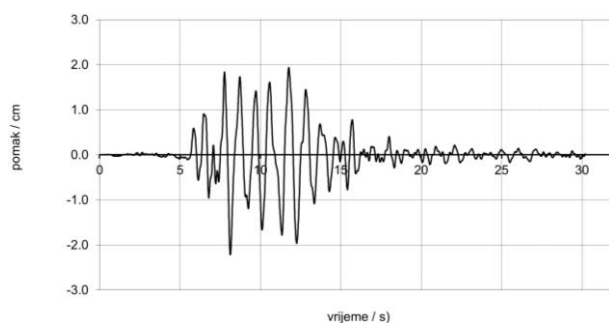
**Petrovac: pridržani za podlogu** – Prva pukotina nastaje za ubrzanje  $a = 0.25 \text{ g}$  u 8.25.s.

**Petrovac: pridržani za podlogu** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.30 \text{ g}$

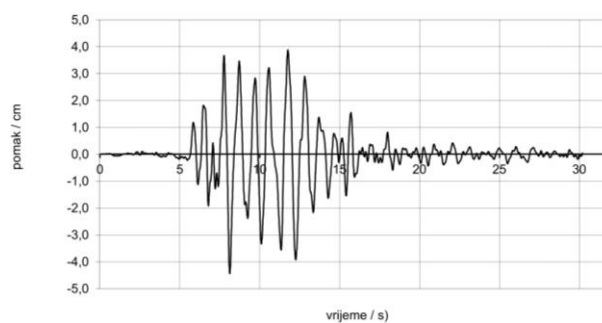


*Slika 22. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje 0.30 g*

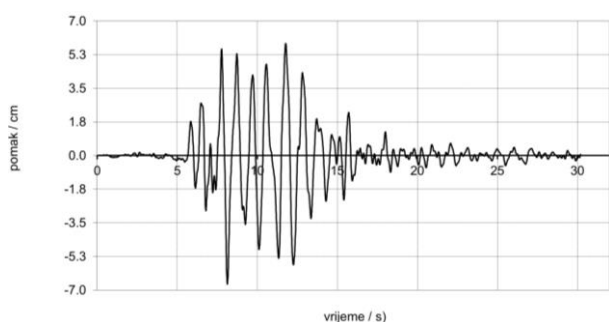
### 4.2.3. Zvonik slobodno oslonjen na krutoj podlozi



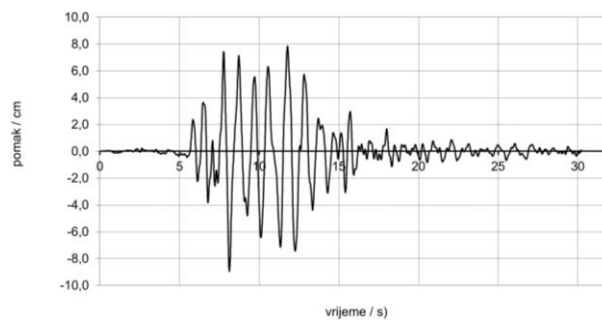
a) vršno ubrzanje 0.05 g



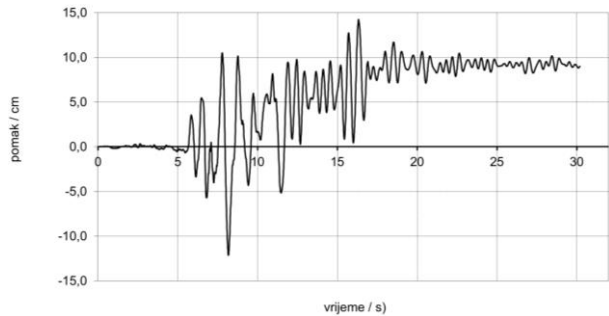
b) vršno ubrzanje 0.10 g



c) vršno ubrzanje 0.15 g



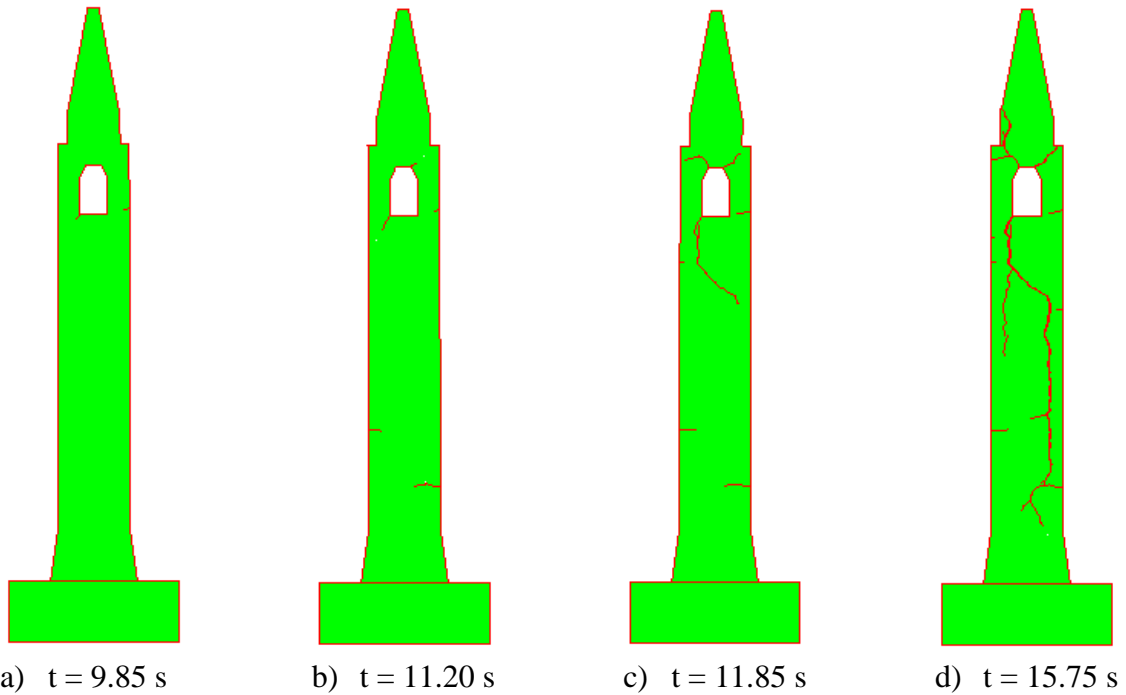
d) vršno ubrzanje 0.20 g



e) vršno ubrzanje 0.30 g

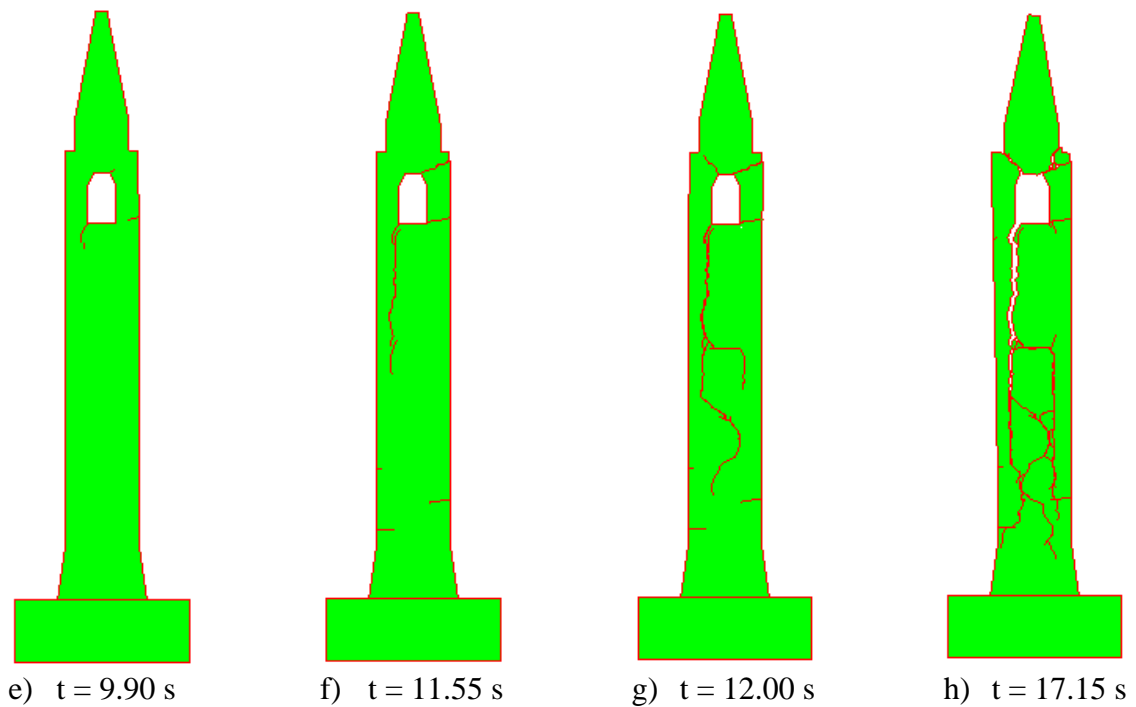
*Slika 23. Pomaci nastali ubrzanjem podloge*

**Petrovac: slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.30 g$



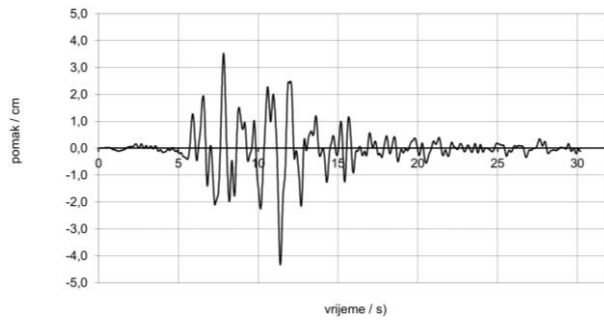
*Slika 24. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.30 g$*

**Petrovac: slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.32 g$

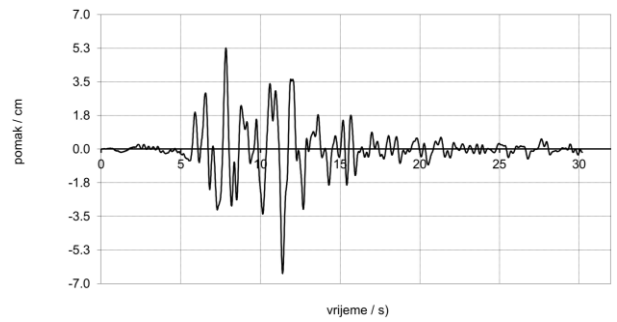


*Slika 25. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.32 g$*

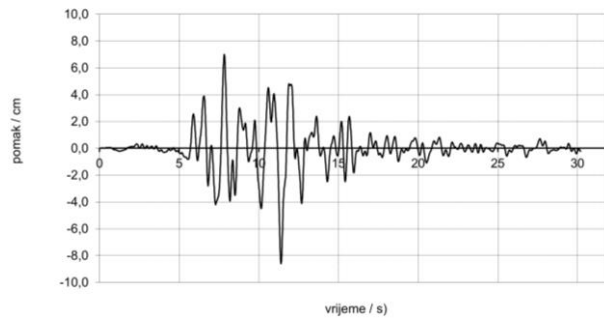
## 4.2.4. Zvonik ukopan u podlogu



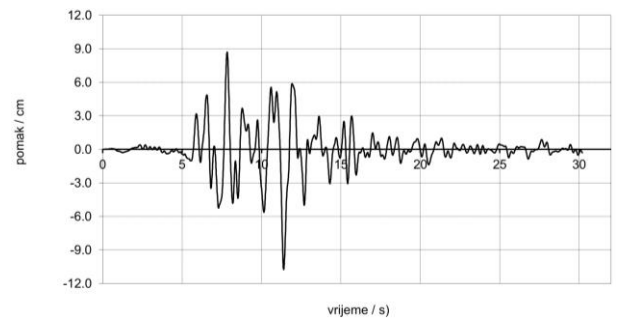
a) vršno ubrzanje 0.10 g



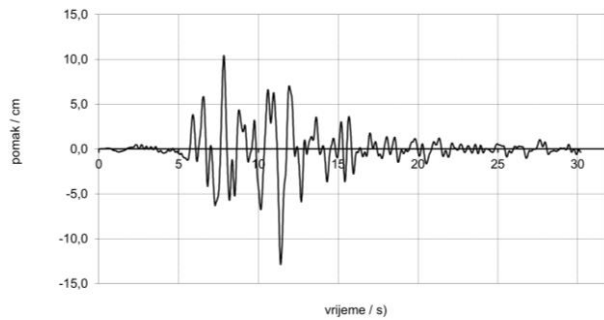
b) vršno ubrzanje 0.15 g



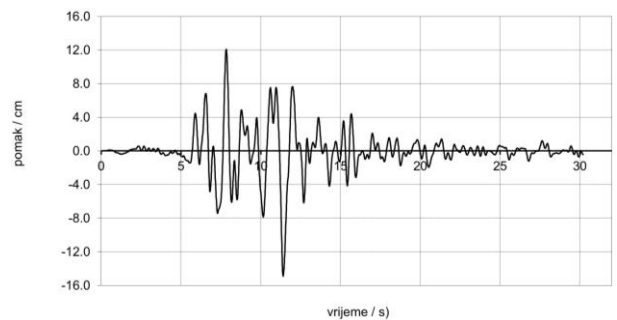
c) vršno ubrzanje 0.20 g



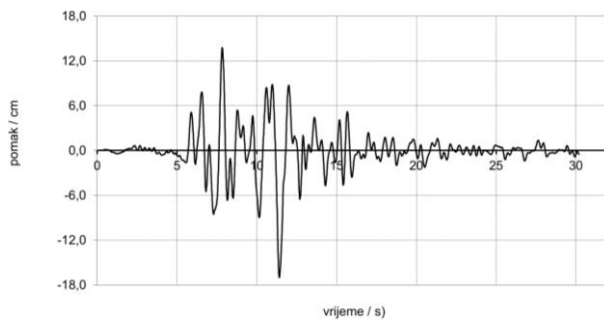
d) vršno ubrzanje 0.25 g



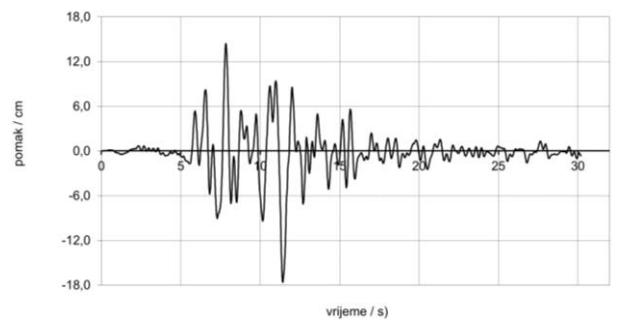
e) vršno ubrzanje 0.30 g



f) vršno ubrzanje 0.35 g



g) vršno ubrzanje 0.40 g

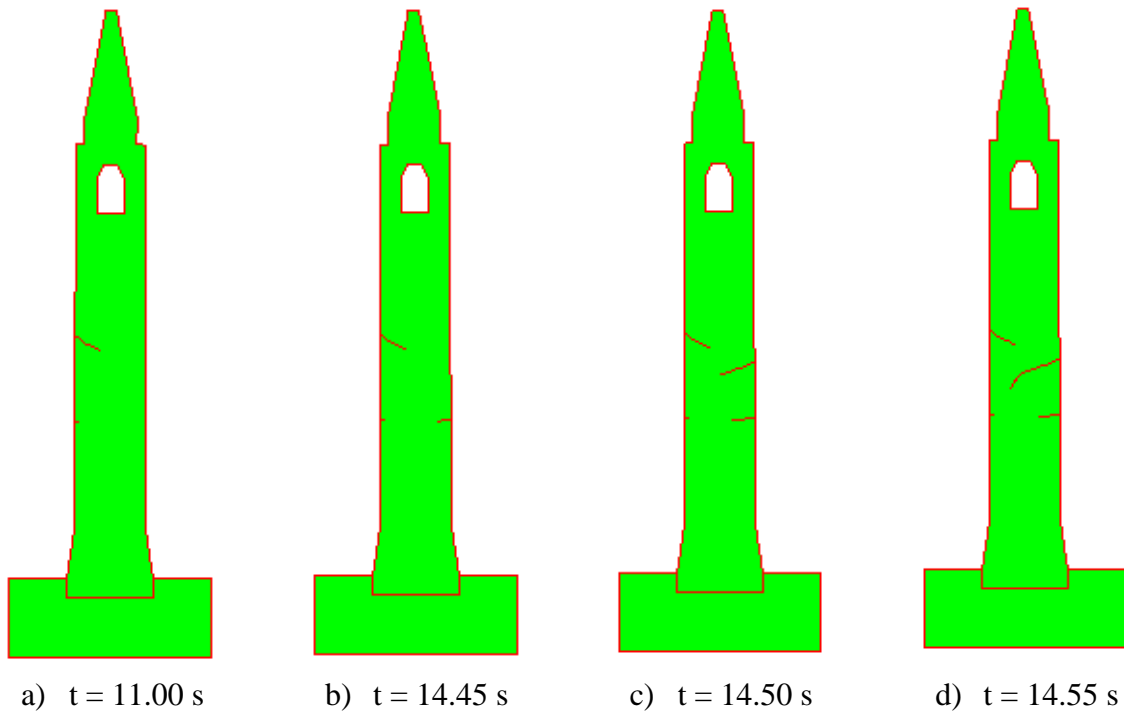


h) vršno ubrzanje 0.42 g

Slika 26. Pomaci nastali ubrzanjem podloge

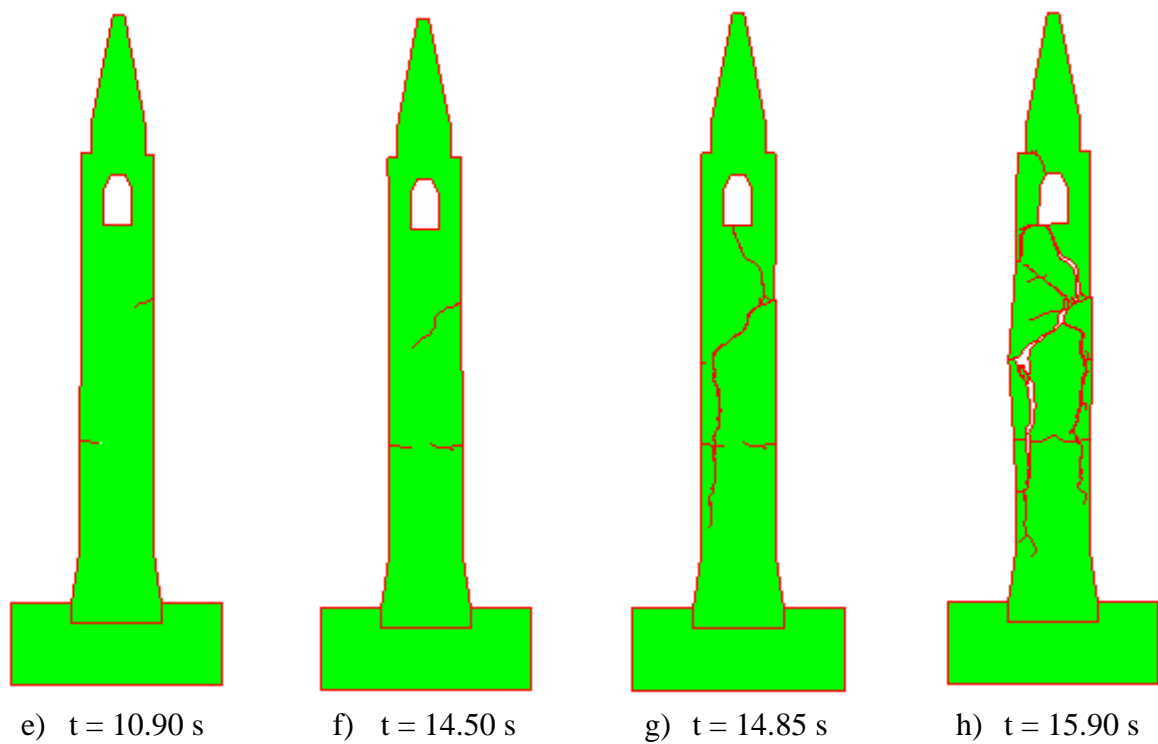


**Petrovac: zvonik ukopan u podlogu** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.40 \text{ g}$



*Slika 27. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.40 \text{ g}$*

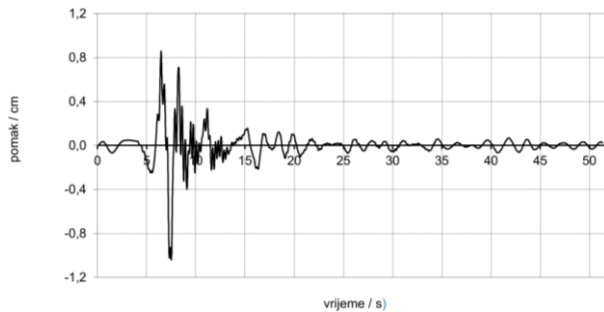
**Petrovac: zvonik ukopan u podlogu** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.44 \text{ g}$



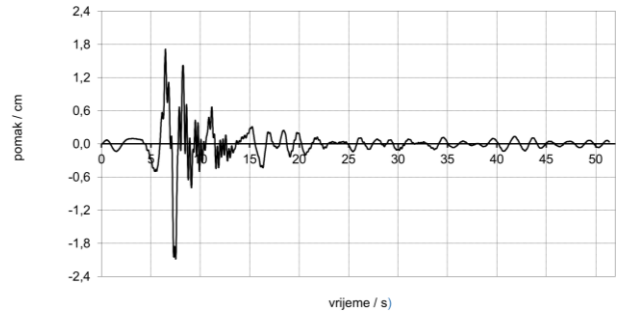
*Slika28. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.44 \text{ g}$*

### 4.3. Rezultati analiza zvonika izloženog potresu South Iceland

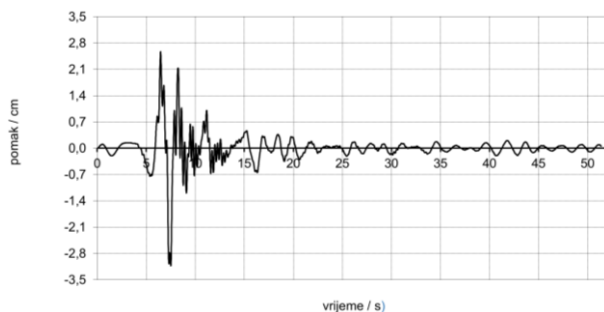
#### 4.3.1. Zvonik slobodno oslonjen na elastičnoj podlozi



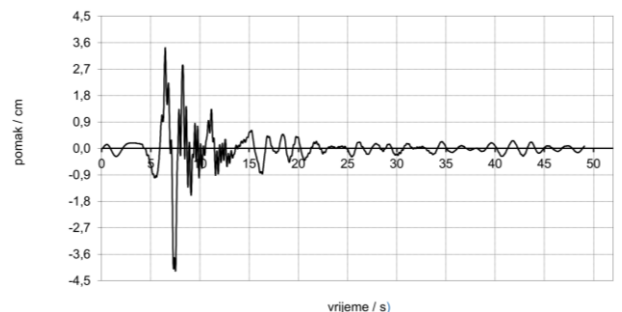
a) vršno ubrzanje 0.10 g



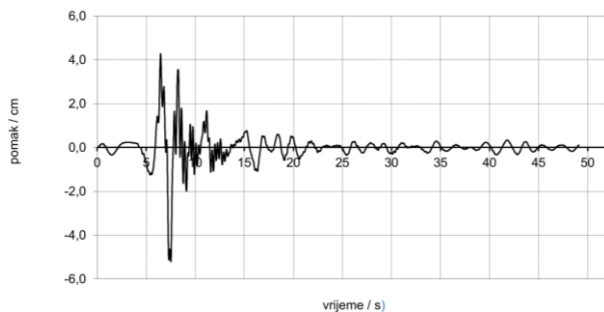
b) vršno ubrzanje 0.20 g



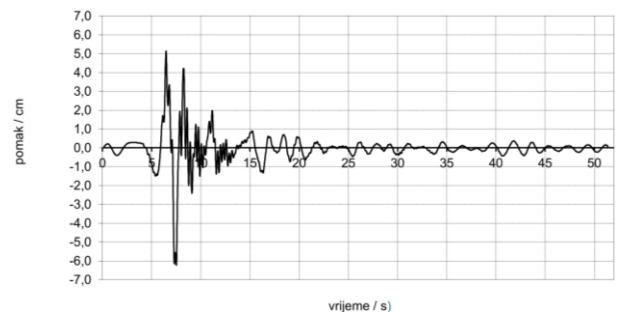
c) vršno ubrzanje 0.30 g



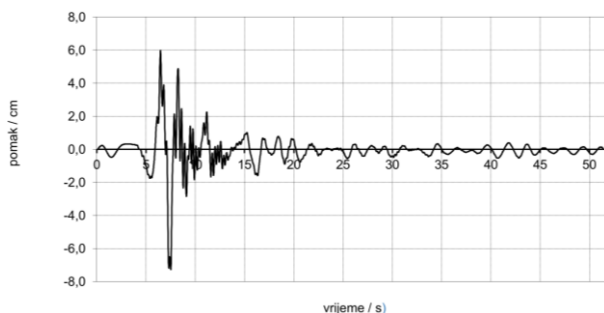
d) vršno ubrzanje 0.40 g



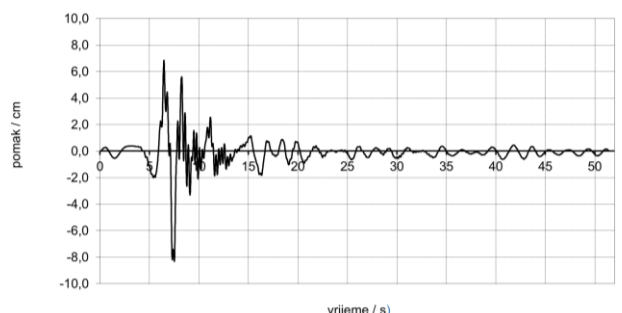
e) vršno ubrzanje 0.50 g



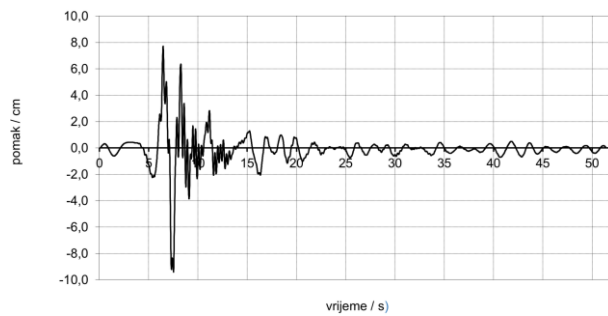
f) vršno ubrzanje 0.60 g



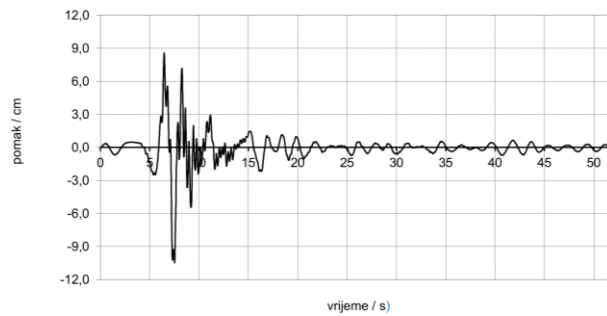
g) vršno ubrzanje 0.70 g



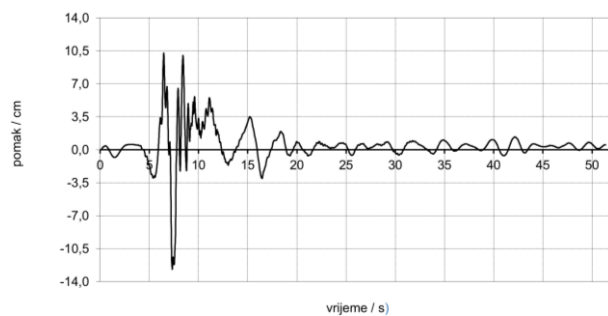
h) vršno ubrzanje 0.80 g



i) vršno ubrzanje 0.90 g



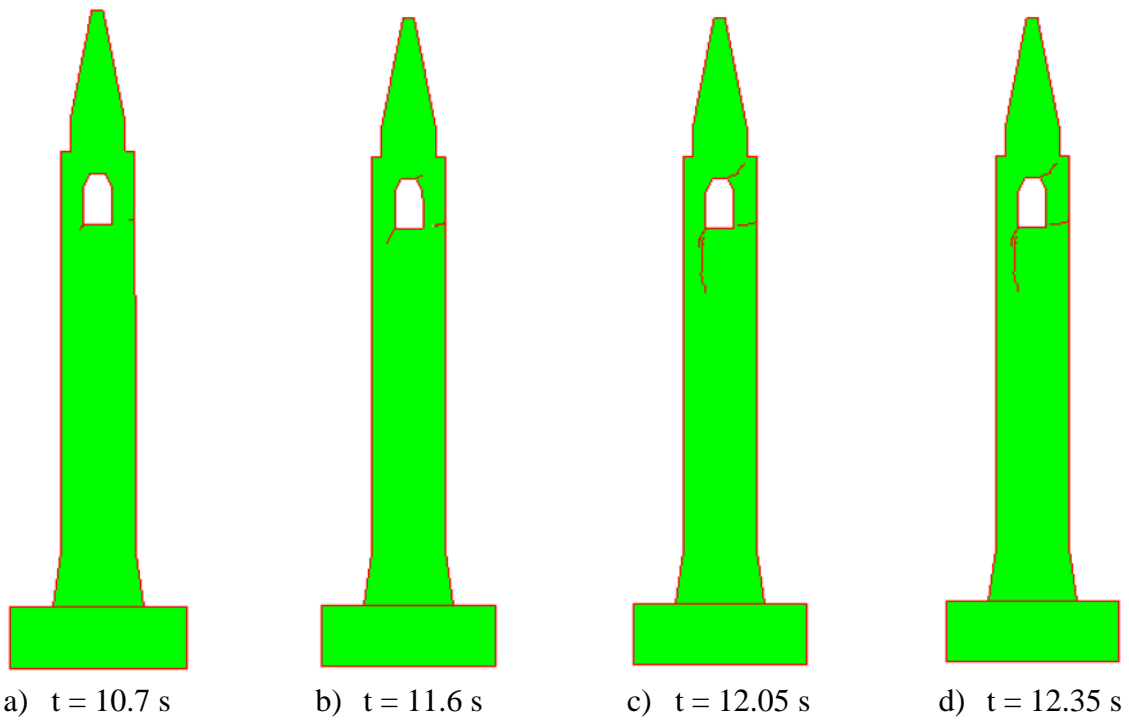
j) vršno ubrzanje 1.00 g



k) vršno ubrzanje 1.20 g

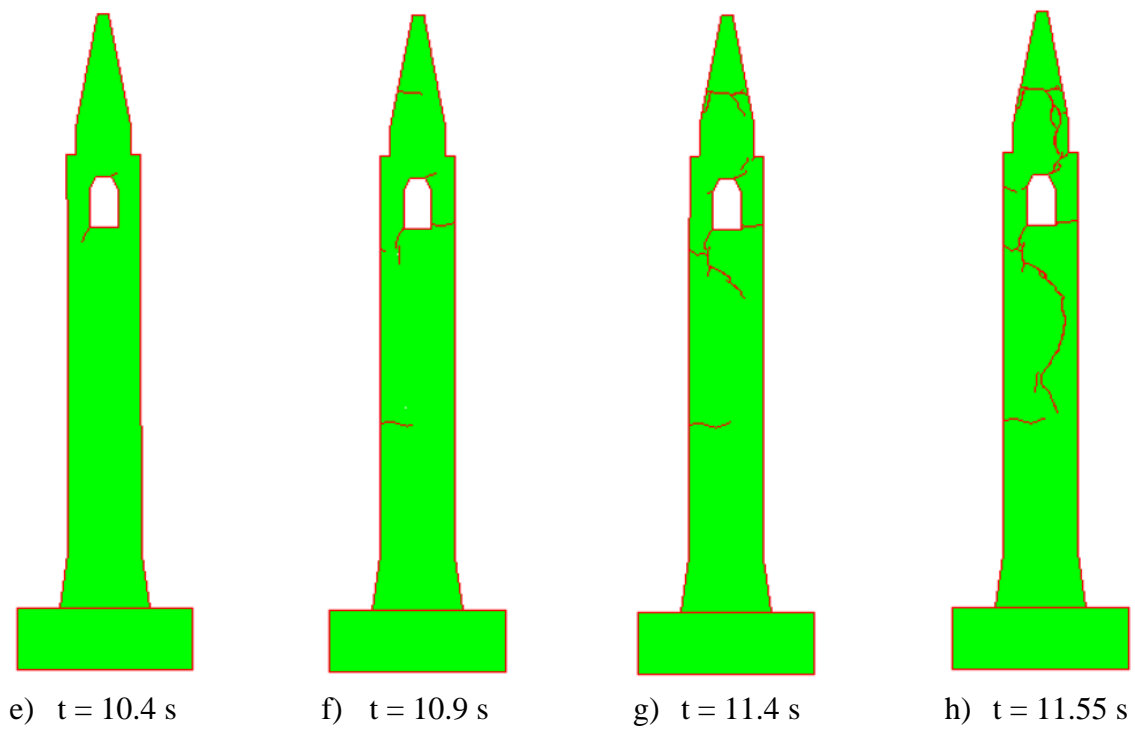
**Slika 29.** Pomaci nastali ubrzanjem podloge

**South Iceland: slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 1.00 \text{ g}$



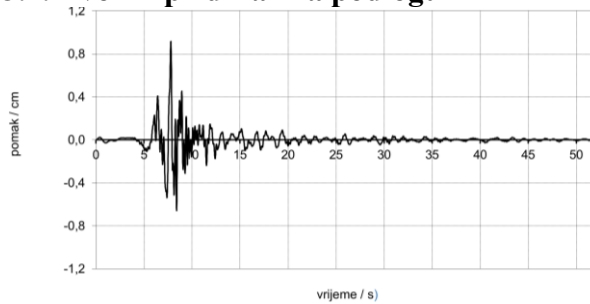
*Slika 30. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $1.00 \text{ g}$*

**South Iceland: slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 1.21 \text{ g}$

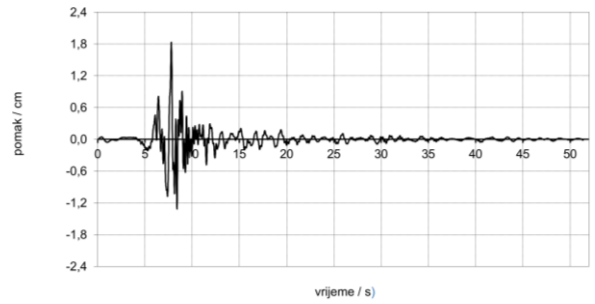


*Slika 31. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $1.21 \text{ g}$*

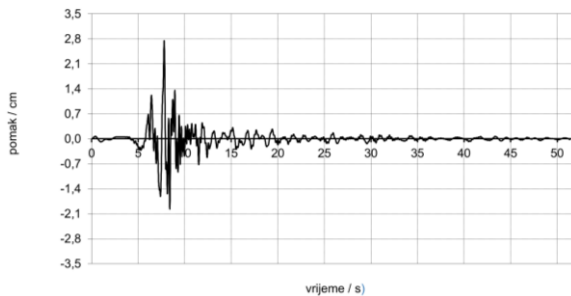
## 4.3.2. Zvonik pridrzan za podlogu



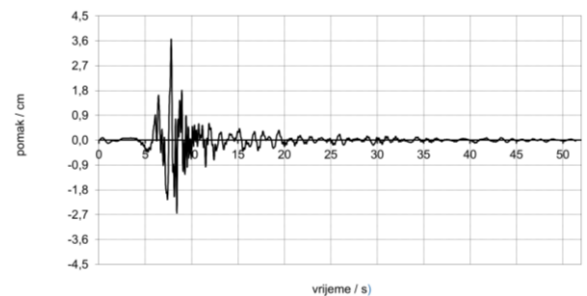
a) vršno ubrzanje 0.10 g



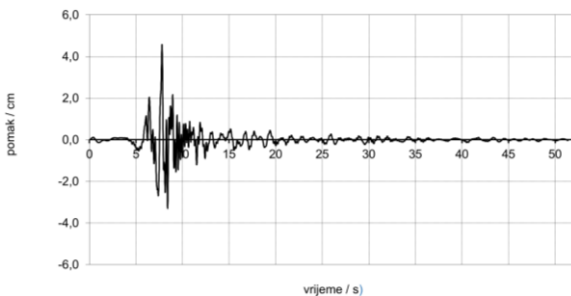
b) vršno ubrzanje 0.20 g



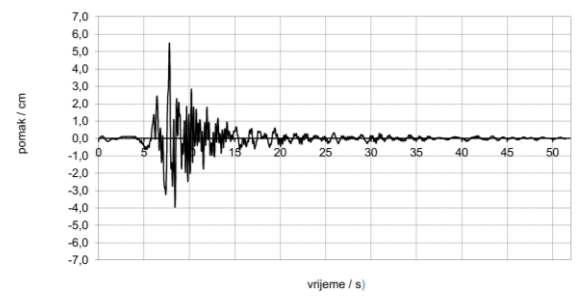
c) vršno ubrzanje 0.30 g



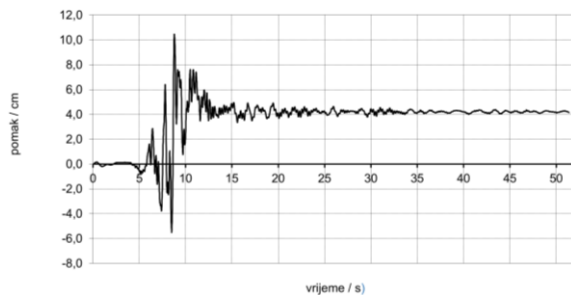
d) vršno ubrzanje 0.40 g



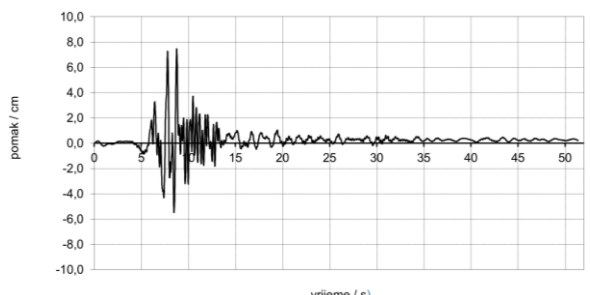
e) vršno ubrzanje 0.50 g



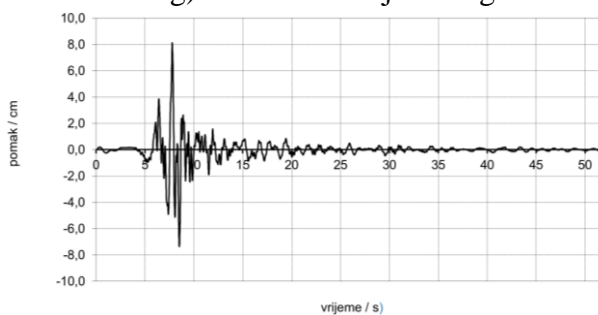
f) vršno ubrzanje 0.60 g



g) vršno ubrzanje 0.70 g



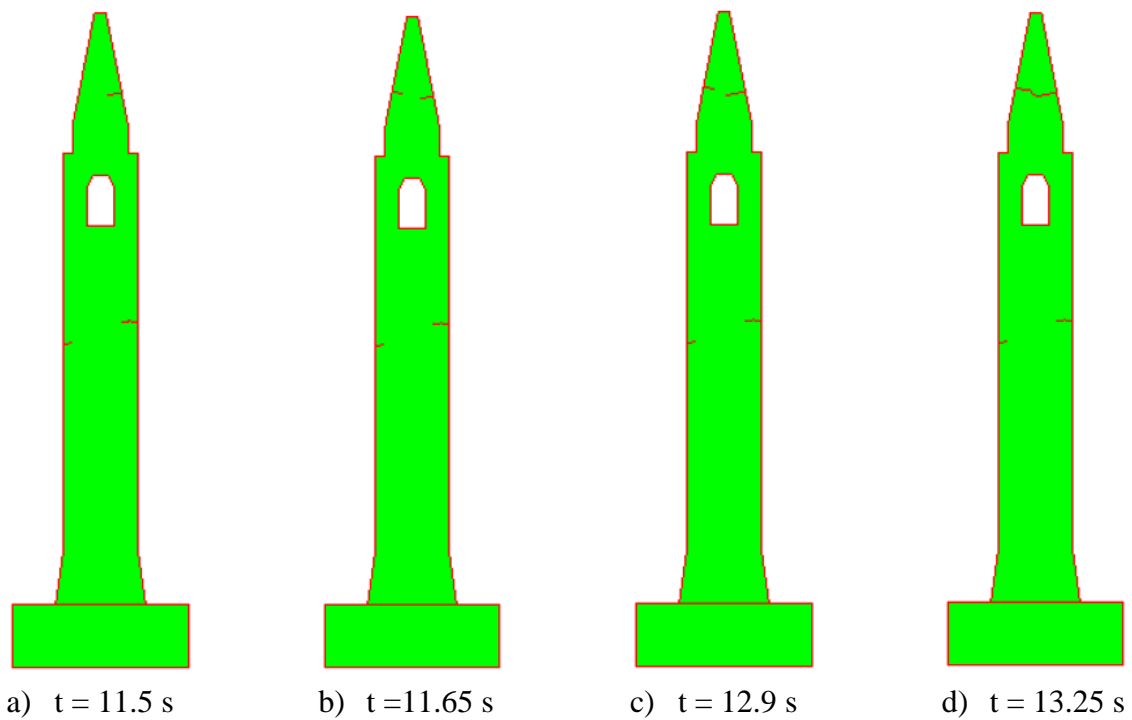
h) vršno ubrzanje 0.80 g



i) vršno ubrzanje 0.90 g

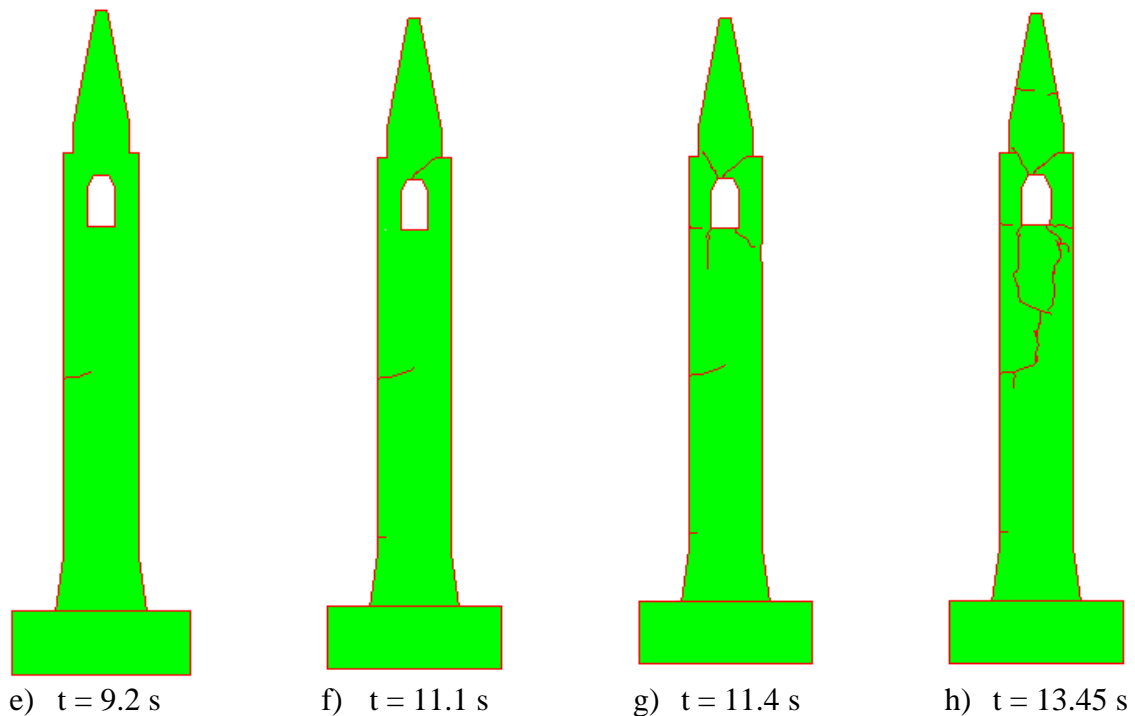
Slika 32. Pomaci nastali ubrzanjem podloge

**South Iceland: pridržani za podlogu** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.60 \text{ g}$



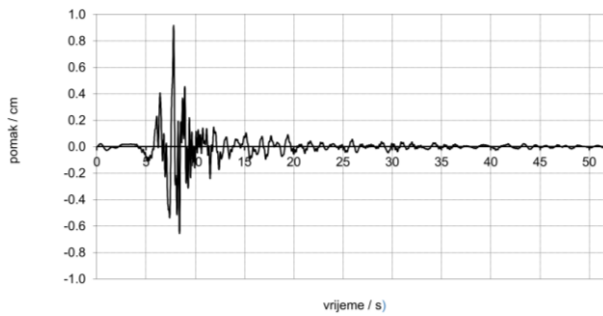
*Slika 33. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.60 \text{ g}$*

**South Iceland: pridržani za podlogu** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.96 \text{ g}$

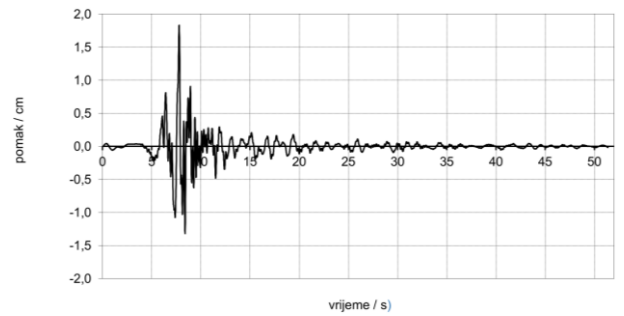


*Slika 34. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje  $0.96 \text{ g}$*

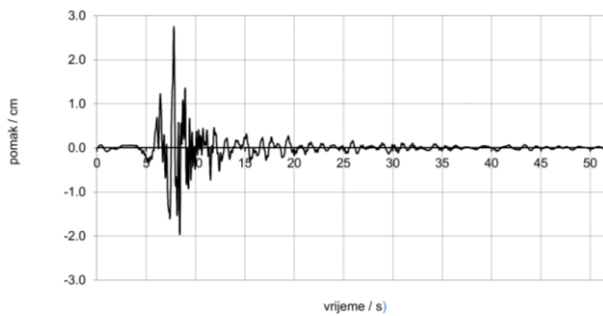
## 4.3.3. Zvonik slobodno oslonjen na krutoj podlozi



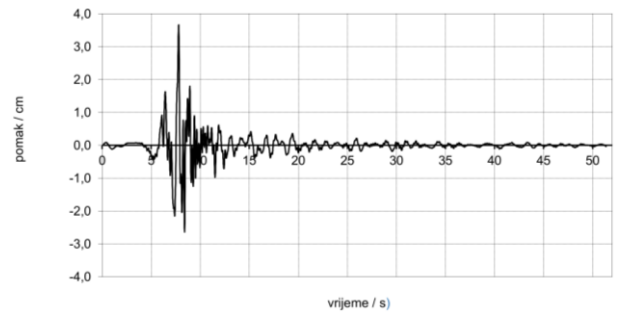
a) vršno ubrzanje 0.10 g



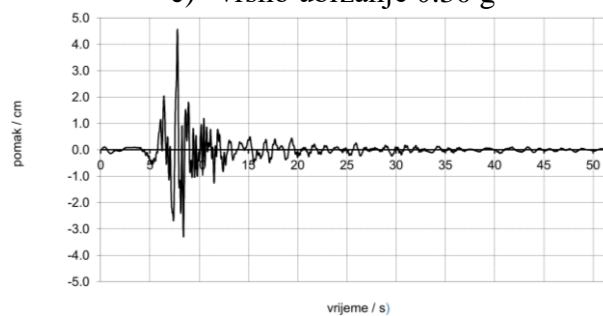
b) vršno ubrzanje 0.20 g



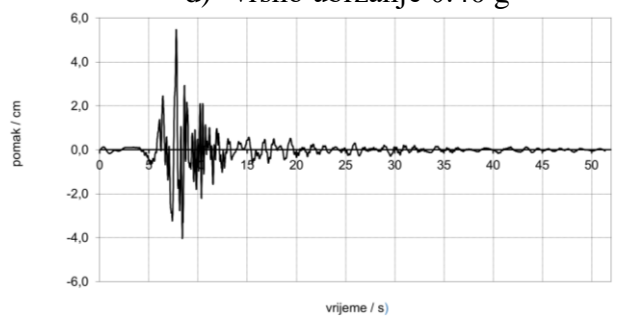
c) vršno ubrzanje 0.30 g



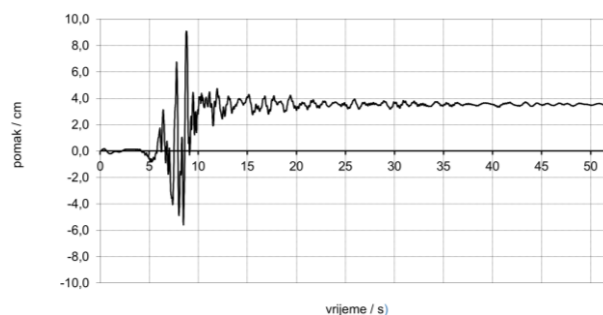
d) vršno ubrzanje 0.40 g



e) vršno ubrzanje 0.50 g



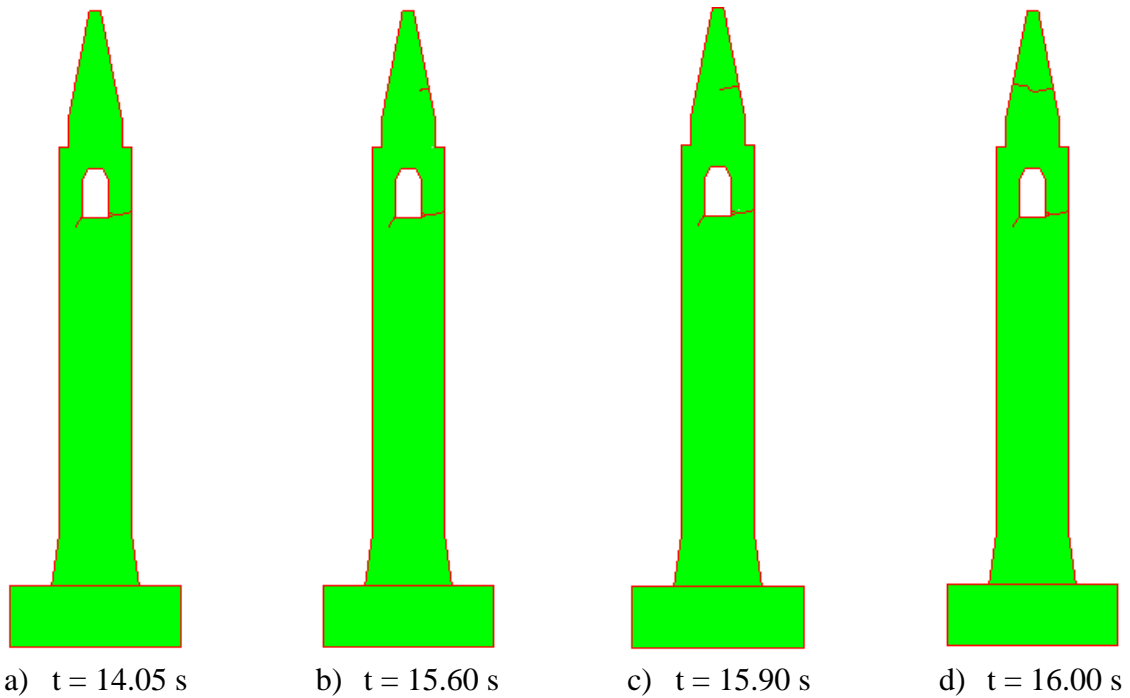
f) vršno ubrzanje 0.60 g



g) vršno ubrzanje 0.75 g

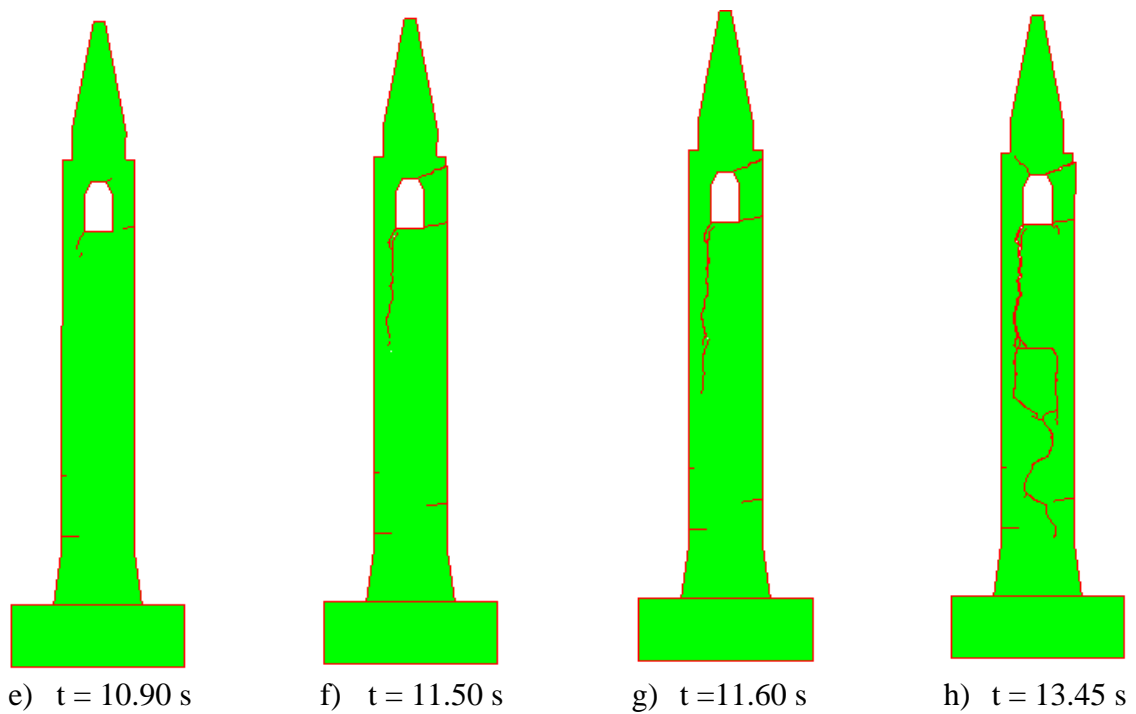
Slika 35. Pomaci nastali ubrzanjem podloge

**South Iceland: slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.60 g$



*Slika 36. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje 0.60 g*

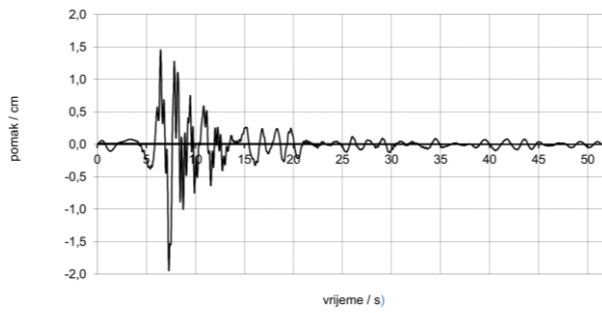
**South Iceland : slobodno oslonjeni** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 0.80 g$



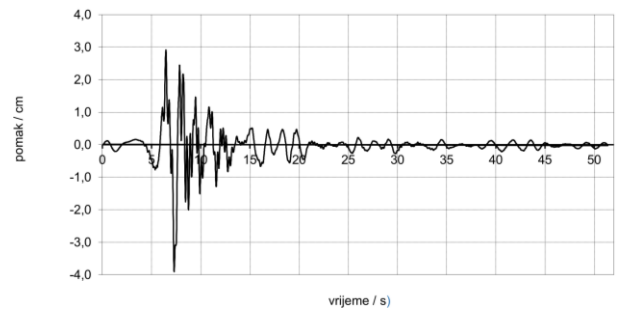
*Slika 37. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje 0.80 g*



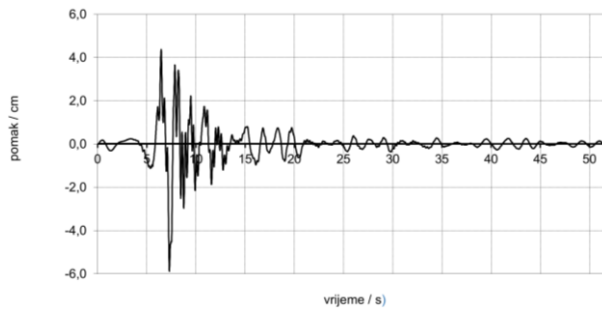
#### 4.3.4. Zvonik ukopan u podlogu



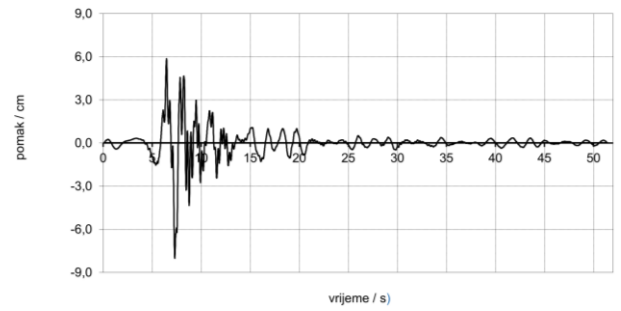
a) vršno ubrzanje 0.20 g



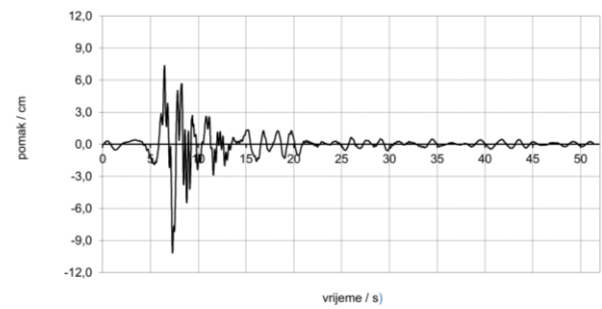
b) vršno ubrzanje 0.40 g



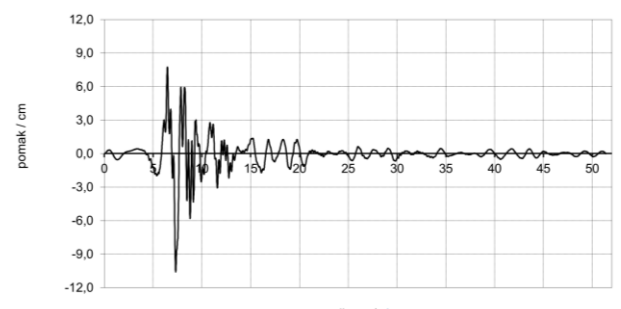
c) vršno ubrzanje 0.60 g



d) vršno ubrzanje 0.80 g



e) vršno ubrzanje 1.00 g

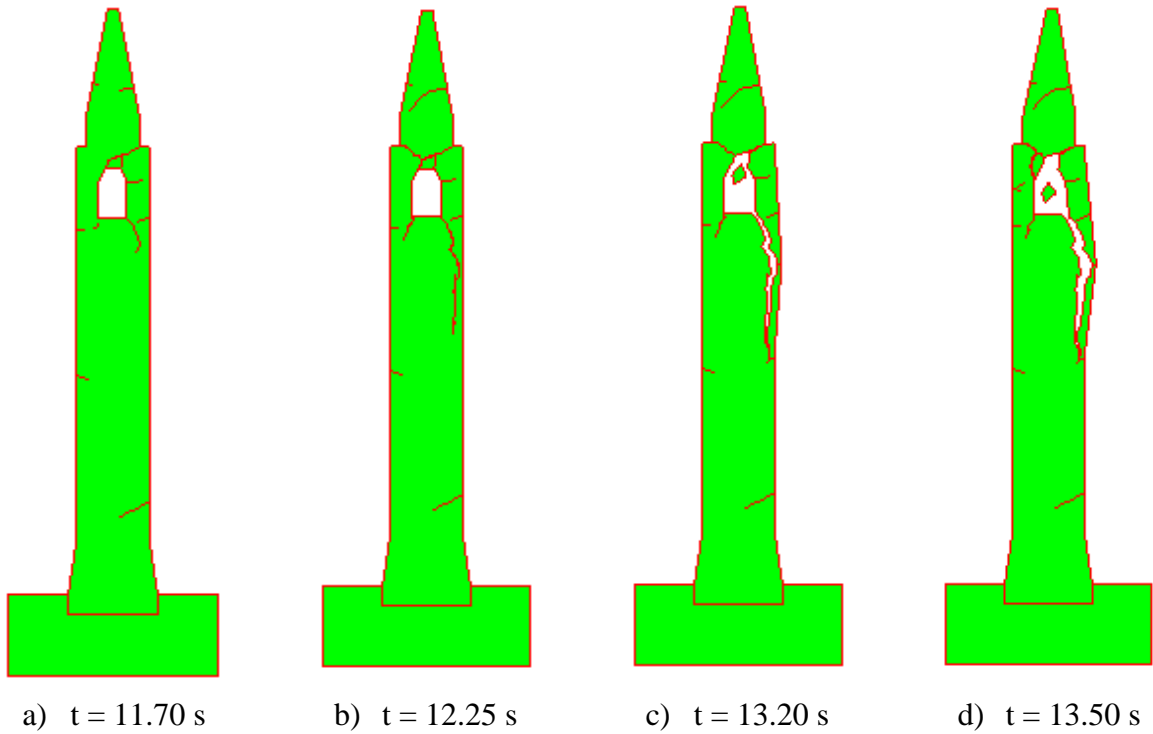


f) vršno ubrzanje 1.05 g

*Slika 38. Pomaci nastali ubrzanjem podloge*

**South Iceland: zvonik ukopan u podlogu** – Prva pukotina nastaje za ubrzanje  $a = 1.00g$  u 14.05.s.

**South Iceland: zvonik ukopan u podlogu** – nastanak i širenje pukotina za ubrzanje  $a = 1.10 g$

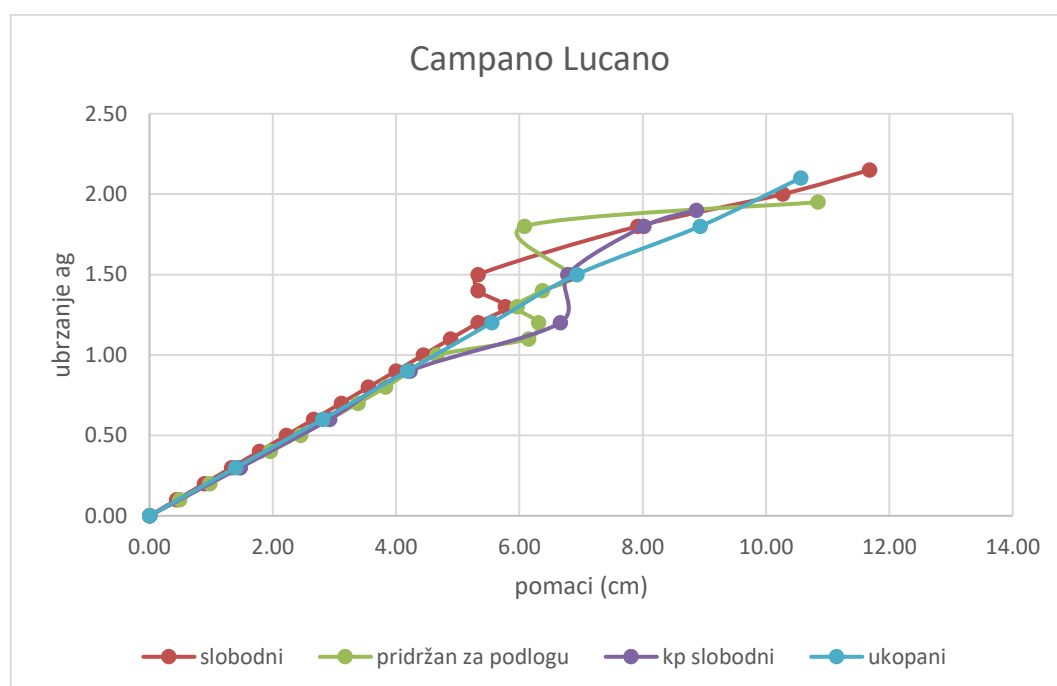


*Slika 39. Zvonik izložen djelovanju potresa za ubrzanje 1.10 g*

## 5. ANALIZA NUMERIČKIH REZULTATA I ZAKLJUČCI

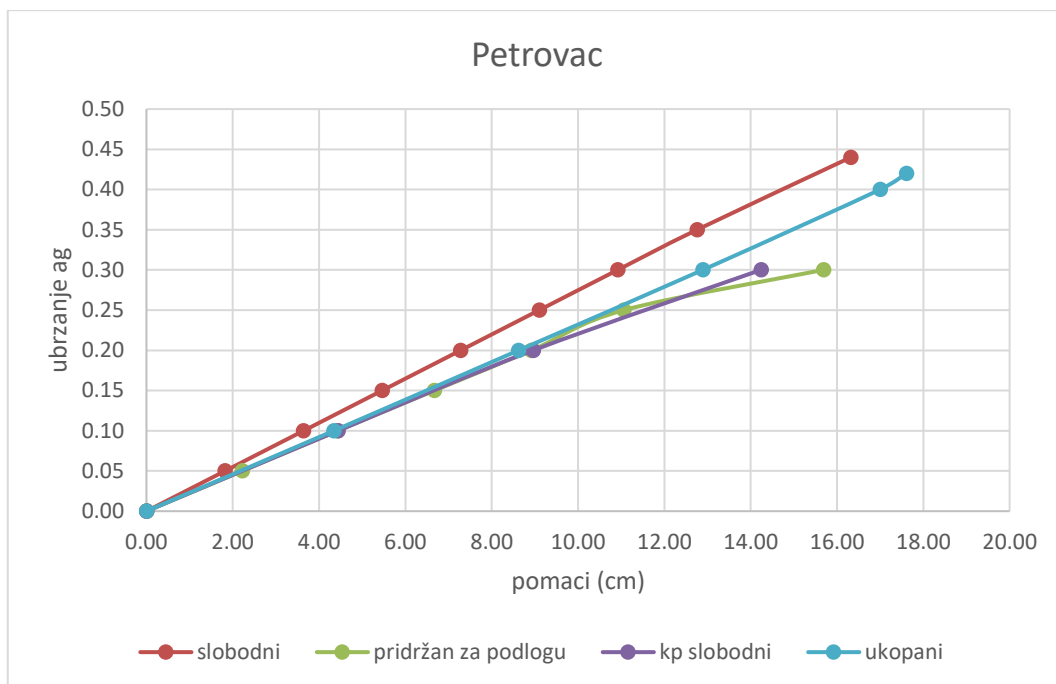
### 5.1. Usporedba četiri rubna uvjeta

U nastavku su prikazani rezultati u krivuljnom obliku na način da su na osi ordinate prikazana vršna ubrzanja za koje se vršio proračun, a na osi apcise pomaci izraženi u centrimetrima. Grafički uspoređujemo rezultate za sva tri realna potresa i četiri rubna uvjeta.



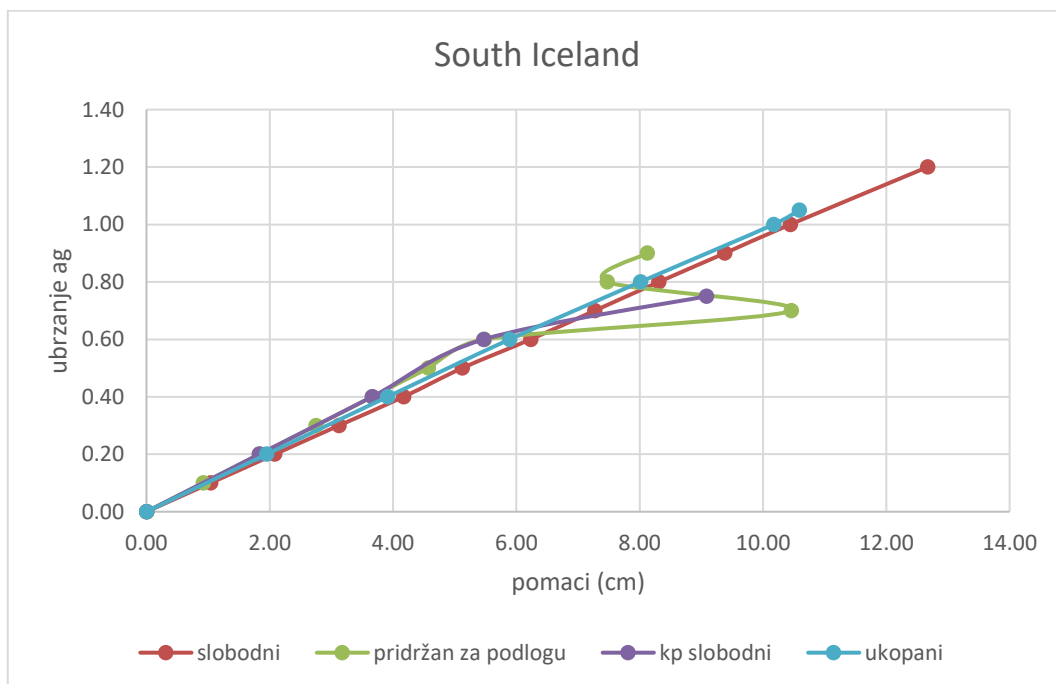
*Slika 40. Veza ubrzanja i pomaka za potres Campano Lucano*

Može se uočiti da je, uspoređujući s ostalim rubnim uvjetima, slobodno oslonjeni na krutoj podlozi podnio najmanje vršno ubrzanje vrijednosti 1.90 g sa pomakom od 8.87 cm. Najveći pomak prije urušavanja ostvario je slobodno oslonjeni na elastičnoj podlozi od 11.68 cm pri vršnom ubrzanju od 2.15 g. Slijedi iza njega ukopani sa 10.56 cm pri 2.10 g. Primjećujemo da se za ubrzanja manja od 1.00 g pomaci bitno ne razlikuju.



*Slika 41. Veza ubrzanja i pomaka za potres Petrovac*

Za razliku od prethodnog slučaja, najveći pomak za realni potres Petrovac ostvario je ukopani rubni uvjet sa 17.61 cm pri ubrzanju 0.42 g. Za ubrzanje 0.44 g slobodno oslonjeni na elastičnoj podlozi ostvaruje pomak od 16.32 cm. Vidljivo je da za manja ubrzanja ovaj rubni uvjet ostvaruje najmanje pomake. Može se uočiti da i za ovaj slučaj najmanji pomak ostvaruje slobodno oslonjeni na krutoj podlozi.

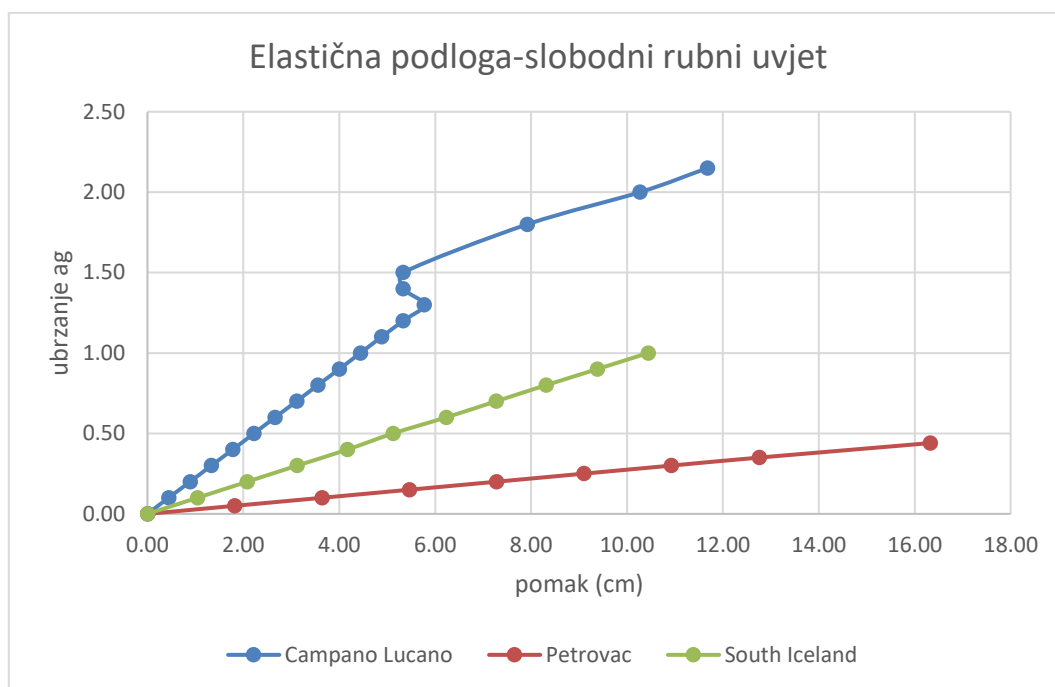


*Slika 42. Veza ubrzanja i pomaka za potres South Iceland*

Kao i u prethodnim slučajevima, slobodno oslonjeni na krutoj podlozi izdržava najmanje vršno ubrzanje prije urušavanja zvonika. Također, slobodno oslonjeni na elastičnoj podlozi izdržava najveće ubrzanje sa pomakom od 12.67 cm. Pridržani za podlogu prije pucanja ima pomak 8.12 cm za 0.90 g. Pomaci se za isto ubrzanje manje od 0.60 g neznatno razlikuju.

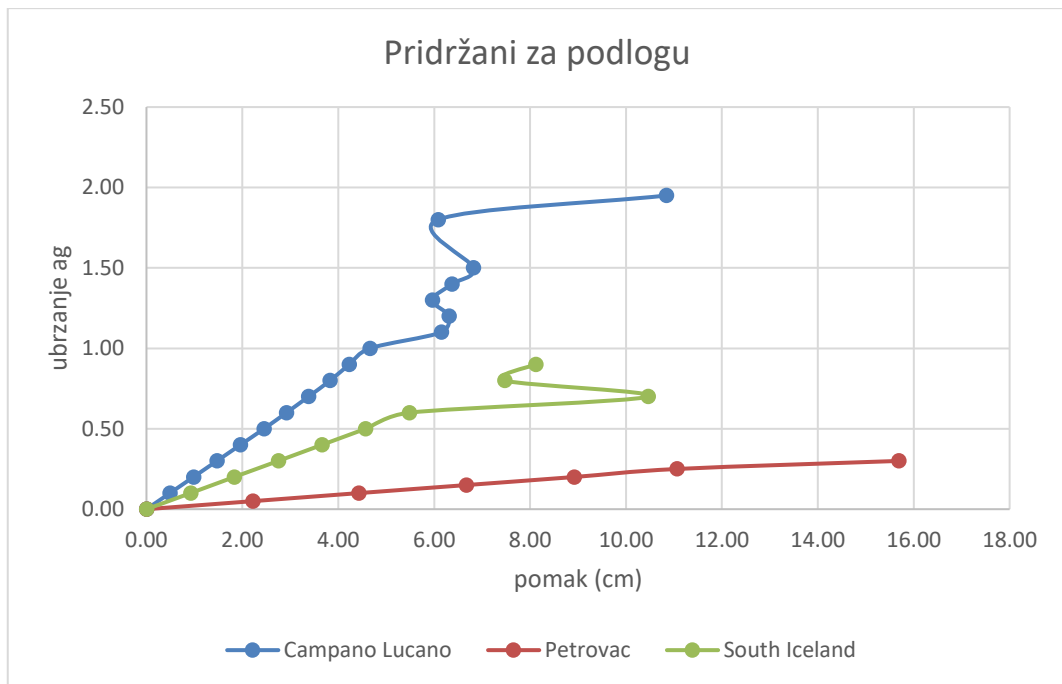
## 5.2. Usporedba tri potresa

Dijagrami u nastavku prikazuju ovisnost vršnog ubrzanja i pomaka za svaki od četiri rubna uvjeta pri tri različita potresa.

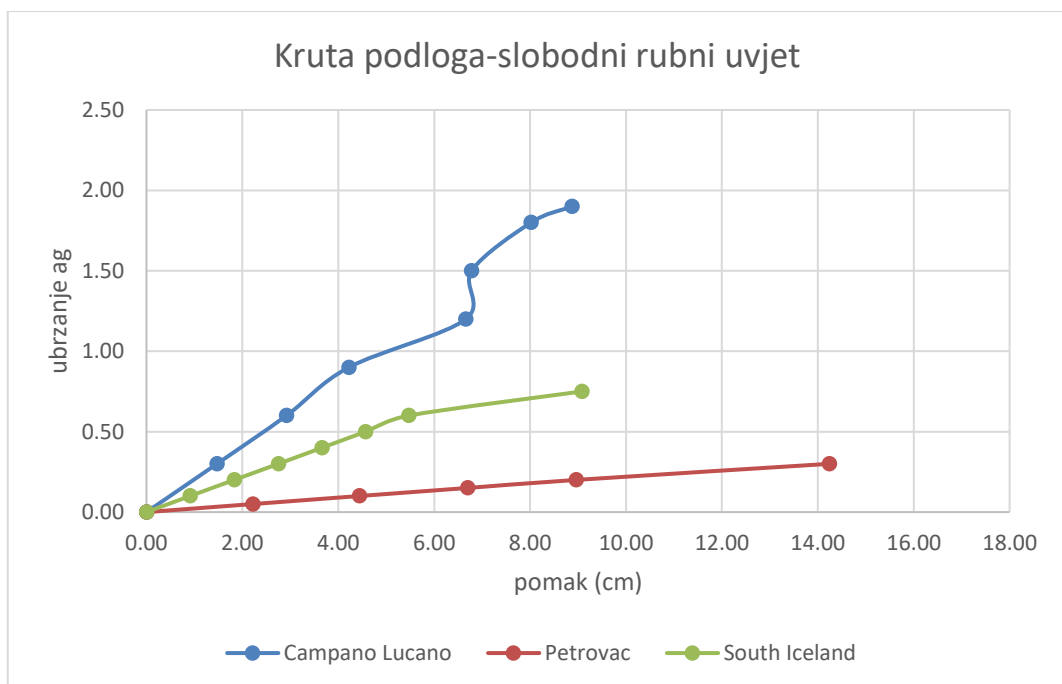


*Slika 43. Veza ubrzanja i pomaka za slobodno oslonjen zvonik na elastičnoj podlozi*

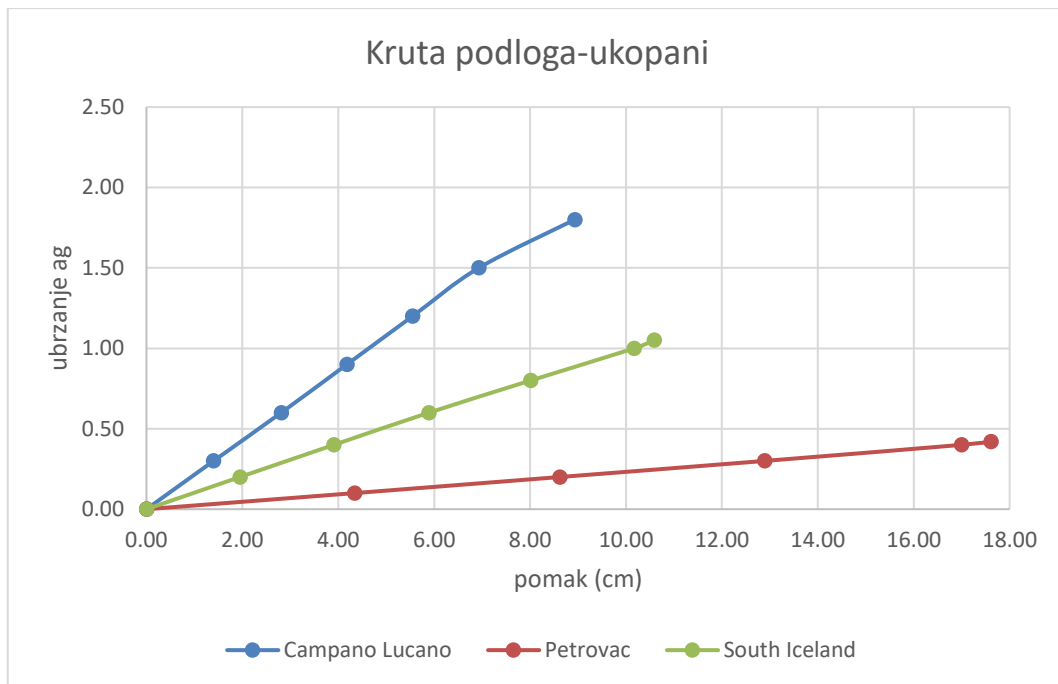
Uspoređujući sva tri potresa, primjećujemo da se najveći pomaci ostvaruju pri potresu Petrovac i to pri malom prirastu vršnog ubrzanja. Zvonik izdržava najveća ubrzanja pri potresu Campano Lucano do 2.15 g. Također, zvonik za Campano Lucano za ista ubrzanja ostvaruje najmanje pomake u odnosu na druga dva potresa. Najveće pomake za ista ubrzanja ostvaruje pri potresu Petrovac.



*Slika 44. Veza ubrzanja i pomaka za zvonik pridrzan za podlogu*



*Slika 45. Veza ubrzanja i pomaka za slobodno oslonjen zvonik na krutoj podlozi*



*Slika 46. Veza ubrzanja i pomaka za zvonik ukopan u podlogu*

Uspoređujući ponašanje konstrukcije za izračunate potrese po određenom rubnom uvjetu možemo uočiti da nema značajnih razlika. Svakom rubnom uvjetu najveći pomaci su ostvareni za potres Petrovac, a najmanji za potres South Iceland. Najveće vršno ubrzanje izdržala je konstrukcija pri potresu Campano Lucano, a najmanje pri potresu Petrovac. Prirast pomaka u odnosu na ubrzanje podloge do 1.00 g je linearan za sva četiri rubna uvjeta. Nakon te vrijednosti ubrzanja dolazi do anomalija u ponašanju konstrukcije uzrokovano pojavom većih pomaka i različitog rasporeda oštećenja na konstrukciji.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je primjena kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata u analizi zidanog zvonika sa područja Italije. S obzirom na osjetljivost povijesnih građevina, od velike je važnosti proračunati njihovu stabilnost na potres i tako procijeniti moguću štetu. Kombiniranom metodom konačno-diskretnih elemenata omogućene su promjene pomaka i rotacije kao i praćenje pukotina i fragmentacija zvonika.

Ispitani su modeli zvonika sa četiri različita rubna uvjeta: slobodno oslonjeni na elastičnoj podlozi, pridržani za podlogu, slobodno oslonjeni na krutoj podlozi i zvonik ukopan u podlogu za tri realna potresa: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland. Povećavanjem vršnog ubrzanja i implementacijom istog na model zvonika, ustanovljeno je da najveće pomake i najveća vršna ubrzanja podnosi slobodno oslonjeni zvonik na elastičnoj podlozi. Nakon njega zvonik ukopan u tlo. Najmanje pomake i vršna ubrzanja podnosi slobodno oslonjeni na krutoj podlozi.

Ovom analizom omogućena je učinkovitija potencijalna rekonstrukcija i bolje shvaćanje ponašanja ovakvih konstrukcija uslijed seizmičkog djelovanja.



## 7. LITERATURA

- [1] Zubović E, Smoljanović, H, Trogrlić, B. Analiza stabilnosti suho zidanih kamenih nadvoja kombiniranom metodom konačno-diskretnih elemenata. Građevinar, 2015; <https://doi.org/10.14256/JCE.1156.2014>
- [2] Munjiza, A.: The combined finite-discrete element method, First edition, John Wiley & Sons, 2004
- [3] Siro Casolo, Gabriele Milani, Giuseppina Uva, Claudio Alessandri, Comparative seismic vulnerability analysis on ten masonry towers in the coastal Po Valley in Italy, Engineering Structures, Volume 49, 2013, Pages 465-490, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.033>.
- [4] Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and postprocessing facilities, (2014) Version 2.8.5
- [5] Clementi, Francesco & Quagliarini, Enrico & Monni, Francesco & Giordano, Ersilia & Lenci, S.. (2017). Cultural Heritage and Earthquake: The Case Study of “Santa Maria Della Carità” in Ascoli Piceno. The Open Civil Engineering Journal. 11. 1079-1105. [10.2174/1874149501711011079](https://doi.org/10.2174/1874149501711011079).
- [6] Y: FEM/DEM COMPUTER PROGRAM, Copyright (C) 2000, Dr. Antonio Munjiza