

# Seizmička analiza obrambenog srednjovjekovnog zidanog tornja na području Italije

---

Štefković, Valentina

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:123:069260>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



*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**

**Valentina Štefković**

**Split, 2022.**

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

**Valentina Štefković**

**Seizmička analiza obrambenog srednjovjekovnog  
zidanog tornja na području Italije**

**Diplomski rad**

**Split, 2022.**

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

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Valentina Štefković

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0149221735

KATEDRA: **Katedra za teoriju konstrukcija**

PREDMET: Dinamika konstrukcija i potresno inženjerstvo

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Seizmička analiza obrambenog srednjovjekovnog zidanog tornja na području Italije

Opis zadatka: Na temelju zadane geometrije modela srednjovjekovnog zidanog tornja na području Italije potrebno je napraviti analizu seizmičke otpornosti predmetne građevine koristeći kombiniranu metodu konačnih i diskretnih elemenata (FEM/DEM). Seizmičku analizu provesti za zapise tri potresa na lokaciji: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland. Analizirati četiri različita rubna uvjeta: (1) slobodnostojeći na elastičnoj podlozi, (2) upeti u krutoj podlozi, (3) slobodnostojeći na krutoj podlozi, (4) ukopan u elastičnu podlogu. Potrebno je provesti analizu dobivenih rezultata i donijeti zaključke o vrsti oslanjanja tornja na podlogu.

U Splitu, ožujak 2022.

Voditelj Diplomskog rada:  
Izv. prof. dr. sc. Ivan Balić



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

Komentor Diplomskog rada:  
Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Smoljanović



## **Seizmička analiza obrambenog srednjovjekovnog zidanog tornja na području Italije**

**Sažetak:** Za obrambeni zidani toranj koji se nalazi u dolini Pada 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, parametarska analiza, FEM/DEM, ubrzanje, pomaci

## **Seismic analysis of a defensive medieval masonry tower in Italy**

**Abstract:** For the defensive masonry tower located in the Po Valley 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, parametric analysis, FEM/DEM, acceleration, displacements

## SADRŽAJ:

1. UVOD.....	2
1.1. METODE U SEIZMIČKOJ ANALIZI ZIDANIH KONSTRUKCIJA .....	4
1.2. OBRAMBENI TORNJ.....	5
1.3. OPĆENITO O KOMBINIRANOJ METODI KONAČNO–DISKRETNIH ELEMENATA.....	6
2. PODACI O PRORAČUNSKOM MODELU .....	10
2.1. OPIS GEOMETRIJE .....	10
2.2. PRORAČUNSKI MODEL.....	12
2.3. SVOJSTVA MATERIJALA.....	13
3. SEIZMIČKE ANALIZE ZIDANOG TORNJA .....	14
3.1. POMACI ZA PETROVAC.....	15
3.1.1. Prikaz 1. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi .....	15
3.1.2. Prikaz 2. rubnog uvjeta – upeti u krutoj podlozi.....	18
3.1.3. Prikaz 3. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na krutoj podlozi.....	20
3.1.4. Prikaz 4. rubnog uvjeta – ukopan u elastičnu podlogu .....	22
3.1.5. NASTANAK I ŠIRENJE PUKOTINA ZA PETROVAC.....	24
3.2. POMACI ZA CAMPANO LUCANO.....	32
3.2.1. Prikaz 1. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi .....	32
3.2.2. Prikaz 2. rubnog uvjeta – upeti u krutoj podlozi.....	35
3.2.3. Prikaz 3. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na krutoj podlozi.....	38
3.2.4. Prikaz 4. rubnog uvjeta – ukopan u elastičnu podlogu .....	42
3.2.5. NASTANAK I ŠIRENJE PUKOTINA ZA CAMPANO LUCANO .....	47
3.3. POMACI ZA SOUTH ICELAND.....	61
3.3.1. Prikaz 1. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi .....	61
3.3.2. Prikaz 2. rubnog uvjeta – upeti u krutoj podlozi.....	63
3.3.3. Prikaz 3. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na krutoj podlozi.....	65
3.3.4. Prikaz 4. rubnog uvjeta – ukopan u elastičnu podlogu .....	67
3.3.5. NASTANAK I ŠIRENJE PUKOTINA ZA SOUTH ICELAN .....	69
4. ANALIZA REZULTATA .....	78
5. ZAKLJUČAK.....	87
6. LITERATURA .....	89

## 1. UVOD

Velik broj građevinskih konstrukcija izvode se kao zidane konstrukcije. Najstarija tehnika je zidanje glinenim i kamenim blokovima povezani mortom. Ta tehnika zidanja koristi se i u današnje vrijeme. Kada se krenulo sa zidanjem prvih zidanih konstrukcija s kamenim blokovima od prirodnoga kamena razvijale su se ljudske vještine i alati te je kamen dobio pravilniji oblik. Postepeno su se počeli razvijati konstrukcijski oblici : stupovi za postizanje visine, grede, lukovi, svodovi i kupole za premošćivanje raspona.

Kako bi se kulturno dobro očuvalo potrebno je poznavati kako se konstrukcije ponašaju u potresu, koje je dominantno opterećenje u potresnom području i kako bi se to razumjelo rade se numeričke analize. Ponašanje konstrukcija u uvjetima seizmičkog opterećenja predstavlja izazov zbog prisutnosti sljubnica između blokova, koje su popunjene mortom ili su bez morta te pokazuju kompleksno i nelinearno ponašanje. Potres otkriva ranjivost zidanih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima. Da bi se smanjio broj ljudskih žrtva i time smanjila oštećenja konstrukcija potreban je bolji uvid u ponašanje zidanih konstrukcija pri seizmičkom djelovanju.

Izrade zidanih konstrukcija usvajale su se na temelju iskustva i prenosila su se s generacije na generaciju. Konstrukcija koja ima prave proporcije je konstrukcijski ispravna i takav način se zadržao kroz cijeli srednji vijek.

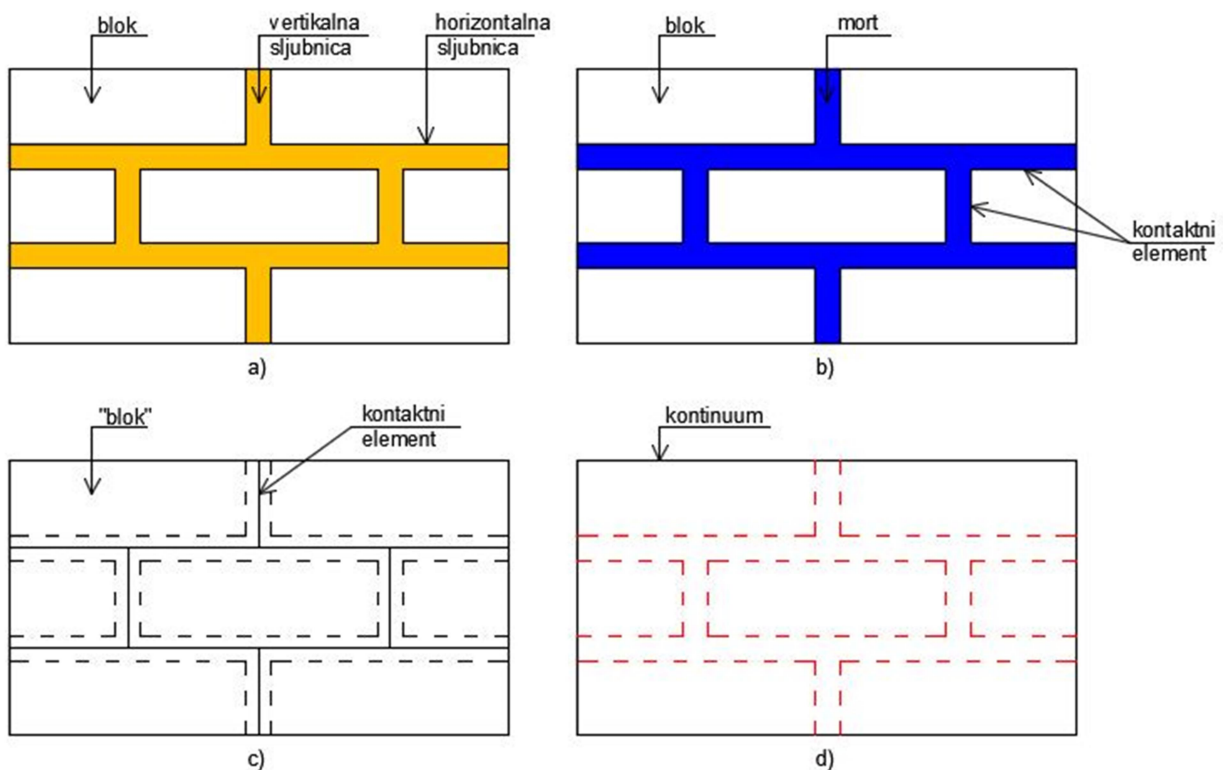
Mnoge građevine izgrađene u tom razdoblju i dan danas postoje i pokazale su se da iskustveno znanje o stabilnosti i raspodjeli sila unutar zidanih konstrukcija u tom vremenu nije bilo zanemareno. Sljubnica u zidanoj konstrukciji predstavlja slabu točku koja je uzrok nelinearnog i kompleksnog ponašanja i stvara velike probleme u numeričkom modeliranju.

Svrha ovoga rada je prikaz numeričkih metoda za seizmičku analizu zidanih konstrukcija.

Jedna od najčešćih metoda kojima se radi numerička analiza je metoda konačnih elemenata koje imaju prednost pomoću diskontinuumata ostvarenih preko kontaktnih elemenata koje mogu biti ugrađene između mreže konačnih elemenata, a metoda diskretnih elemenata ima prednost idealizacije preko kontinuuma i ostvaruje se tako da svaki diskretni element diskretizira s vlastitom mrežom konačnih elemenata i time je moguće uzeti u obzir deformabilnost elementa.

S obzirom na stupanj jednostavnosti i točnosti može se govoriti o mikro modeliranju te makro modeliranju. U makro modeliranju sve točke konstrukcije imaju jednaka svojstva, odnosno konstruktivni zakon ponašanja.

Svojstva morta i blokova koja su jednako razmazana po konstrukciji tretiraju se kao homogeni anizotropni kontinuum i ovakav pristup pogodan je za analizu na većim konstrukcijama jer je najmanje proračunski zahtjevan. Ako je volumen reda veličine jednog bloka i manje, onda se govori o detaljnom mikro modeliranju kod kojeg su blok i mort diskretizirani i modelirani s konačnim elementima, a veza bloka i morta je prikazana s kontaktnim elementima. Odvojeno se promatraju konstitutivni zakoni ponašanja morta i bloka. Kod pojednostavljenog mikro modeliranja prošireni blok modeliran je s konačnim elementima, a veza morta i bloka opisana je kontaktnim elementima i predstavljaju mjesta potencijalnih pukotina.



**Slika 1.** a) zidana konstrukcija b) detaljno mikro modeliranje c) pojednostavljeno mikro modeliranje d) makro modeliranje [1]



## 1.1. METODE U SEIZMIČKOJ ANALIZI ZIDANIH KONSTRUKCIJA

Najčešće korištene metode u seizmičkoj analizi zidanih konstrukcija su : metoda konačnih elemenata i metoda diskretnih elemenata.

### a) METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata izvedena je pomoću makro elemenata i ima znatno manje vrijeme proračuna. Najčešće korišten pristup je makro modeliranje kod analize zidanih konstrukcija jer je postignut najbolji omjer između cijene proračuna i razine točnosti. Mreža konačnih elemenata mora biti takva da je svaki blok diskretiziran sa svojom mrežom što vodi modeliranju mikro ili pojednostavljenoj mikro razini. Nedostatak metode konačnih elementa je u tome što se ne može simulirati mehanička interakcija između više tijela, a to je važno pri izloženosti udarnom opterećenju i pri analizi kolapsa konstrukcije.

### b) METODA DISKRETNIH ELEMENATA

Definirana je kao računali pristup koji ima prednost u tome što omogućava konačne pomake i rotacije diskretnih tijela uključujući njihovo potpuno odvajanje. Automatski prepoznaje nove kontakte između tijela kako proračun napreduje. Diskretna metoda elementa prikladna je za modeliranje zidanih konstrukcija na pojednostavljenoj mikro razini koji simuliraju prisutnost morta. Nedostatak metode diskretnih elemenata je u tome što ne mogu opisati stanje naprezanja i deformacije unutar diskretnih elemenata, a to je važno pri analizi pojave i razvoja pukotina.

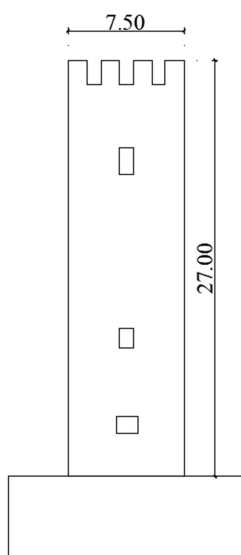
### c) KOMBINIRANA METODA KONAČNO-DISKRETNIH ELEMENATA

Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata proizlazi iz porodice metode diskretnih elemenata te kombinira prednosti metode konačnih elemenata i metode diskretnih elemenata. Zasniva se na simulaciji ponašanja velikog broja diskretnih elemenata koji se mogu naći u međusobnoj interakciji. Svaki diskretni element diskretiziran je s vlastitom mrežom konačnih elemenata i time je omogućena njegova deformabilnost. Ovu metodu razvio je prof.Munjiza.

- Kod metode konačnih elemenata ne može se simulirati pucanje, a kod diskretnih elemenata može se prikazati sve što i u metodi konačnih elemenata, a prednost je simulacija pucanja, nastajanje pukotina, širenje pukotina i potpunog sloma konstrukcije odnosno kolapsa.
- Kombinirana metoda konačno-diskretnih elemenata preuzima konačne elemente, deformabilnosti se opisuju preko konačnih elemenata, a pucanje se opisuje preko kontaktnih elemenata.

## 1.2. OBRAMBENI TORNJ

Kroz povijest tornjevi su svojim vlasnicima omogućavali obrambenu prednost omogućavajući im pogled na širu okolinu, uključujući i bojna polja. Građeni su u blizini potencijalnih meta. Tornjevi u obrambenoj svrsi mogu se pronaći u zatvorima i vojnim kampovima. Tornjevi su najčešće izgrađeni od kameno-zidane konstrukcije i vrlo su rasprostranjeni u Italiji i predstavljaju dio građevne baštine. Predmetni zidani toranj (slika 2.) smješten je u sjeveroistočnoj Italiji u obalnoj dolini Pada (Due Torri di Rovigo) i namijenjen je za vojne obrane i vođenje. Tornjevi se grade zbog njihove visine koji im daje različite prednosti te mogu biti samostalni. S tornja se mogu lansirati napadi koji se teško odbijaju zato su i mnogi gradovi imali nekoliko tornjeva. Toranj je srednjovjekovna obrambena građevina 13. stoljeća koja ima masivne obodne zidove i četiri unutarnje prostorije odvojene debelim svodovima. U tom tornju postoji nepravilnost unutar parametarskih zidova. Toranj pokazuje različite geometrije a to su vitkost, debljina obodnih zidova, visina, postotak perforacije. Temelji se na relativno rafiniranoj 2D diskretizaciji dobivenoj sastavljanjem krutog četverokutnog elementa međusobno povezanih nelinearnim aksijalnim i posmičnim oprugama te pokazuje realističnu energiju disipacije pod cikličkim opterećenjem. Tornjevi su bili zamišljeni tako da izdrže vertikalno opterećenje. Tijekom jakih potresa ponekad se pojavljuju vertikalne posmične pukotine. Ključnu ulogu u seizmičkoj ranjivosti imaju vitkost i smicanje baze. Najvažniji parametar koji određuje razinu ranjivosti tornja je vitkost. Visina predmetnog tornja iznosi 27.00 m, a debljina baze 7.50 m. Zidani toranj analiziran je pomoću metode konačno-diskretnih elemenata FEM/DEM.

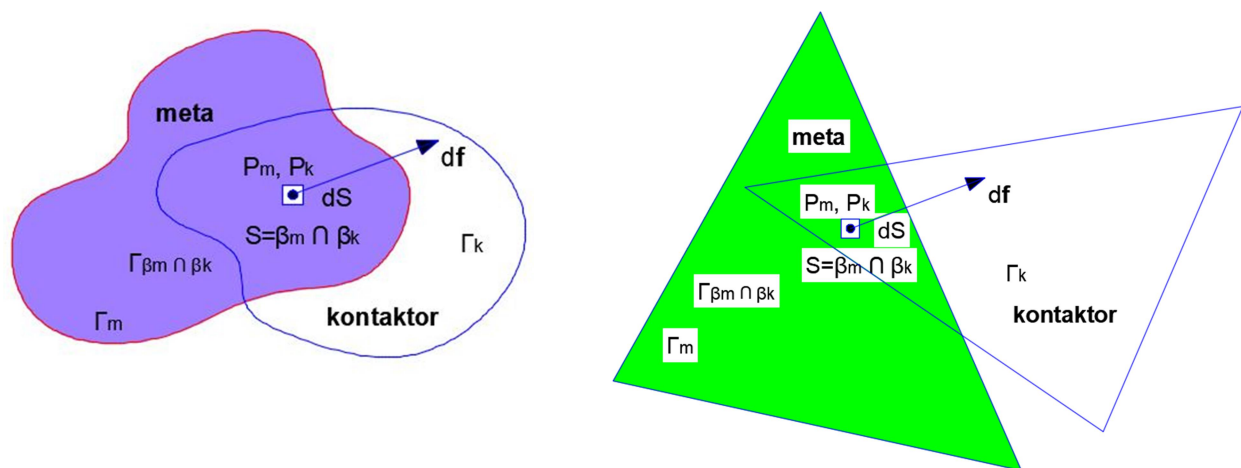


**Slika 2.** Toranj namijenjen za vojnu obranu i vođenje

### 1.3. OPĆENITO O KOMBINIRANOJ METODI KONAČNO–DISKRETNIH ELEMENATA

Metoda konačno–diskretnih elemenata se zasniva na simulaciji konstrukcija koja ima velik broj elemenata [6] i ona se modelira s jednim diskretnim elementom. Modelirana je vlastitom mrežom konačnih elemenata i time je omogućena deformabilnost. Kako bi se osigurala veza u vremenskom koraku diskretnih elemenata, u metodi modelirana je detekcija i interakcija kontakta.

Javljaju se kontaktne sile između dva diskretna elementa koja se nađu u kontaktu od kojih je jedan kontaktor, a drugi meta (slika 3.). Kontaktor i meta kada su u kontaktu preklapaju se preko površine  $S$  koja je omeđena vanjskim rubom  $\Gamma_{\beta_m \cap \beta_k}$ .



**Slika 3.** Kontaktne diferencijalne sile u okolini točaka  $P_m$  i  $P_k$  [6]

Definirana je ukupna kontaktne diferencijalne sile na kontaktor  $df_k$  kao

$$df_k = [grad\varphi_k(P_m) - grad\varphi_m(P_k)]dS \quad (1)$$

gdje su  $P_m$  i  $P_k$  preklapajuće točke mete i kontaktora, a  $\varphi$  je odgovarajuća funkcija potencijala. Ukupna kontaktne sile se dobiva preko integracije prethodnog izraza preko cijele preklapajuće površine  $S$  i glasi

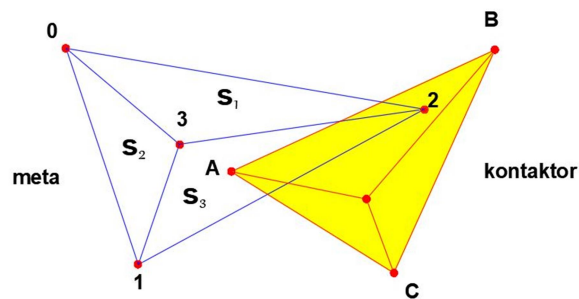
$$f_k = \oint_{\Gamma_{\beta_m \cap \beta_k}} n_\Gamma [\varphi_k - \varphi_m] d\Gamma \quad (2)$$

gdje je  $n_\Gamma$  jedinična vanjska normala na rub  $\Gamma$  preklapajuće površine  $S$ .

Ukupna kontaktna sila na metu dobiva se na isti način samo što kontaktor i meta zamijene uloge. Svaki diskretni element je diskretiziran s više konačnih elemenata na koje se diskretni element može raspasti, pa taj problem kontaktnih sila rješavamo na razini konačnih elemenata.

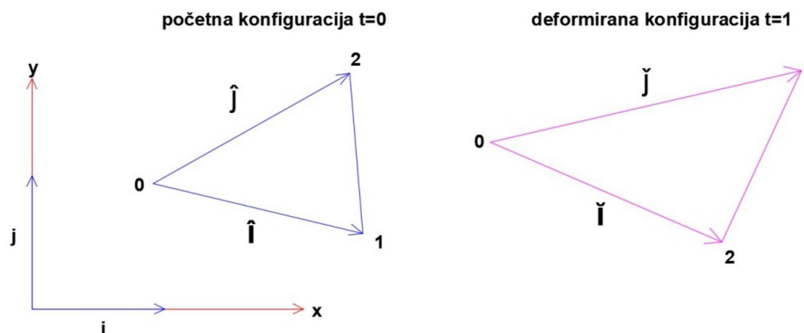
Broj kontakta među konačnim elementima je velik, pa da bi se što brže proračunale kontaktne sile i sile koje su posljedica deformiranja, izabran je konačni element u ravnini, a zapravo je to trokutni tročvorni konačni element.

Imamo problem određivanja kontaktnih sila između dva trokutna konačna elementa i oni se mogu reducirati na interakciju kontaktora s bridovima mete i interakciju mete s bridovima kontaktora.



**Slika 4.** Dva trokutna konačna elementa mete i kontaktora u kontaktu [6]

Deformabilno tijelo sastoji se od skupa točaka omeđenih vanjskom konturom. Pomaci deformabilnog tijela su: pomaci deformabilnog tijela kao krutog tijela koji uključuju translaciju i rotaciju i pomaci koji uzrokuju deformiranje što je zapravo promjena volumena i oblika. Da bi se opisala deformacija trokutnog konačnog elementa i uspostavila veza između naprezanja i deformacija usvajaju se 3 koordinatna sustava.



**Slika 5.** Trokutni konačni element koji je u početnoj i deformiranoj konfiguraciji [6]

Trokutni tročvorni konačni element ima posljedicu da je gradijent deformacije  $F$  konstantan u svim točkama trokuta i polje pomaka konačnog elementa opisano je linearnom funkcijom oblika

$$x_c = a_x x_i + \beta_x y_i \quad (3)$$

$$y_c = a_y x_i + \beta_y y_i$$

gdje su  $x_c$  i  $y_c$  trenutne koordinate, a  $x_i$  i  $y_i$  početne koordinate. Pomak po  $x$  i  $y$  rezultira konstantnim parcijalnim derivacijama.

Svaki diskretni element diskretiziran je s trokutnim koordinatama čvorova konačnih elementa, u kombinaciji FEM/DEM metodi. Kako bi se mogla izračunati trenutna koordinata čvorova potrebno je u obzir uzeti masu sustava. Masa sustava je koncentrirana u čvorovima konačnih elemenata što vodi prema modelu koncentriranih masa. Oblik i položaj diskretnog elementa u prostoru je opisan s trenutnim koordinatama čvorova konačnih elemenata gdje je  $n$  ukupan broj stupnjeva slobode sustava.

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

Inercijalne sile koje se javljaju na diskretnom elementu one su opisane s masom koja je zbog diskretizacije diskretnog elementa isto diskretizirana.

Prikazivanje mase u kombiniranoj FEM/DEM metodi najjednostavnije je pomoću modela koncentriranih masa, gdje je masa koncentrirana u čvorove i to vodi na dijagonalnu matricu masa koja se može prikazati kao masa koja je povezana sa svim stupnjevima slobode.

Provedba vremenske integracije je izvedena čvor po čvor posebno za svaki stupanj slobode u eksplicitnom obliku. Interakcije između dva ili više elemenata u kontaktu, vanjskih sila, sila prigušenja i deformiranje konačnog elementa su posljedice sile koje se javljaju u čvorovima konačnog elementa. Sve sile su zbrojene u vektor čvornih sila.

Izabrana je metoda konačnih razlika koja je uvjetno stabilna. Ta stabilnost i točnost ovisi o izboru vremenskog koraka. Integracija jednadžbe gibanja po vremenu vrši se za svaki stupanj slobode pojedinačno koja se može prikazati u obliku

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

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

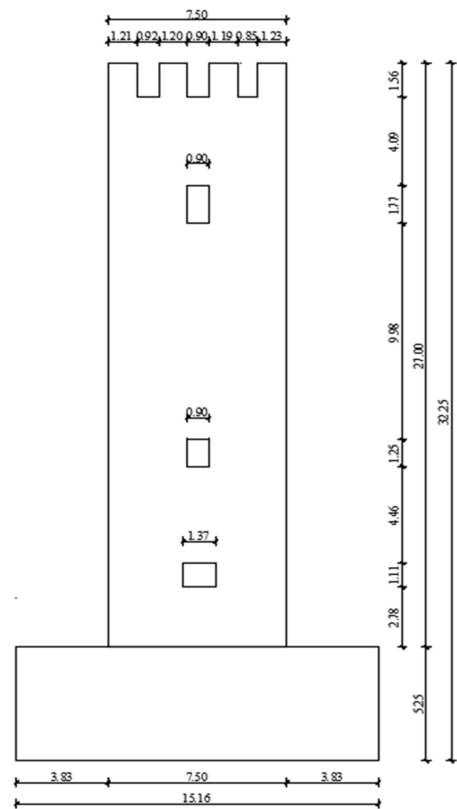
$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} h \quad (7)$$

gdje je  $f_n$  suma sila interakcije 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  $h$  je veličina vremenskog koraka koja je konstantna.

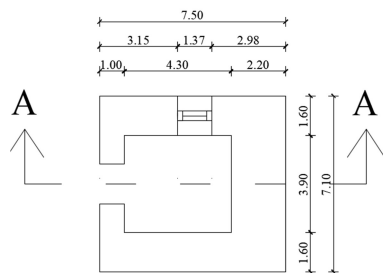
## 2. PODACI O PRORAČUNSKOM MODELU

### 2.1. OPIS GEOMETRIJE

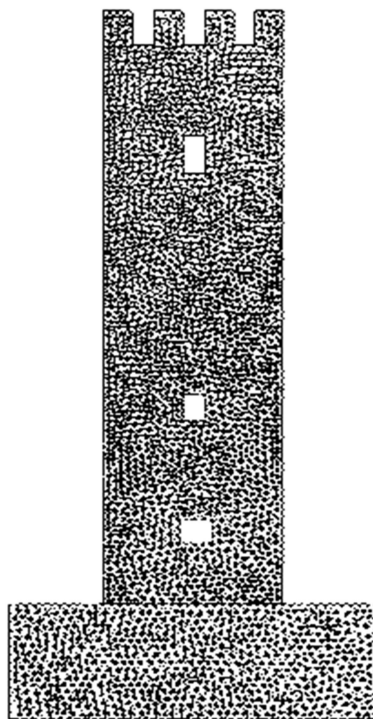
Na slikama 6a i 6b prikazana je geometrija predmetnog tornja, dok su na slikama 6c i 6d prikazane mreže konačnih elemenata korištene u numeričkim analizama. Stvorena je mreža trokutnih konačnih elemenata s tri čvora i dva stupnja slobode. Svaki trokut između čvorova ima konkretni element.



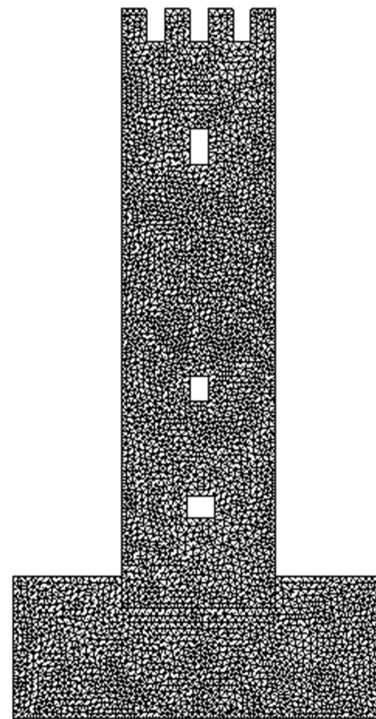
a) Geometrija modela (pogled)



b) Geometrija modela (tlocrt)



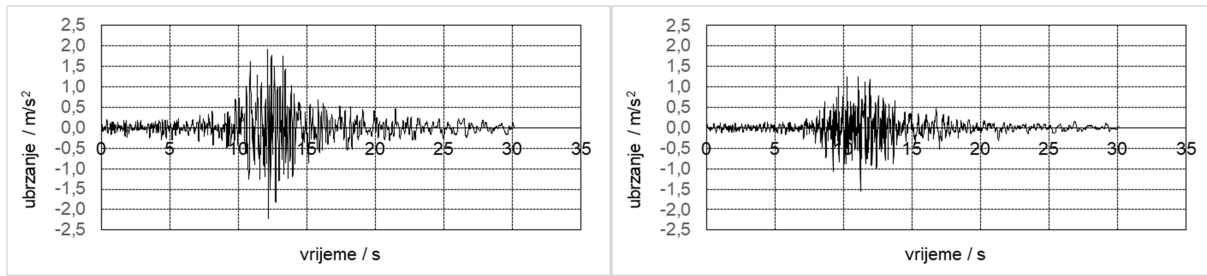
c) Mreža konačnih elemenata za rubne uvjete – upeti u krutoj podlozi, slobodno stojeći na elastičnoj podlozi, slobodno stojeći na krutoj podlozi



d) Mreža konačnih elemenata za rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu

Slika 6. Diskretizacija tornja koja se nalazi u obalnoj dolini Pada u Italiji

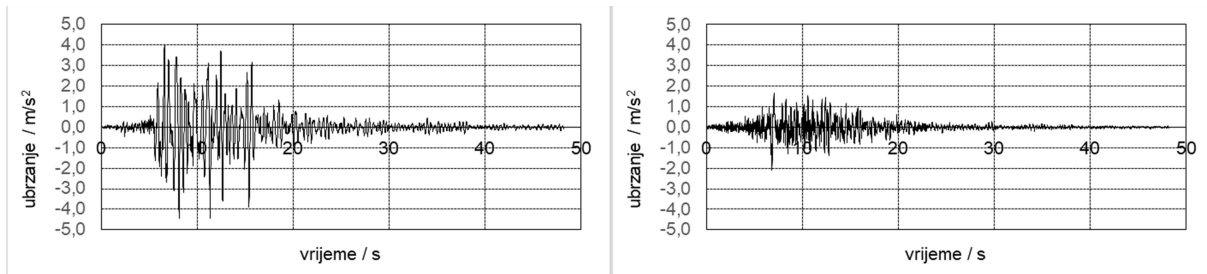
Seizmička analiza vršila se za tri potresa na lokaciji: Campano Lucano, Petrovac i South Iceland. U nastavku su vidljivi akcelerogrami za potrese na horizontalnoj i vertikalnoj komponenti.



a) horizontalna komponenta

b) vertikalna komponenta

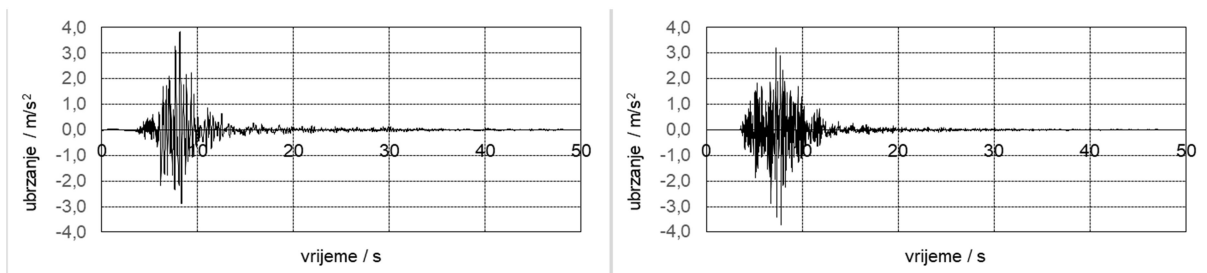
**Slika 7.** Akcelerogram potresa za Campano Lucano



a) horizontalna komponenta

b) vertikalna komponenta

**Slika 8.** Akcelerogram potresa za Petrovac



a) horizontalna komponenta

b) vertikalna komponenta

**Slika 9.** Akcelerogram potresa za South Iceland



## 2.2. PRORAČUNSKI MODEL

U ovome radu za tri potresa (Campano Lucano, Petrovac, South Iceland) korištena su četiri rubna uvjeta:

1. rubni uvjet – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi
2. rubni uvjet – upeti u krutoj podlozi
3. rubni uvjet – slobodnostojeći na krutoj podlozi
4. rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu
  - SLOBODNOSTOJEĆI NA ELASTIČNOJ PODLOZI – toranj je slobodan i nije vezan za podlogu. Cijela baza je nepomična, odnosno dno baze je nepomično s lijeve i desne strane, a toranj slobodno stoji na tlu tako da je omogućeno njihanje.
  - UPETI U KRUTOJ POLOZI – toranj je vezan za podlogu, odnosno upeti u podlogu.
  - SLOBODNOSTOJEĆI NA KRUTOJ PODLOZI – toranj na donjem dijelu ima krutu podlogu i on se odiže prilikom potresa.
  - UKOPAN U ELASTIČNU PODLOGU – toranj je upušten u tlo i kada dođe potres on se u gornjem dijelu slobodno njiše, a tlo je stišljivo odnosno mekano.

Geometrija tornja za 1., 2., 3. rubni uvjet opisana je s 5926 trokutnih konačnih elemenata gdje svaki trokutni element ima tri čvora s dva stupnja slobode u čvoru što sve skupa čini 3169 čvorova. Za 4. rubni uvjet geometrija tornja je opisana sa 7307 trokutnih konačnih elemenata i sve skupa čini 3892 čvorova. Pucanje konstrukcije omogućeno je s kontaktnim elementima koji su ubačeni između diskretnih i konačnih elemenata trokuta. Numerički model je u 2D i debljina konačnog elementa tla iznosi 15.16 m, zatim debljina na rubovima tornja odnosno bočnih zidova iznosi 7.10 m i debljina središnjih zidova iznosi 2.20 m i to je zbroj sjevernog i južnog zida.

### 2.3. SVOJSTVA MATERIJALA

U analizi svojstva materijala korišteni su sljedeći podaci (tablica 1.):

**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, $\zeta$	0.20	0.40

Tlu nije dana mogućnost pucanja. Proces loma sastoji se od pojave i razvoja pukotina Prvi uvjet za pojavu pukotine je dosezanje graničnog stanja u kritičnoj točki tijela ili tijela u cjelini, a razvoj pukotine proizlazi od toga da u tijelu već postoje pukotine i definira se kriterij za početak proširivanja. Do širenja pukotina u nekom elementu dolazi nakon što naprezanje u elementu konstrukcije dostigne za neku pukotinu kritičnu vrijednost. Energija apsorbirana pri lomu tumači se površinom ispod naprezanja koja se naziva žilavost materijala. Krhki materijali imaju malu površinu ispod krivulje naprezanje–deformacija jer je apsorbiran mali iznos energije tijekom udarne radnje loma. Kako raste sposobnost plastične deformacije materijala raste i površina ispod krivulje naprezanje–deformacija, a također raste i apsorbirana energija te žilavost materijala.

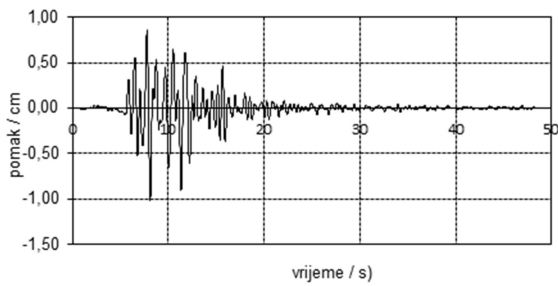
### **3. SEIZMIČKE ANALIZE ZIDANOG TORNJA**

Za zidane tornjeve na tri lokacije (Campano Lucano, Petrovac, South Iceland) vršile su se seizmičke analize potresa. Svaka lokacija se analizirala s četiri rubna uvjeta (1. rubni uvjet – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi, 2. rubni uvjet – upeti u krutoj podlozi, 3. rubni uvjet – slobodnostojeći na krutoj podlozi, 4. rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu).

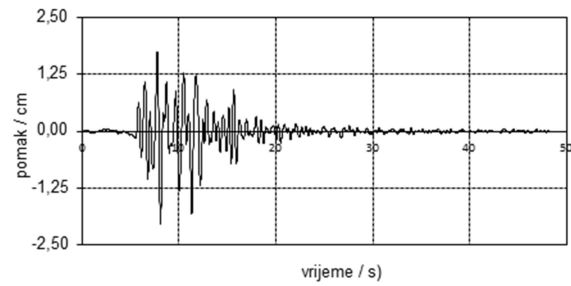
U nastavku će biti prikazani pomaci za pojedino vršno ubrzanje. Povećavala su se ubrzanja sve dok nije došlo do prvih pukotina te konačnog sloma odnosno kolapsa tornja. Iz slika će se vidjeti nastanak i širenje pukotina za pojedino ubrzanje.

### 3.1. POMACI ZA PETROVAC

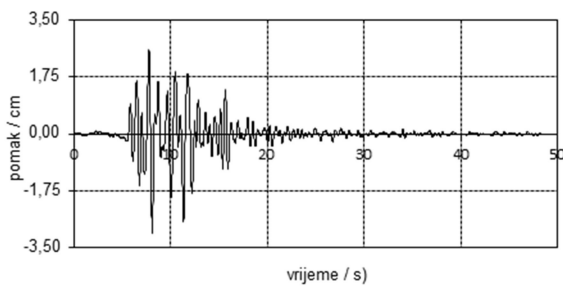
#### 3.1.1. Prikaz 1. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi



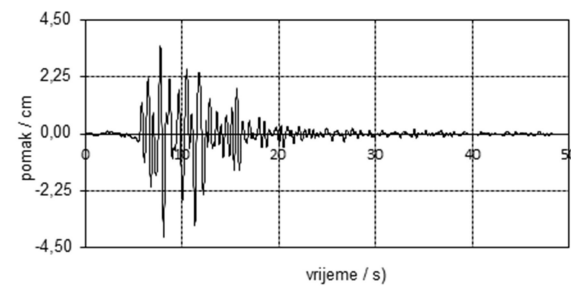
(a) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.05$  g



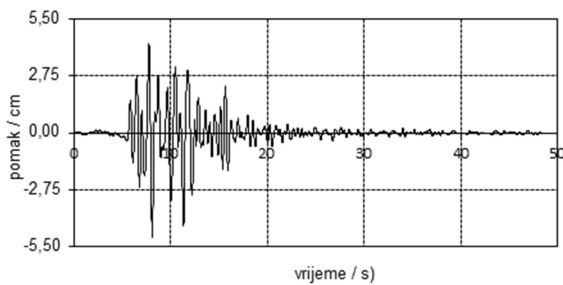
(b) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.10$  g



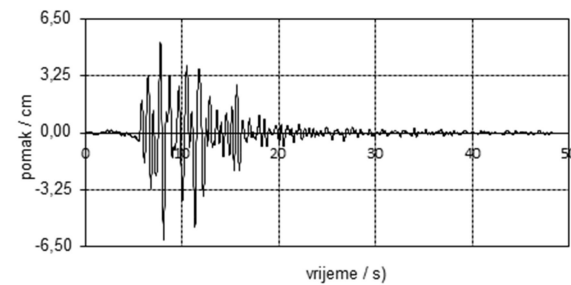
(c) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.15$  g



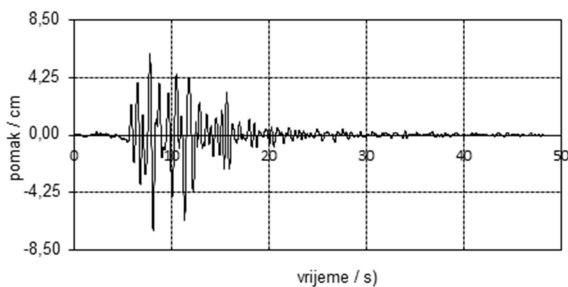
(d) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



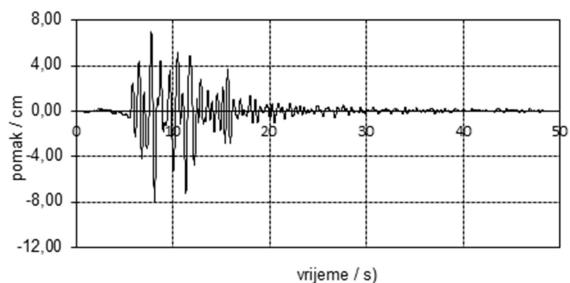
(e) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.25$  g



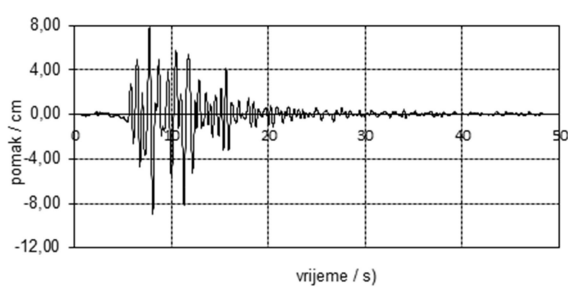
(f) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.30$  g



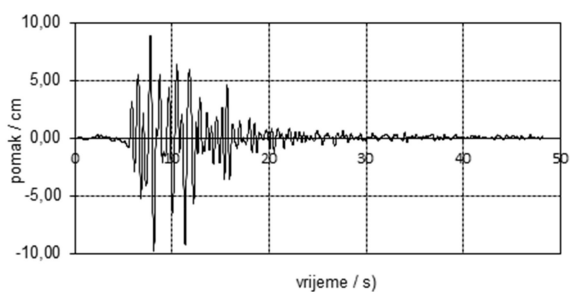
(g) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.35$  g



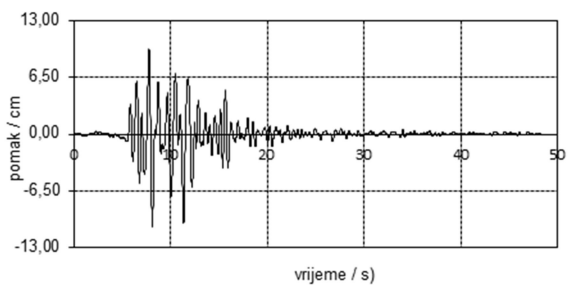
(h) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



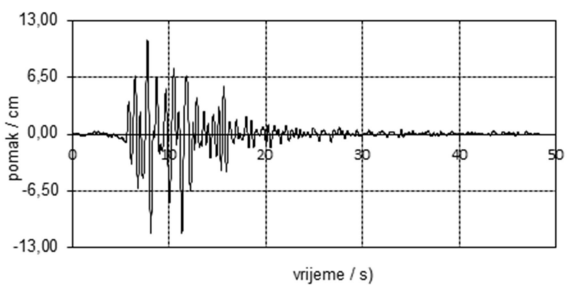
(i) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.45$  g



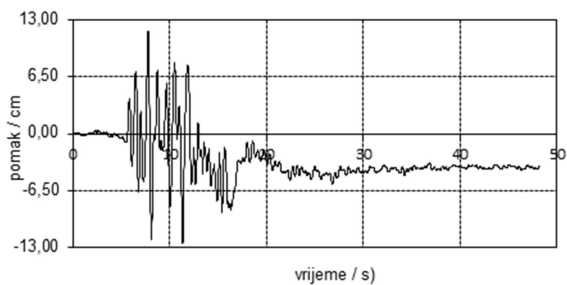
(j) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.50$  g



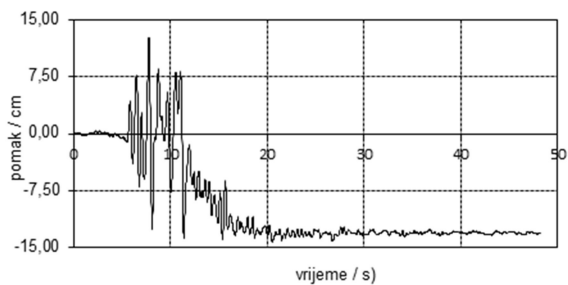
(k) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.55$  g



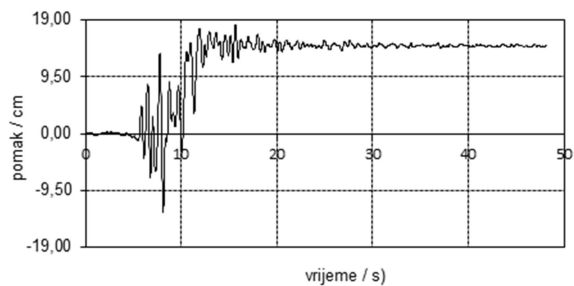
(l) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



(m) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.65$  g



(n) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.70$  g

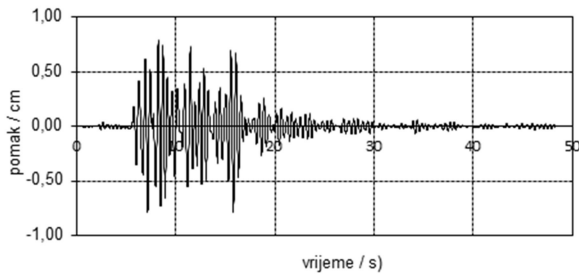


(o) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.74$  g

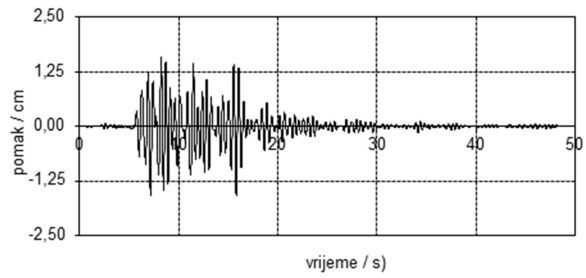
**SRUŠIO SE**

(p) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.75$  g

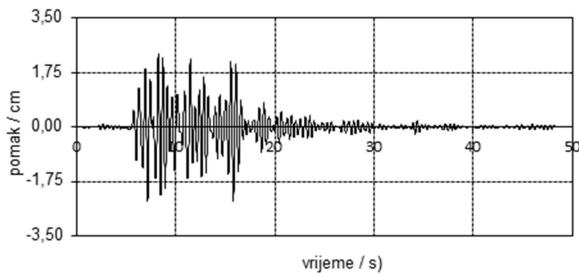
### 3.1.2. Prikaz 2. rubnog uvjeta – upeti u krutoj podlozi



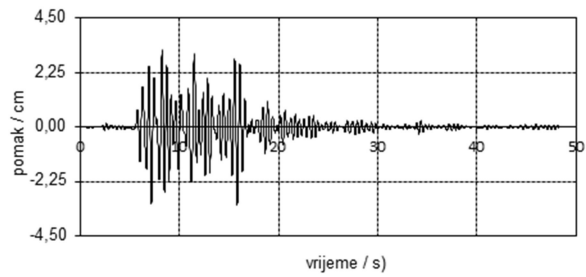
(a) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.05$  g



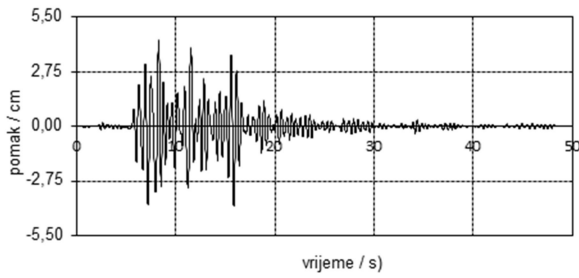
(b) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.10$  g



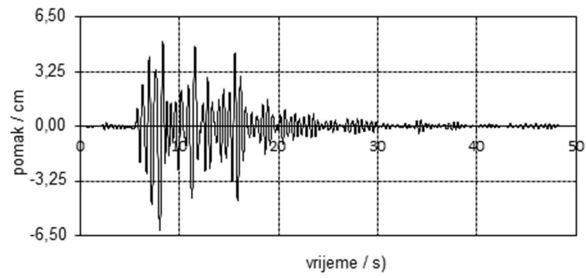
(c) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.15$  g



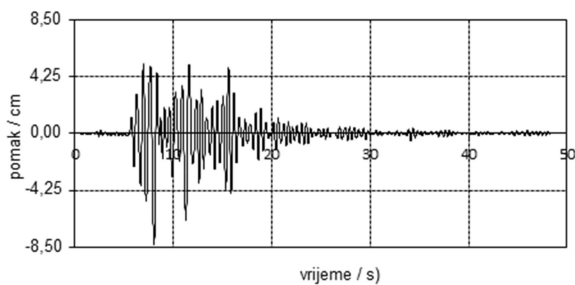
(d) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



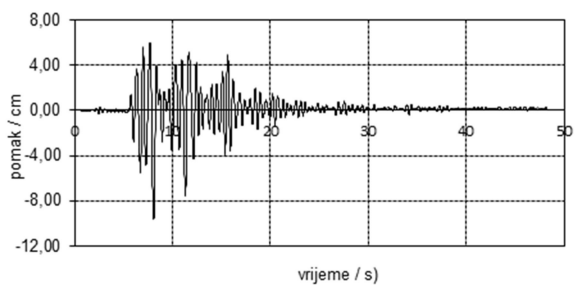
(e) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.25$  g



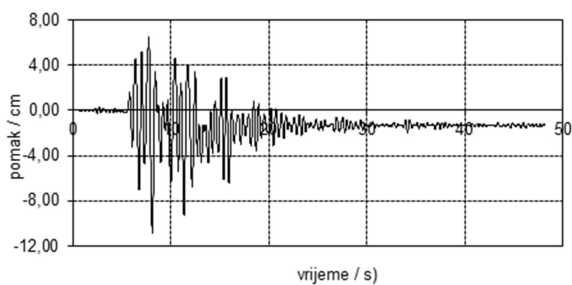
(f) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.30$  g



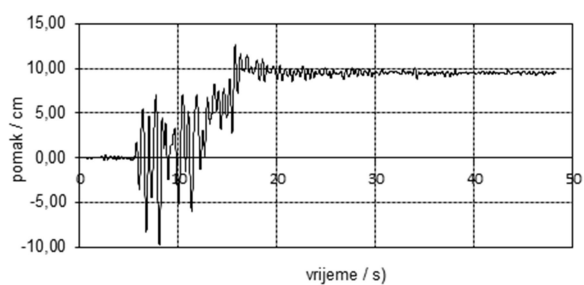
(g) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.35$  g



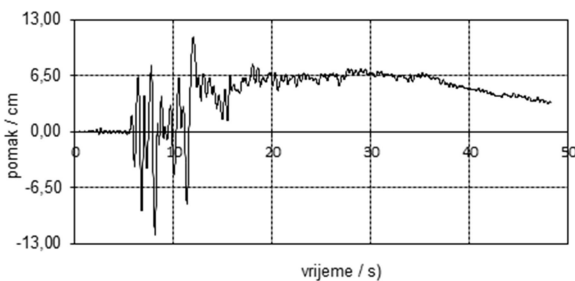
(h) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



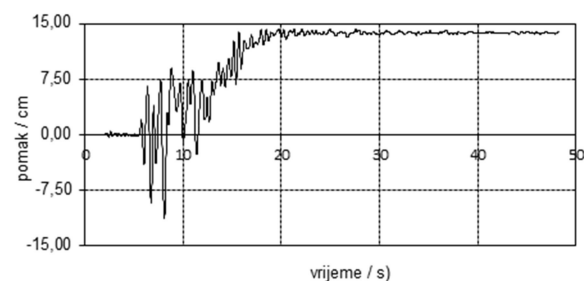
(i) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.45$  g



(j) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.50$  g



(k) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.55$  g



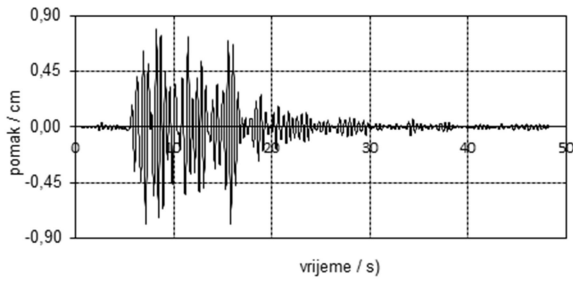
(l) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.56$  g

### SRUŠIO SE

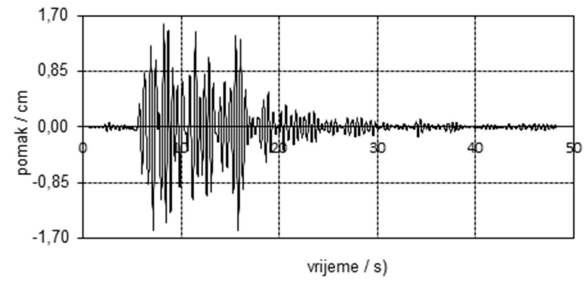
(m) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.57$  g



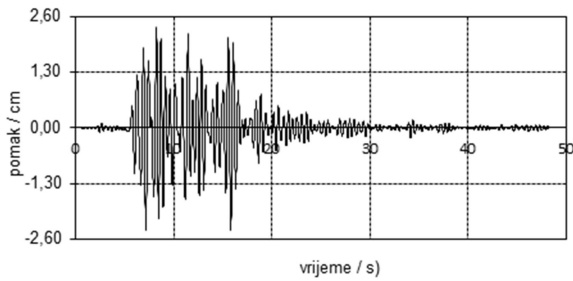
### 3.1.3. Prikaz 3. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na krutoj podlozi



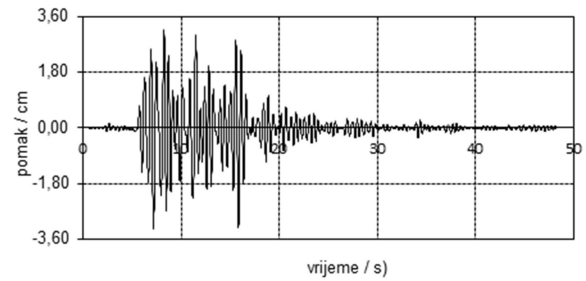
(a) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.05$  g



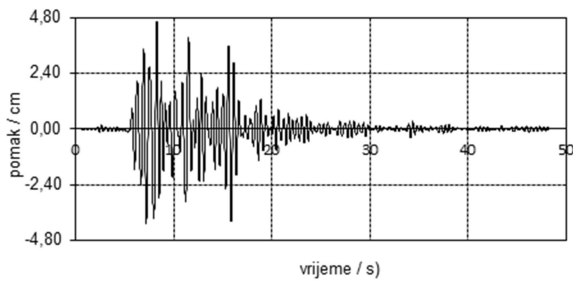
(b) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.10$  g



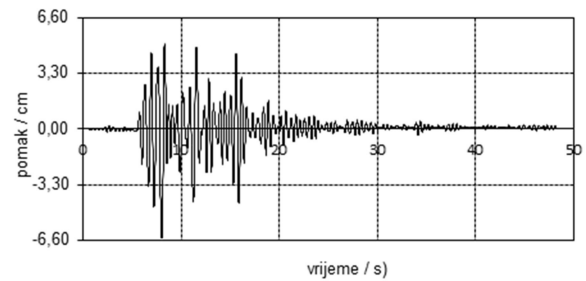
(c) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.15$  g



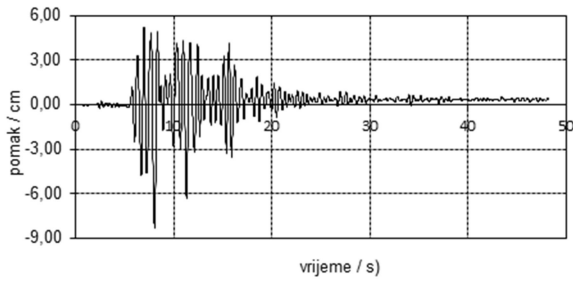
(d) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



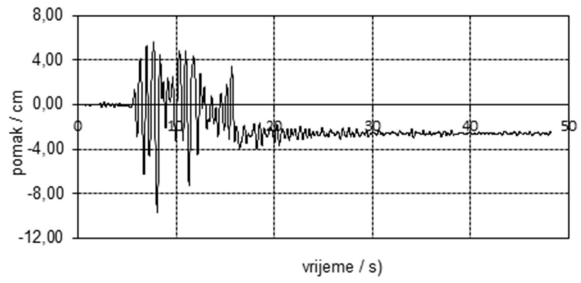
(e) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.25$  g



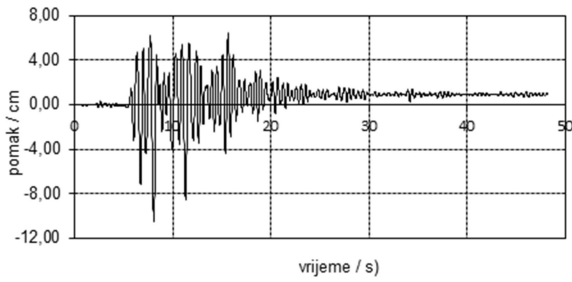
(f) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.30$  g



(g) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.35\text{ g}$



(h) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.40\text{ g}$

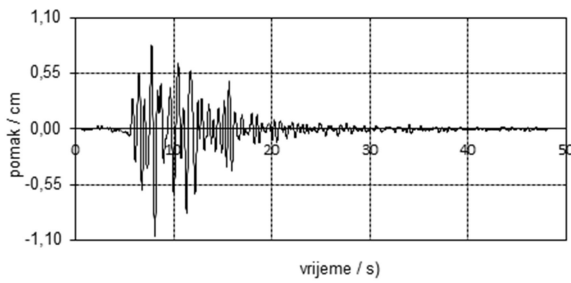


(i) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.44\text{ g}$

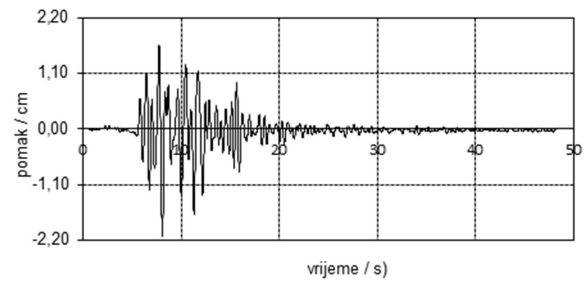
**SRUŠIO SE**

(j) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.45\text{ g}$

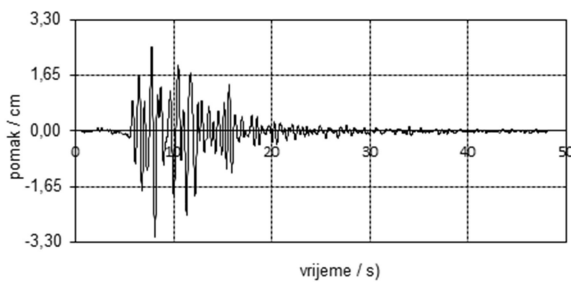
### 3.1.4. Prikaz 4. rubnog uvjeta – ukopan u elastičnu podlogu



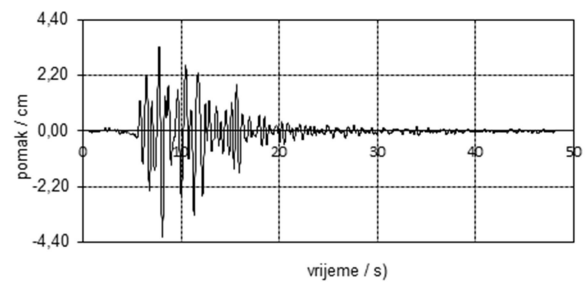
(a) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.05$  g



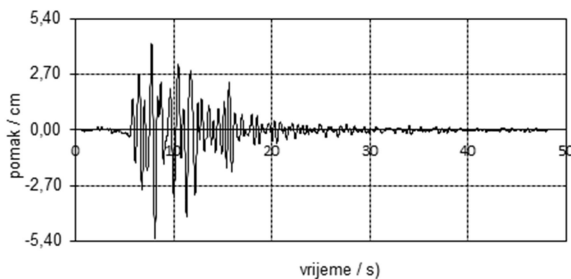
(b) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.10$  g



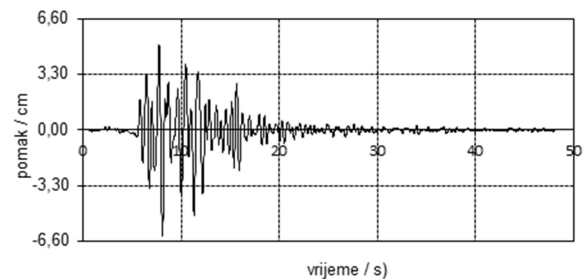
(c) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.15$  g



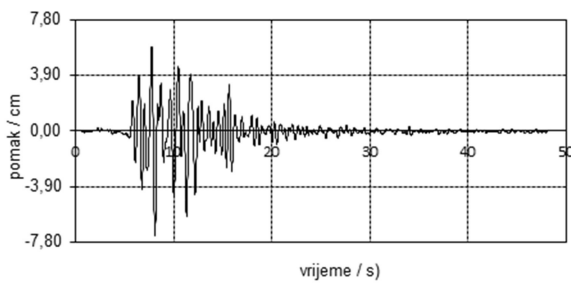
(d) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



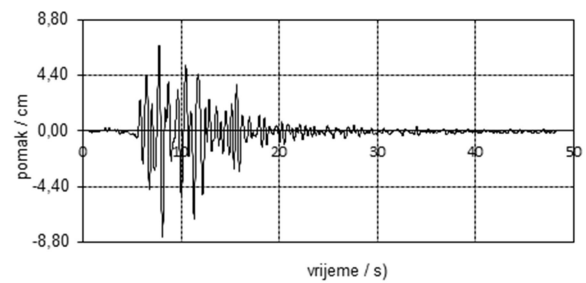
(e) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.25$  g



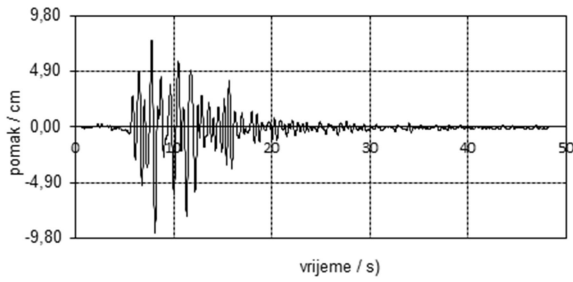
(f) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.30$  g



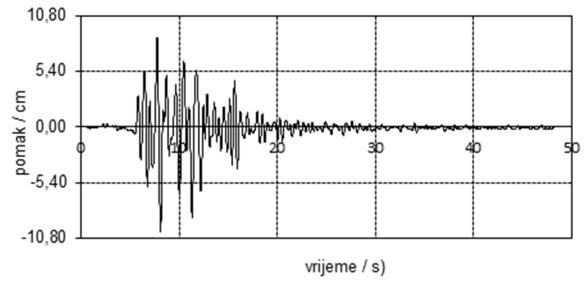
(g) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.35$  g



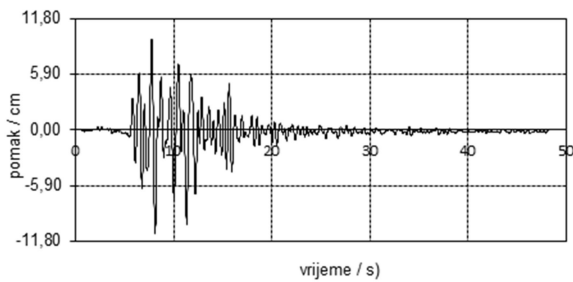
(h) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



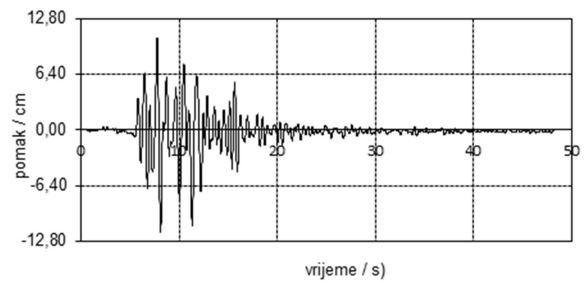
(i) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.45$  g



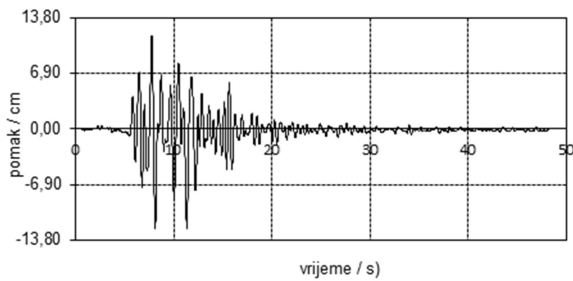
(j) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.50$  g



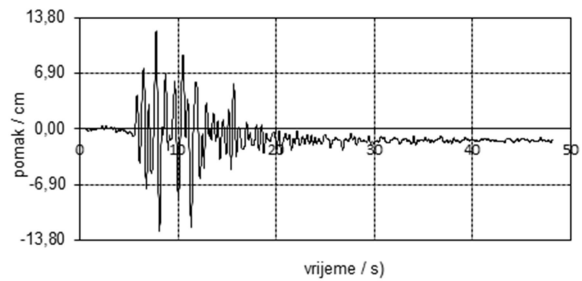
(k) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.55$  g



(l) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



(m) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.65$  g



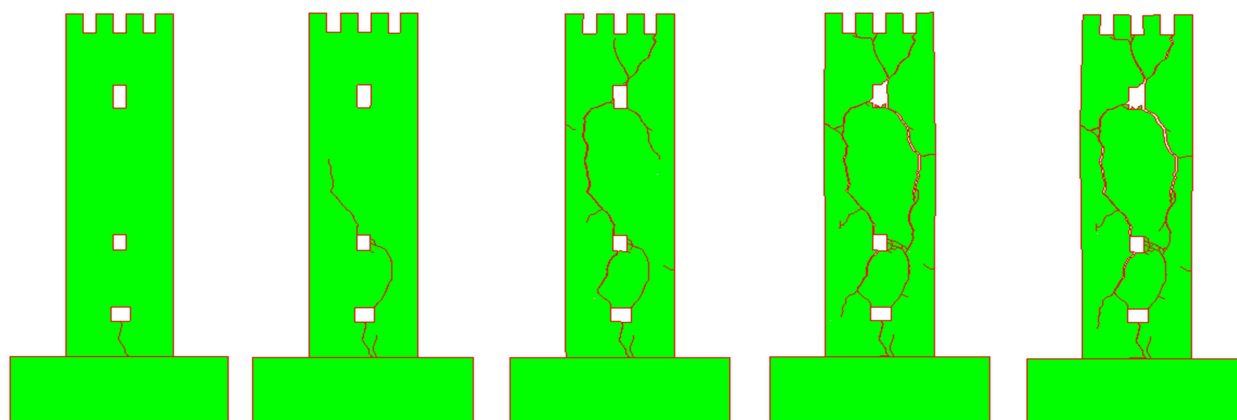
(n) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.68$  g

### SRUŠIO SE

(o) Petrovac – vršno ubrzanje  $a=0.69$  g

### 3.1.5. NASTANAK I ŠIRENJE PUKOTINA ZA PETROVAC

a) 1. rubni uvjet – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi



a)  $t=8.70$  s

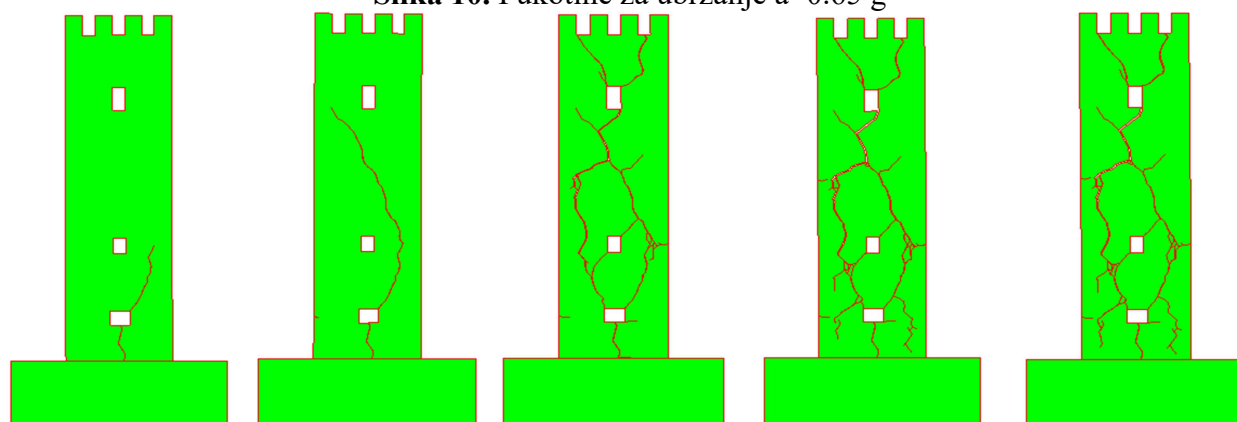
b)  $t=12.10$  s

c)  $t=13.20$  s

d)  $t=16.30$  s

e)  $t=48.20$  s

Slika 10. Pukotine za ubrzanje  $a=0.65$  g



a)  $t=8.35$  s

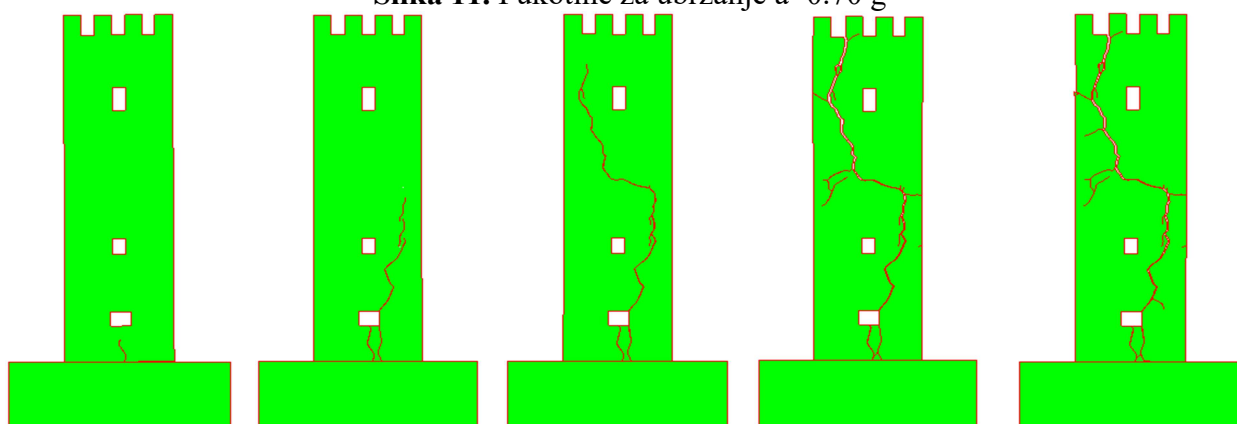
b)  $t=8.85$  s

c)  $t=12.10$  s

d)  $t=16.15$  s

e)  $t=48.20$  s

Slika 11. Pukotine za ubrzanje  $a=0.70$  g



a)  $t=8.25$  s

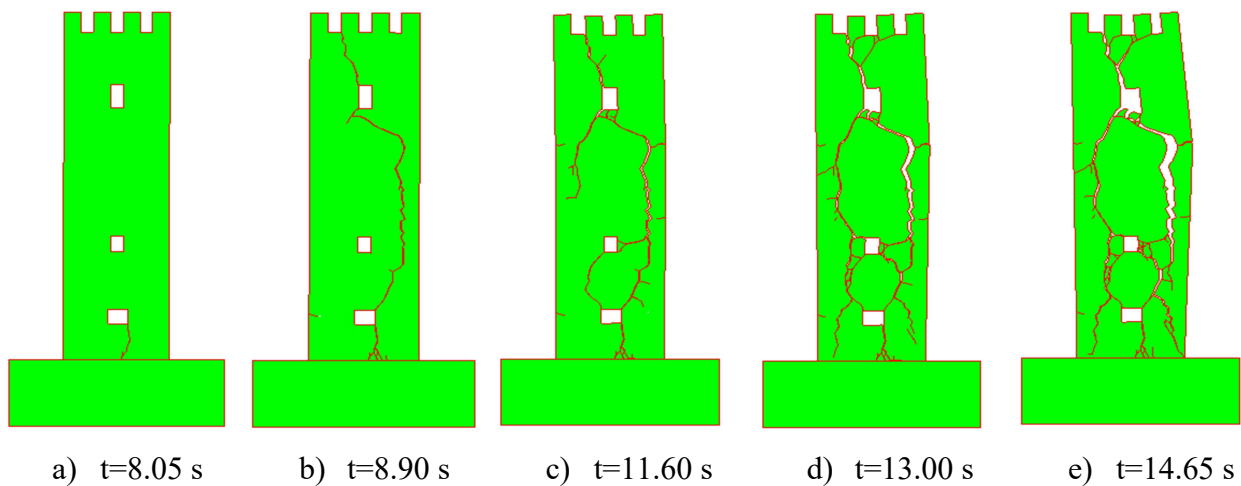
b)  $t=8.40$  s

c)  $t=8.95$  s

d)  $t=11.60$  s

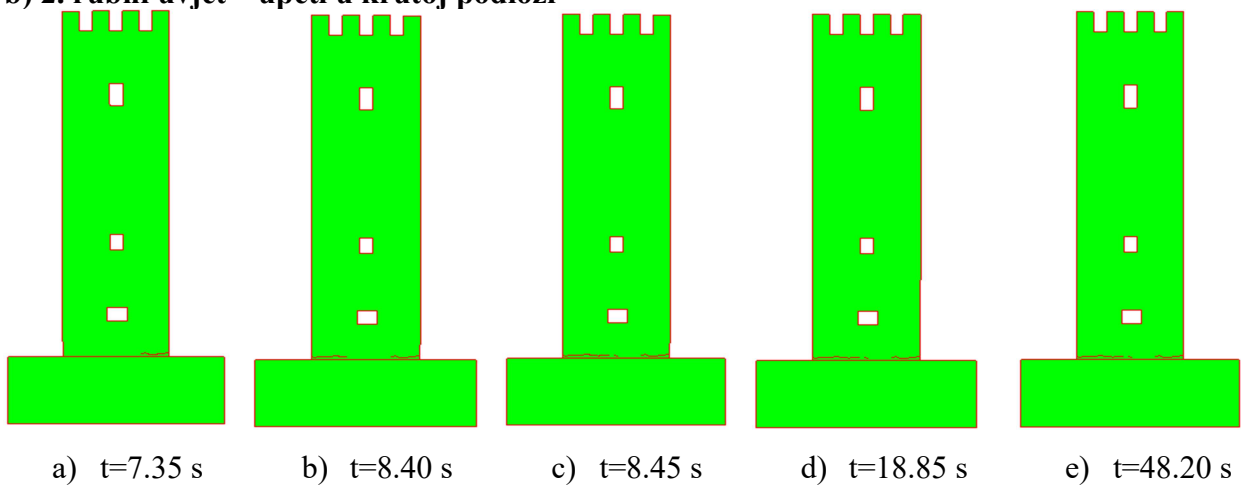
e)  $t=49.20$  s

Slika 12. Pukotine za ubrzanje  $a=0.74$  g

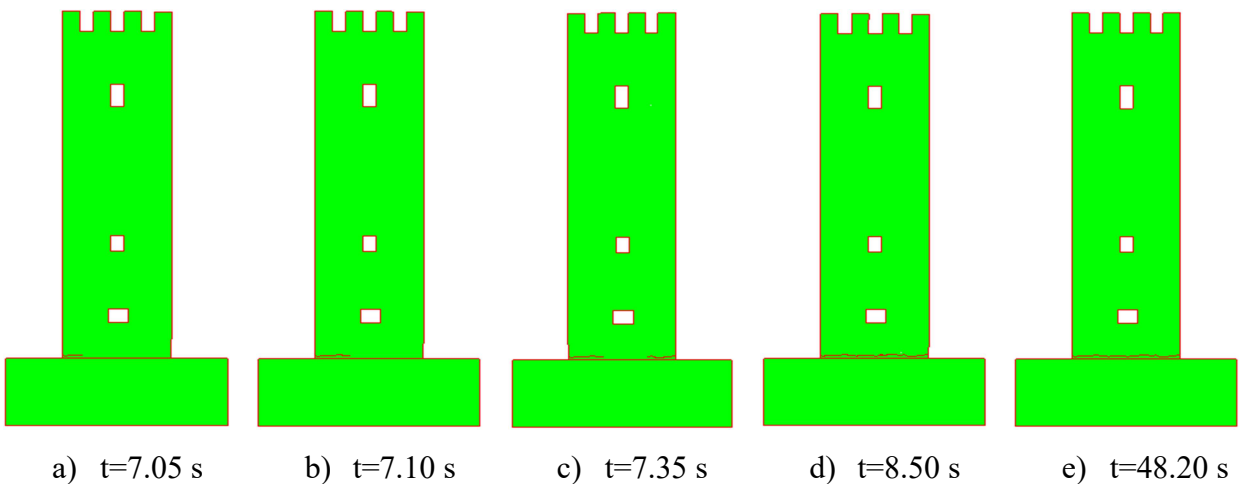


Slika 13. Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a=0.75$  g

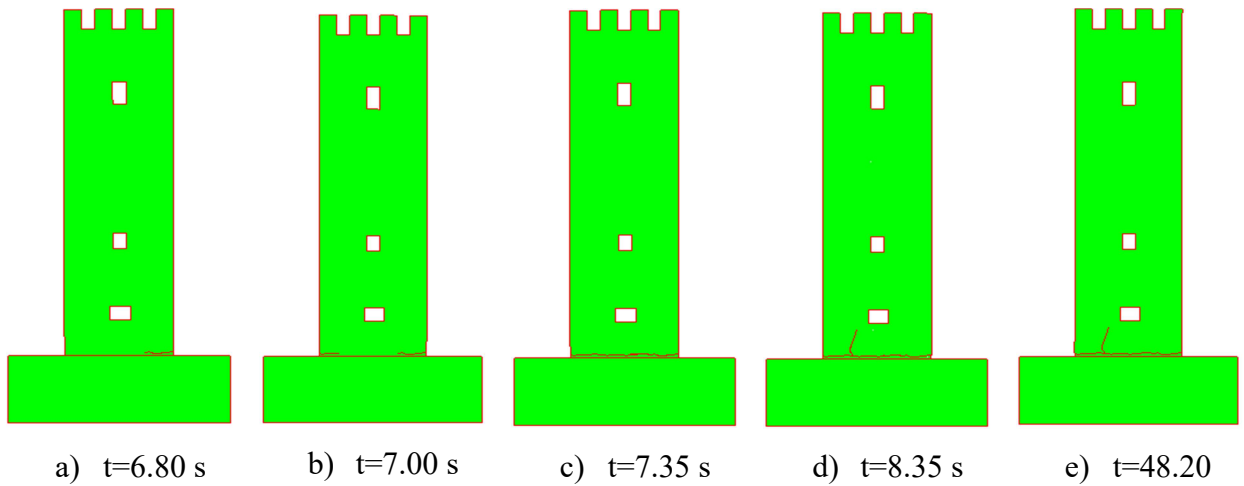
**b) 2. rubni uvjet – upeti u krutoj podlozi**



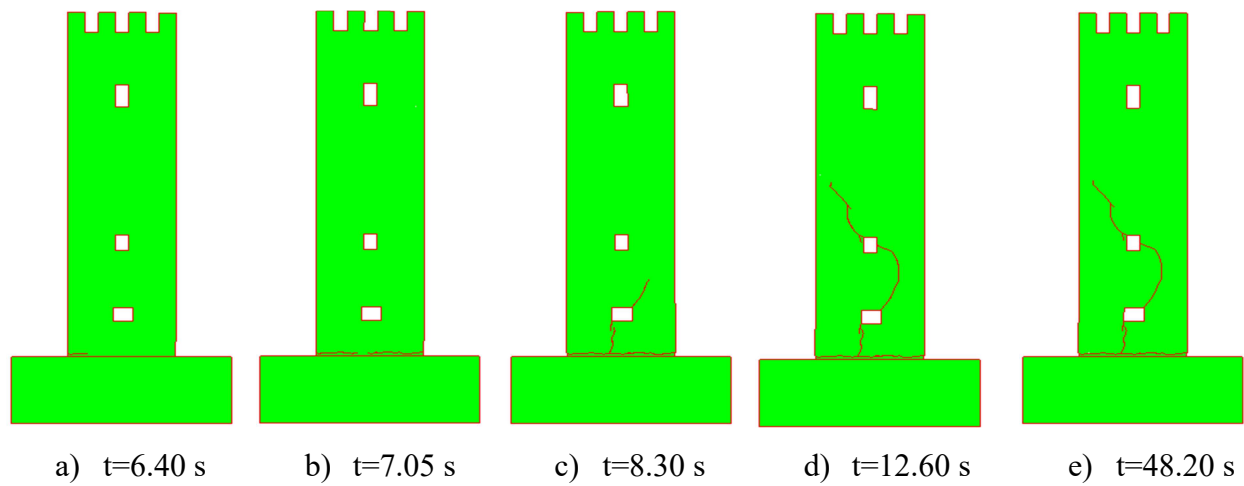
Slika 14. Pukotine za ubrzanje  $a=0.25$  g



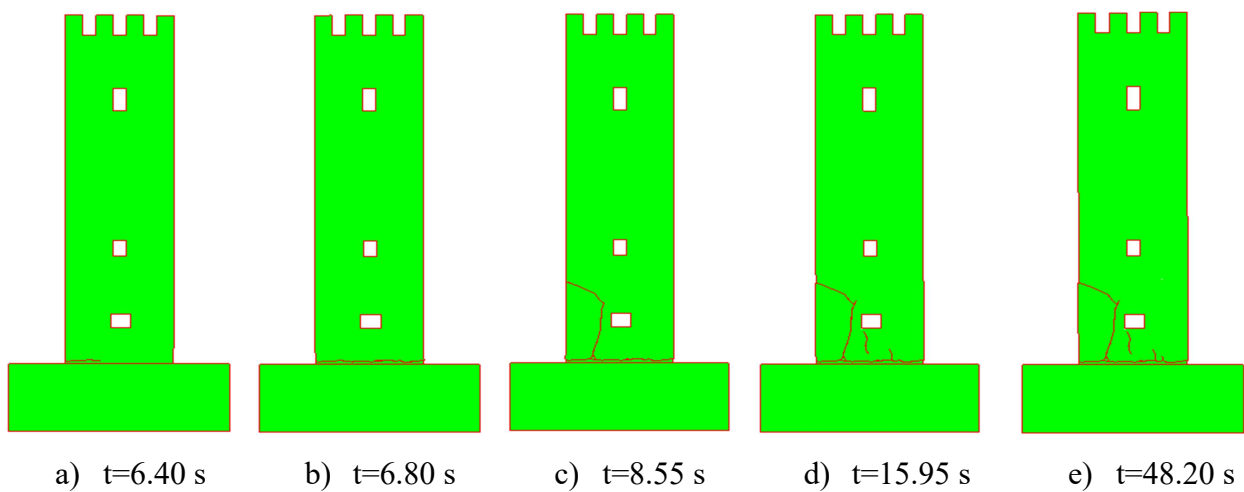
Slika 15. Pukotine za ubrzanje  $a=0.30$  g



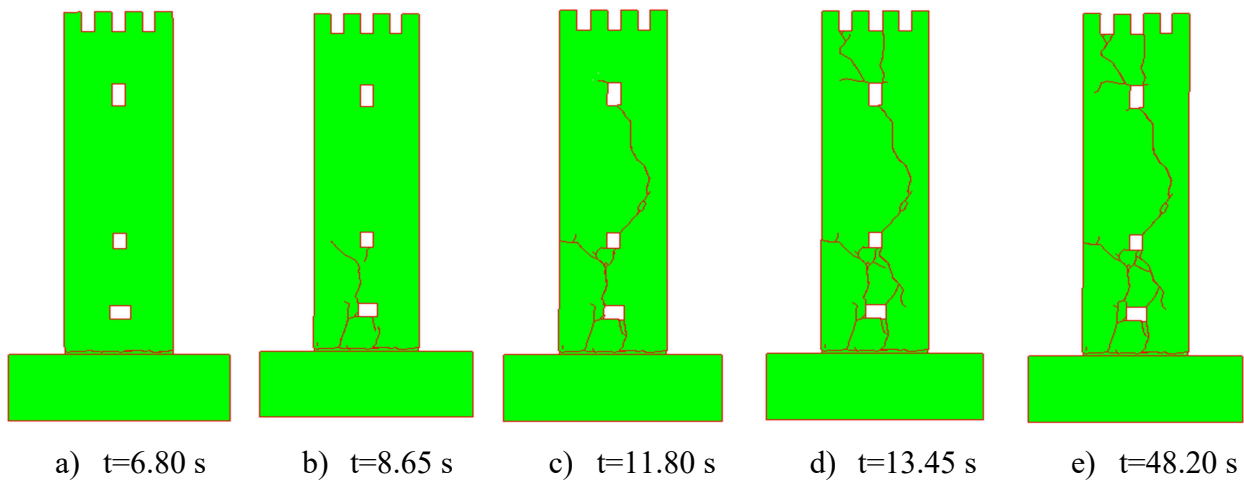
**Slika 16.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.35$  g



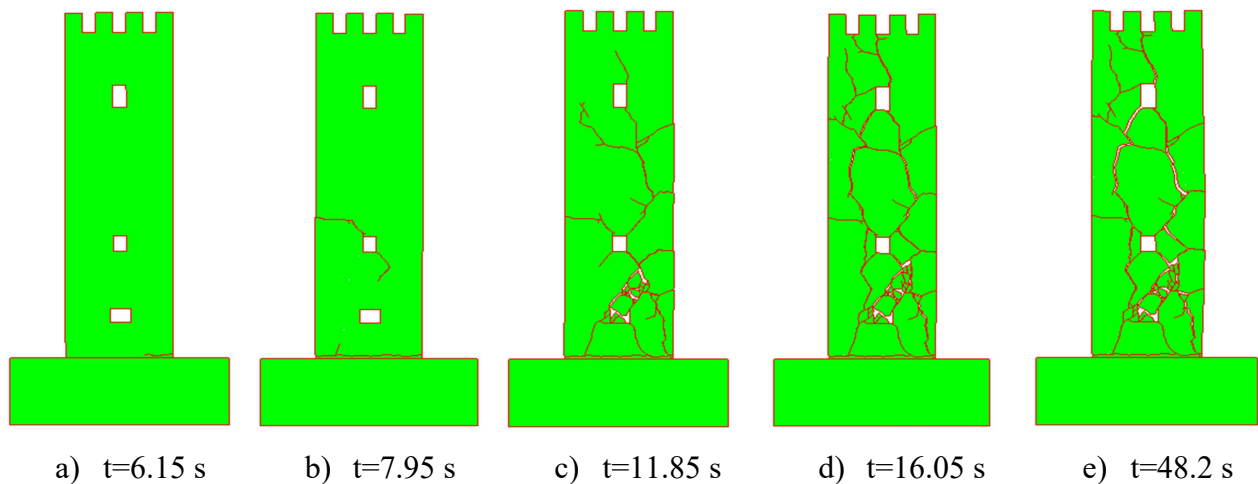
**Slika 17.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.40$  g



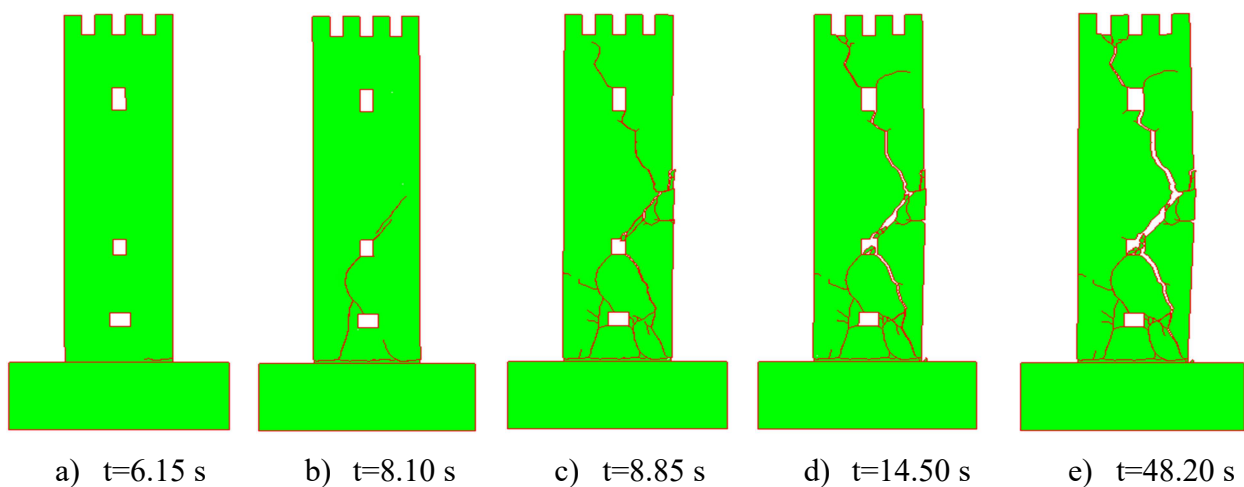
**Slika 18.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.45$  g



**Slika 19.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.50$  g

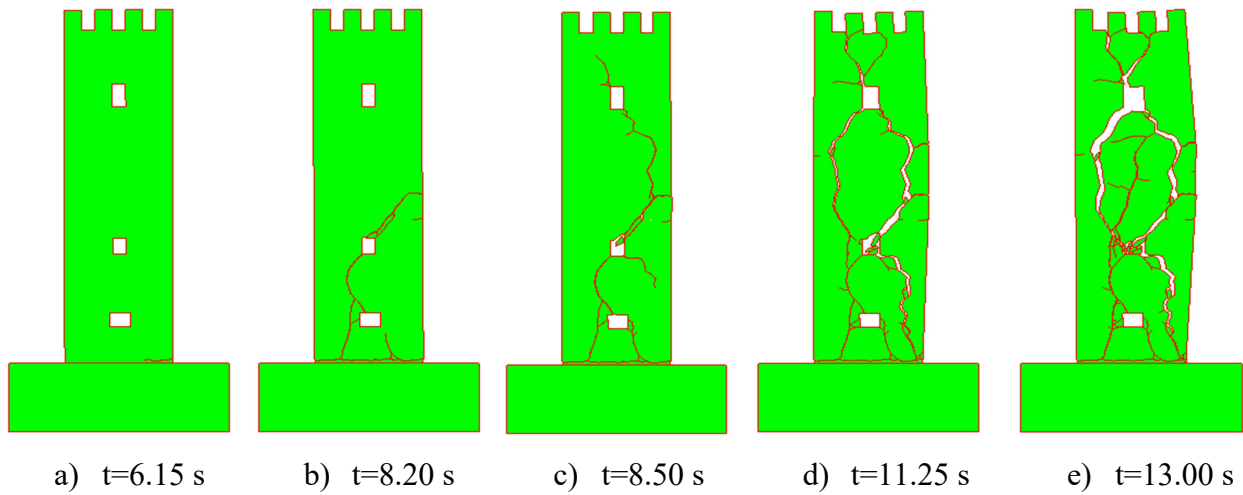


**Slika 20.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.55$  g



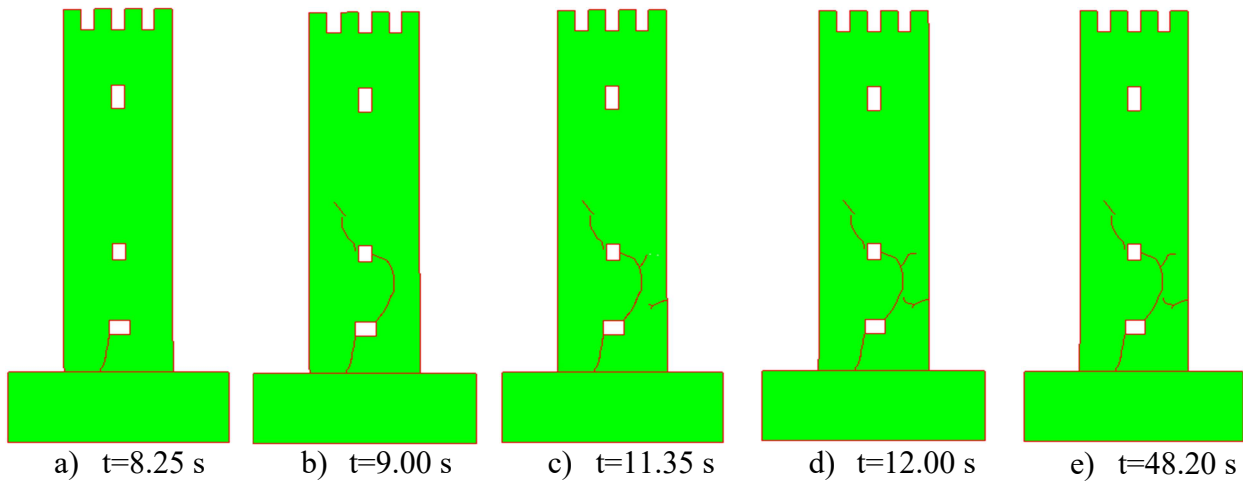
**Slika 21.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.56$  g



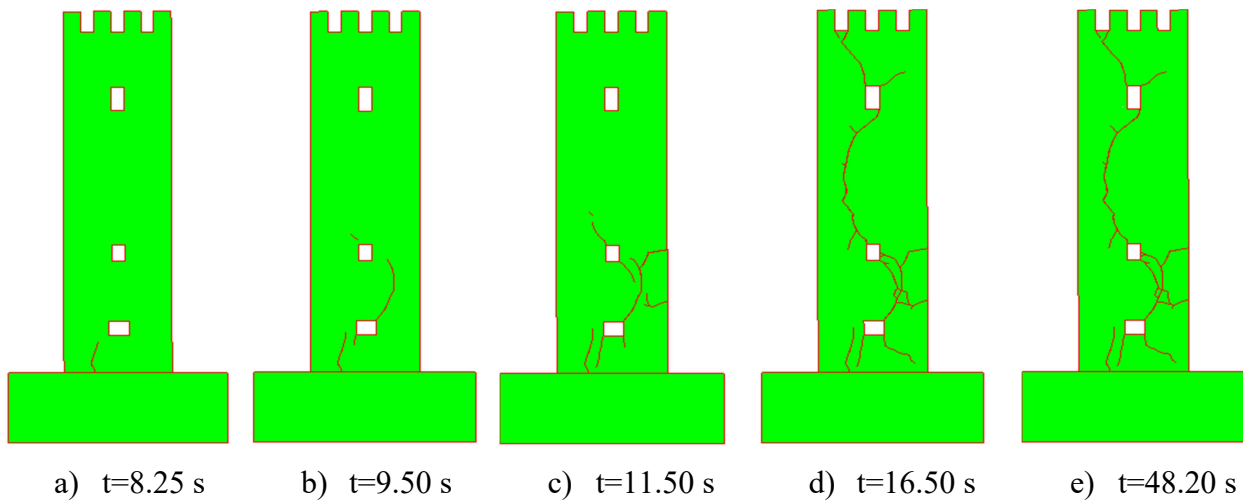


Slika 22. Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a=0.57$  g

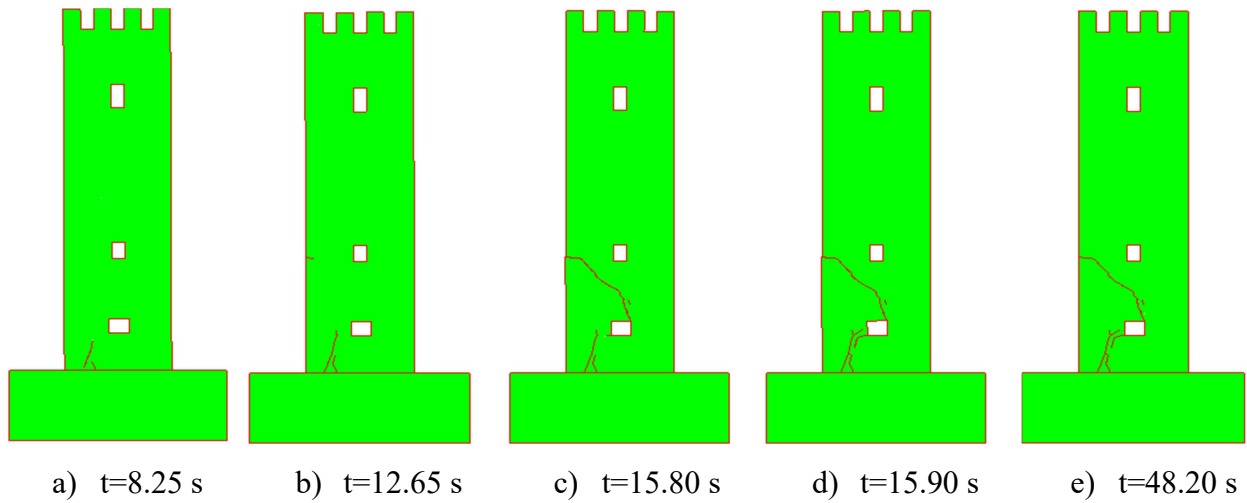
**c) 3. rubni uvjet – slobodnostojeći na krutoj podlozi**



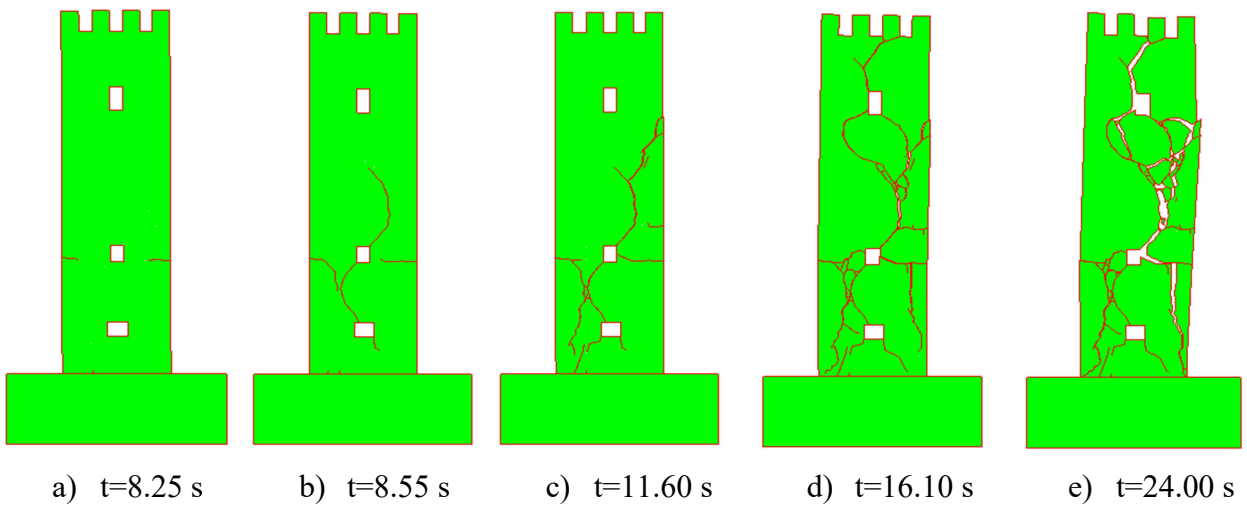
Slika 23. Pukotine za ubrzanje  $a=0.35$  g



Slika 24. Pukotine za ubrzanje  $a=0.40$  g

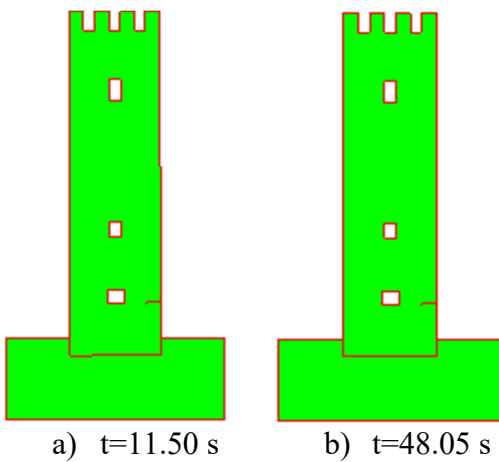


Slika 25. Pukotine za ubrzanje  $a=0.44$  g

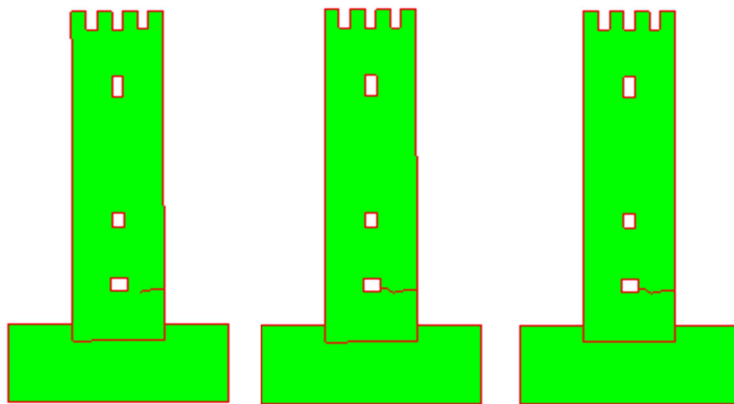


Slika 26. Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a=0.45$  g

**d) 4. rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu**



Slika 27. Pukotine za ubrzanje  $a=0.55$  g

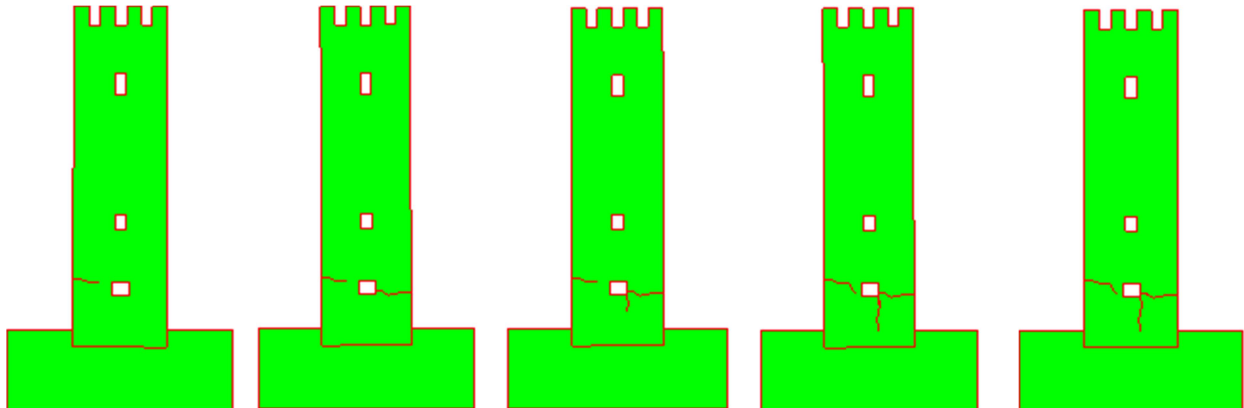


a)  $t=8.25$  s

b)  $t=8.30$  s

c)  $t=48.05$  s

**Slika 28.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.60$  g



a)  $t=7.95$  s

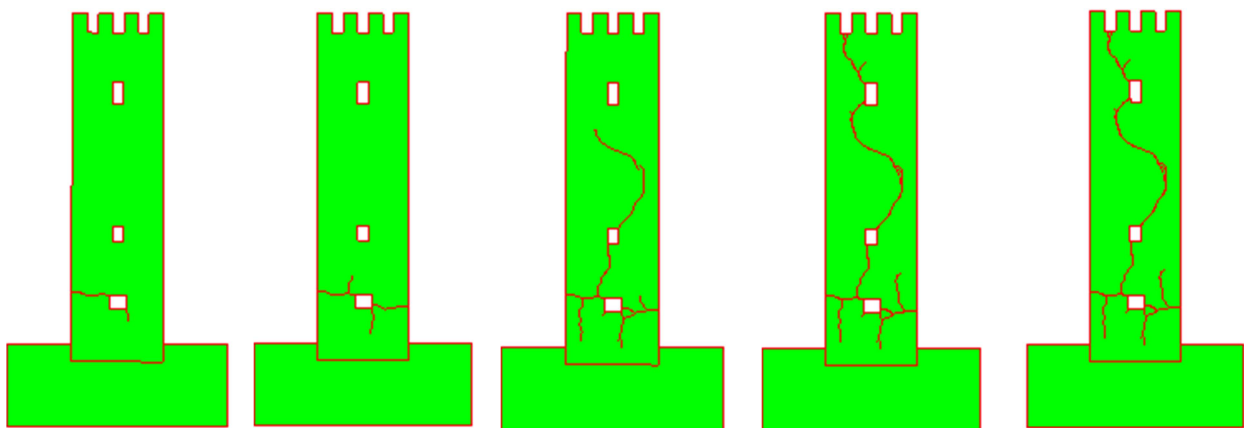
b)  $t=8.25$  s

c)  $t=8.35$  s

d)  $t=11.45$  s

e)  $t=48.05$  s

**Slika 29.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.65$  g



a)  $t=7.95$  s

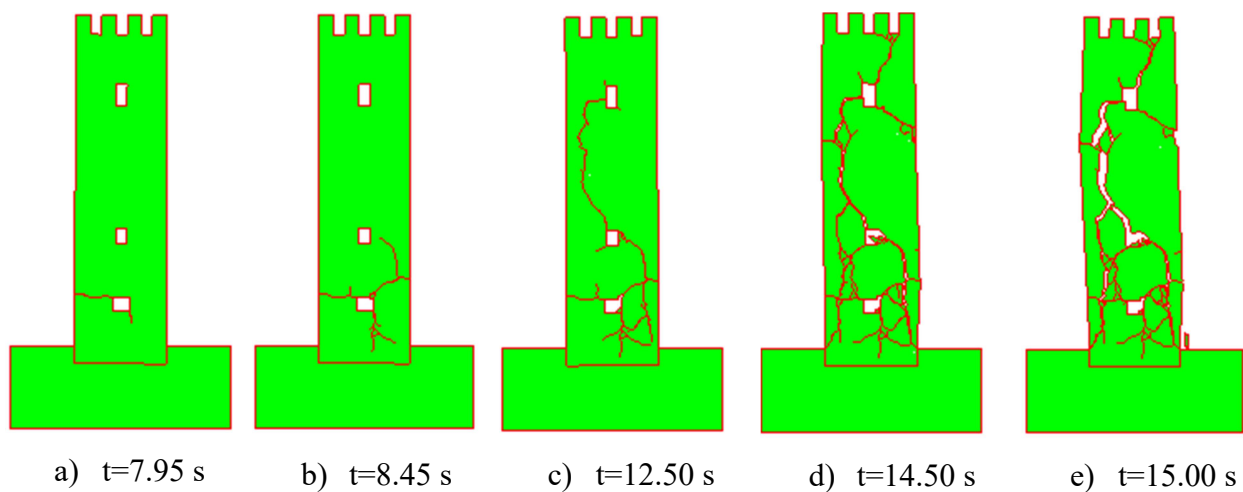
b)  $t=8.45$  s

c)  $t=11.60$  s

d)  $t=16.50$  s

e)  $t=48.05$  s

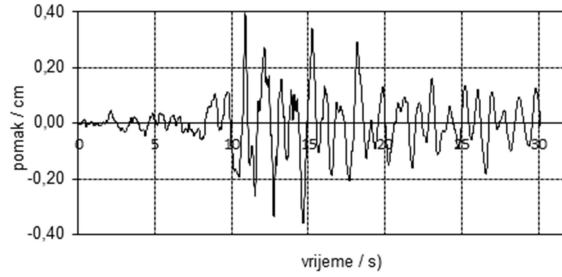
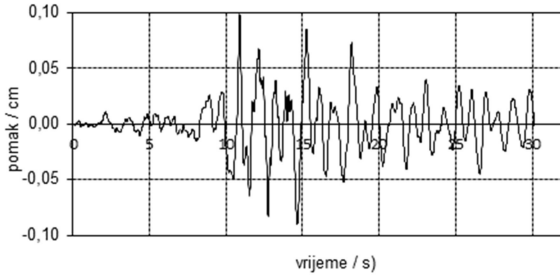
**Slika 30.** Pukotine za ubrzanje  $a=0.68$  g



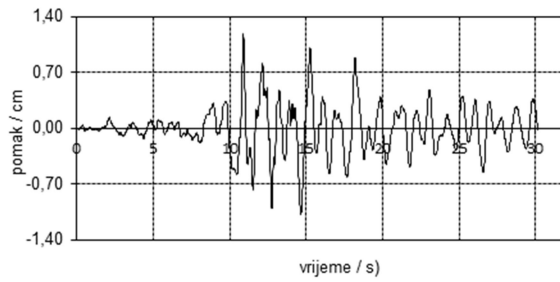
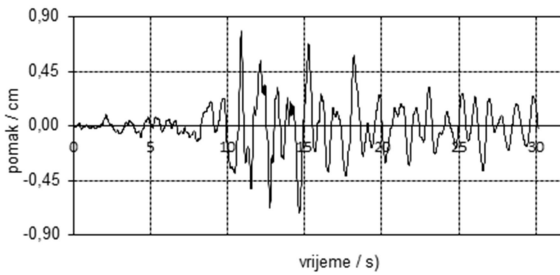
**Slika 31.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a=0.69$  g

## 3.2. POMACI ZA CAMPANO LUCANO

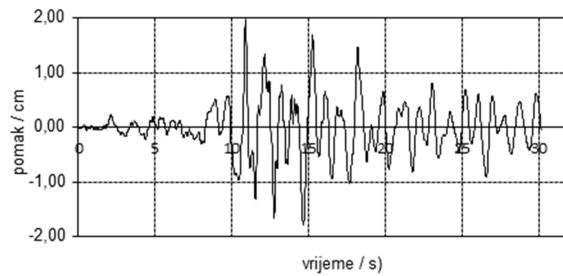
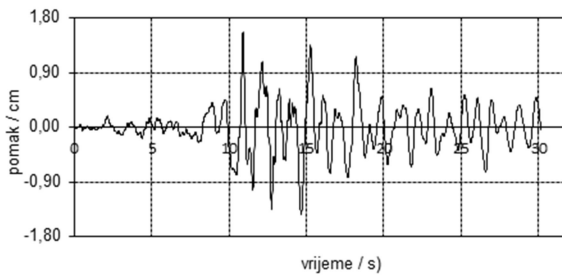
### 3.2.1. Prikaz 1. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi



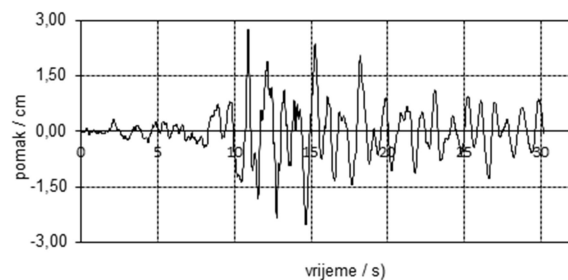
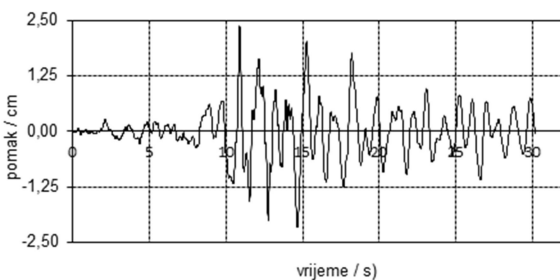
(a) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.05$  g (b) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



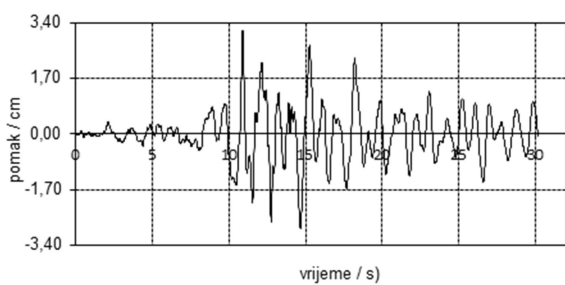
(c) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g (d) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



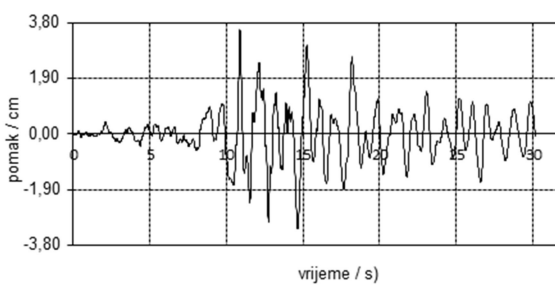
(e) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g (f) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g



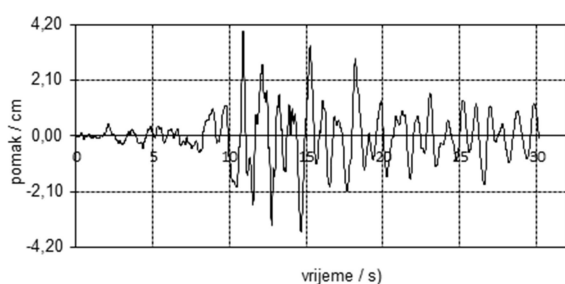
(g) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g (h) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g



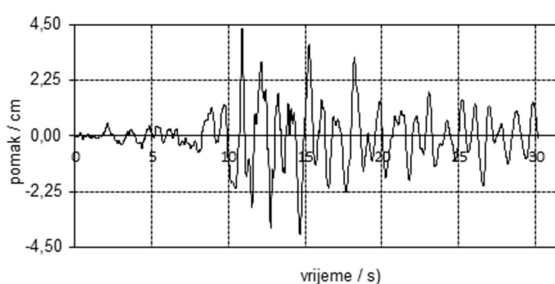
(i) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.60$  g



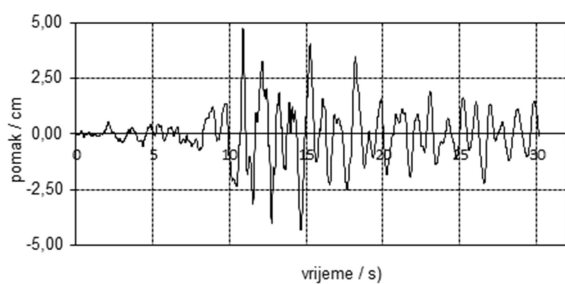
(j) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.80$  g



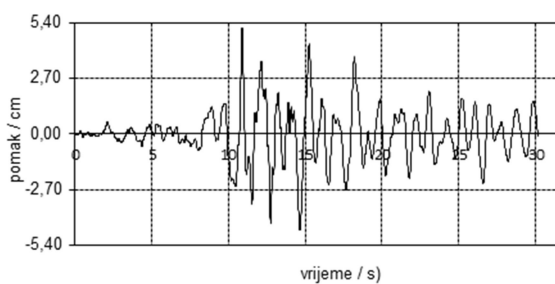
(k) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.00$  g



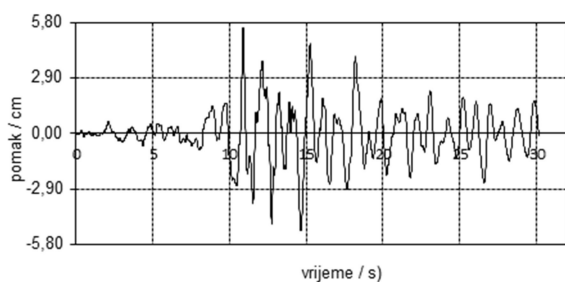
(l) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.20$  g



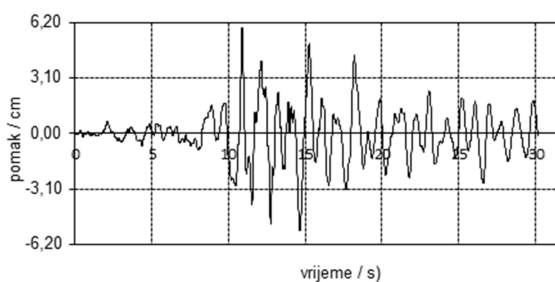
(m) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.40$  g



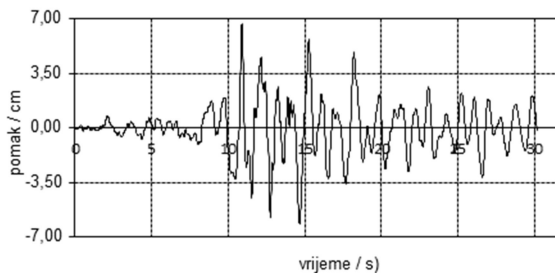
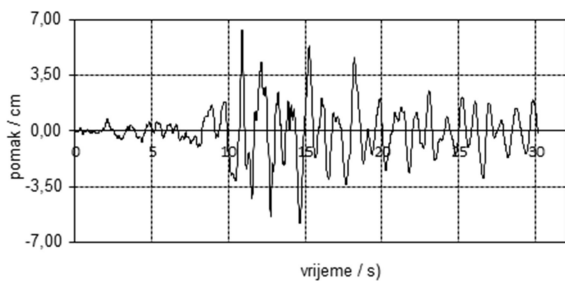
(n) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.60$  g



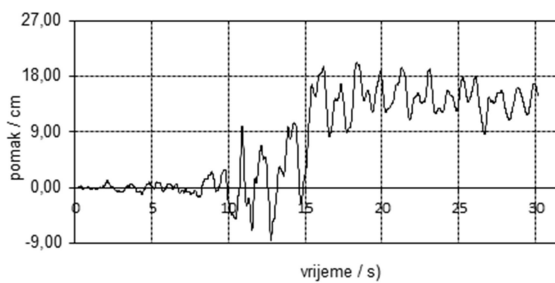
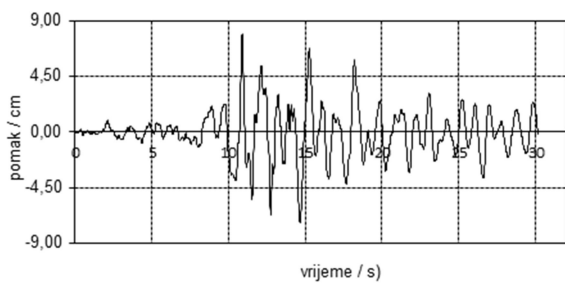
(o) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.80$  g



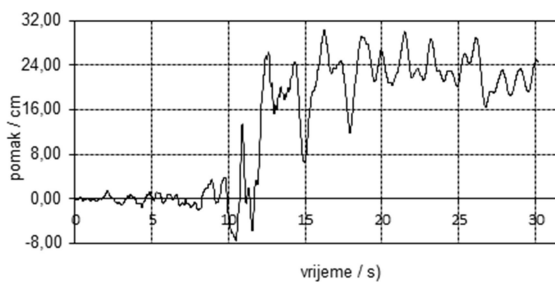
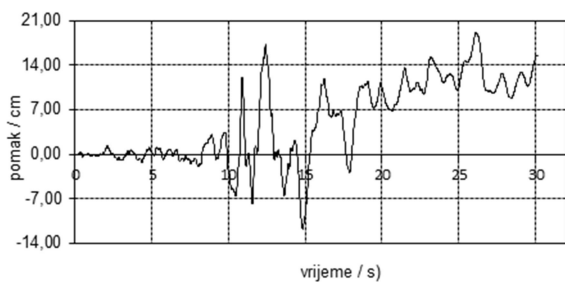
(p) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.00$  g



(r) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.20$  g (s) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.40$  g



(t) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.00$  g (u) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=5.00$  g

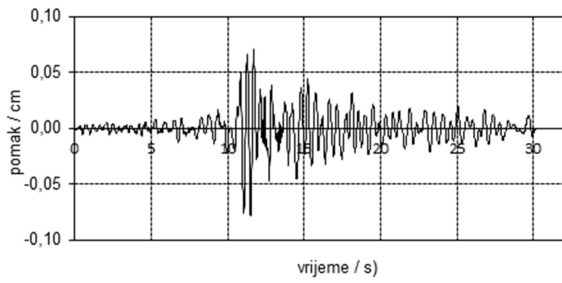


(v) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=6.00$  g (z) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=6.60$  g

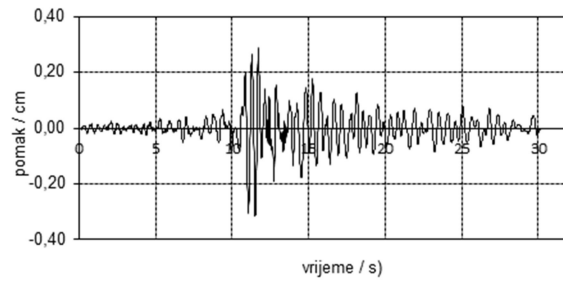
## SRUŠIO SE

(w) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=6.70$  g

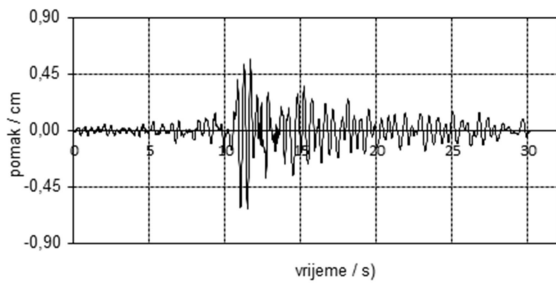
### 3.2.2. Prikaz 2. rubnog uvjeta – upeti u krutoj podlozi



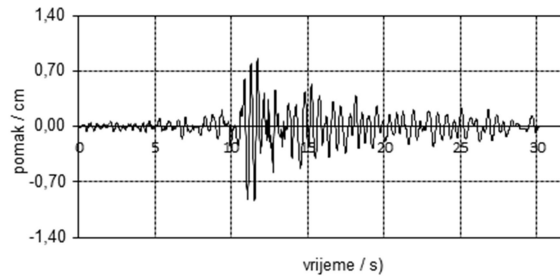
(a) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=0.05$  g



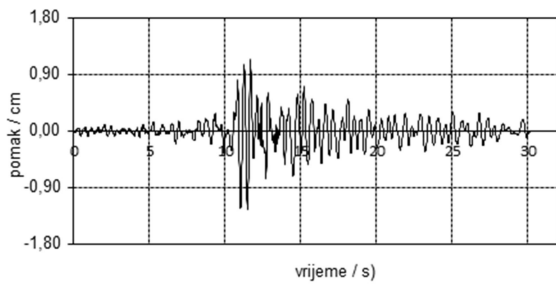
(b) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



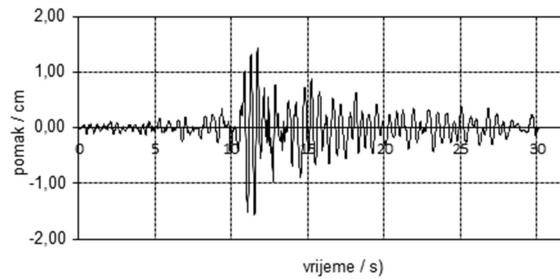
(c) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



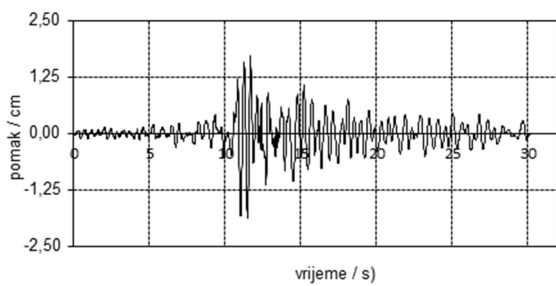
(d) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



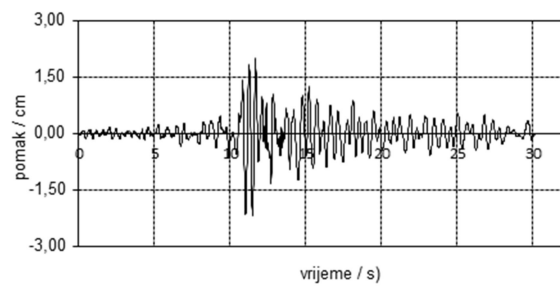
(e) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=0.80$  g



(f) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=1.00$  g

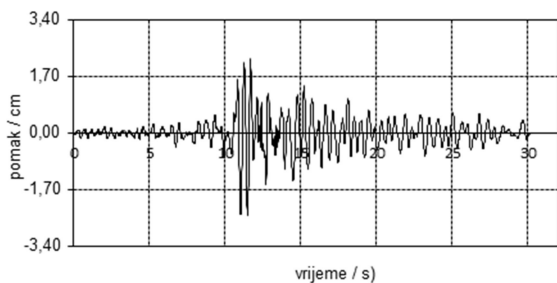


(g) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=1.20$  g

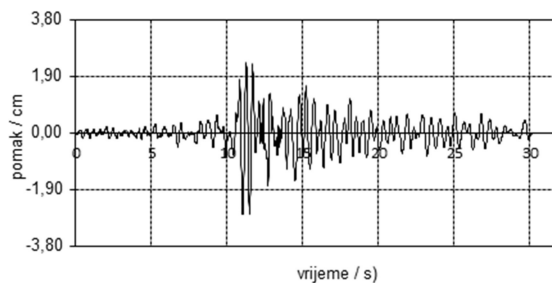


(h) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=1.40$  g

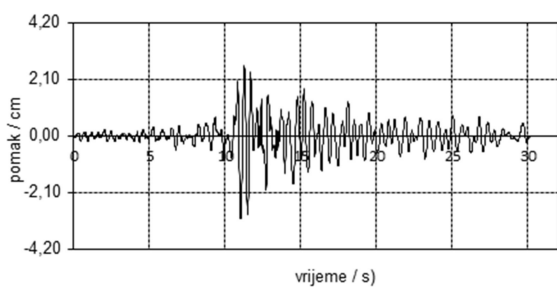




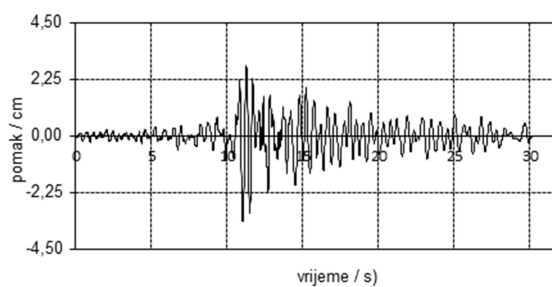
(i) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=1.60$  g



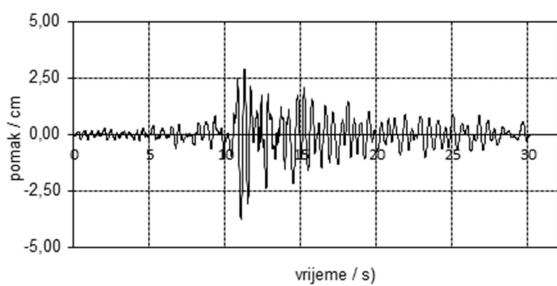
(j) Campano Lucan–vršno ubrzanje  $a=1.80$  g



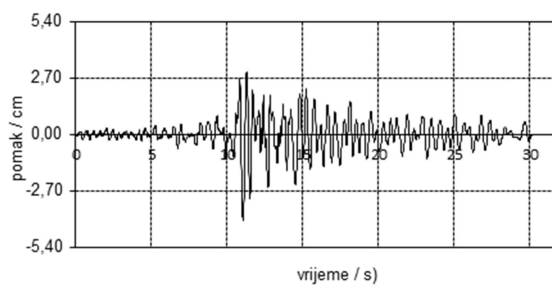
(k) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=2.00$  g



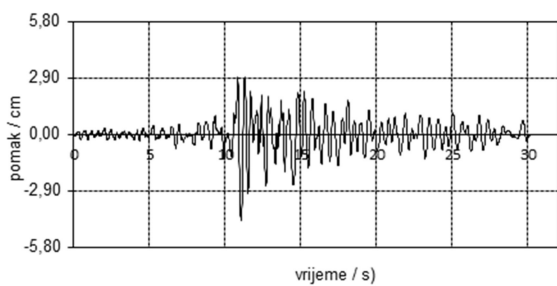
(l) Campano Lucan–vršno ubrzanje  $a=2.20$  g



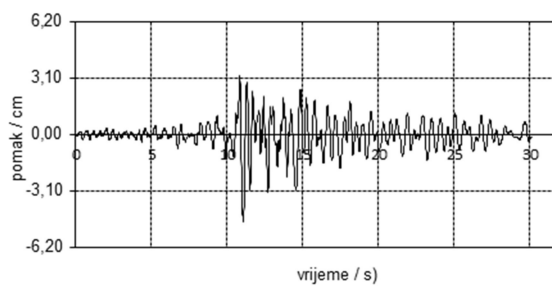
(m) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=2.40$  g



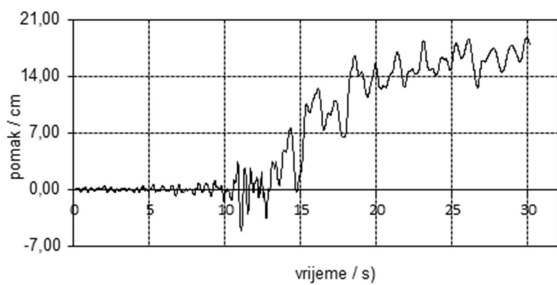
(n) Campano Lucan–vršno ubrzanje  $a=2.60$  g



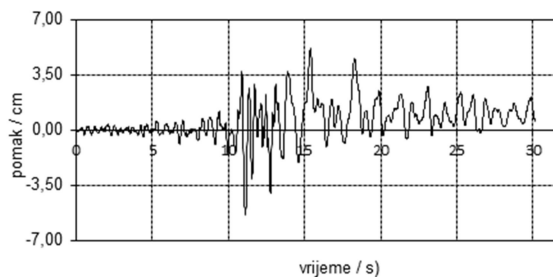
(o) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=2.80$  g



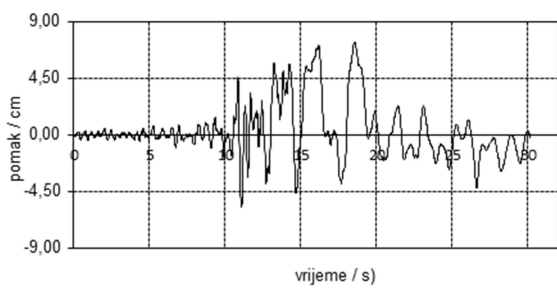
(p) Campano Lucan–vršno ubrzanje  $a=3.00$  g



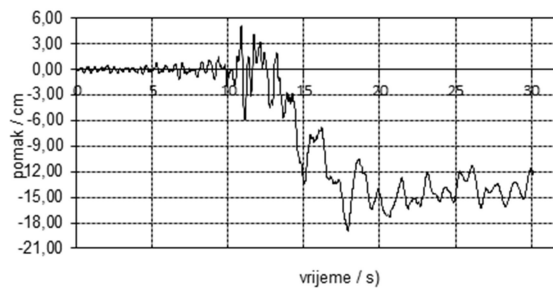
(r) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=3.20$  g



(s) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=3.40$  g



(t) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=4.00$  g

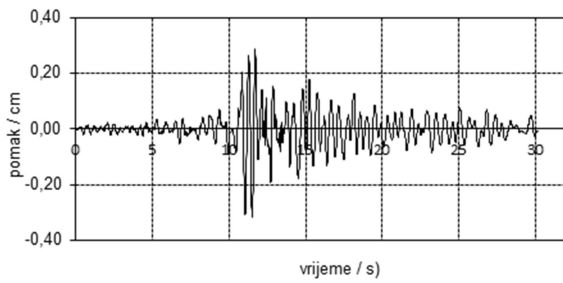


(u) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=4.40$  g

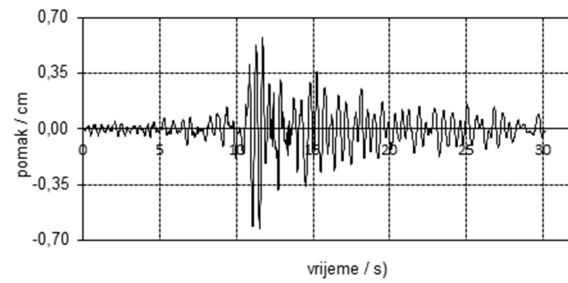
### SRUŠIO SE

(v) Campano Lucano–vršno ubrzanje  $a=4.45$  g

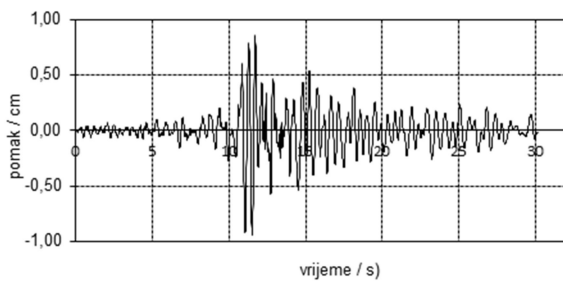
### 3.2.3. Prikaz 3. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na krutoj podlozi



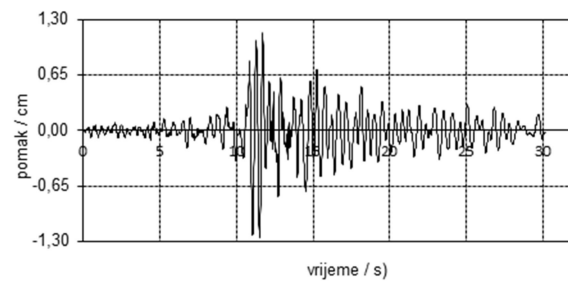
(a) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



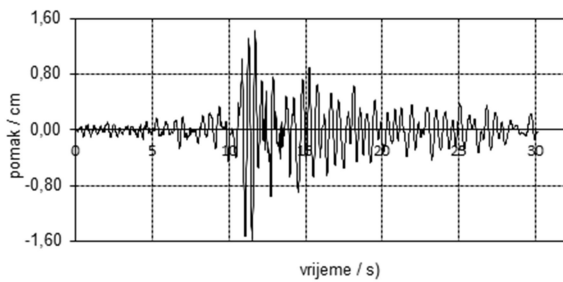
(b) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



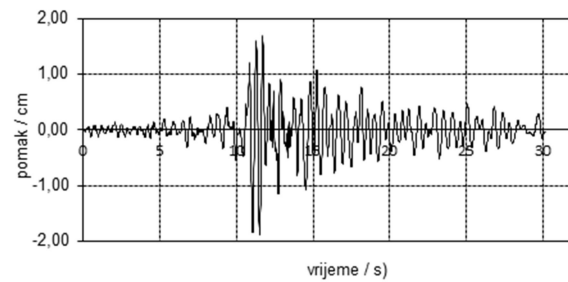
(c) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



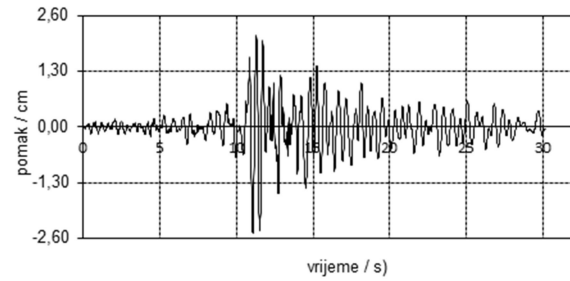
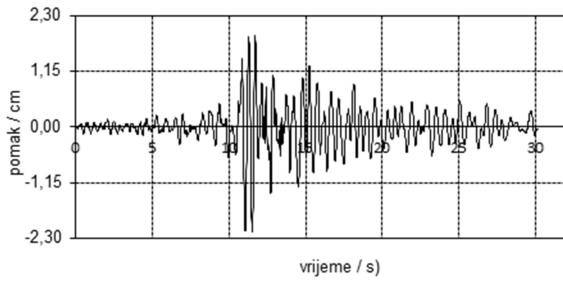
(d) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g



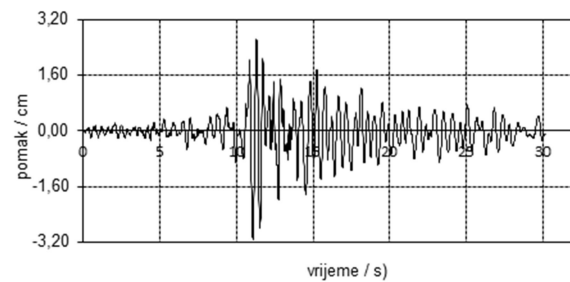
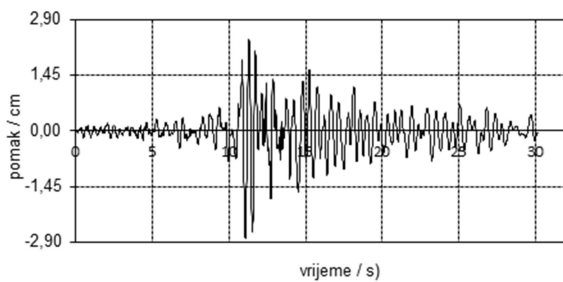
(e) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g



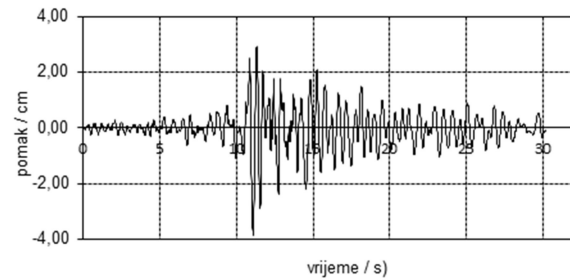
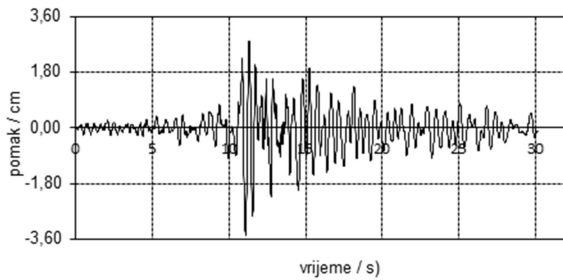
(f) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g



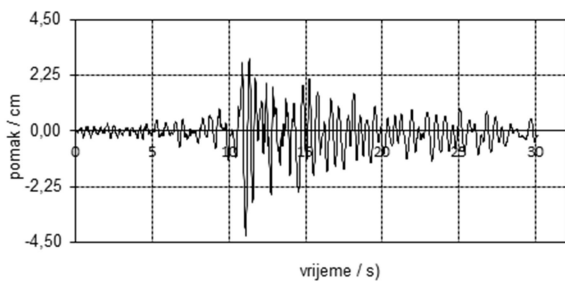
(g) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g (h) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.60$  g



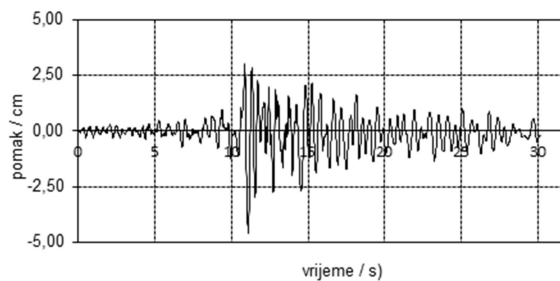
(i) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.80$  g (j) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.00$  g



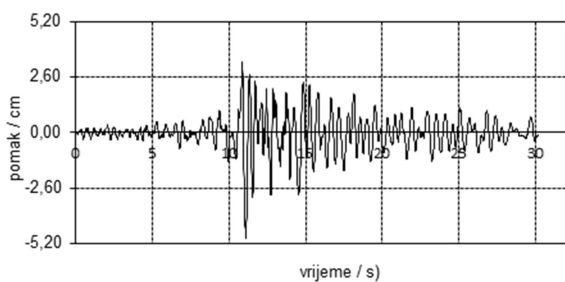
(k) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.20$  g (l) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.40$  g



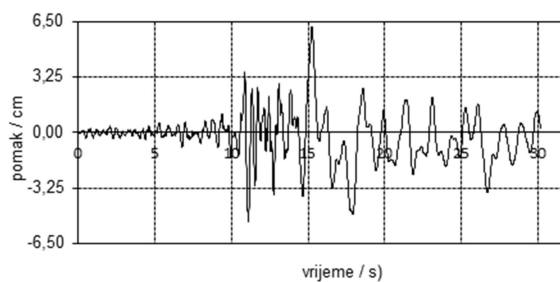
(m) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.60$  g



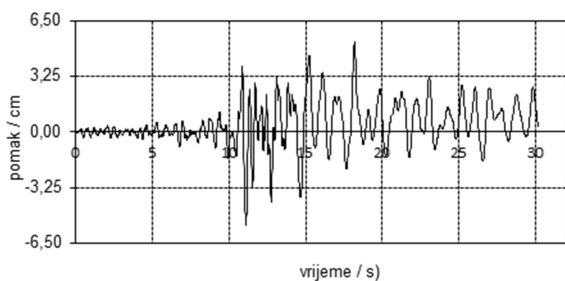
(n) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.80$  g



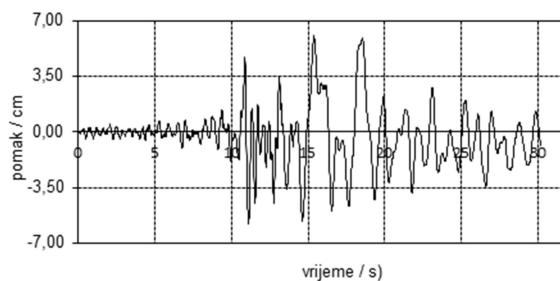
(o) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.00$  g



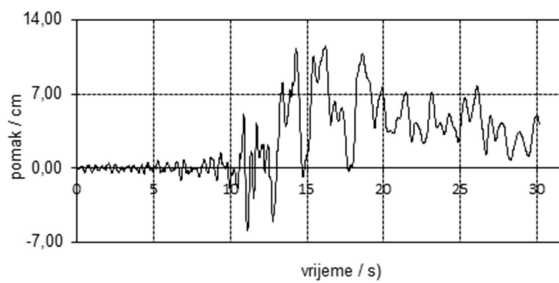
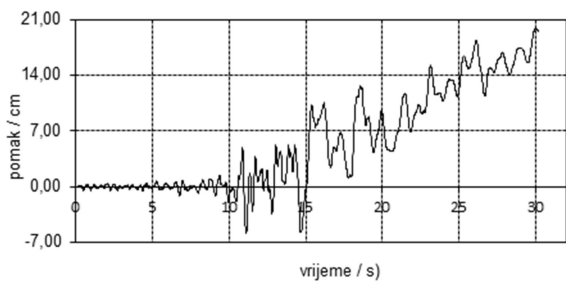
(p) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.20$  g



(r) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.40$  g



(s) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.00$  g

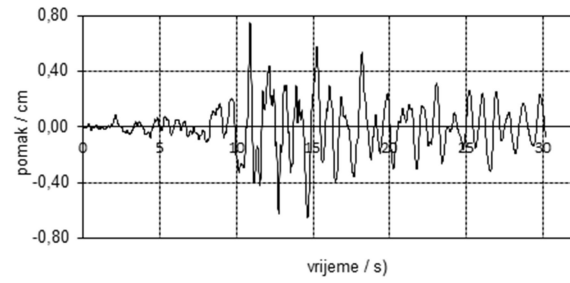
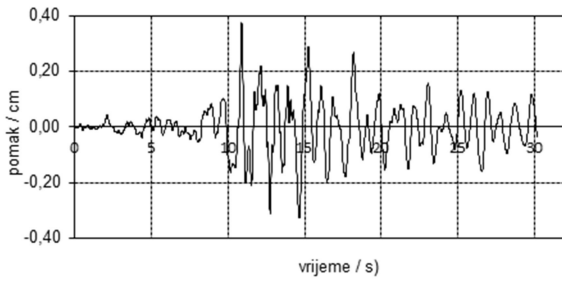


(t) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.20$  g (u) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.30$  g

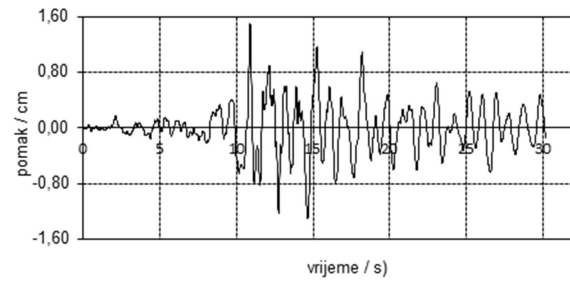
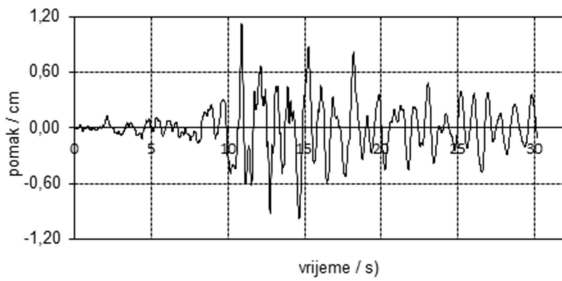
### SRUŠIO SE

(v) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.35$  g

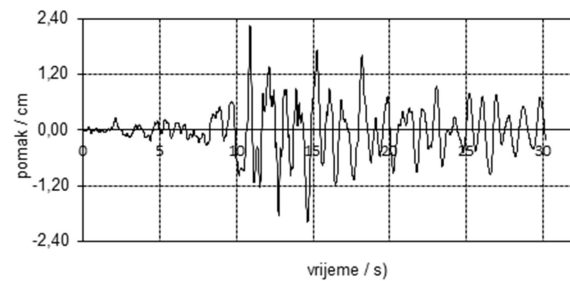
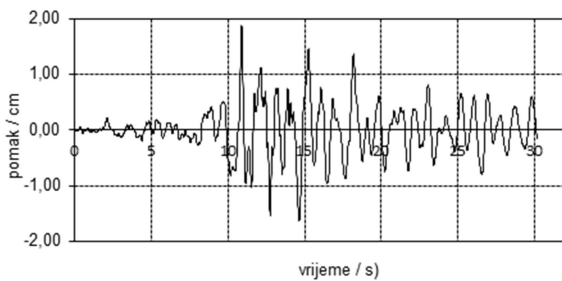
### 3.2.4. Prikaz 4. rubnog uvjeta – ukopan u elastičnu podlogu



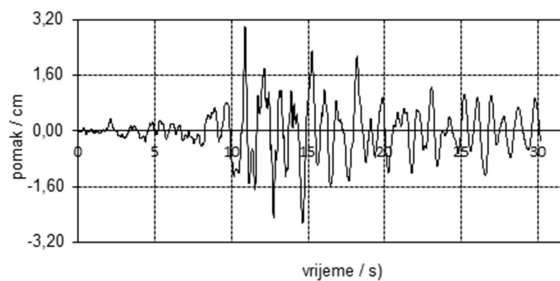
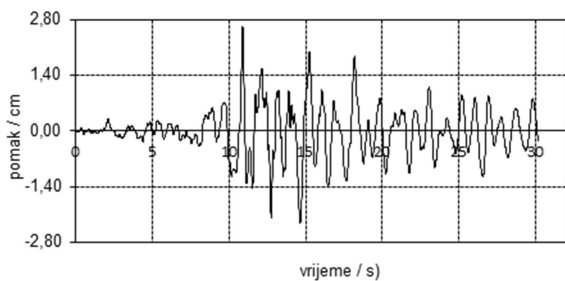
(a) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g (b) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



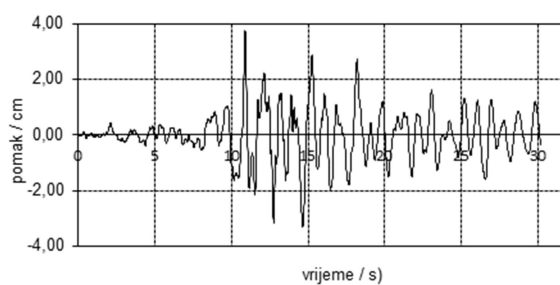
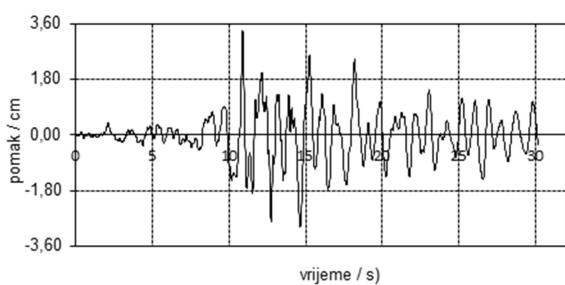
(c) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g (d) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g



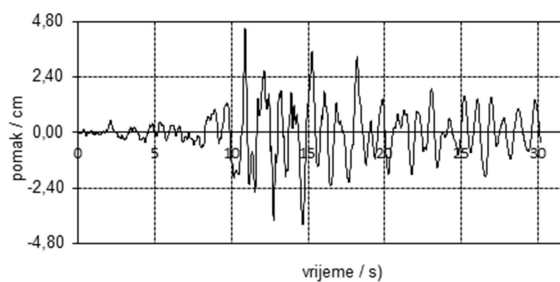
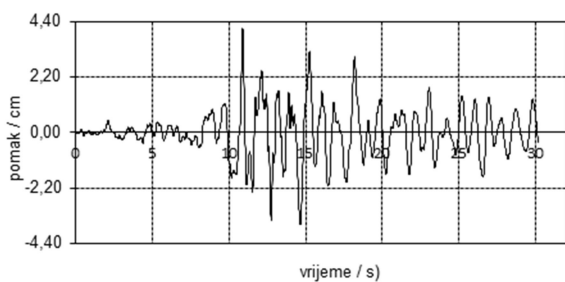
(e) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g (f) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g



(g) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g (h) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.60$  g

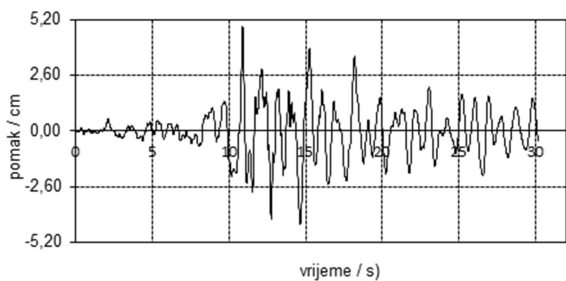


(i) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=1.80$  g (j) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.00$  g

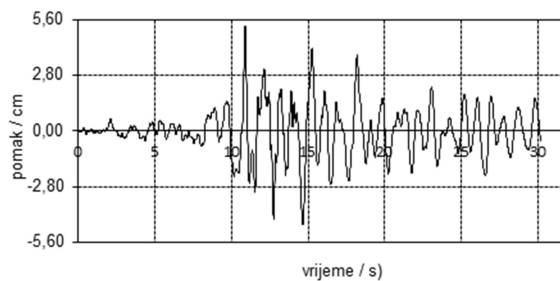


(k) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.20$  g (l) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.40$  g

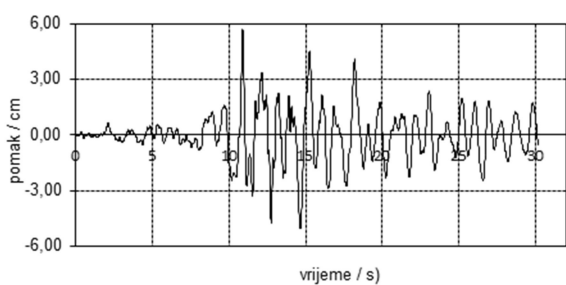




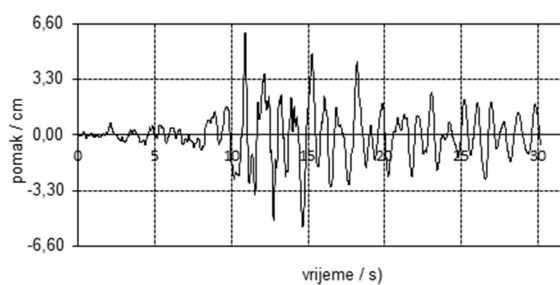
(m) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.60$  g



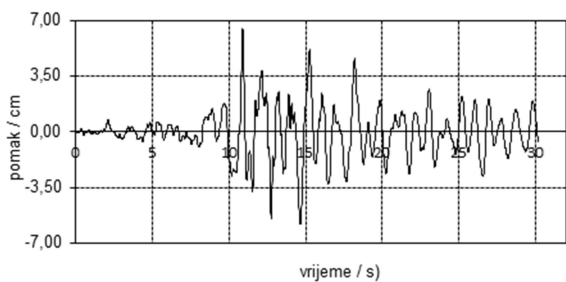
(n) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=2.80$  g



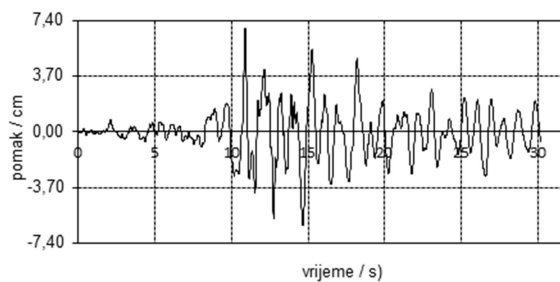
(o) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.00$  g



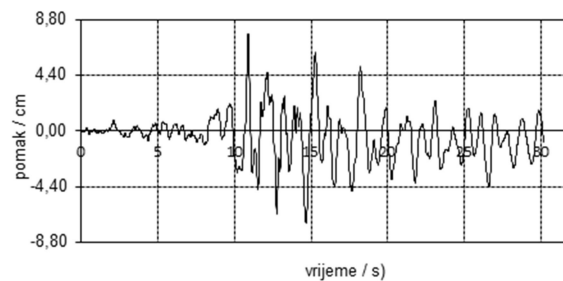
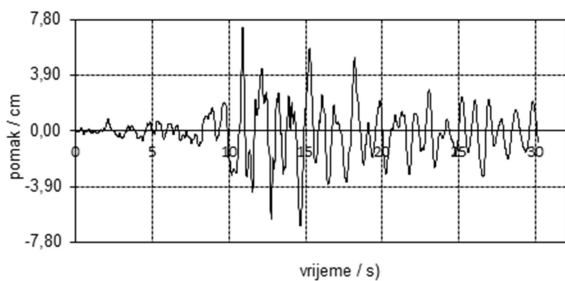
(p) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.20$  g



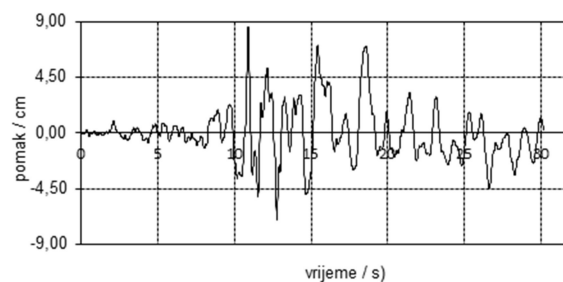
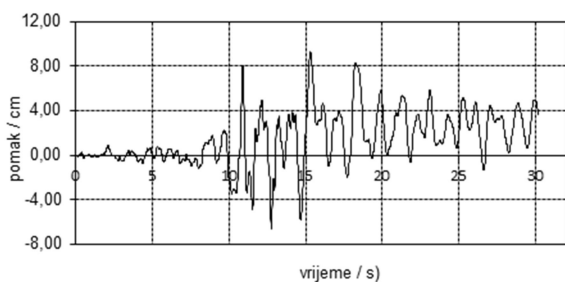
(r) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.40$  g



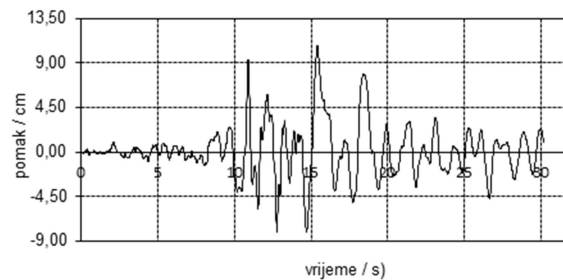
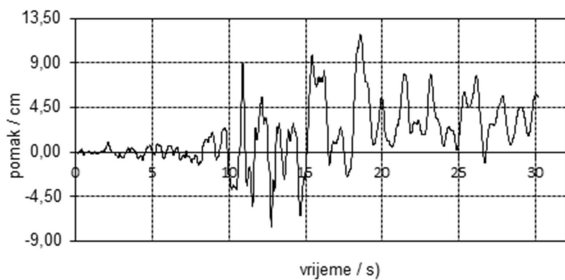
(s) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.60$  g



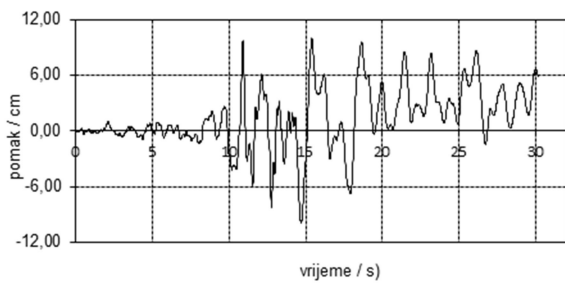
(t) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=3.80$  g (u) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.00$  g



(v) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.20$  g (z) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.40$  g



(ž) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.60$  g (w) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.80$  g

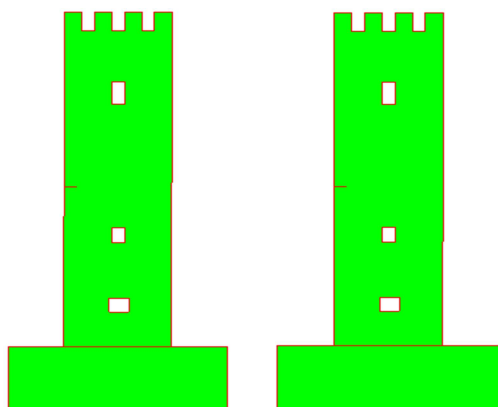


## SRUŠIO SE

(y) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=4.95$  g (q) Campano Lucano – vršno ubrzanje  $a=5.00$  g

### 3.2.5. NASTANAK I ŠIRENJE PUKOTINA ZA CAMPANO LUCANO

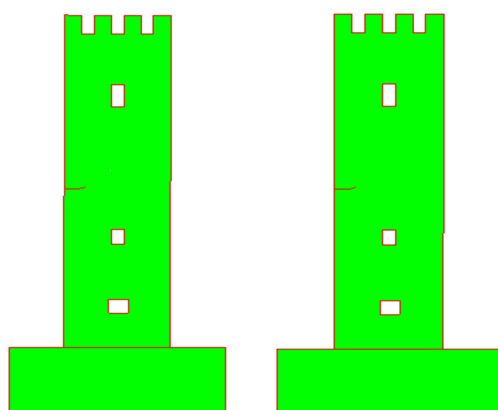
a) 1. rubni uvjet – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi



a)  $t=12.60$  s

b)  $t=30.15$  s

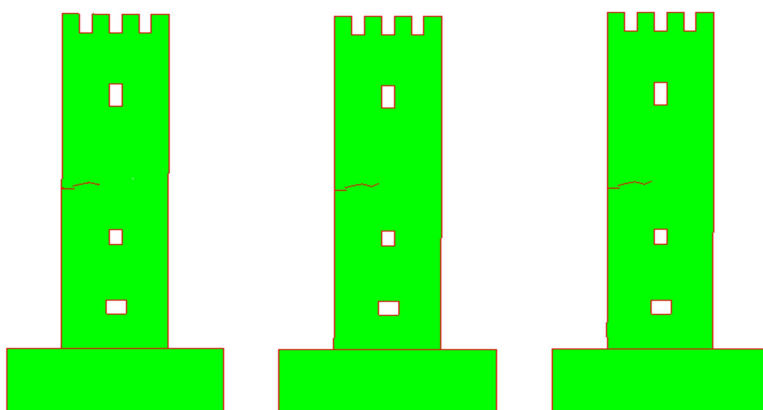
**Slika 32.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.20$  g



a)  $t=12.60$  s

b)  $t=30.15$  s

**Slika 33.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.40$  g

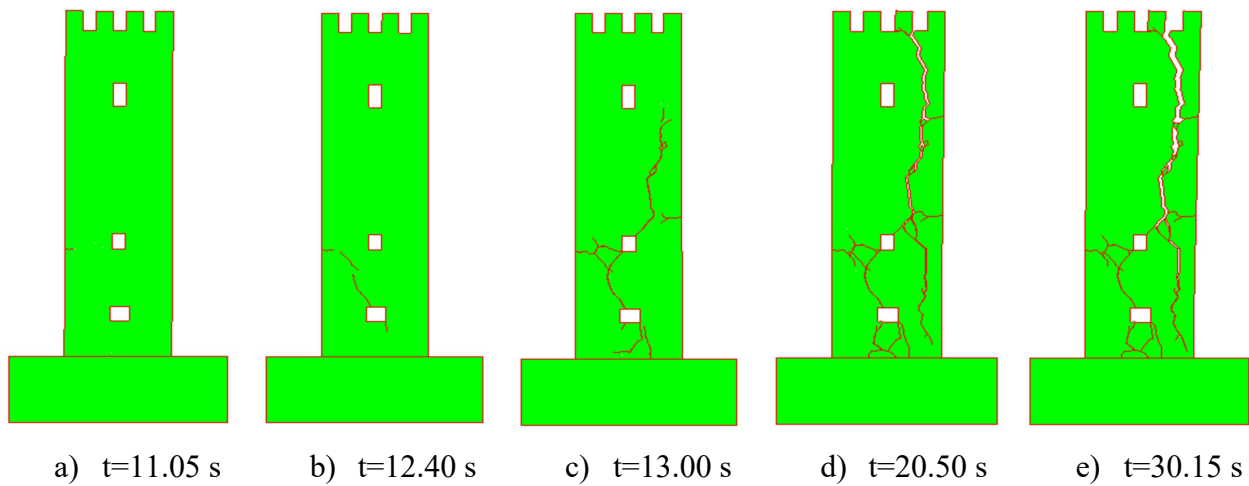


a)  $t=12.60$  s

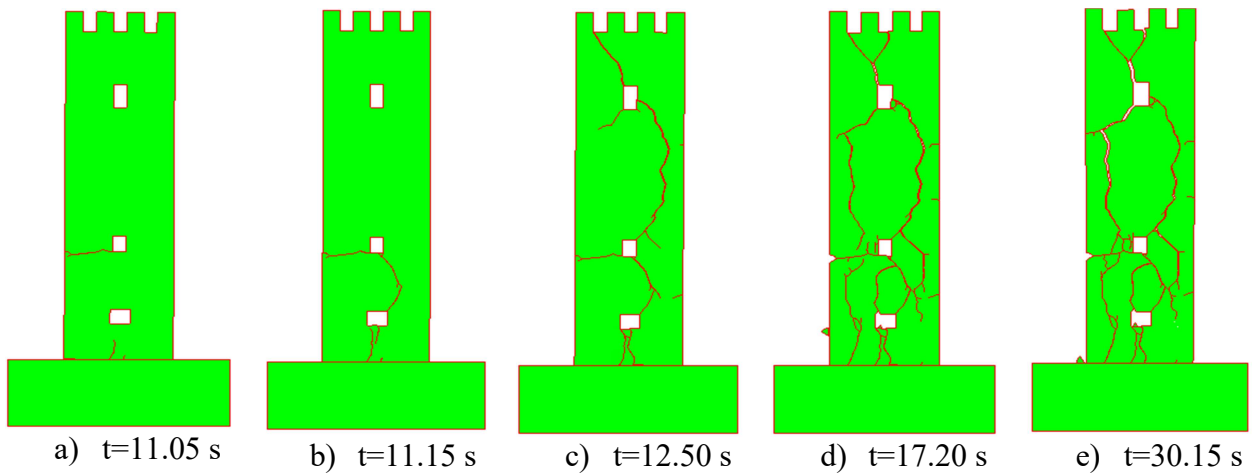
b)  $t=12.65$  s

c)  $t=30.15$  s

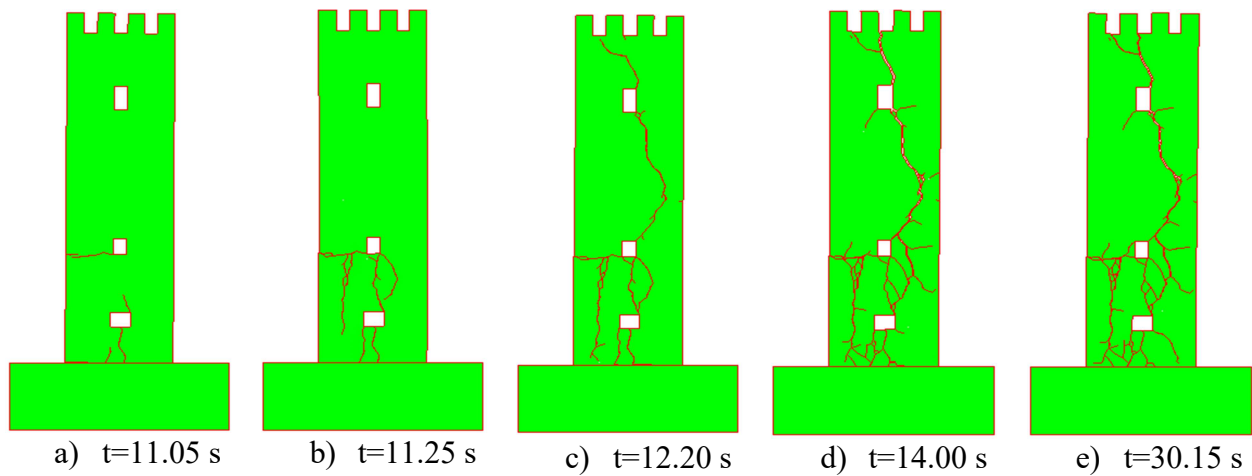
**Slika 34.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.00$  g



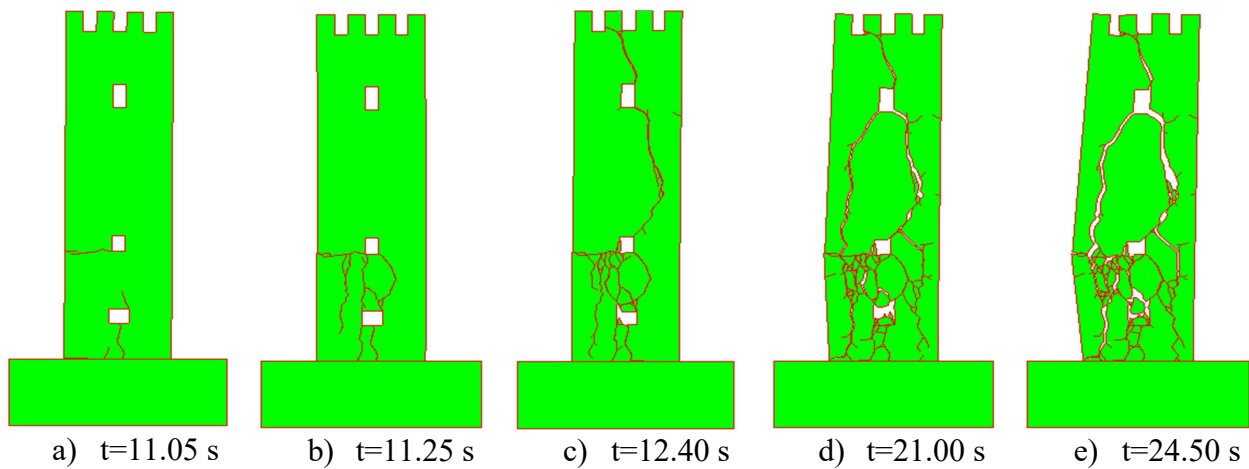
**Slika 35.** Pukotine za ubrzanje  $a = 5.00$  g



**Slika 36.** Pukotine za ubrzanje  $a = 6.00$  g

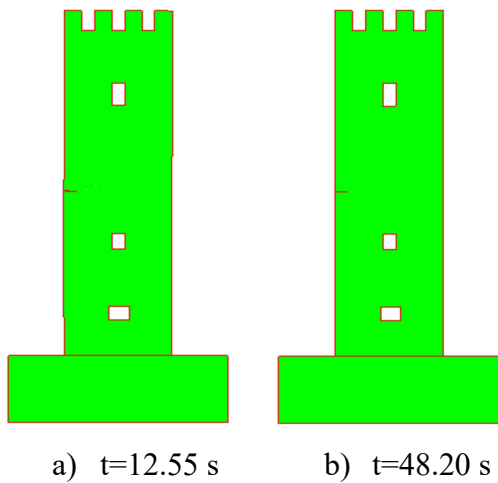


**Slika 37.** Pukotine za ubrzanje  $a = 6.60$  g

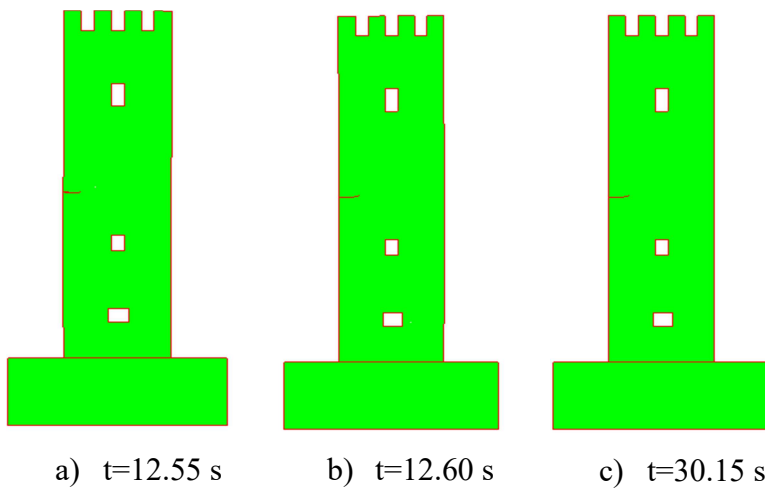


**Slika 38.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 6.70$  g

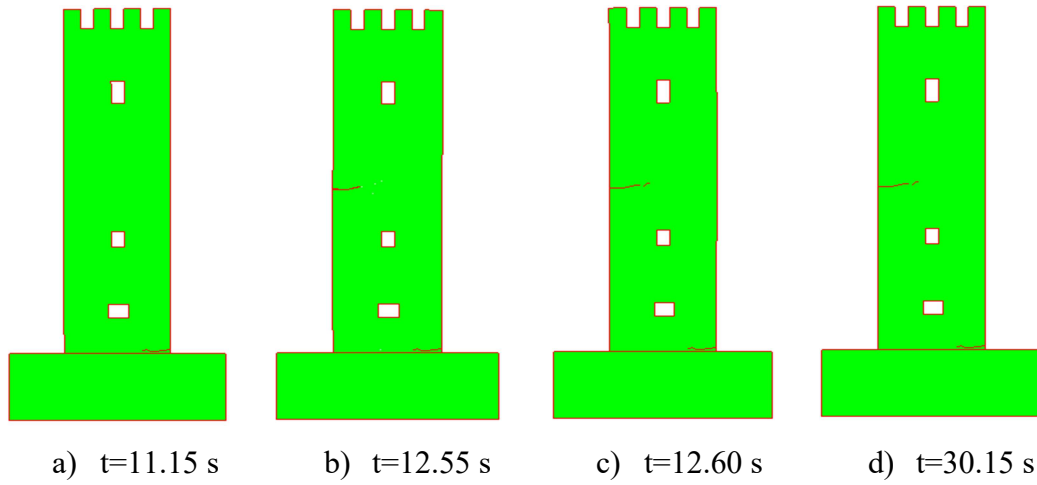
**b) 2. rubni uvjet – upeti u krutoj podlozi**



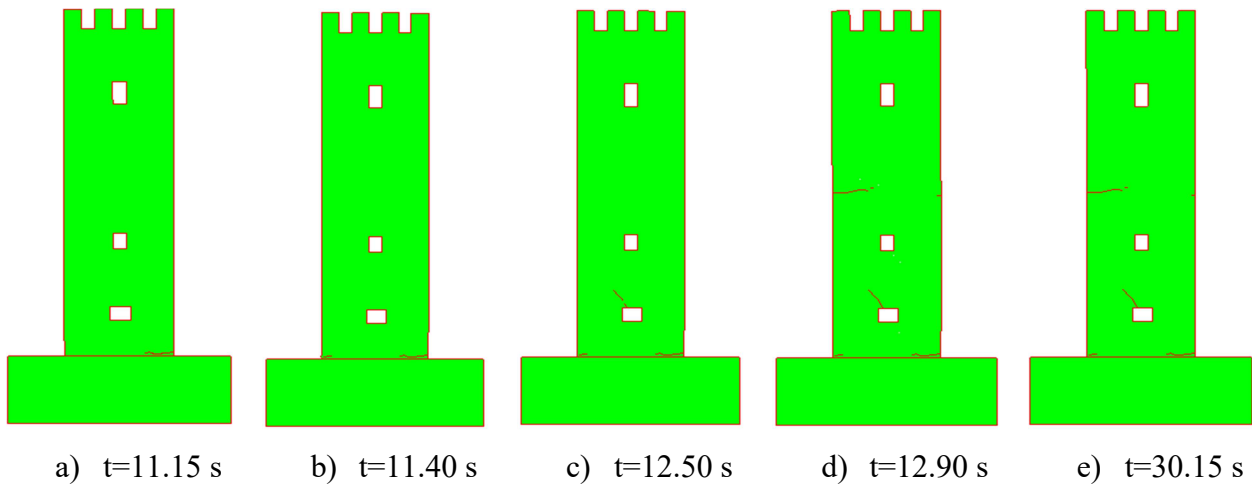
**Slika 39.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.00$  g



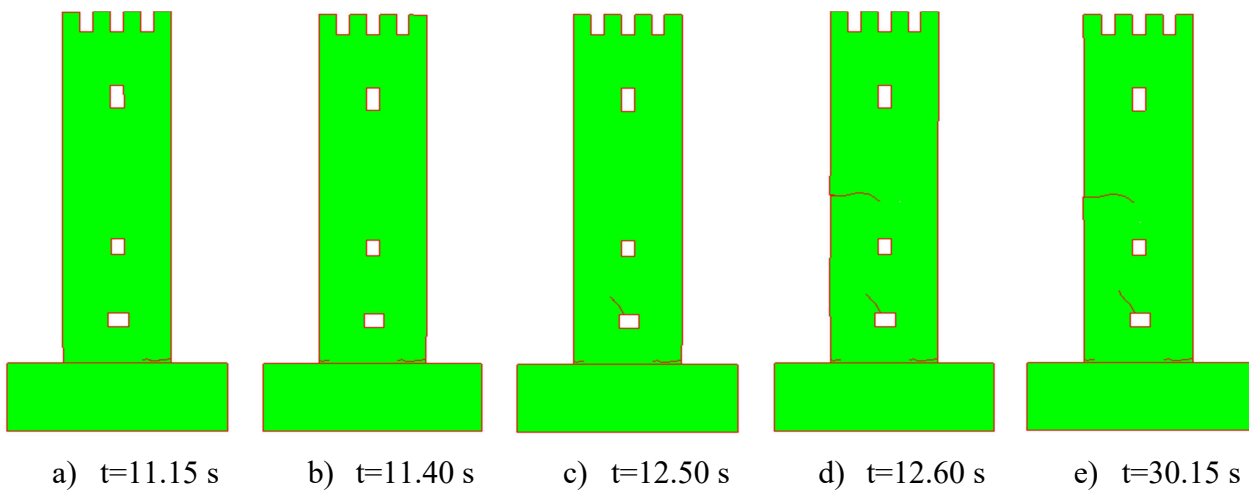
**Slika 40.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.20$  g



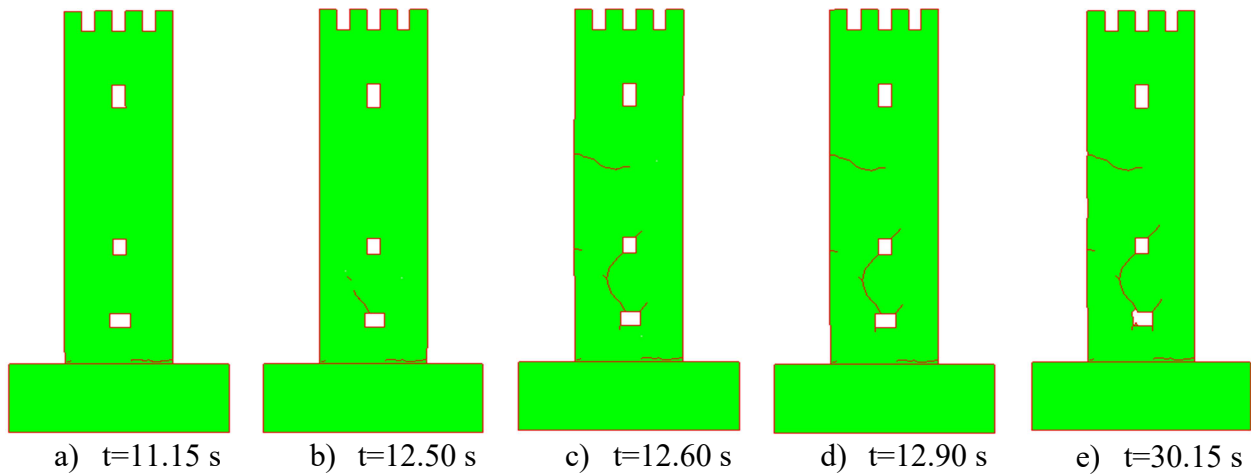
**Slika 41.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.40$  g



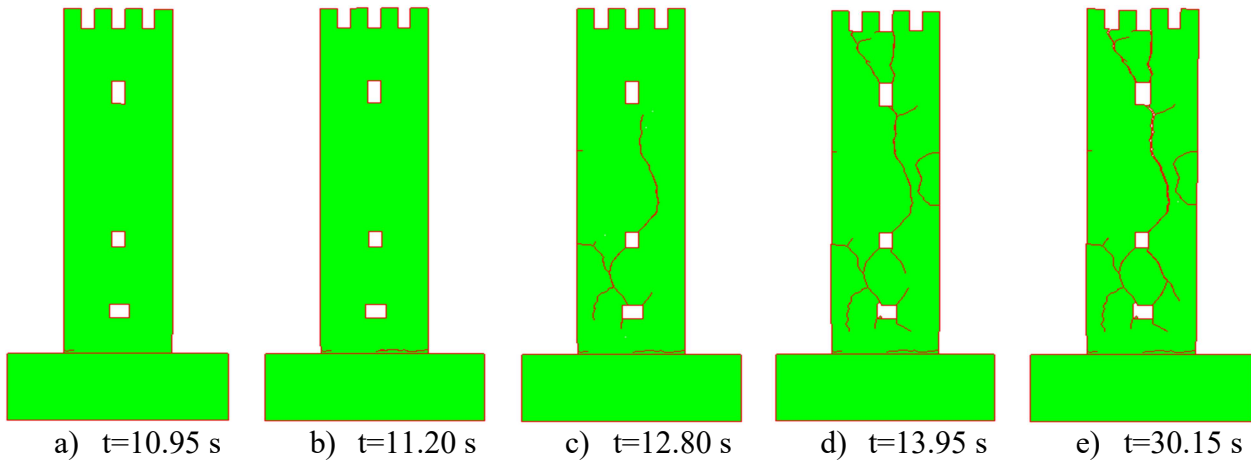
**Slika 42.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.60$  g



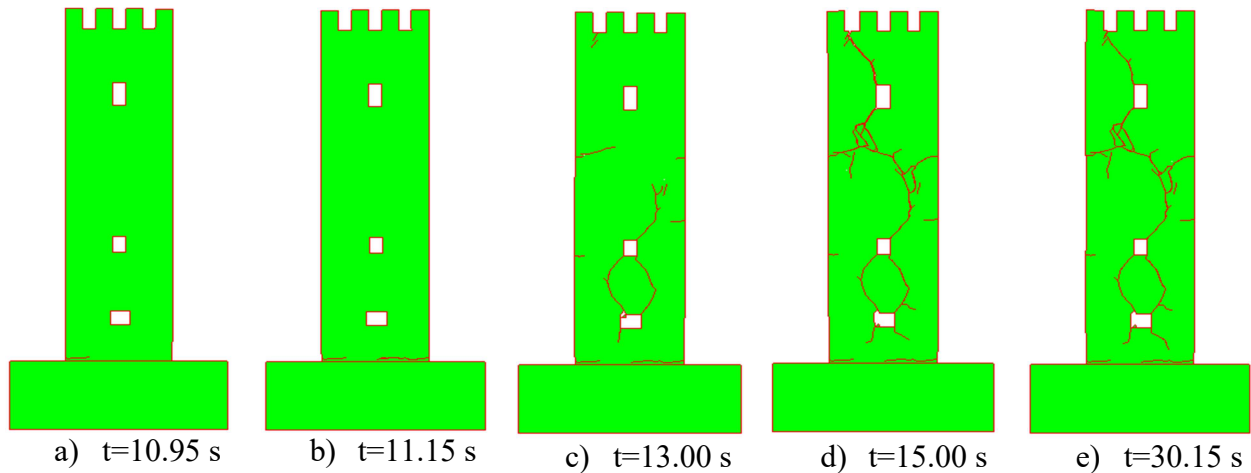
**Slika 43.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.80$  g



**Slika 44.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.00$  g

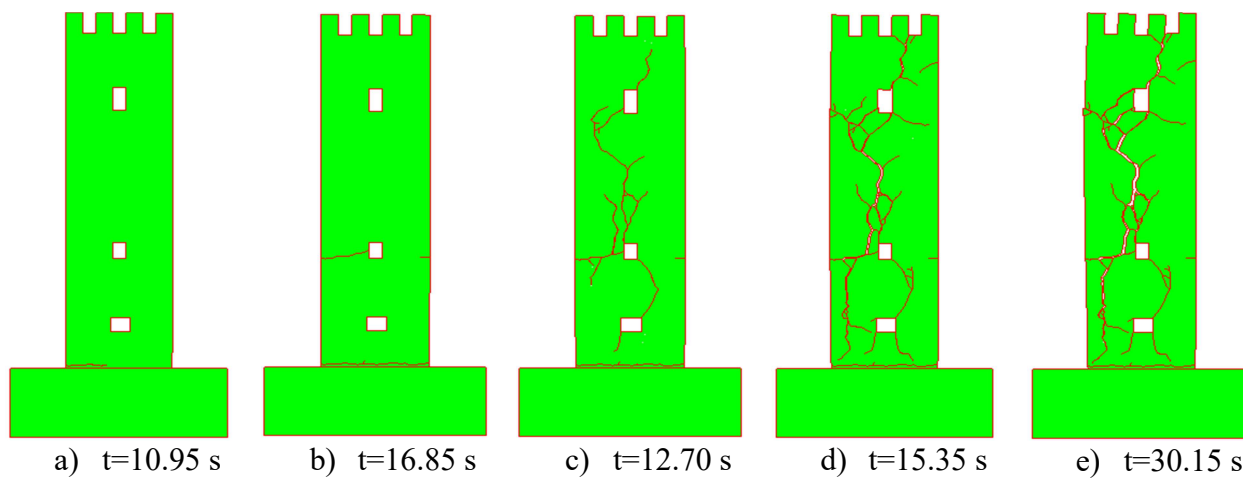


**Slika 45.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.20$  g

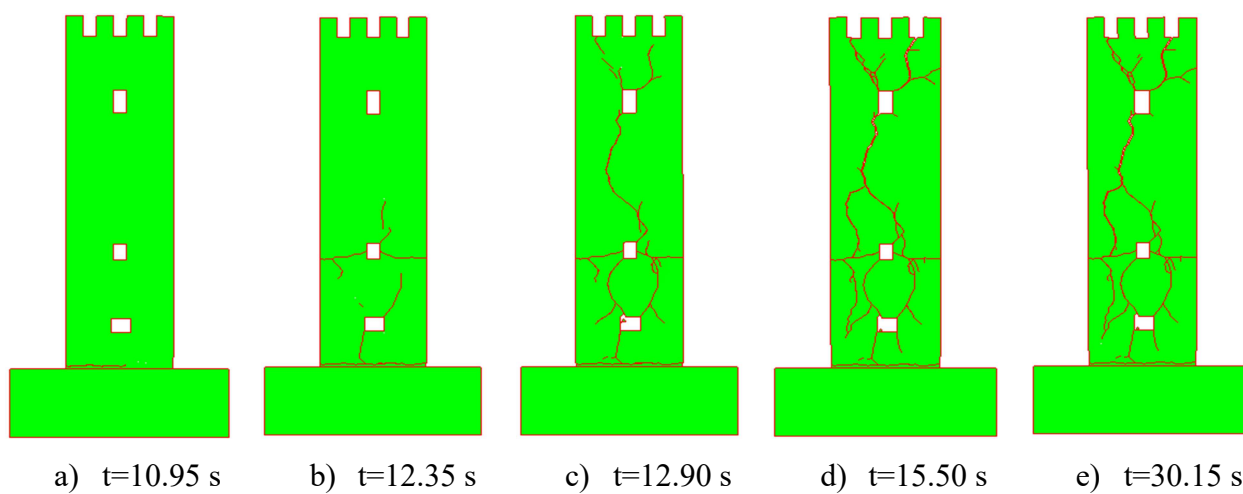


**Slika 46.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.40$  g

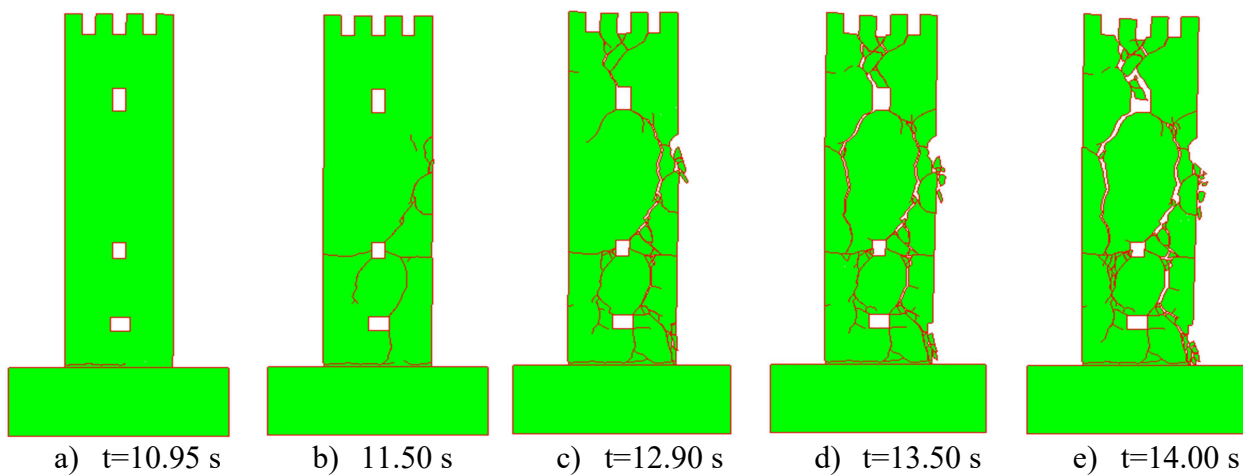




**Slika 47.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.00$  g

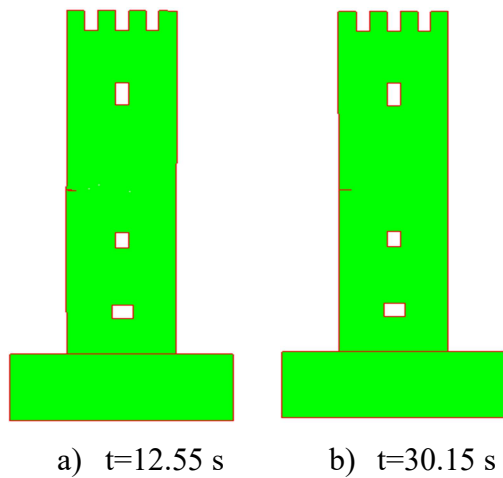


**Slika 48.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.40$  g

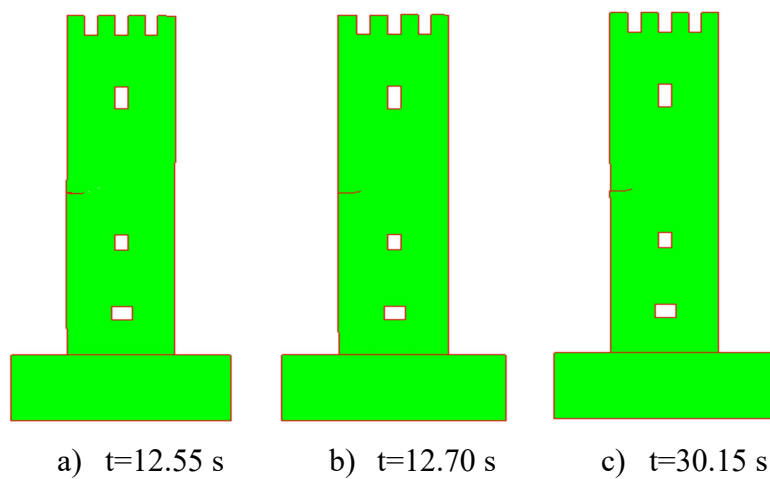


**Slika 49.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 4.45$  g

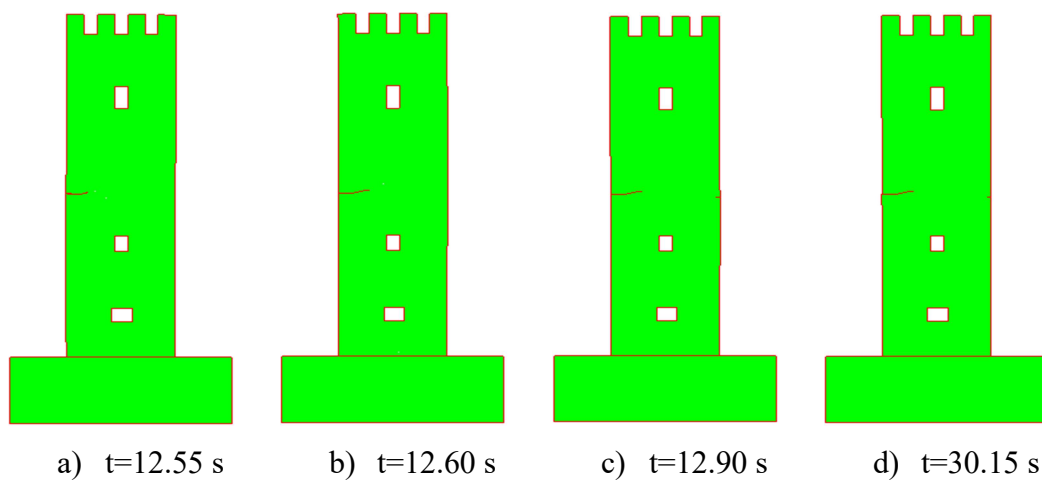
c) 3. rubni uvjet – slobodnostojeći na krutoj podlozi



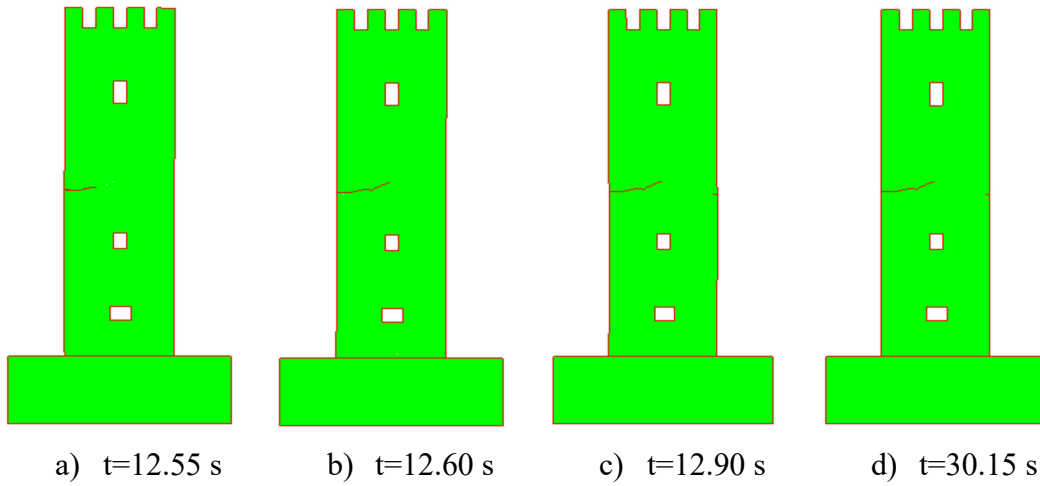
Slika 50. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.00$  g



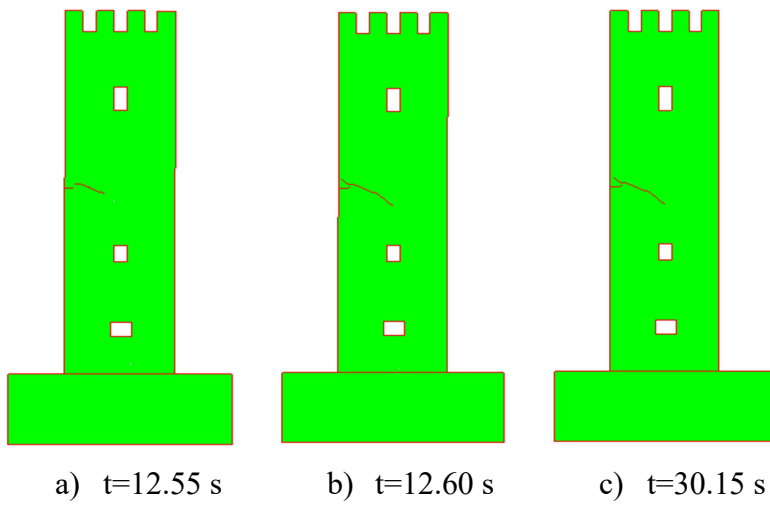
Slika 51. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.20$  g



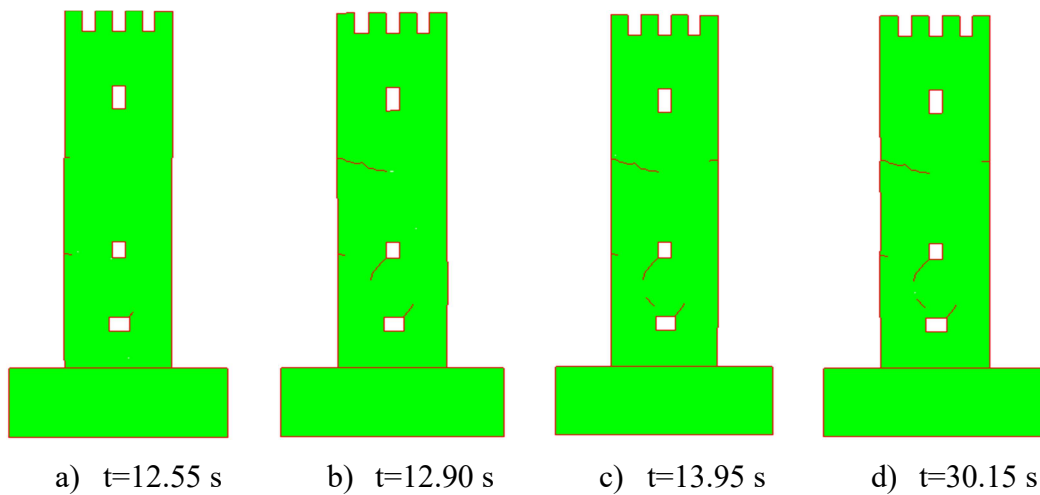
Slika 52. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.40$  g



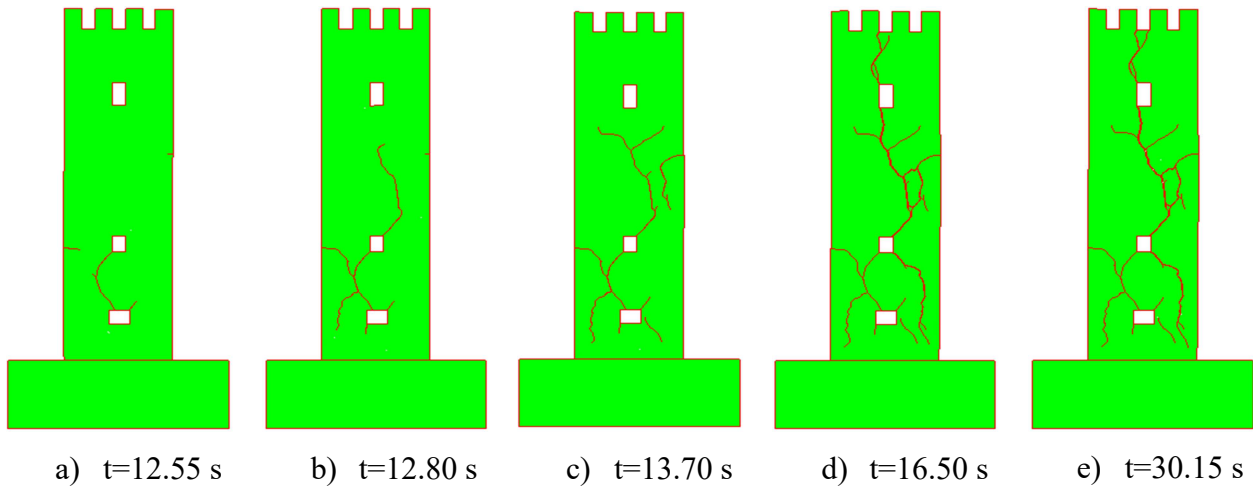
**Slika 53.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.60$  g



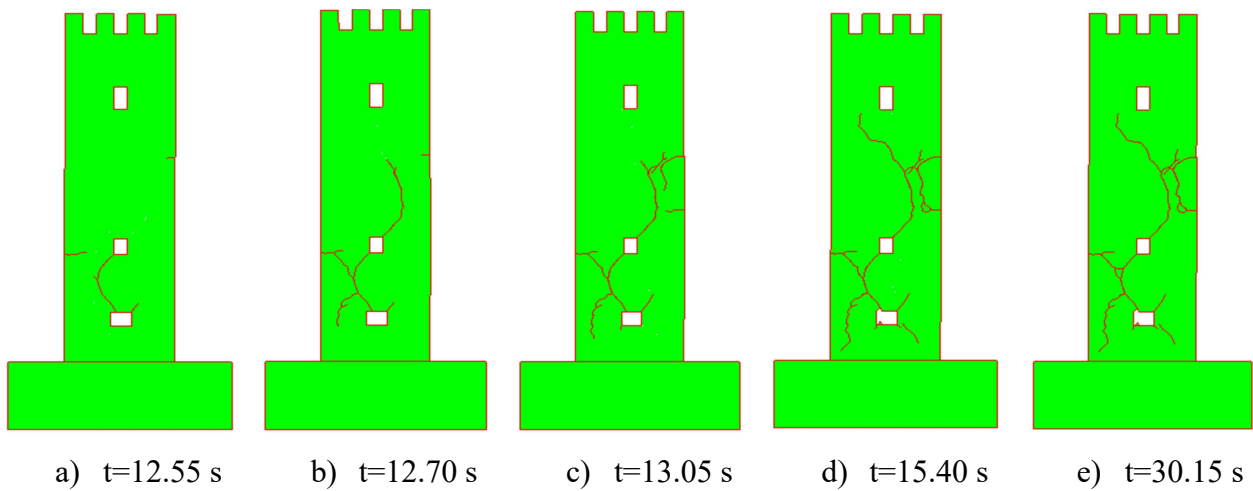
**Slika 54.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.80$  g



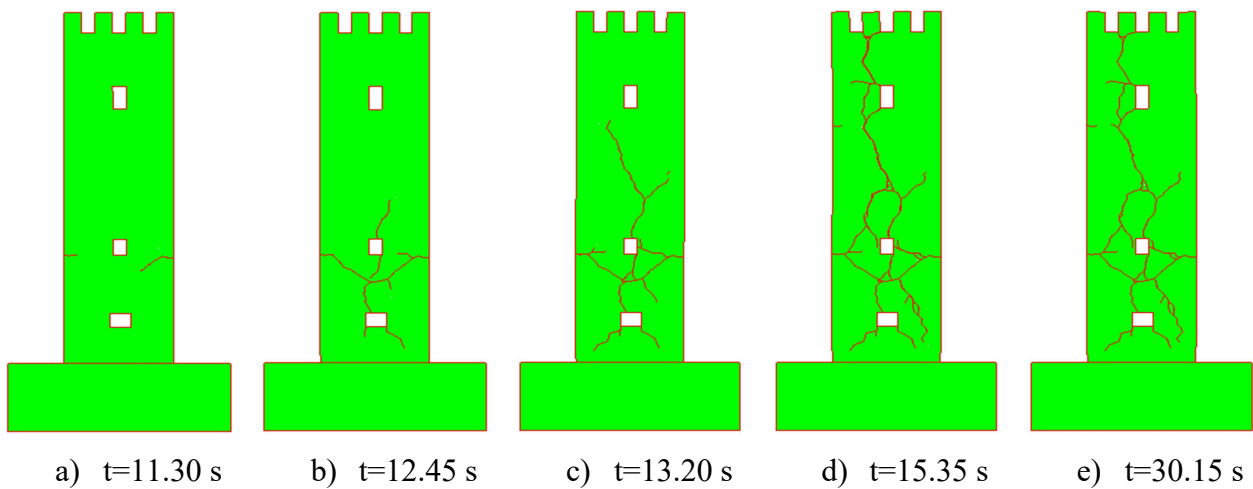
**Slika 55.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.00$  g



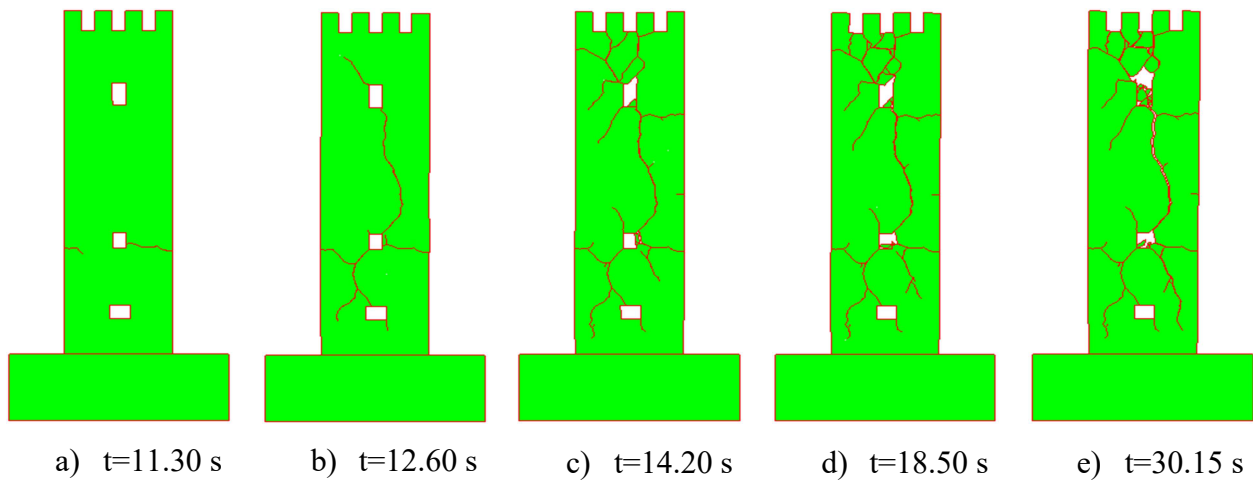
**Slika 56.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.20$  g



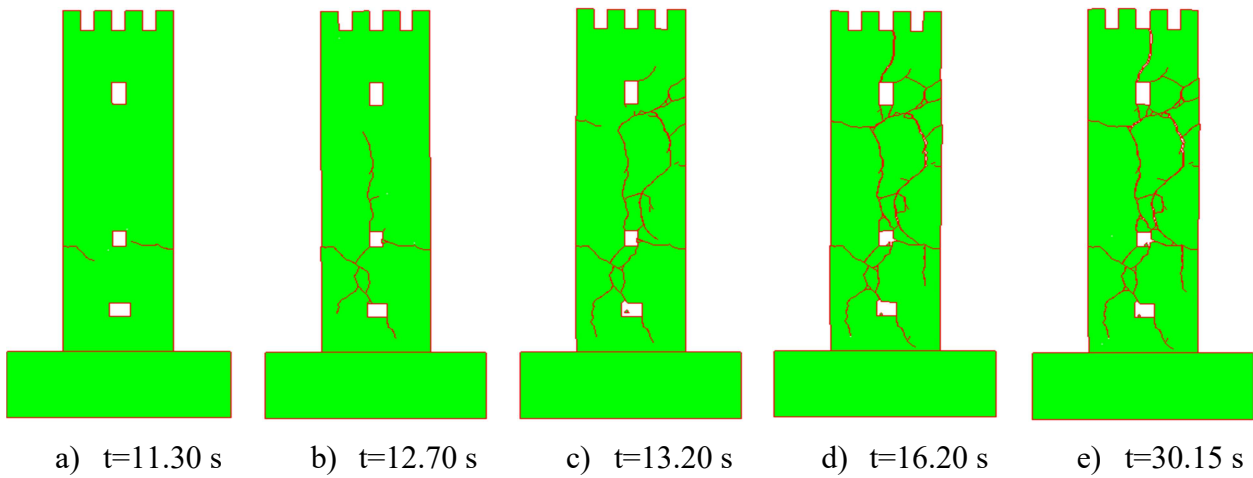
**Slika 57.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.40$  g



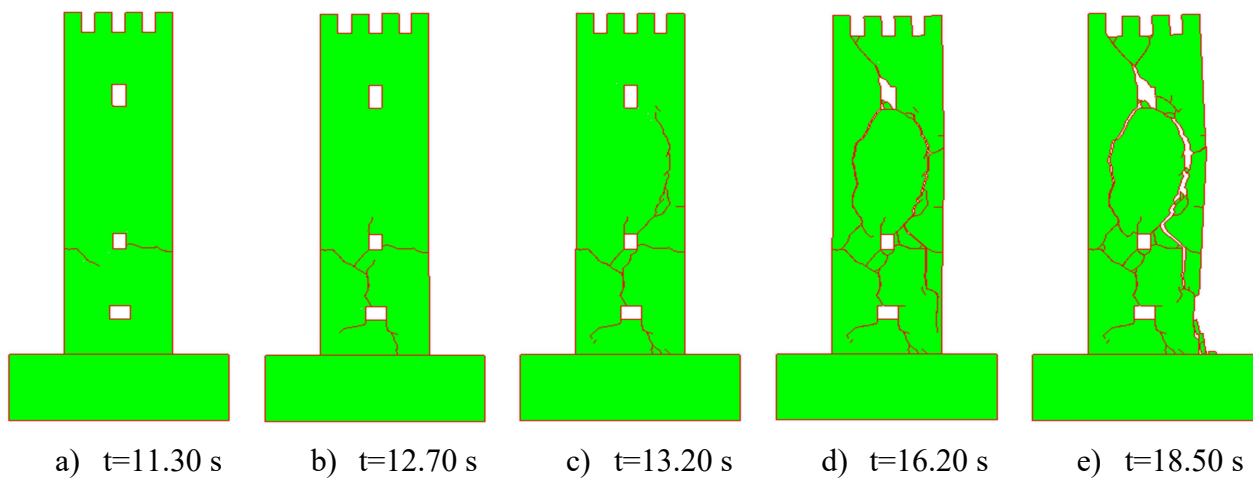
**Slika 58.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.00$  g



**Slika 59.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.20$  g

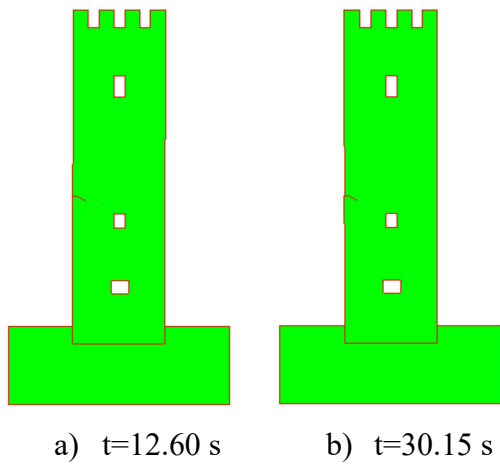


**Slika 60.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.30$  g

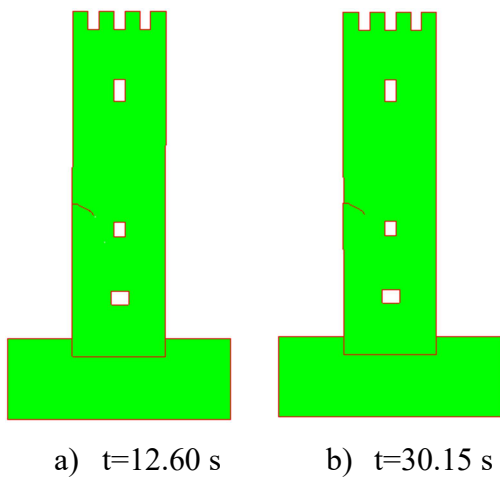


**Slika 61.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 4.35$  g

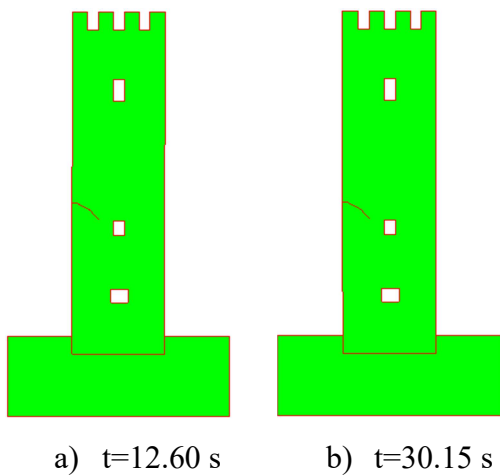
**d) 4. rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu**



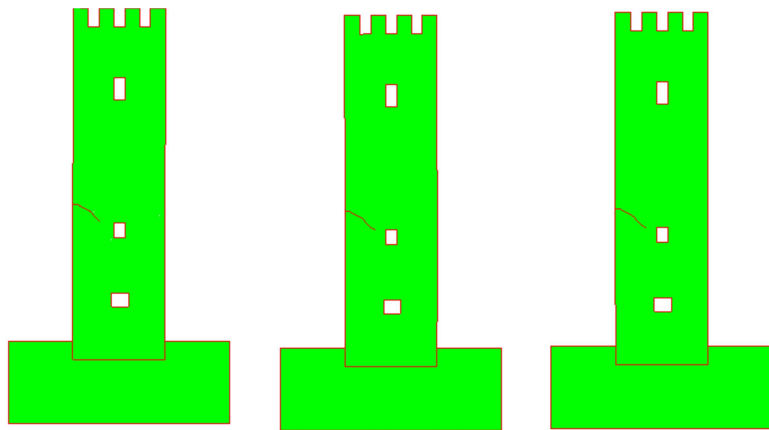
**Slika 62.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.00 \text{ g}$



**Slika 63.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.20 \text{ g}$



**Slika 64.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.40 \text{ g}$

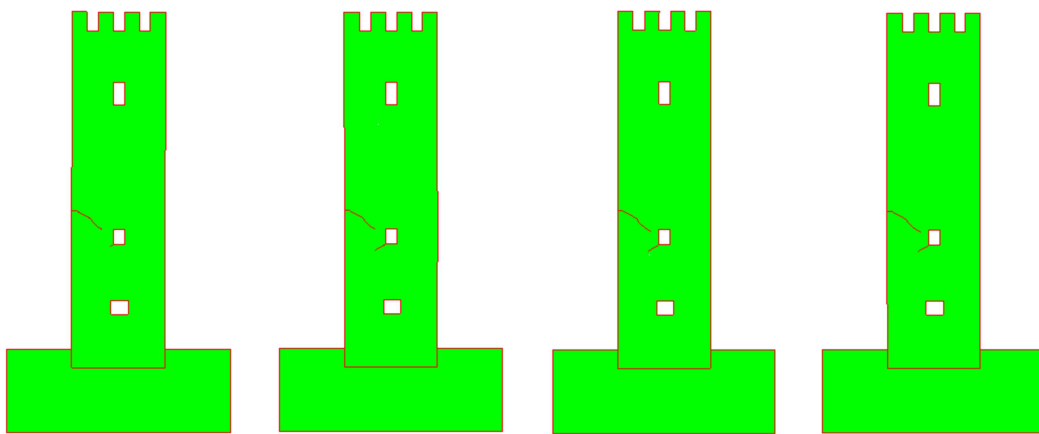


a)  $t=12.60$  s

b)  $t=12.65$  s

c)  $t=30.15$  s

**Slika 65.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.60$  g



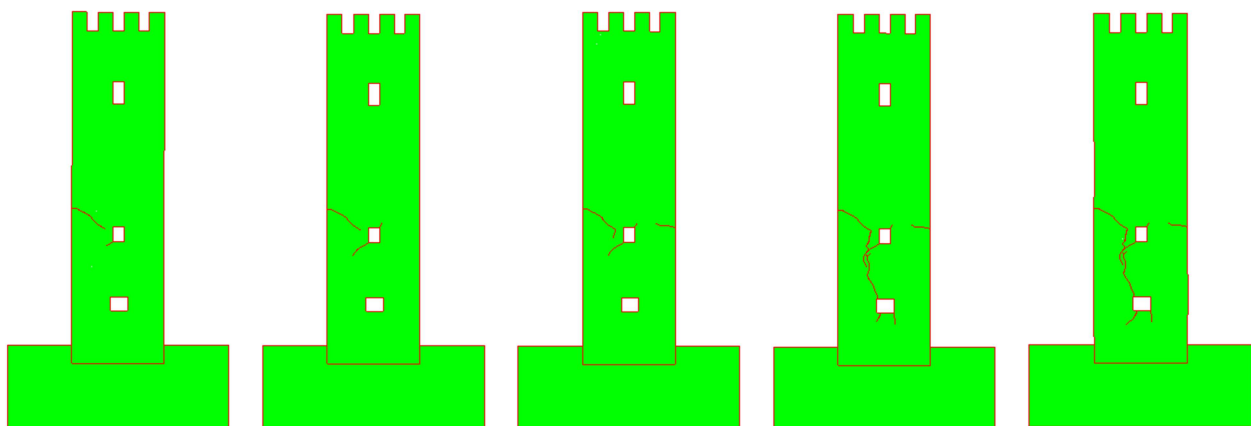
a)  $t=12.60$  s

b)  $t=12.65$  s

c)  $t=15.30$  s

d)  $t=30.15$  s

**Slika 66.** Pukotine za ubrzanje  $a = 3.80$  g



a)  $t=12.60$  s

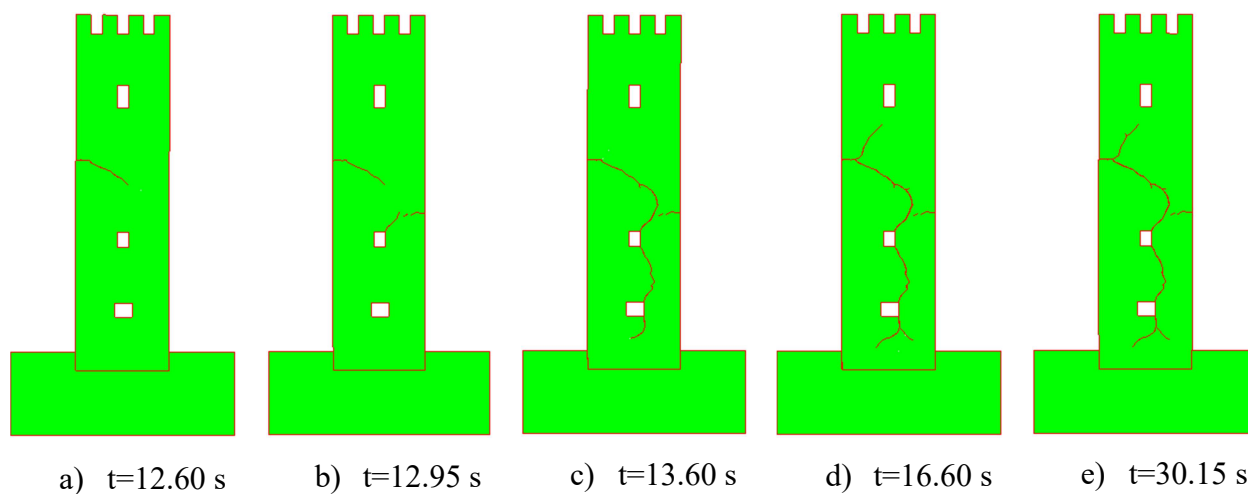
b)  $t=12.75$  s

c)  $t=13.30$  s

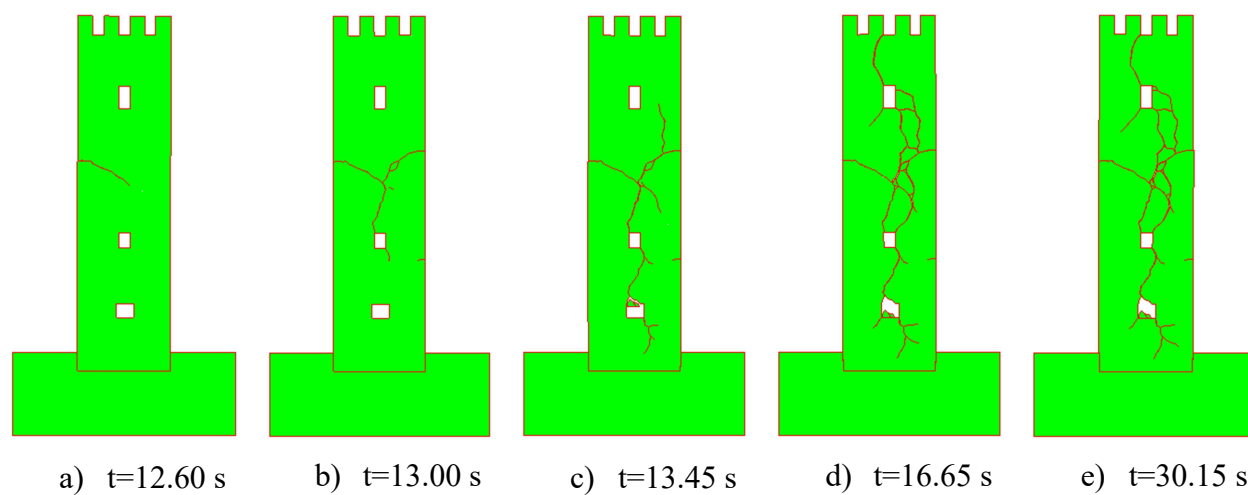
d)  $t=16.40$  s

e)  $t=30.15$  s

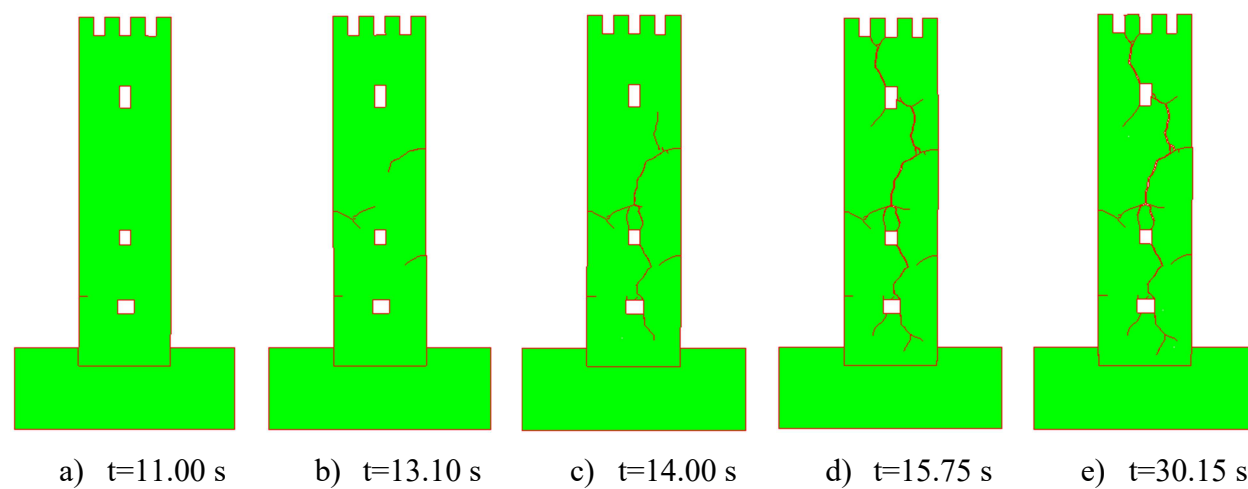
**Slika 67.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.00$  g



**Slika 68.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.20$  g

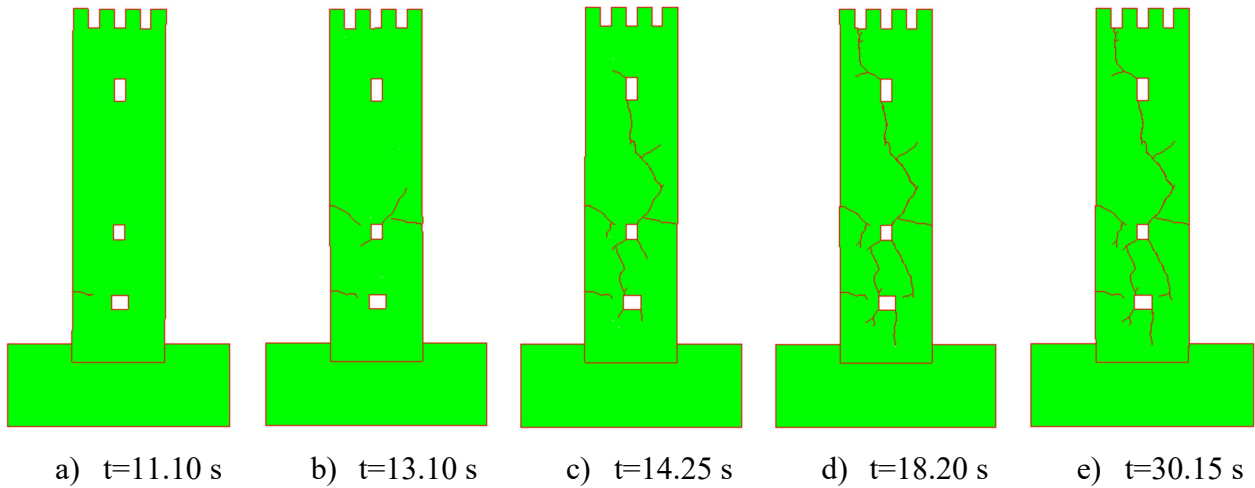


**Slika 69.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.40$  g

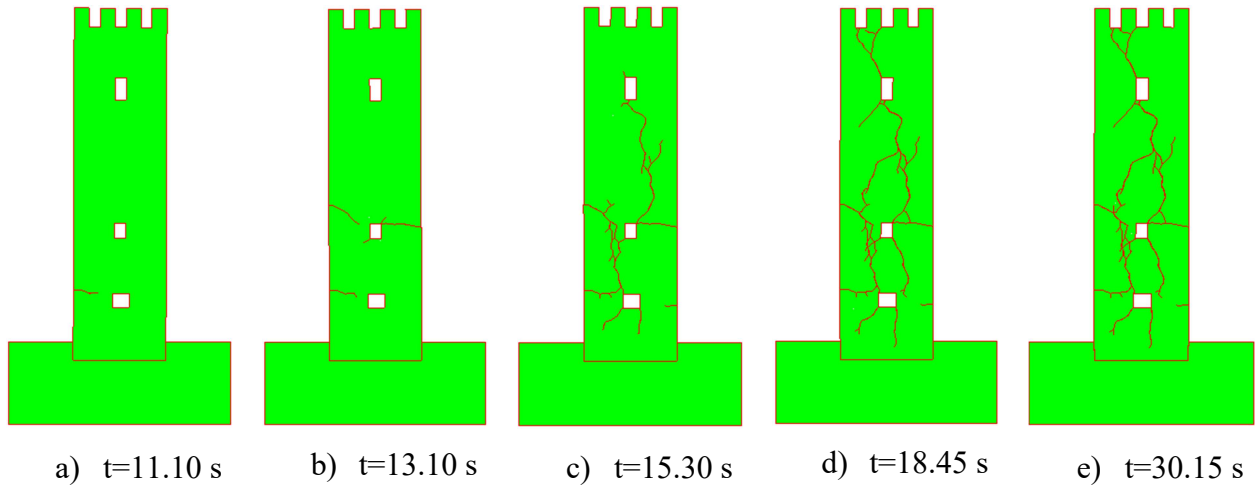


**Slika 70.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.60$  g

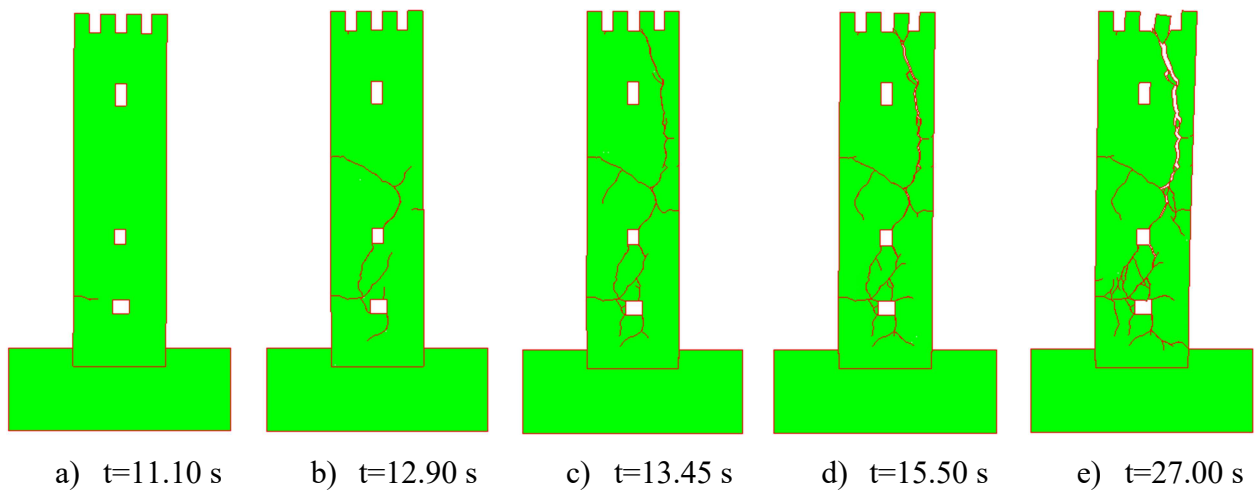




**Slika 71.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.80$  g



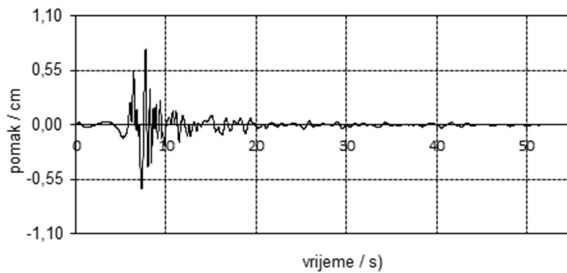
**Slika 72.** Pukotine za ubrzanje  $a = 4.95$  g



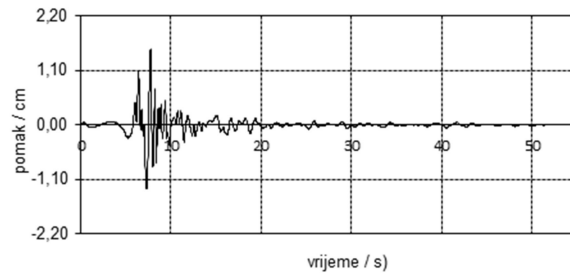
**Slika 73.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 5.00$  g

### 3.3. POMACI ZA SOUTH ICELAND

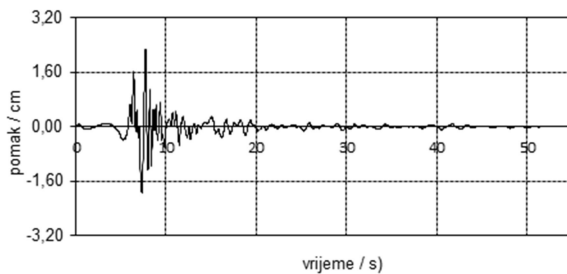
#### 3.3.1. Prikaz 1. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi



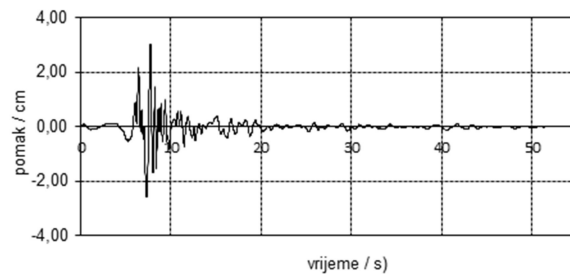
(a) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



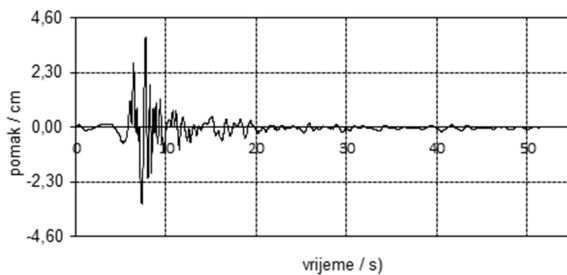
(b) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



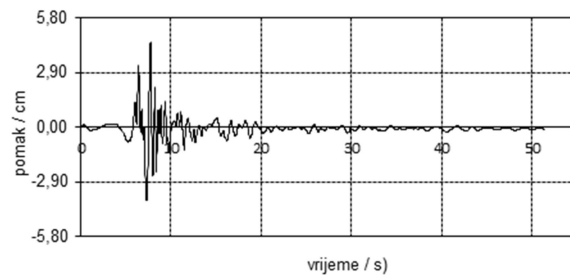
(c) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



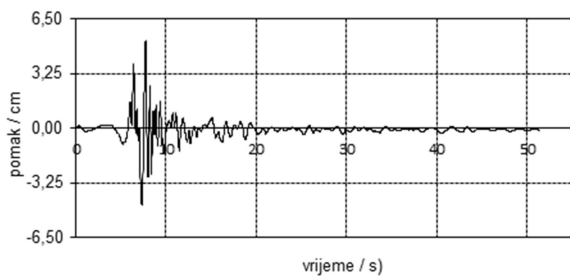
(d) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g



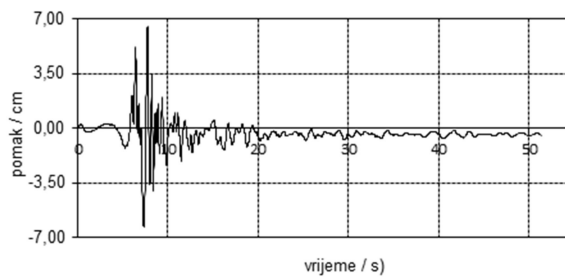
(e) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g



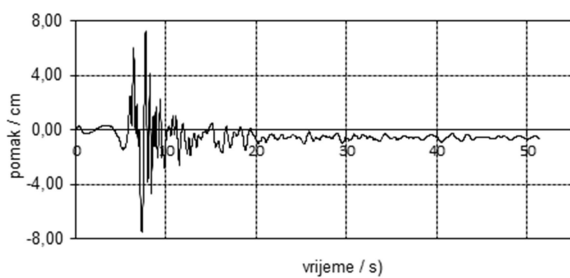
(f) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g



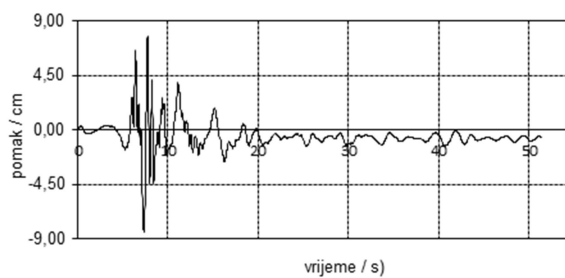
(g) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g



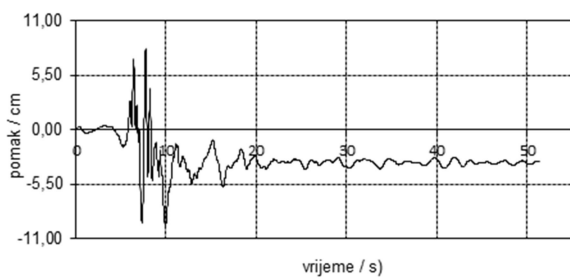
(h) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.90$  g



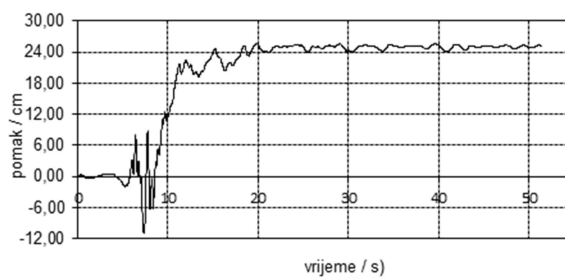
(i) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.20$  g



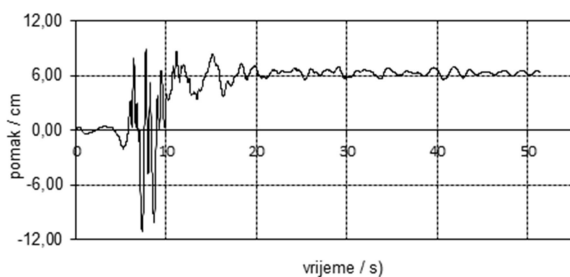
(j) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.40$  g



(k) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.60$  g



(l) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.90$  g

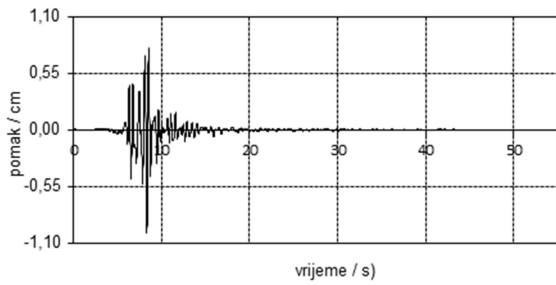


(m) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.91$  g

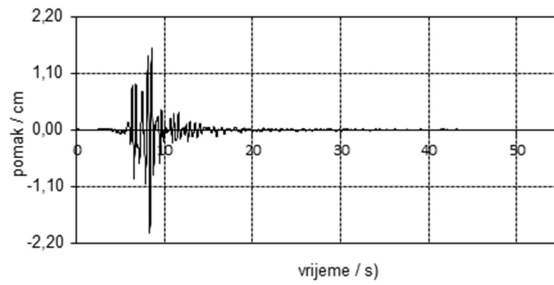
**SRUŠIO SE**

(n) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.92$  g

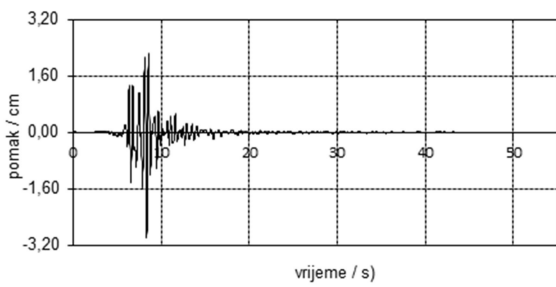
### 3.3.2. Prikaz 2. rubnog uvjeta – upeti u krutoj podlozi



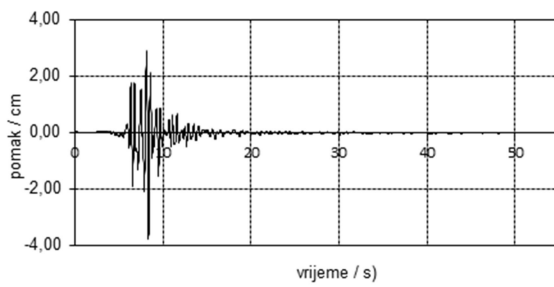
(a) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



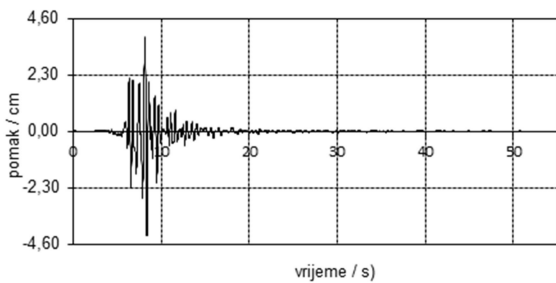
(b) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



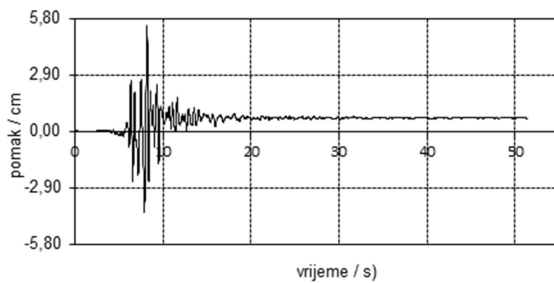
(c) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



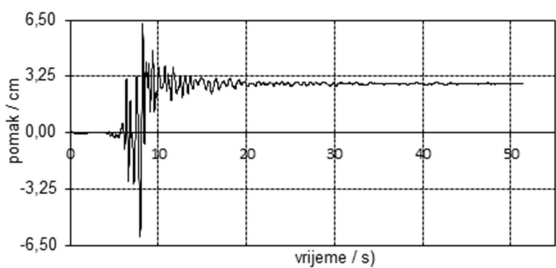
(d) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g



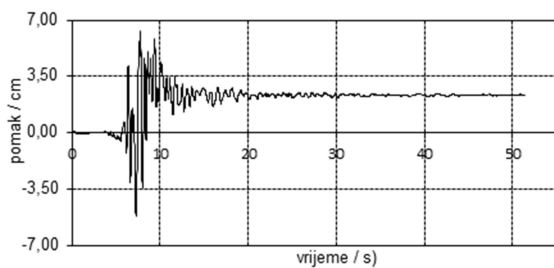
(e) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g



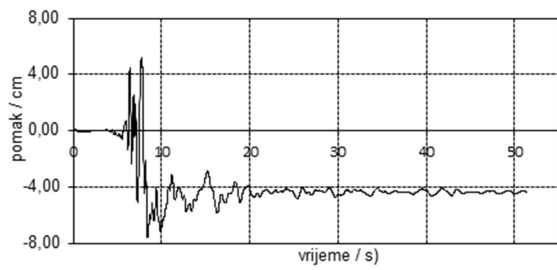
(f) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g



(g) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g



(h) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.90$  g

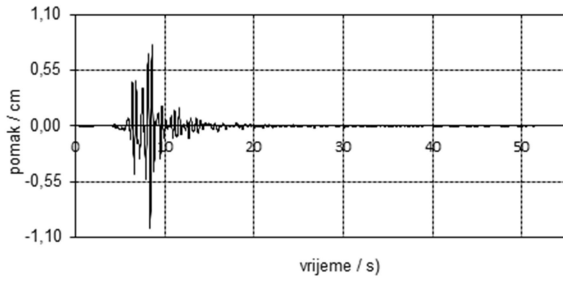


## SRUŠIO SE

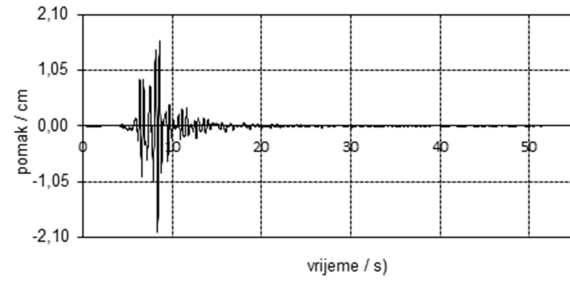
(i) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.99\text{ g}$

(j) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.00\text{ g}$

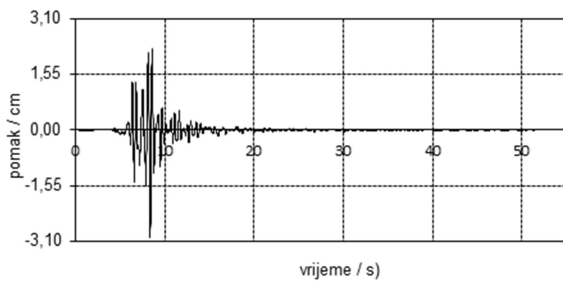
### 3.3.3. Prikaz 3. rubnog uvjeta – slobodnostojeći na krutoj podlozi



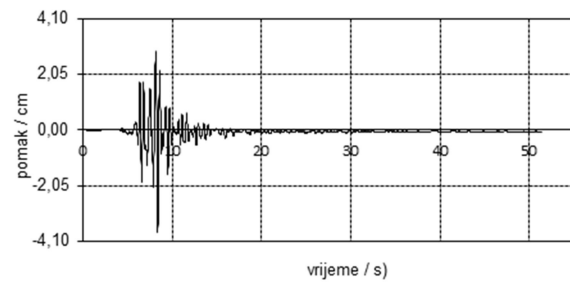
(a) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



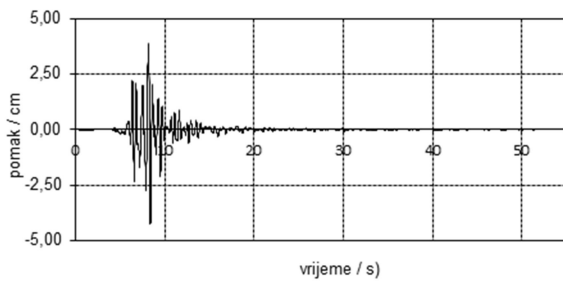
(b) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



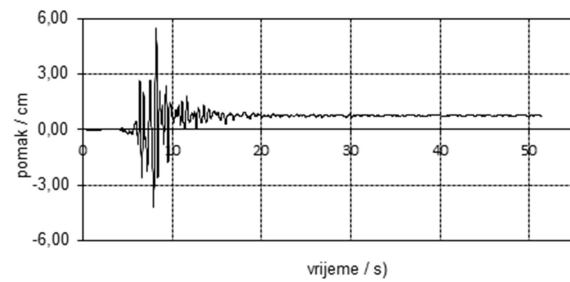
(c) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



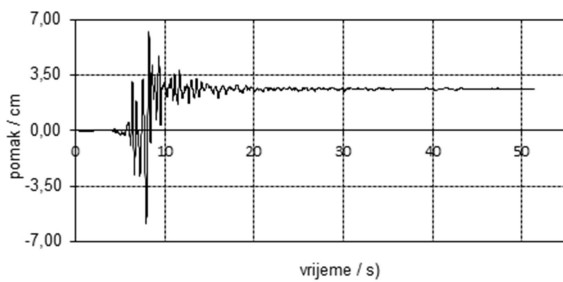
(d) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g



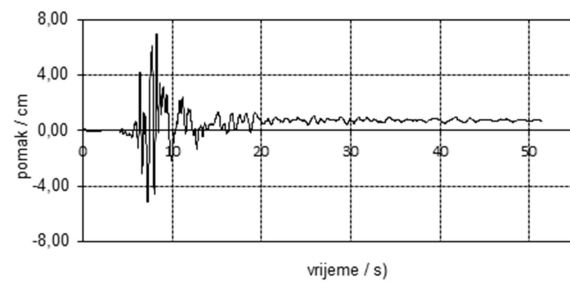
(e) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g



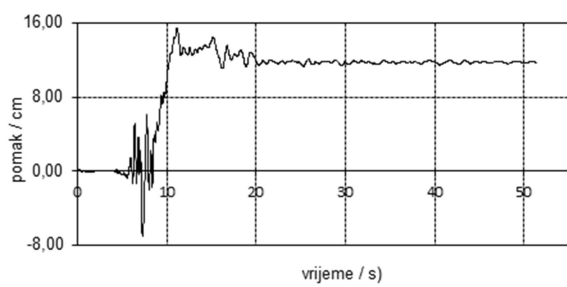
(f) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g



(g) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g



(h) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.90$  g

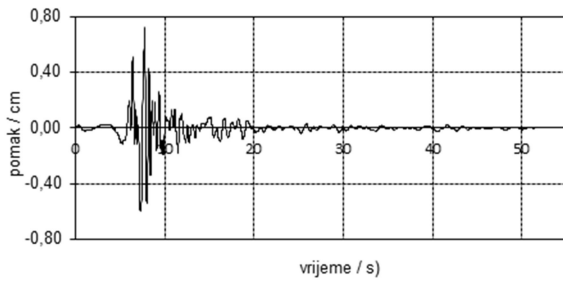


### SRUŠIO SE

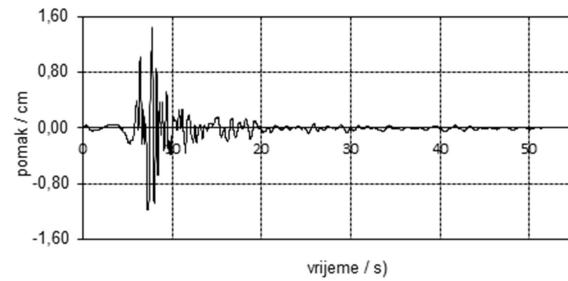
(i) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.20$  g

(j) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.25$  g

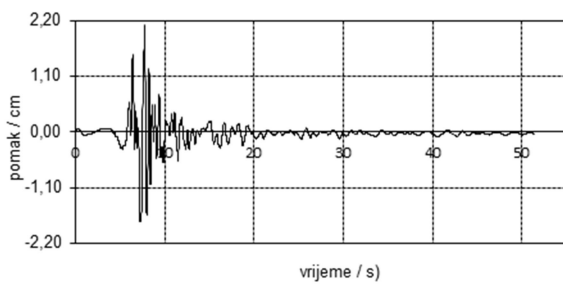
### 3.3.4. Prikaz 4. rubnog uvjeta – ukopan u elastičnu podlogu



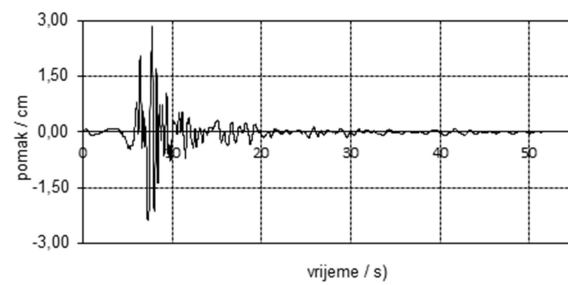
(a) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.20$  g



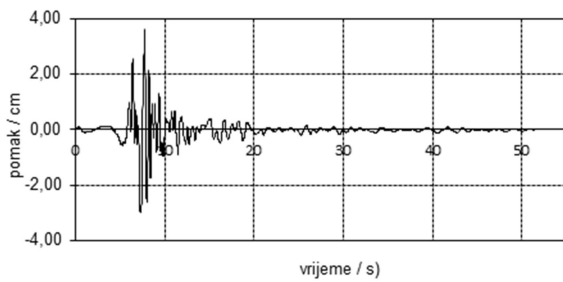
(b) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.40$  g



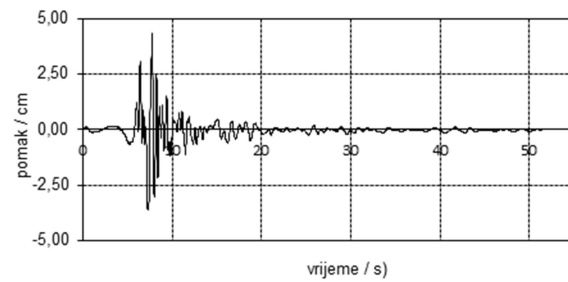
(c) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.60$  g



(d) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=0.80$  g

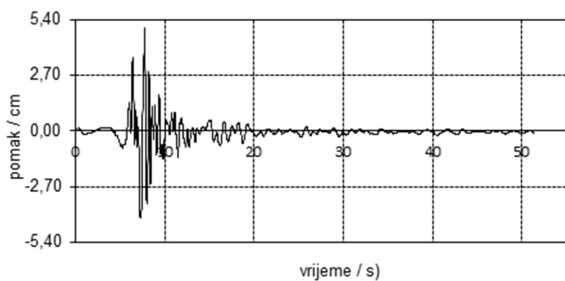


(e) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.00$  g

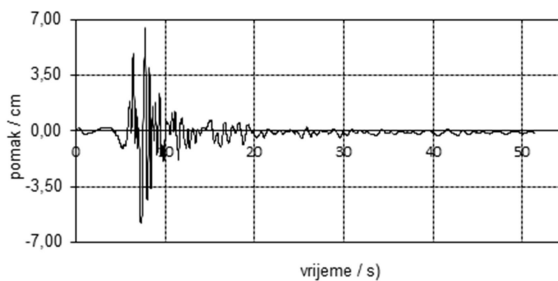


(f) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.20$  g

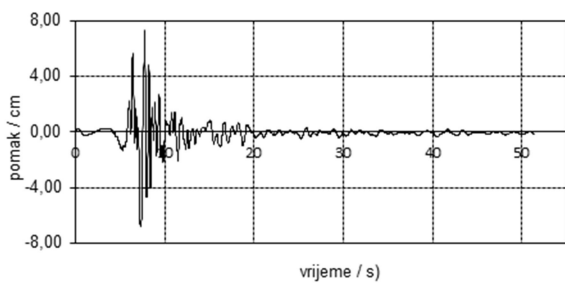




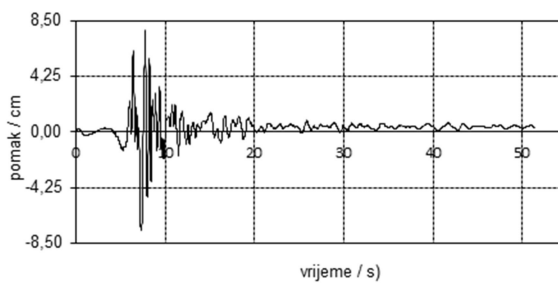
(g) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.40$  g



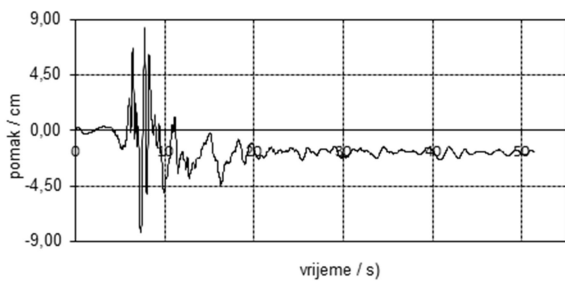
(h) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=1.90$  g



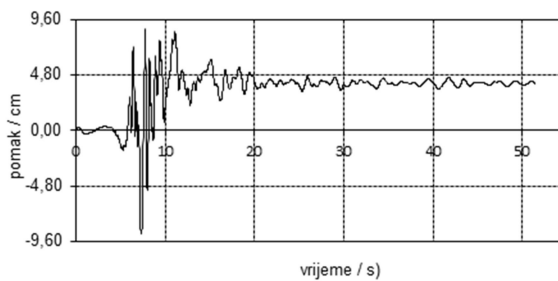
(i) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.20$  g



(j) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.40$  g



(k) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.60$  g



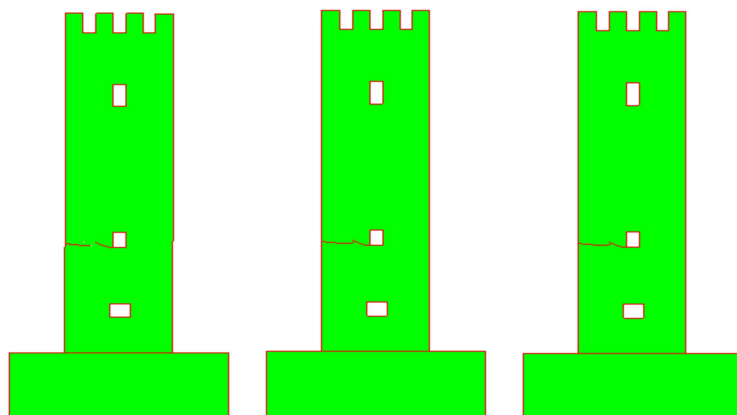
(l) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.80$  g

### SRUŠIO SE

(m) South Iceland – vršno ubrzanje  $a=2.85$  g

### 3.3.5. NASTANAK I ŠIRENJE PUKOTINA ZA SOUTH ICELAN

a) 1. rubni uvjet – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi

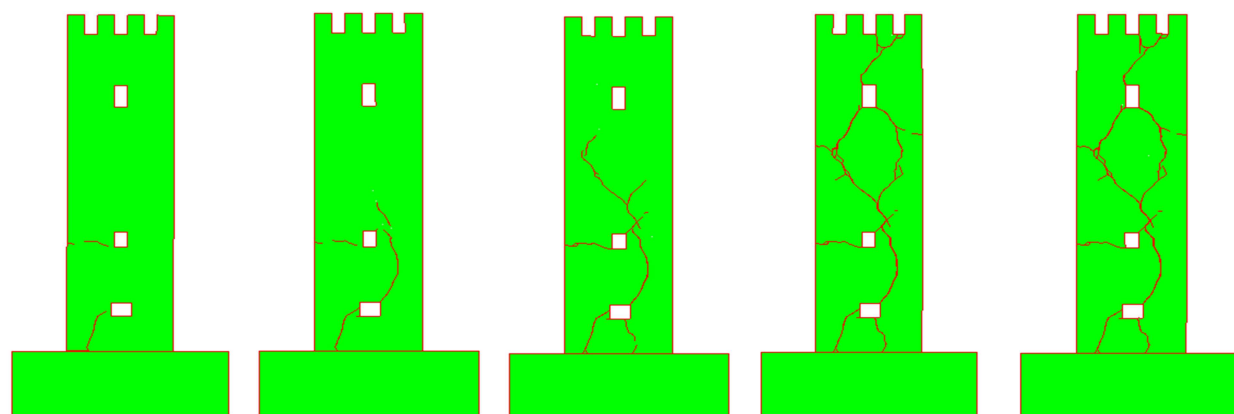


a)  $t=7.95$  s

b)  $t=8.00$  s

c)  $t=51.35$  s

Slika 74. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.20$  g



a)  $t=7.95$  s

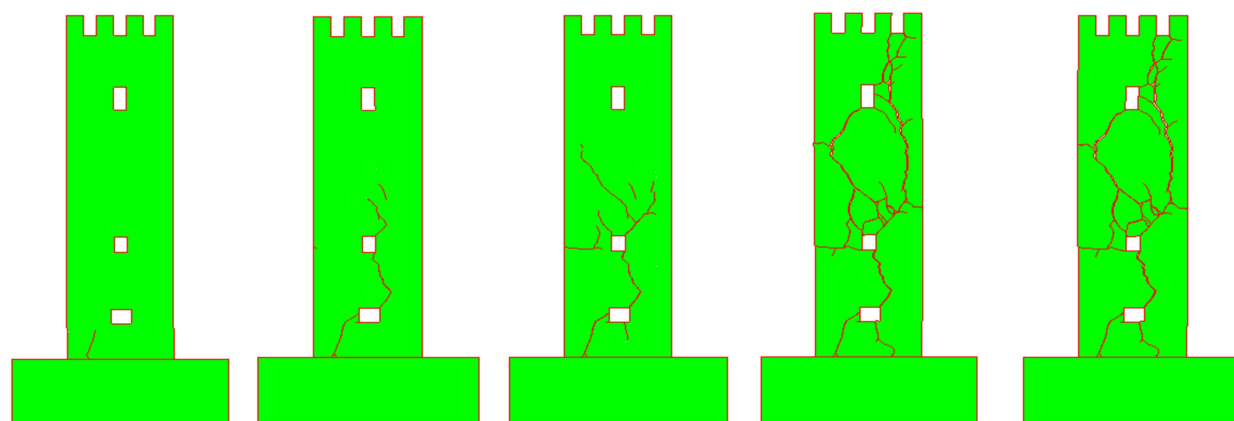
b)  $t=8.10$  s

c)  $t=8.50$  s

d)  $t=10.00$  s

e)  $t=51.35$  s

Slika 75. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.40$  g



a)  $t=7.60$  s

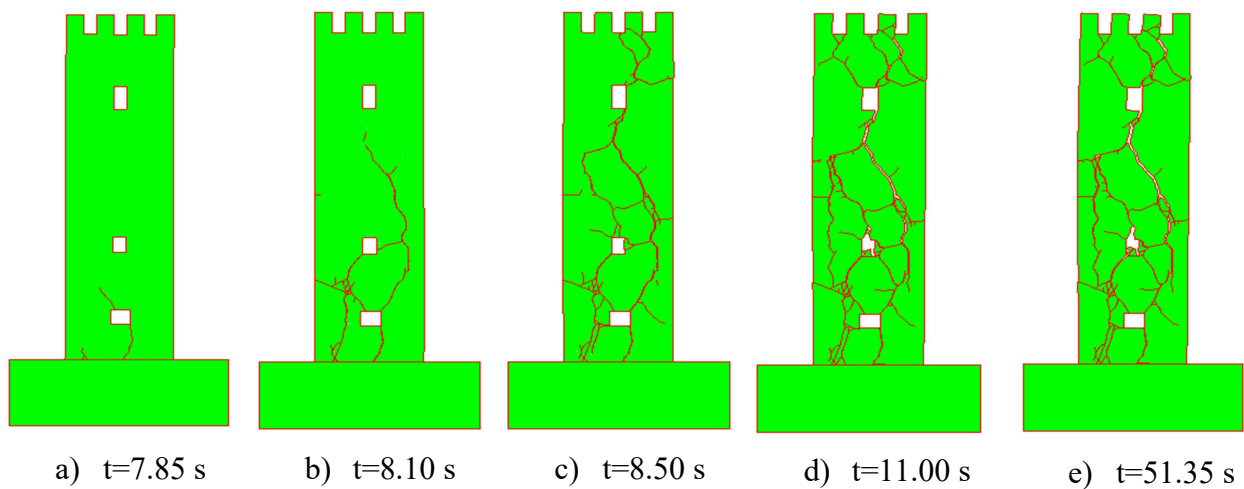
b)  $t=8.10$  s

c)  $t=8.50$  s

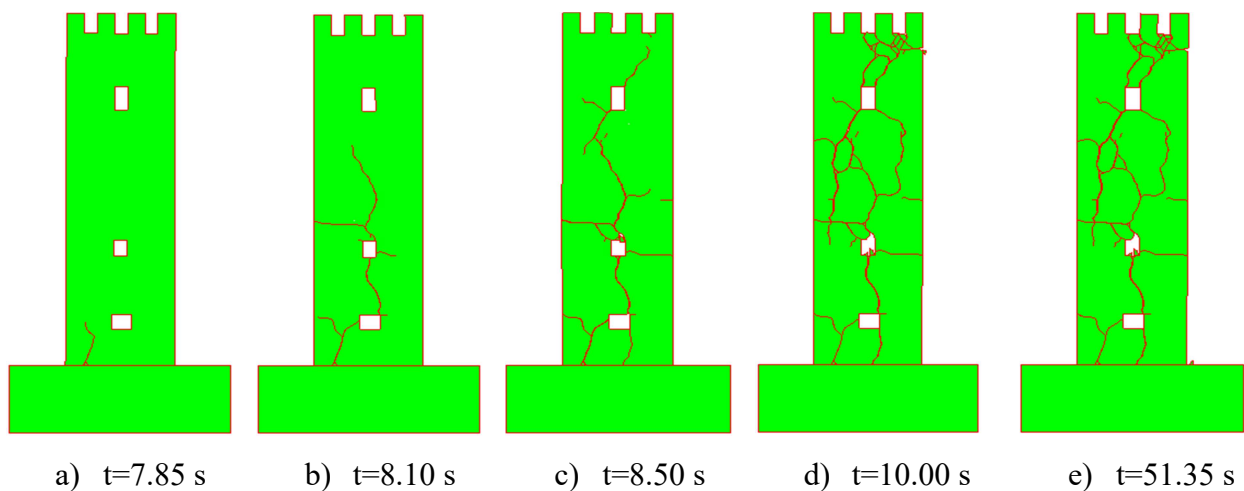
d)  $t=10.10$  s

e)  $t=51.35$  s

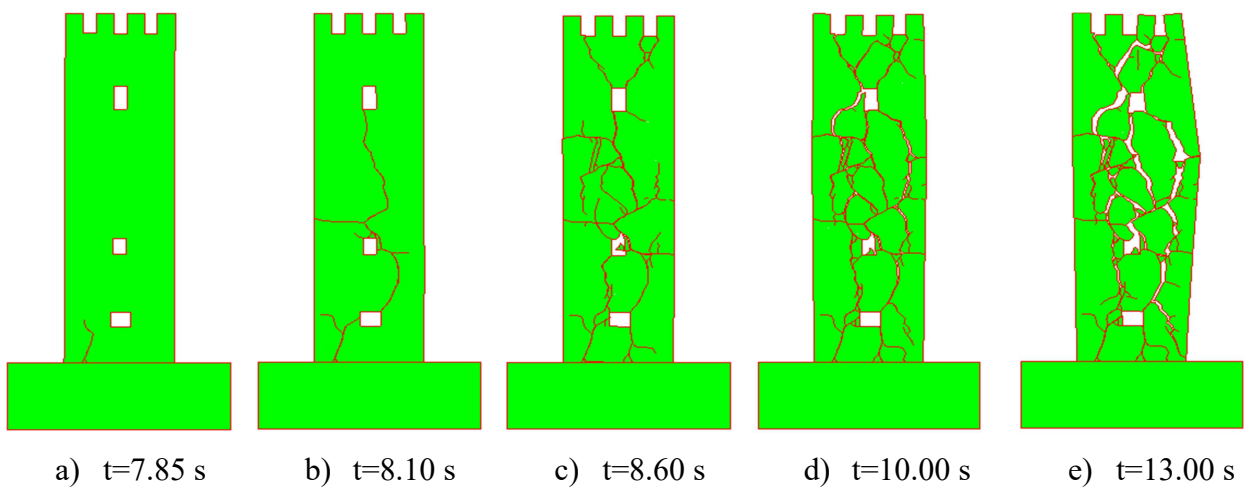
Slika 76. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.60$  g



**Slika 77.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.90$  g

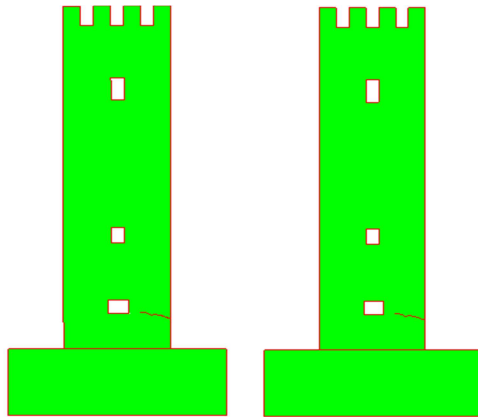


**Slika 78.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.91$  g



**Slika 79.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 2.92$  g

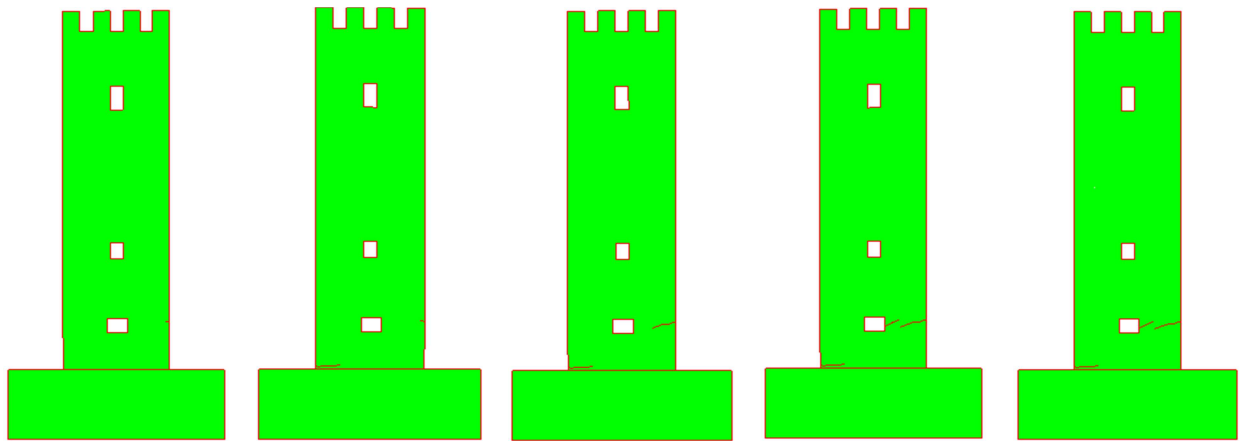
b) 2. rubni uvjet – upeti u krutoj podlozi



a)  $t=8.50$  s

b)  $t=51.35$  s

Slika 80. Pukotine za ubrzanje  $a = 0.80$  g



a)  $t=8.05$  s

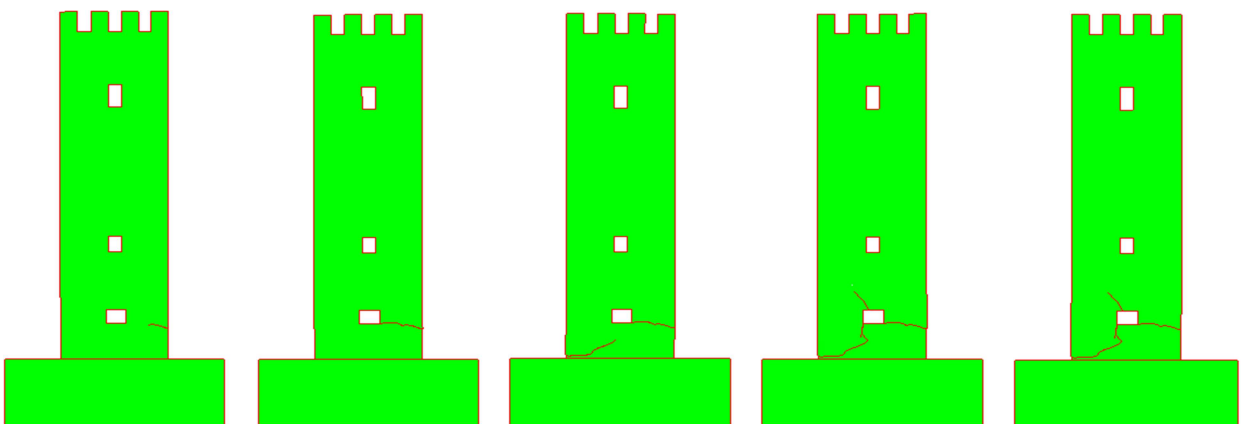
b)  $t=8.30$  s

c)  $t=8.50$  s

d)  $t=8.55$  s

e)  $t=51.35$  s

Slika 81. Pukotine za ubrzanje  $a = 1.00$  g



a)  $t=6.75$  s

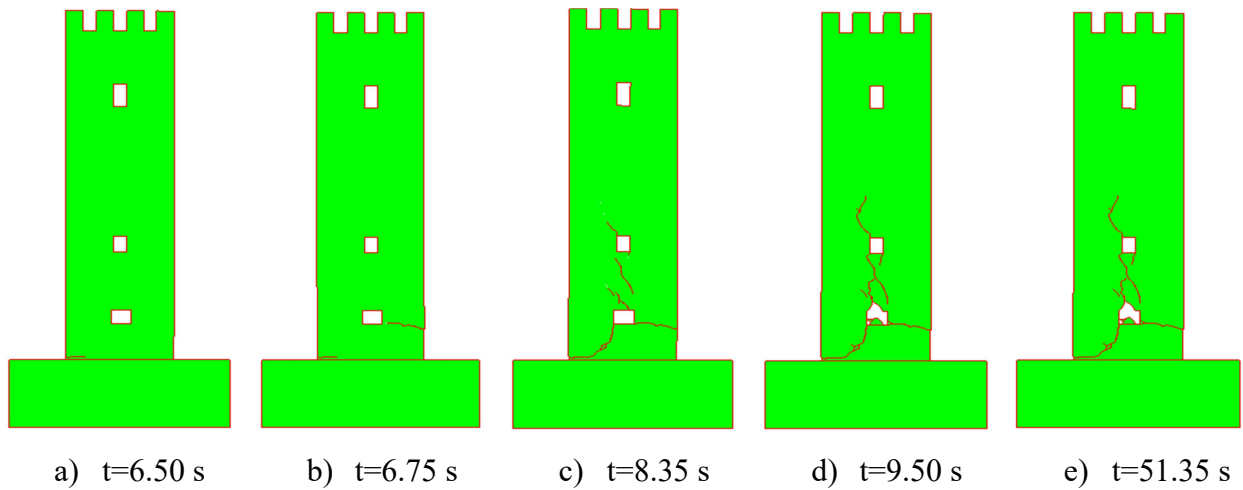
b)  $t=8.05$  s

c)  $t=8.30$  s

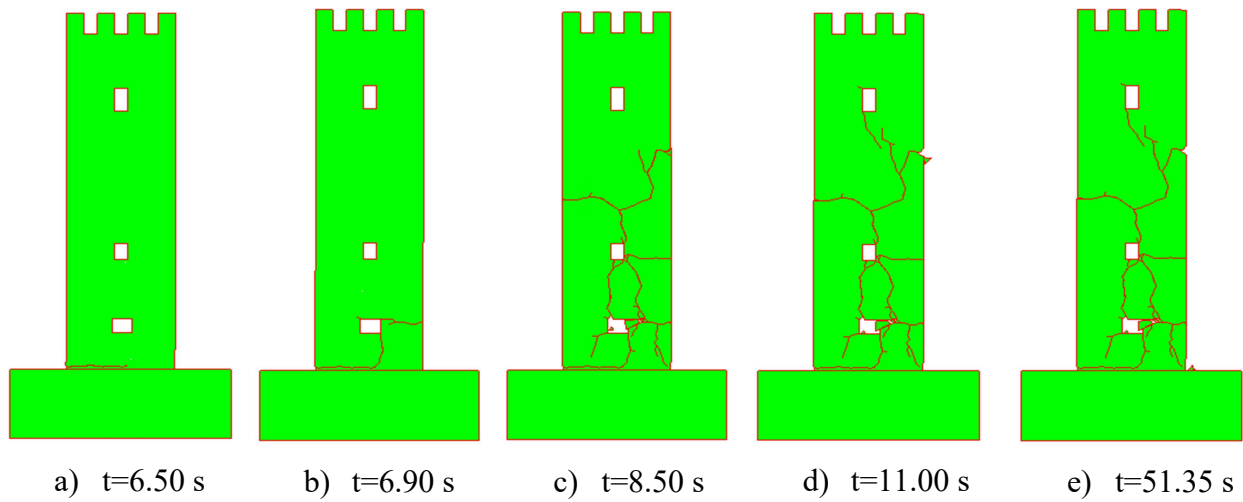
d)  $t=8.45$  s

e)  $t=51.35$  s

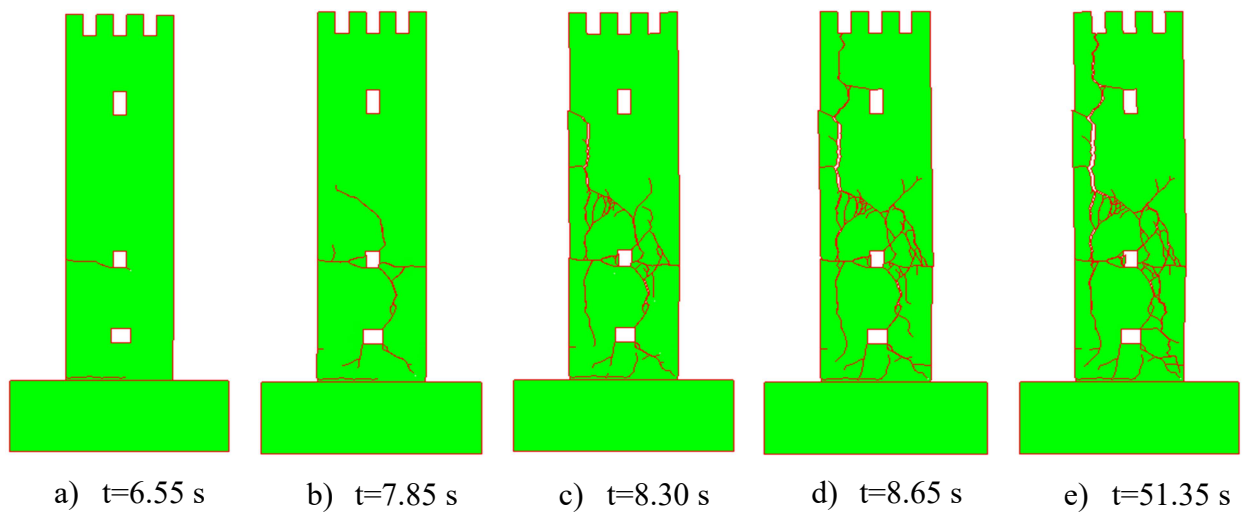
Slika 82. Pukotine za ubrzanje  $a = 1.20$  g



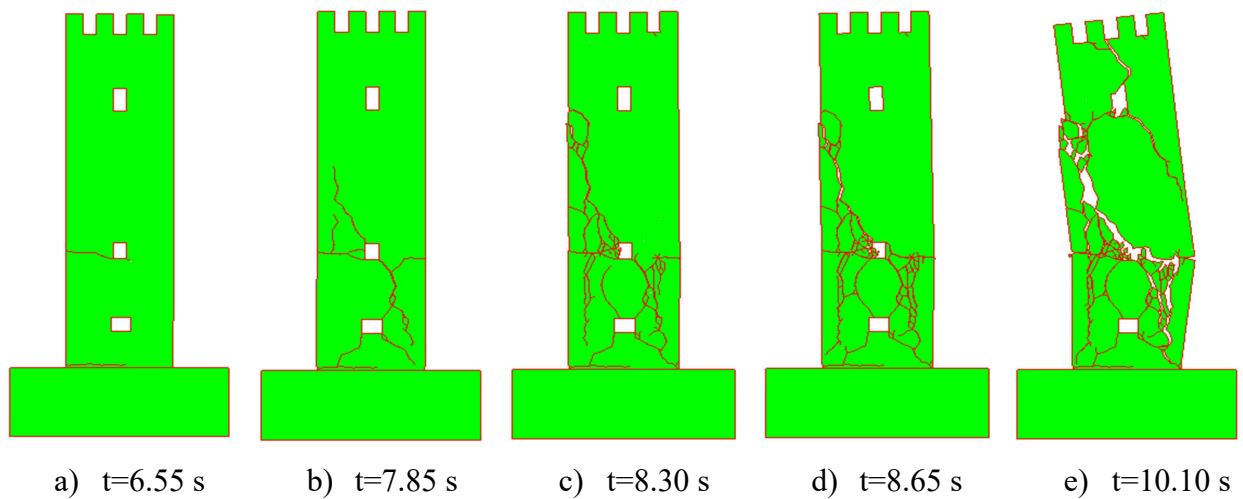
**Slika 83.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.40$  g



**Slika 84.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.90$  g

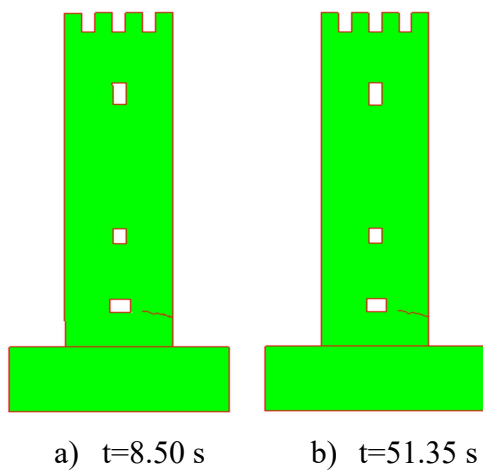


**Slika 85.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.99$  g

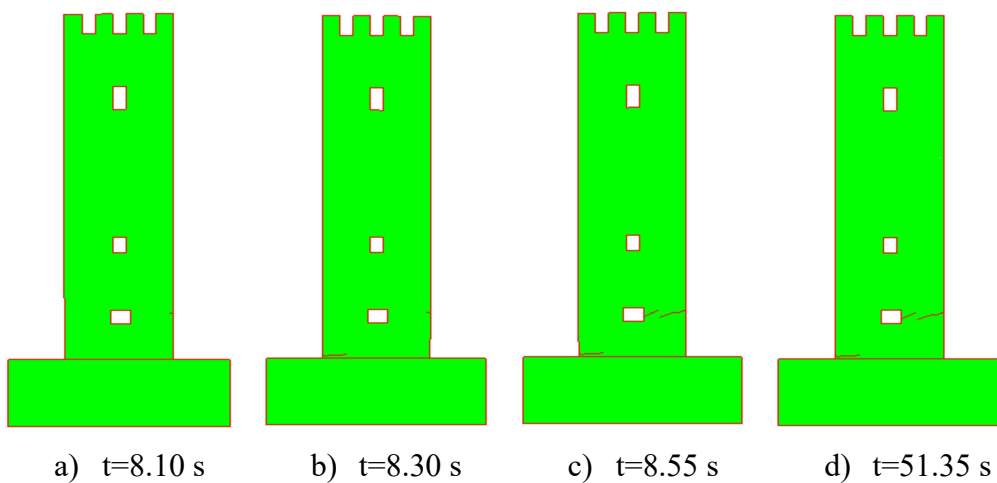


**Slika 86.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 2.00$  g

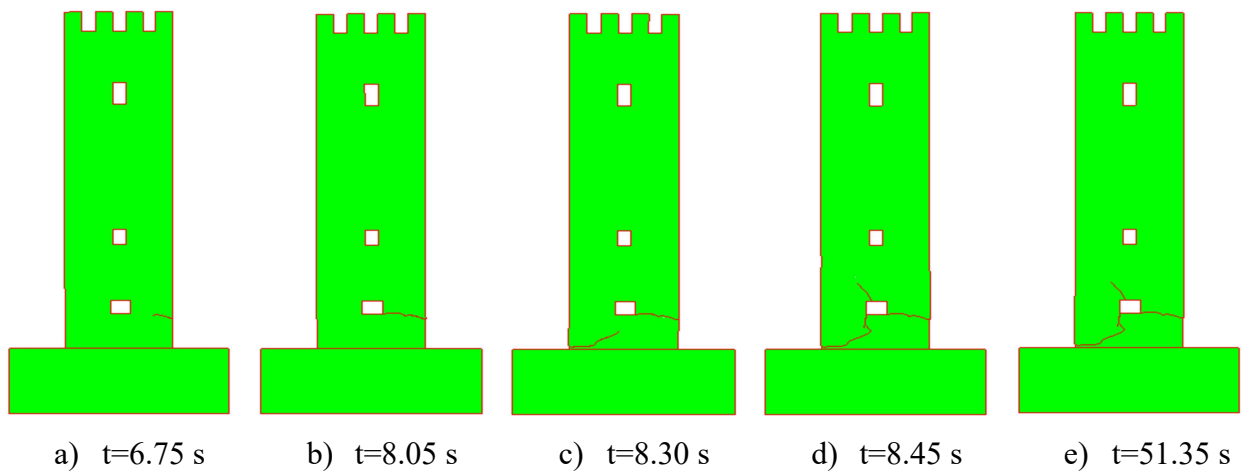
**c) 3. rubni uvjet – slobodnostojeći na krutoj podlozi**



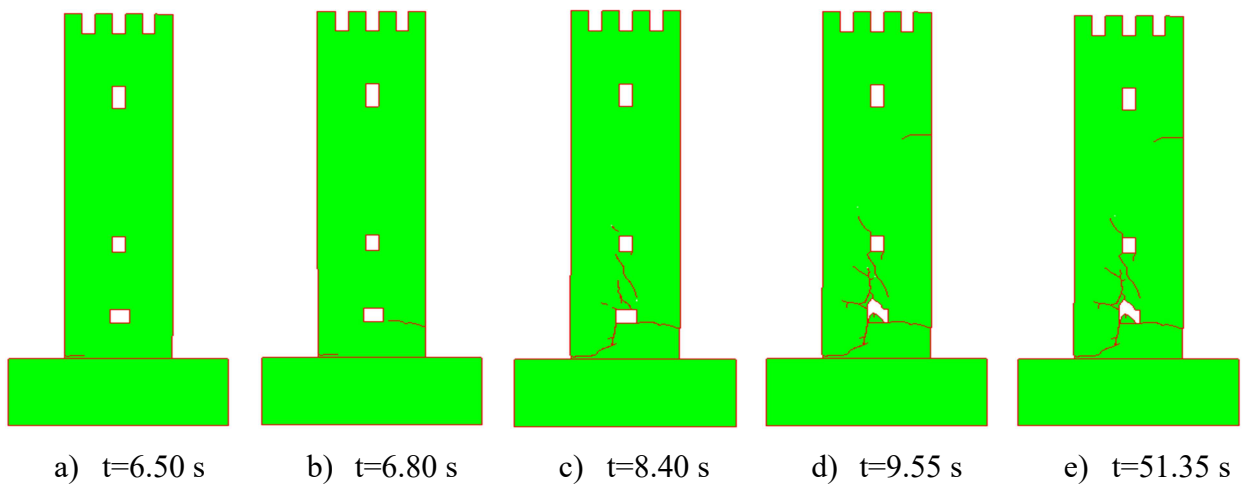
**Slika 87.** Pukotine za ubrzanje  $a = 0.80$  g



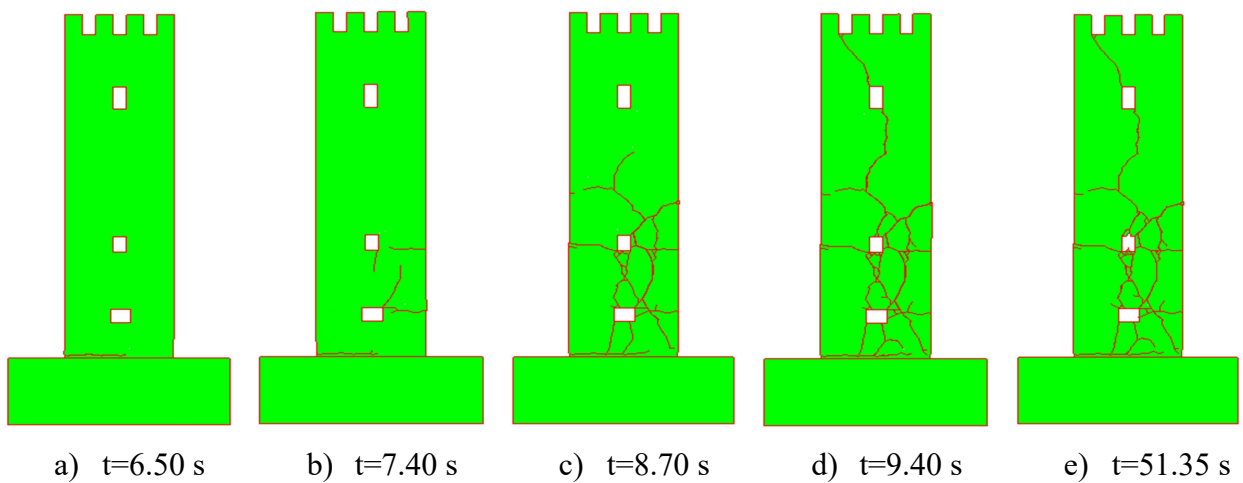
**Slika 88.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.00$  g



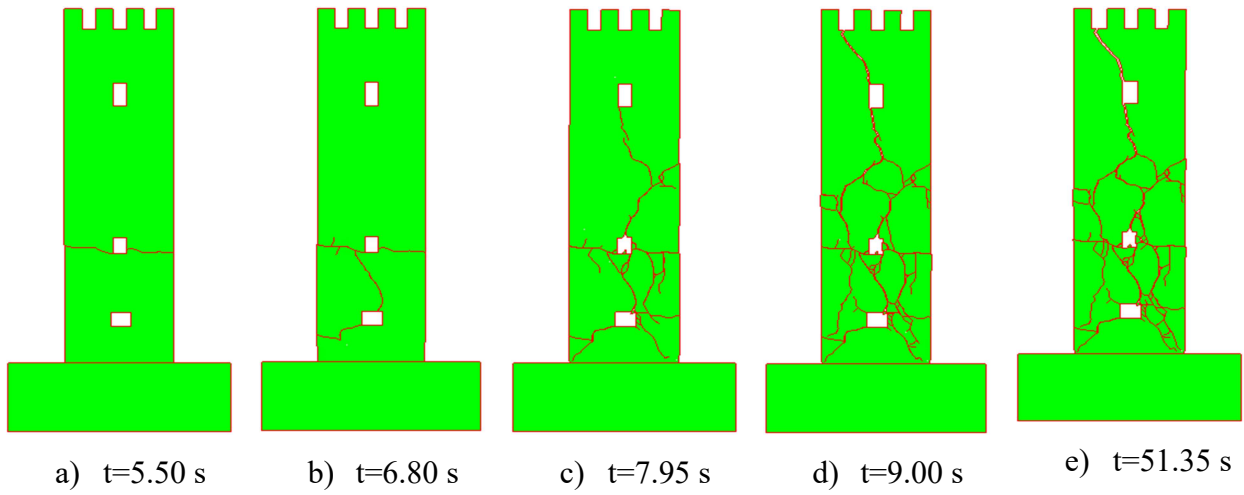
**Slika 89.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.20$  g



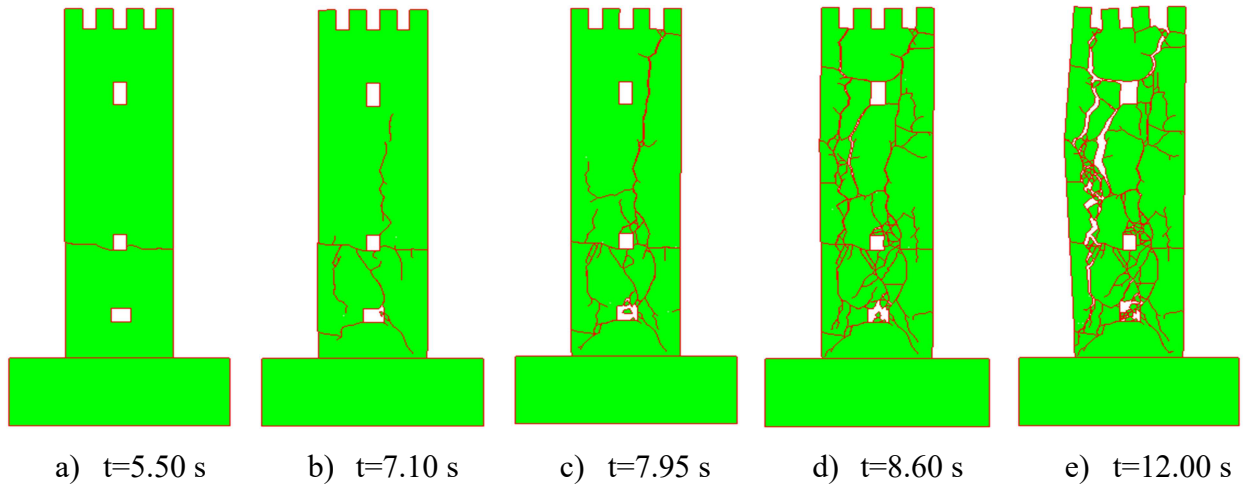
**Slika 90.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.40$  g



**Slika 91.** Pukotine za ubrzanje  $a = 1.90$  g



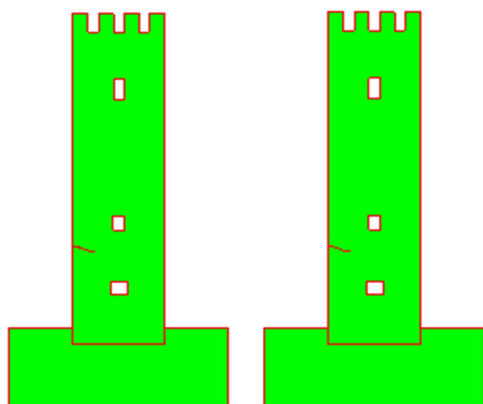
**Slika 92.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.20$  g



**Slika 93.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 2.25$  g



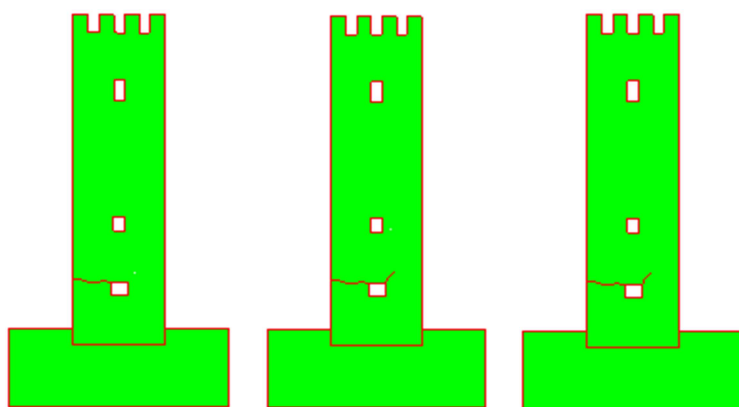
d) 4. rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu



a)  $t=7.95$  s

b)  $t=51.35$  s

Slika 94. Pukotine za ubrzanje  $a = 1.90$  g

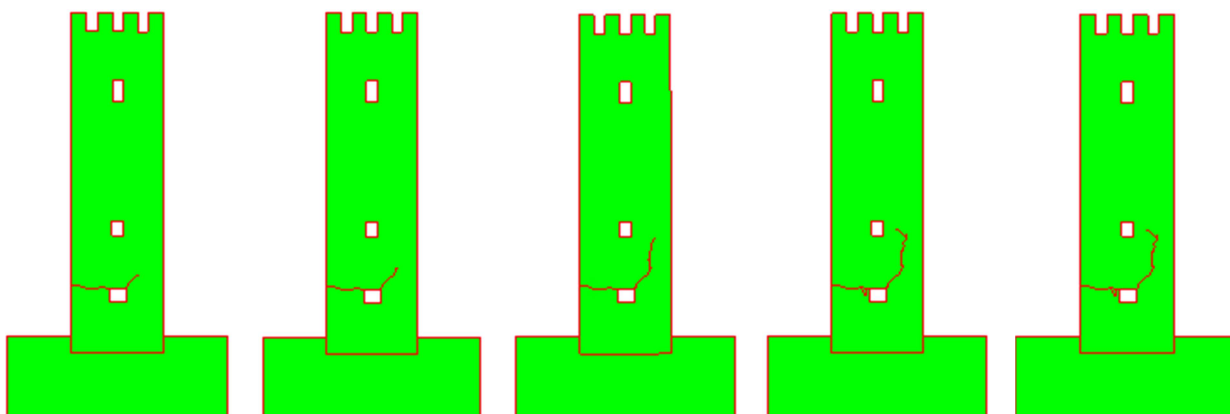


a)  $t=7.95$  s

b)  $t=8.00$  s

c)  $t=51.35$  s

Slika 95. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.20$  g



a)  $t=7.95$  s

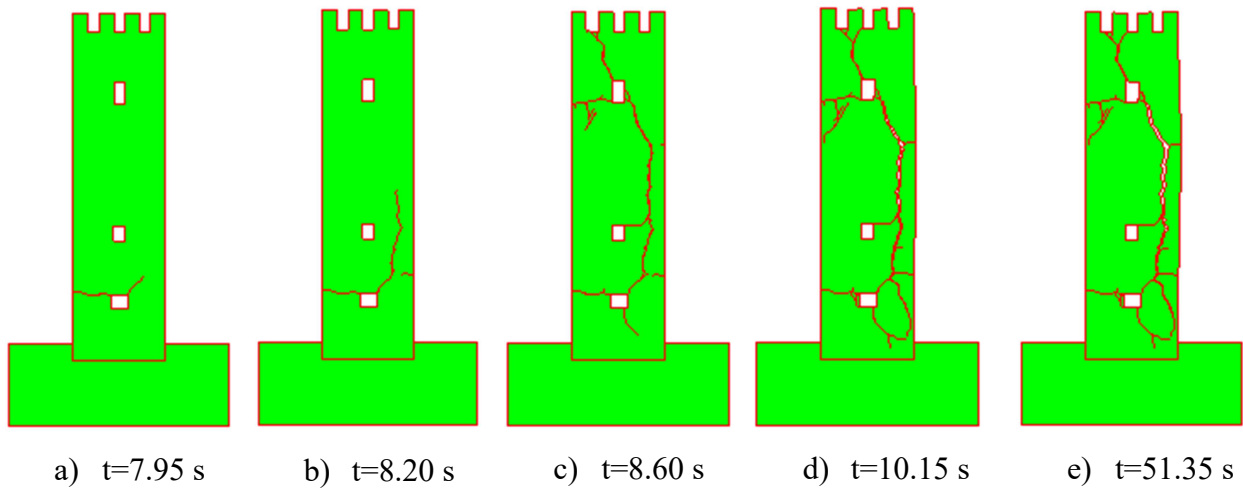
b)  $t=8.00$  s

c)  $t=8.10$  s

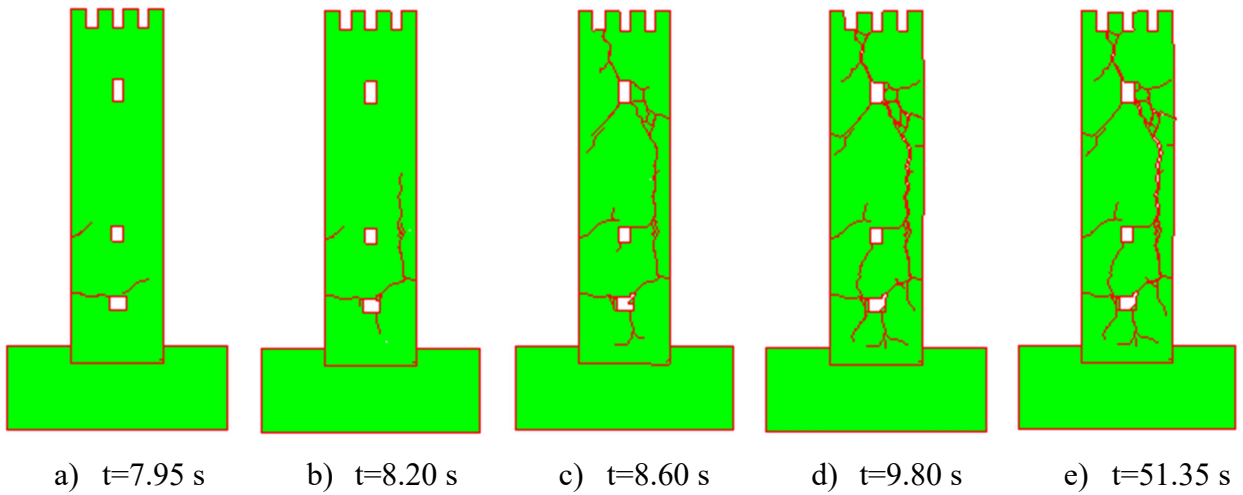
d)  $t=8.75$  s

e)  $t=51.35$  s

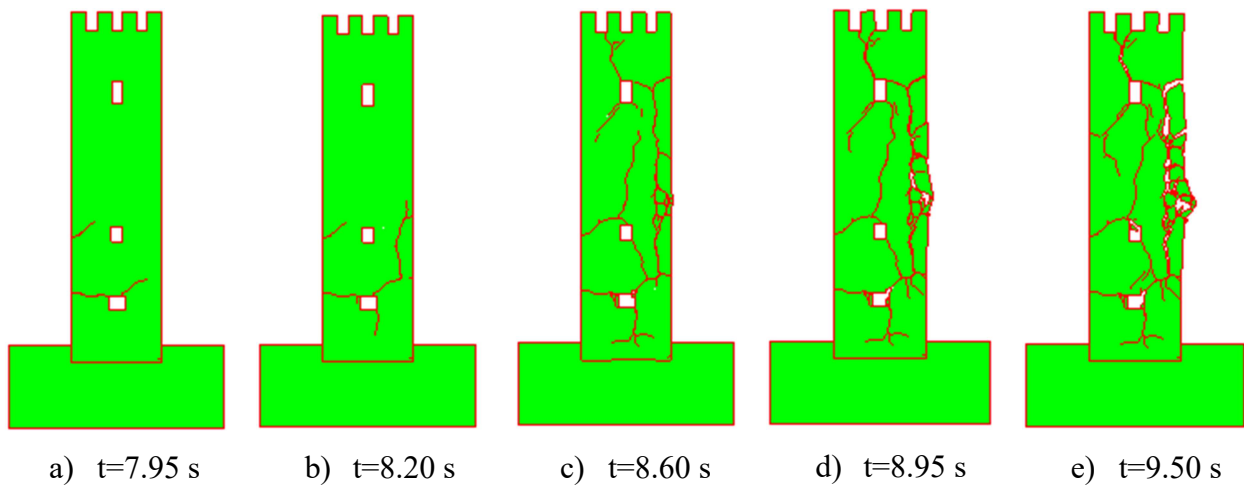
Slika 96. Pukotine za ubrzanje  $a = 2.40$  g



**Slika 97.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.60$  g



**Slika 98.** Pukotine za ubrzanje  $a = 2.80$  g



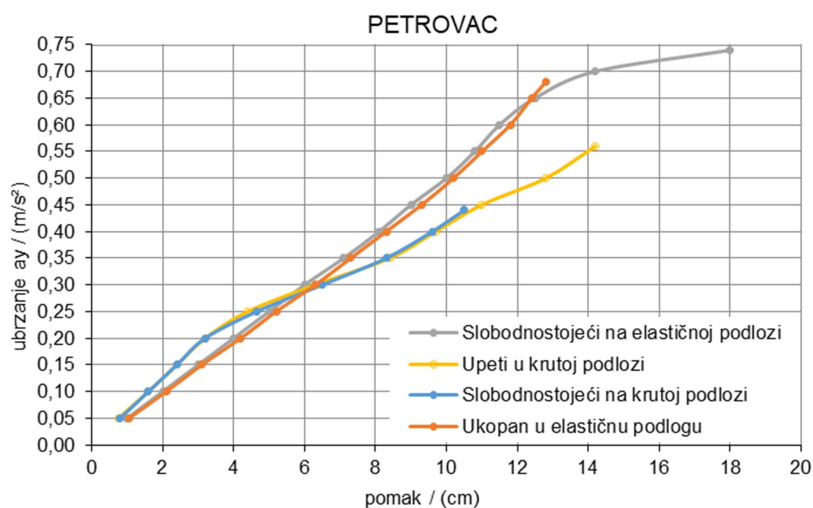
**Slika 99.** Pukotine i konačni slom za ubrzanje  $a = 2.85$  g

## 4. ANALIZA REZULTATA

Na grafovima su prikazane tri vrste potresa (Petrovac, Campano Lucano, South Iceland) pri čemu su korištena četiri rubna uvjeta.

**Tablica 2.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za Petrovac s četiri rubna uvjeta

Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi_PETROVAC		Upeti u krutoj podlozi_PETROVAC		Slobodnostojeći na krutoj podlozi_PETROVAC		Ukupan u elastičnu podlogu_PETROVAC	
pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay
1,00	0,05	0,75	0,05	0,80	0,05	1,05	0,05
2,00	0,10	1,60	0,10	1,60	0,10	2,10	0,10
3,00	0,15	2,40	0,15	2,40	0,15	3,10	0,15
4,00	0,20	3,20	0,20	3,20	0,20	4,20	0,20
5,00	0,25	4,40	0,25	4,65	0,25	5,20	0,25
6,00	0,30	6,30	0,30	6,50	0,30	6,30	0,30
7,10	0,35	8,40	0,35	8,30	0,35	7,30	0,35
8,10	0,40	9,70	0,40	9,60	0,40	8,30	0,40
9,00	0,45	11,00	0,45	10,50	0,44	9,30	0,45
10,00	0,50	12,80	0,50			10,20	0,50
10,80	0,55	14,20	0,56			11,00	0,55
11,50	0,60					11,80	0,60
12,50	0,65					12,40	0,65
14,20	0,70					12,80	0,68
18,00	0,74						

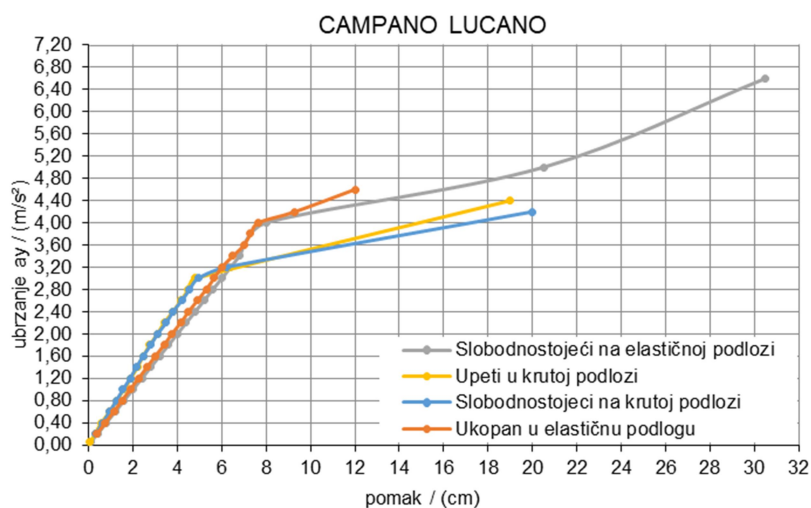


**Slika 100.** Petrovac s četiri rubna uvjeta

Iz grafa je vidljivo da Petrovac može najviše izdržati vršno ubrzanje do 0.74 g, gdje je rubni uvjet slobodnostojeći na elastičnoj podlozi s najvećim pomakom od 18.00 cm i taj rubni uvjet je najpovoljniji. Slijedi ga rubni uvjet ukopan u elastičnoj podlozi koji je izdržao ubrzanje do 0.68 g s najvećim pomakom od 12.80 cm. Za rubni uvjet slobodnostojeći na krutoj podlozi potres je najprije otkazao i ima najmanji pomak od 10.50 cm i spada u najnepovoljniji rubni uvjet koji je izdržao ubrzanje do 0.44 g. Potom ga slijedi rubni uvjet upeti u krutoj podlozi koji je izdržao ubrzanje do 0.56 g i ima veći pomak (14.20 cm) od rubnog uvjeta ukopan u elastičnu podlogu.

**Tablica 3.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za Campano Lucano s četiri rubna uvjeta

Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi_CAMPANO LUCANO		Upeti u krutoj podlozi_CAMPANO LUCANO		Slobodnostojeći na krutoj podlozi_CAMPANO LUCANO		Ukopan u elastičnu podlogu_CAMPANO LUCANO	
pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay
0,09	0,05	0,07	0,05	0,32	0,20	0,37	0,20
0,40	0,20	0,29	0,20	0,63	0,40	0,75	0,40
0,80	0,40	0,57	0,40	0,95	0,60	1,13	0,60
1,20	0,60	0,95	0,60	1,25	0,80	1,50	0,80
1,60	0,80	1,25	0,80	1,55	1,00	1,87	1,00
2,00	1,00	1,60	1,00	1,87	1,20	2,25	1,20
2,40	1,20	1,90	1,20	2,15	1,40	2,63	1,40
2,80	1,40	2,20	1,40	2,45	1,60	3,00	1,60
3,20	1,60	2,45	1,60	2,80	1,80	3,40	1,80
3,60	1,80	2,75	1,80	3,10	2,00	3,75	2,00
4,00	2,00	3,10	2,00	3,50	2,20	4,15	2,20
4,40	2,20	3,40	2,20	3,80	2,40	4,50	2,40
4,80	2,40	3,80	2,40	4,20	2,60	4,90	2,60
5,20	2,60	4,15	2,60	4,55	2,80	5,30	2,80
5,60	2,80	4,50	2,80	4,95	3,00	5,65	3,00
6,00	3,00	4,80	3,00	6,20	3,20	6,00	3,20
6,40	3,20	19,00	3,20	20,00	4,20	6,50	3,40
6,80	3,40	5,40	3,40	11,50	4,30	7,00	3,60
8,00	4,00	7,40	4,00			7,30	3,80
20,50	5,00	19,00	4,40			7,65	4,00
30,50	6,60					9,30	4,20
						12,00	4,60
						11,00	4,80
						10,00	4,95

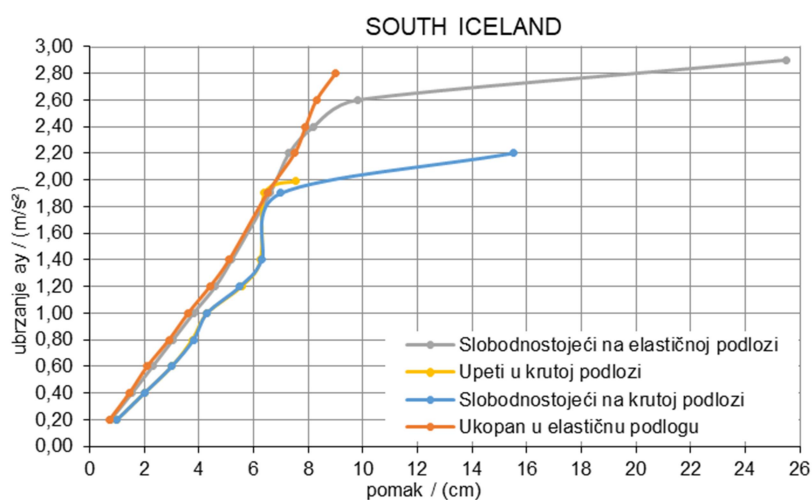


**Slika 101.** Campano Lucano s četiri rubna uvjeta

Iz grafa Campano Lucano vidljivo je da najviše može izdržati rubni uvjet slobodnostojeći na elastičnoj podlozi za vršno ubrzanje do 6.60 g gdje pomak iznosi 30.50 cm i taj rubni uvjet je najpovoljniji, ali ima jako veliki pomak. Uvjet ukopan u elastičnu podlogu ima pomak od 12.00 cm pri ubrzanju od 4.60 g, a uvjet upeti u krutoj podlozi izdrži ubrzanje do 4.40 g s pomakom od 19.00 cm. Najnepovoljniji rubni uvjet je slobodnostojeći na krutoj podlozi koji ima dosta veliki pomak od 20.00 cm pri ubrzanju od 4.20 g.

**Tablica 4.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za South Iceland s četiri rubna uvjeta

Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi SOUTH ICELAND		Upeti u krutoj podlozi SOUTH ICELAND		Slobodnostojeći na krutoj podlozi SOUTH ICELAND		Ukopan u elastičnu podlogu SOUTH ICELAND	
pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay
0,76	0,20	1,00	0,20	1,00	0,20	0,72	0,20
1,55	0,40	2,00	0,40	2,00	0,40	1,45	0,40
2,30	0,60	3,00	0,60	3,00	0,60	2,10	0,60
3,05	0,80	3,75	0,80	3,80	0,80	2,90	0,80
3,80	1,00	4,30	1,00	4,30	1,00	3,60	1,00
4,60	1,20	5,55	1,20	5,50	1,20	4,40	1,20
5,20	1,40	6,25	1,40	6,30	1,40	5,10	1,40
6,60	1,90	6,40	1,90	7,00	1,90	6,50	1,90
7,30	2,20	7,55	1,99	15,50	2,20	7,50	2,20
8,20	2,40					7,90	2,40
9,80	2,60					8,30	2,60
25,50	2,90					9,00	2,80
11,00	2,91						



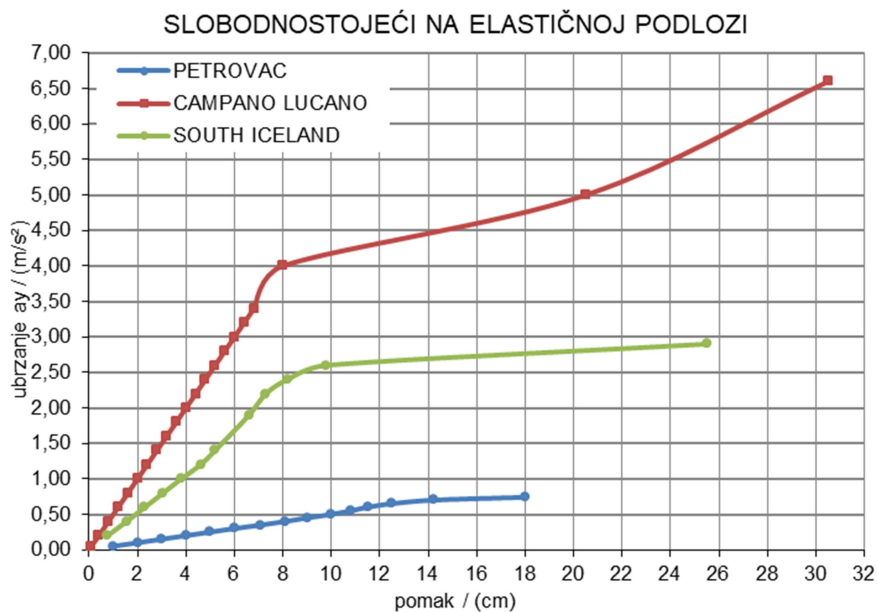
**Slika 102.** South Iceland s četiri rubna uvjeta

Prema grafu za potres South Iceland najviše izdrži rubni uvjet slobodnostojeći na elastičnoj podlozi za vršno ubrzanje od 2.90 g s pomakom od 25.50 cm i taj rubni uvjet je najpovoljniji jer može izdržati najveće vršno ubrzanje od ostalih rubnih uvjeta. Među boljim rubnim uvjetima je ukopani u elastičnu podlogu koji izdrži ubrzanje do 2.80 g s pomakom od 9.00 cm i ima manji pomak od prethodnog rubnog uvjeta. Rubni uvjet upeti u krutu podlogu izdrži najmanje ubrzanje od 1.99 g s pomakom od 7.55 cm i spada u najnepovoljniji rubni uvjet. Slijedi ga rubni uvjet slobodnostojeći na krutoj podlozi s ubrzanjem od 2.20 g koji ima dosta veliki pomak od 15.50 cm.

Na grafovima su prikazane četiri različite vrste rubnih uvjeta za tri potresa (Petrovac, Campano Lucano, South Iceland).

**Tablica 5.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri potresa s 1. rubnim uvjetom – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi

Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi_PETROVAC		Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi_CAMPANO LUCANO		Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi_SOUTH ICELAND	
pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$
1,00	0,05	0,09	0,05	0,76	0,20
2,00	0,10	0,40	0,20	1,55	0,40
3,00	0,15	0,80	0,40	2,30	0,60
4,00	0,20	1,20	0,60	3,05	0,80
5,00	0,25	1,60	0,80	3,80	1,00
6,00	0,30	2,00	1,00	4,60	1,20
7,10	0,35	2,40	1,20	5,20	1,40
8,10	0,40	2,80	1,40	6,60	1,90
9,00	0,45	3,20	1,60	7,30	2,20
10,00	0,50	3,60	1,80	8,20	2,40
10,80	0,55	4,00	2,00	9,80	2,60
11,50	0,60	4,40	2,20	25,50	2,90
12,50	0,65	4,80	2,40	11,00	2,91
14,20	0,70	5,20	2,60		
18,00	0,74	5,60	2,80		
		6,00	3,00		
		6,40	3,20		
		6,80	3,40		
		8,00	4,00		
		20,50	5,00		
		30,50	6,60		

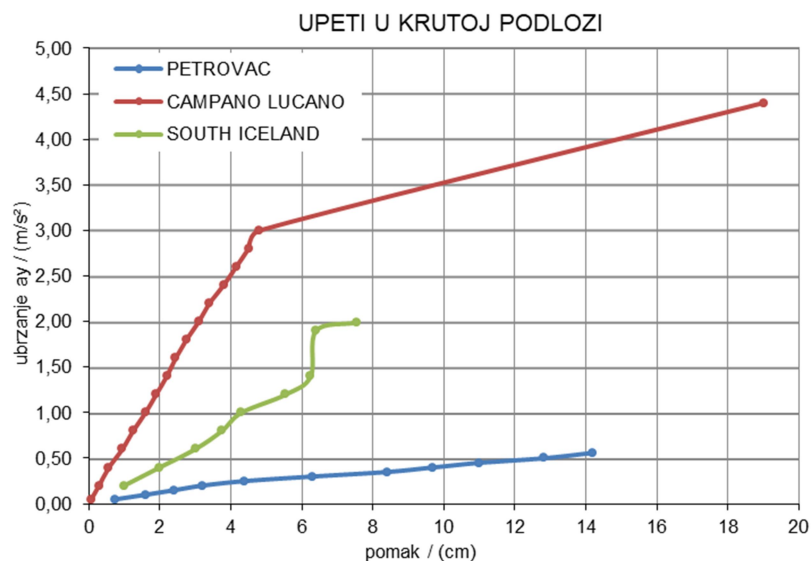


**Slika 103.** Rubni uvjet – slobodnostojeći na elastičnoj podlozi za tri potresa

Iz tabličnoga prikaza vidi se da Campano Lucano može izdržati najveće vršno ubrzanje do 6.60 g s najvećim pomakom od 30.50 cm, a također se vidi i iz grafičkog prikaza. Zatim ga slijedi South Iceland s vršnim ubrzanjem 2.90 g koji ima pomak od 25.50 cm, pri čemu je nešto manji pomak od Campana Lucana. Najmanje vršno ubrzanje od 0.74 g izdrži Petrovac s pomakom od 18.00 cm. Kako potresi izdrže veće vršno ubrzanje time imaju i veći pomak.

**Tablica 6.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri potresa s 2. rubnim uvjetom – upeti u krutoj podlozi

Upeti u krutoj podlozi_PETROVAC		Upeti u krutoj podlozi_CAMPANO LUCANO		Upeti u krutoj podlozi_SOUTH ICELAND	
pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay
0,75	0,05	0,07	0,05	1,00	0,20
1,60	0,10	0,29	0,20	2,00	0,40
2,40	0,15	0,57	0,40	3,00	0,60
3,20	0,20	0,95	0,60	3,75	0,80
4,40	0,25	1,25	0,80	4,30	1,00
6,30	0,30	1,60	1,00	5,55	1,20
8,40	0,35	1,90	1,20	6,25	1,40
9,70	0,40	2,20	1,40	6,40	1,90
11,00	0,45	2,45	1,60	7,55	1,99
12,80	0,50	2,75	1,80		
14,20	0,56	3,10	2,00		
		3,40	2,20		
		3,80	2,40		
		4,15	2,60		
		4,50	2,80		
		4,80	3,00		
		19,00	3,20		
		5,40	3,40		
		7,40	4,00		
		19,00	4,40		



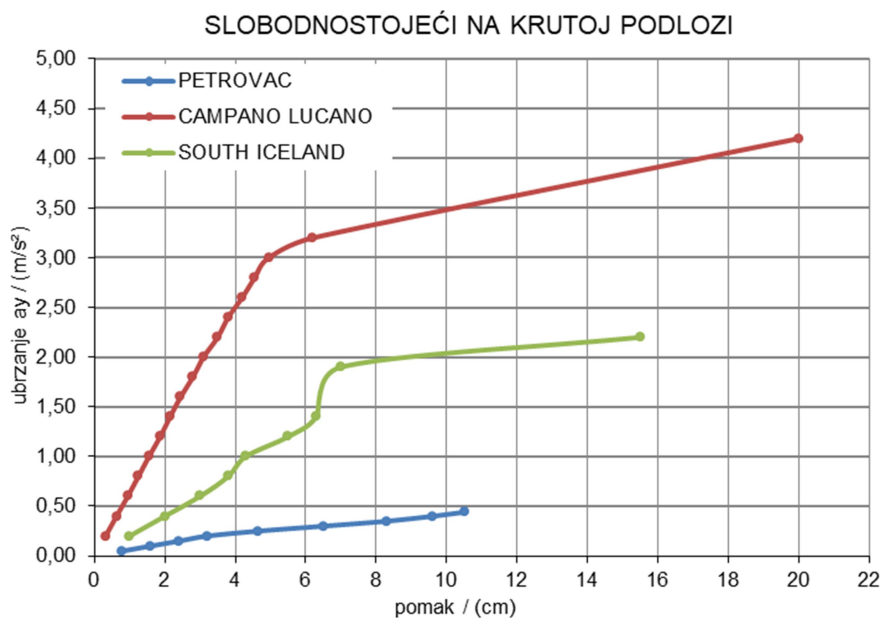
**Slika 104.** Rubni uvjet – upeti u krutoj podlozi za tri potresa

Campano Lucano može izdržati vršno ubrzanje od 4.40 g s pomakom od 19.00 cm koji se vidi iz grafičkog prikaza. Zatim ga slijedi South Iceland s vršnim ubrzanjem do 1.99 g koji ima pomak od 7.55 cm, pri čemu ima manji pomak od Campana Lucana. Petrovac izdrži najmanje vršno ubrzanje od 0.56 g s pomakom od 14.2 cm. U ovome slučaju Campano Lucano ima najveći pomak od ostalih potresa.



**Tablica 7.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri potresa s 3. rubnim uvjetom – slobodnostojeći na krutoj podlozi

Slobodnostojeći na krutoj podlozi_PETROVAC		Slobodnostojeći na krutoj podlozi_CAMPANO LUCANO		Slobodnostojeći na krutoj podlozi_SOUTH ICELAND	
pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$	pomak (cm)	ubrzanje $a_y$
0,80	0,05	0,32	0,20	1,00	0,20
1,60	0,10	0,63	0,40	2,00	0,40
2,40	0,15	0,95	0,60	3,00	0,60
3,20	0,20	1,25	0,80	3,80	0,80
4,65	0,25	1,55	1,00	4,30	1,00
6,50	0,30	1,87	1,20	5,50	1,20
8,30	0,35	2,15	1,40	6,30	1,40
9,60	0,40	2,45	1,60	7,00	1,90
10,50	0,44	2,80	1,80	15,50	2,20
		3,10	2,00		
		3,50	2,20		
		3,80	2,40		
		4,20	2,60		
		4,55	2,80		
		4,95	3,00		
		6,20	3,20		
		20,00	4,20		
		11,50	4,30		

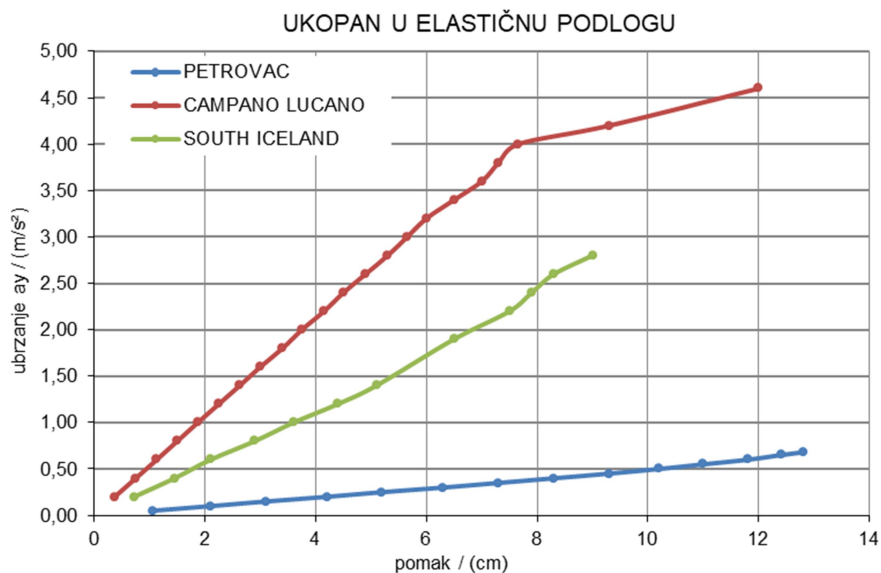


**Slika 105.** Rubni uvjet – slobodnostojeći na krutoj podlozi

Iz grafičkog prikaza vidi se da Campano Lucano može izdržati vršno ubrzanje do 4.30 g s najvećim pomakom od 20.00 cm. Zatim ga slijedi South Iceland s vršnim ubrzanjem do 2.20 g koji ima pomak od 15.50 cm, pri čemu ima manji pomak od Campana Lucana. Petrovac ima najmanji pomak od 10.50 cm pri vršnom ubrzanju od 0.44 g i to je najmanje ubrzanje. Prema vidljivome kako potresi izdrže veće vršno ubrzanje time dostižu i veći pomak.

**Tablica 8.** Tablični prikaz pomaka i ubrzanja za sva tri potresa s 4. rubnim uvjetom – ukopan u elastičnu podlogu

Ukopan u elastičnu podlogu_PETROVAC		Ukopan u elastičnu podlogu_CAMPANO LUCANO		Ukopan u elastičnu podlogu_SOUTH ICELAND	
pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay	pomak (cm)	ubrzanje ay
1,05	0,05	0,37	0,20	0,72	0,20
2,10	0,10	0,75	0,40	1,45	0,40
3,10	0,15	1,13	0,60	2,10	0,60
4,20	0,20	1,50	0,80	2,90	0,80
5,20	0,25	1,87	1,00	3,60	1,00
6,30	0,30	2,25	1,20	4,40	1,20
7,30	0,35	2,63	1,40	5,10	1,40
8,30	0,40	3,00	1,60	6,50	1,90
9,30	0,45	3,40	1,80	7,50	2,20
10,20	0,50	3,75	2,00	7,90	2,40
11,00	0,55	4,15	2,20	8,30	2,60
11,80	0,60	4,50	2,40	9,00	2,80
12,40	0,65	4,90	2,60		
12,80	0,68	5,30	2,80		
		5,65	3,00		
		6,00	3,20		
		6,50	3,40		
		7,00	3,60		
		7,30	3,80		
		7,65	4,00		
		9,30	4,20		
		12,00	4,60		
		11,00	4,80		
		10,00	4,95		



**Slika 106.** Rubni uvjet – ukopan u elastičnu podlogu

Prema grafičkome prikazu Campano Lucano izdrži najveće vršno ubrzanje do 4.95 g s najvećim pomakom od 12.00 cm. Zatim ga slijedi South Iceland s vršnim ubrzanjem do 2.80 g koji ima pomak od 9.00 cm i ima manji pomak od Campana Lucana. Petrovac ima najveći pomak od ostalih potresa, a to je 12.80 cm pri vršnom ubrzanju od 0.68 g.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovome radu radila se seizmička analiza obrambenog zidanog tornja preko kombinirane metode konačno-diskretnih elemenata. Ova seizmička analiza se vršila za tri potresa kako bi se moglo utvrditi s koja od četiri rubna uvjeta je zidani toranj najizdržljiviji pri najvećem ubrzanju, odnosno kada dolazi do pojave prve pukotine te koliki je pomak i koliko ubrzanje zidani toranj može izdržati do potpunog urušavanja. Iz rezultata izanalizirani su svi rubni uvjeti i vidljivo je da je najpovoljniji 1. rubni uvjet (slobodnostojeći na elastičnoj podlozi), što je već bilo i vidljivo kod pojave prvih pukotina (prikazano u tablici 9.). Rubni uvjet slobodnostojeći na elastičnoj podlozi izdržao je najveće vršno ubrzanje na sva tri potresa (Petrovac, Campano Lucano, South Iceland). Petrovac se srušio na vršnom ubrzanju od 0.75 g, a Campano Lucano na 6.70 g i South Iceland na 2.92 g. Idući među boljim rubnim uvjetima je ukopani u elastičnu podlogu, a među najlošijim rubnim uvjetima kreće se slobodnostojeći na krutoj podlozi, a zatim upeti u krutoj podlozi. Detaljniji rezultati vidljivi su iz tablice 10.

**Tablica 9.** Izlazni rezultati prvih pukotina tornja

	Petrovac	Campano Lucano	South Iceland
Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi	a=0.65 g	a=3.20 g	a=2.20 g
Ukopani u elastičnu podlogu	a=0.55 g	a=3.00 g	a=1.90 g
Upeti u krutoj podlozi	a=0.25 g	a=2.00 g	a=0.80 g
Slobodnostojeći na krutoj podlozi	a=0.35 g	a=2.00 g	a=0.80 g

**Tablica 10.** Izlazni rezultati sa ubrzanjima, pomacima i urušavanjem tornja

	Slobodnostojeći na elastičnoj podlozi	Ukopani u elastičnu podlogu	Upeti u krutoj podlozi	Slobodnostojeći na krutoj podlozi
Petrovac	a=0.74 g na 18.00 cm a=0.75 g u 14.65 sek	a=0.68 g na 12.80 cm a=0.69 g u 24.50 sek	a=0.56 g na 14.20 cm a=0.57 g u 13.00 sek	a=0.44 g na 10.50 cm a=0.45 g u 24.00 sek
Campano Lucano	a=6.60 g na 30.50 cm a=6.70 g u 24.50 sek	a=4.60 g na 12.00 cm a=5.00 g u 27.00 sek	a=4.40 g na 19.00 cm a=4.45 g u 14.00 sek	a=4.20 g na 20 cm a=4.35 g u 18.50 sek
South Iceland	a=2.90 g na 25.50 cm a=2.92 g u 13.00 sek	a=2.80 g na 9.00 cm a=2.85 g u 9.50 sek	a=1.99 g na 7.55 cm a=2.00 g u 10.10 sek	a=2.20 g na 15.50 cm a=2.25 g u 12.00 sek

Za sva četiri rubna uvjeta najveće vršno ubrzanje izdrži Campano Lucano i može se reći da je on najpovoljniji. Zatim ga slijedi South Iceland s manjim vršnim ubrzanjem. Petrovac je najnepovoljniji i najprije se sruši pri vršnom ubrzanju. Što se tiče pomaka za pojedini rubni uvjet dolazi do variranja. Za 1. rubni uvjet Campano Lucano ima najveći pomak od 30.50 cm, zatim ga slijedi South Iceland s pomakom od 25.50 cm, a najmanji ima Petrovac s pomakom od 18.00 cm. Za 2. rubni uvjet Campano Lucano ima najveći pomak od 19.00 cm, a Petrovac ima pomak od 14.20 cm, a najmanji pomak ima South Iceland od 7.55 cm. Što se tiče redoslijeda pomaka 3. rubni uvjet je sličan 1. rubnom uvjetu. Campano Lucano ima najveći pomak od 20.00 cm, a South Iceland ima pomak od 15.50 cm, a najmanji pomak ima Petrovac od 10.50 cm. Zadnji 4. rubni uvjet je potpuno različit od ostalih. Najveći pomak ima Petrovac od 12.80 cm, zatim Campano Lucana ima pomak od 12 cm i najmanji pomak ima South Iceland od 9.00 cm (tablica 10.).

- Prema svim dobivenim seizmičkim rezultatima može se zaključiti da 1. rubni uvjet slobodnostojeći na elastičnoj podlozi je najpovoljniji jer je na sve tri lokacije zidani toranj izdržao najveća ubrzanja i najveće pomake. Zatim ga slijedi 4. rubni uvjet ukopani na elastičnoj podlozi s vrlo malom razlikom ubrzanja od 1. rubnog uvjeta, ali s puno manjim pomakom.
- Među lošijim rubnim uvjetima su se pokazali 3. rubni uvjet slobodnostojeći na krutoj podlozi, a zatim 3. rubni uvjet upeti u krutoj podlozi.
- Analiza koja se vršila i svi dobiveni rezultati mogu poslužiti za buduća projektiranja takvih istih i sličnih objekata ili za samu obnovu sličnih postojećih objekata.

## 6. LITERATURA

1. Građevinar: Pregled metoda za modeliranje povijesnih zidanih konstrukcija-Hrvoje Smoljanović, Nikolina Živaljić i Željana Nikolić
2. Osnove kombinirane metode konačno - diskretnih elemenata
3. Engineering Structures-Siro Casolo, Gabriele Milani, Giuseppina Uva, Claudio Alessandri
4. Građevinar: Analiza stabilnosti suho zidanih kamenih nadvoja kombiniranom metodom konačno-diskretnih elemenata-Emili Zubović, Hrvoje Smoljanović i Boris Trogrlić
5. <https://repozitorij.gradst.unist.hr/islandora/object/gradst%3A896/datastream/PDF/view>
6. The combined finite-discrete element method, First edition, John Wiley&Sons, 2004 – Munjiza A.