



# Utjecaj različitih parametara na ponašanje i nosivost armiranobetonskih stupova pri potresu

Nikola Grgić

Jure Radnić

Doc. dr.sc. Nikola Grgić, dipl.ing.građ., FGAG, Split

Prof. dr. sc. Jure Radnić, dipl.ing.građ., FGAG, Split

# Sadržaj

- Uvod
- Prednosti testiranja s potresnim platformama
- Ograničenja testiranja s potresnim platformama
- Dijagram toka istraživanja
- Eksperimentalna ispitivanja stupova
  - Oprema za mjerenje
  - Seizmičko opterećenje
  - Rezultati testiranja
- Numerički model



- UVOD

- Svrha testiranja na potresnim platformama

- Analiza seizmičkih performanse (ne)konstrukcijskih dijelova i složenih sustava
- Osiguravanje podatke za provjeru valjanosti / kalibriranje analitičkih modela
- Vrednovanje projektantskih koncepcija, principa i detaljiranja.

- Najčešći tipovi uzoraka testiranih na potresnim platformama

- Ne konstrukcijske komponente
  - npr. sidra ili postolja za razne tipove vrijednih uređaja
- Konstrukcijske komponente
  - npr. stupovi, razne vrste prigušivača
- Dijelovi objekata
  - npr. okviri, zidovi , čvorovi
- Cijeli objekti
  - npr. zgrade, mostovi, vjetro turbine



# Prednosti testiranja s potresnim platformama u odnosu na ostale metode testiranja

- Realističnije uzimanje u obzir dinamičkih efekata
  - Inercijalne sile
  - Prigušenje
  - Nema potrebe za spajanje naprava za nanošenje opterećenja
  
- Najbolji način simulacije efekata gibanja tla zabilježenih uslijed potresa



# Ograničenja testiranja na potresnim platformama

- Cijena
- Dostupnost laboratorija
- Kapacitet opreme
- Točnost pojedinih mjerenja
- Rubni uvjeti
- Ograničeno vrijeme reakcije ukoliko nešto ne krene po planu



# Dijagram toka istraživanja

## Korak 1

- definirati potrebu za istraživanjem

Određivanje konstrukcijskog sustava, koncepta itd. kog će se istraživati

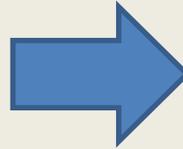


Projektiranje prototipa konstrukcije

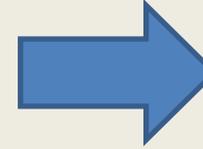
## Korak 2

- oprema/troškovi i ograničenja  
- Zakoni sličnosti

Projektiranje modela za ispitivanje



Izrada plana mjerenja

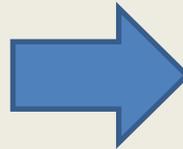


Izrada programa testiranja

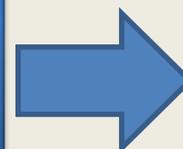
## Korak 3

- provođenje eksperimenata

Priprema uzoraka za testiranje



Provođenje programa ispitivanja

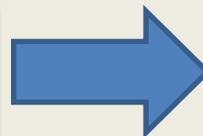


Prikupljanje i pohranjivanje podataka

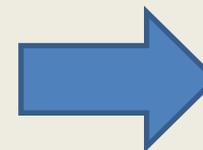
## Korak 4

- obrada podataka

Analiza podataka



Provjera analitičkih modela



Ocjena koncepta, sustava i sl



# Eksperimentalno ispitivanja stupova

- Cilj istraživačkog rada:
- Istražiti ponašanje vitkih armirano betonskih stupova pri potresu.
- Poboljšanje i verifikacija postojećeg numeričkog modela za statičku i dinamičku analizu armiranobetonskih konstrukcija.



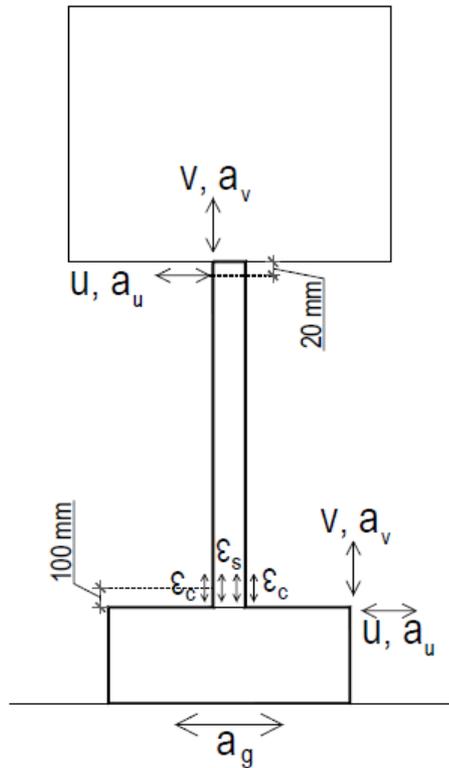
## ➤ Istraživani parametri:

- Utjecaj tipa pobude (potresa) na dinamički odgovor stupa.
- Utjecaj vitkosti (duljine) stupa na njegov seizmički odgovor.
- Utjecaj veličine temelja na dinamički odziv stupova.
- Utjecaj rubnih uvjeta (popuštanje, klizanje, odizanje temelja) na dinamičko ponašanje stupova.
- Utjecaj količine uzdužne armature na dinamički odziv stupova.
- Utjecaj količine poprečne armature (spona) na dinamičko ponašanje armiranobetonskih stupova.
- Utjecaj ekscentriciteta uzdužne sile na vrhu stupa na njegovo ponašanje pri potresu.



# Oprema za mjerenje

HBM Quantum X high-speed data acquisition system korišten je za prikupljanje podataka s mjernih uređaja.



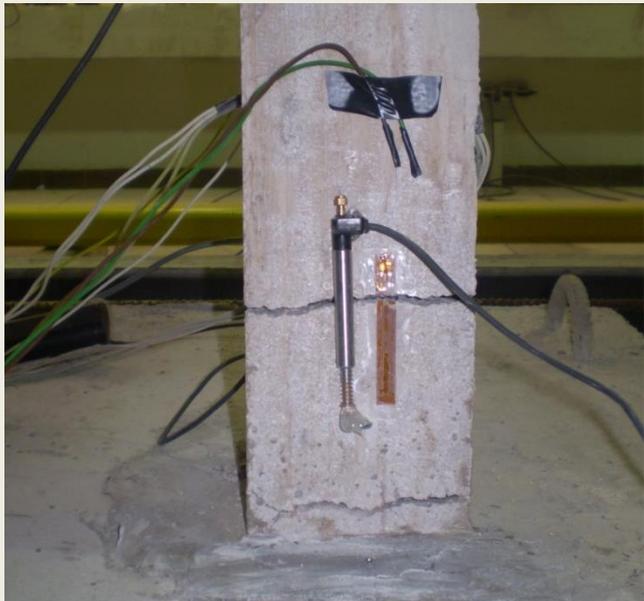
- $u$  - horizontalni pomak
- $v$  - vertikalni pomak
- $a_u$  - horizontalno ubrzanje
- $a_v$  - vertikalno ubrzanje
- $\epsilon_c$  - deformacija betona
- $\epsilon_s$  - deformacija armature
- $a_g$  - ubrzanje platforme



Mjerna traka za čelik K-LY11-5/120 (HBM).

Mjerna traka za beton K-LY11-60/120 (HBM)

Inductive displacement transducer WA/10-L



Akcelerometar KISTLER tip 8044



# Aplicirano seizmičko opterećenje

## Elastično područje

- $a_{gmax}=0,05$  g
- $a_{gmax}=0,10$  g

## Srednja nelinearnost

- $a_{gmax}=0,15$  g
- $a_{gmax}=0,20$  g

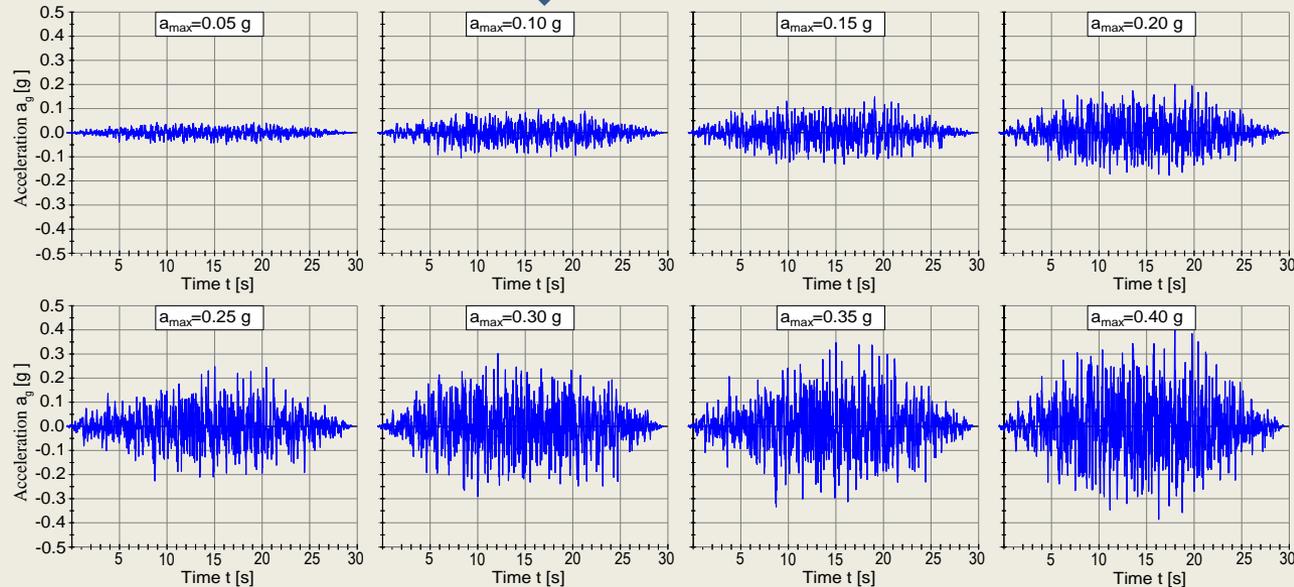
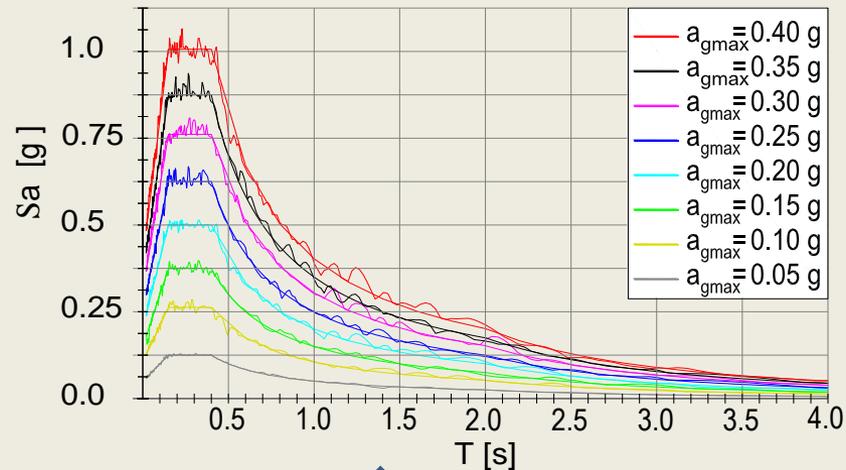
## Značajana nelinearnost

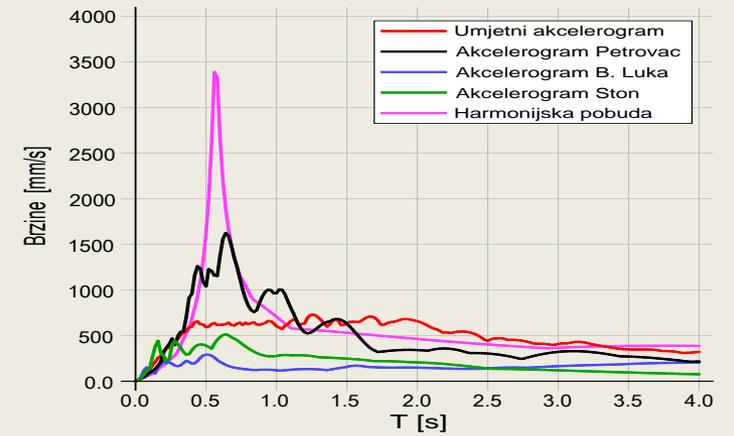
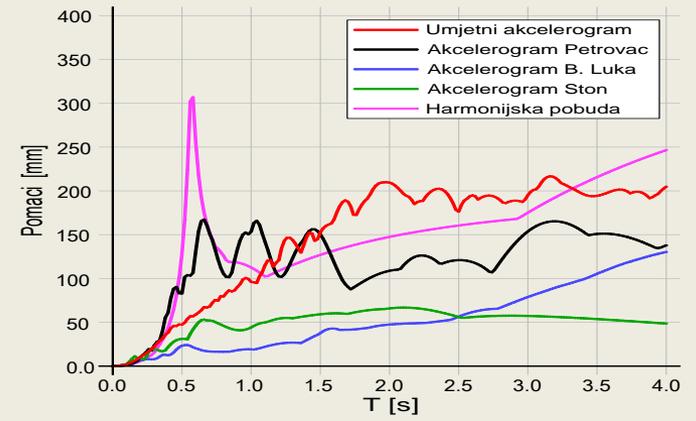
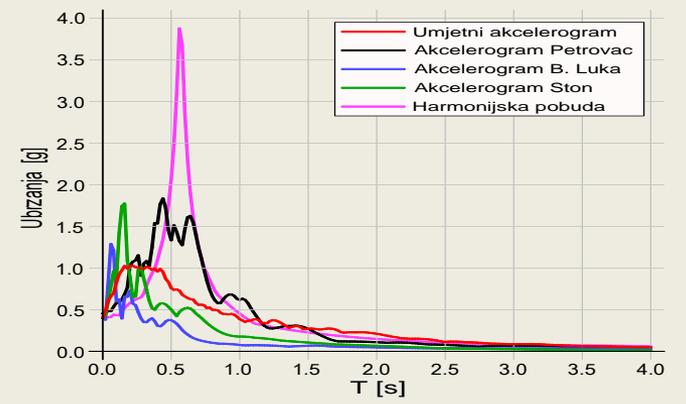
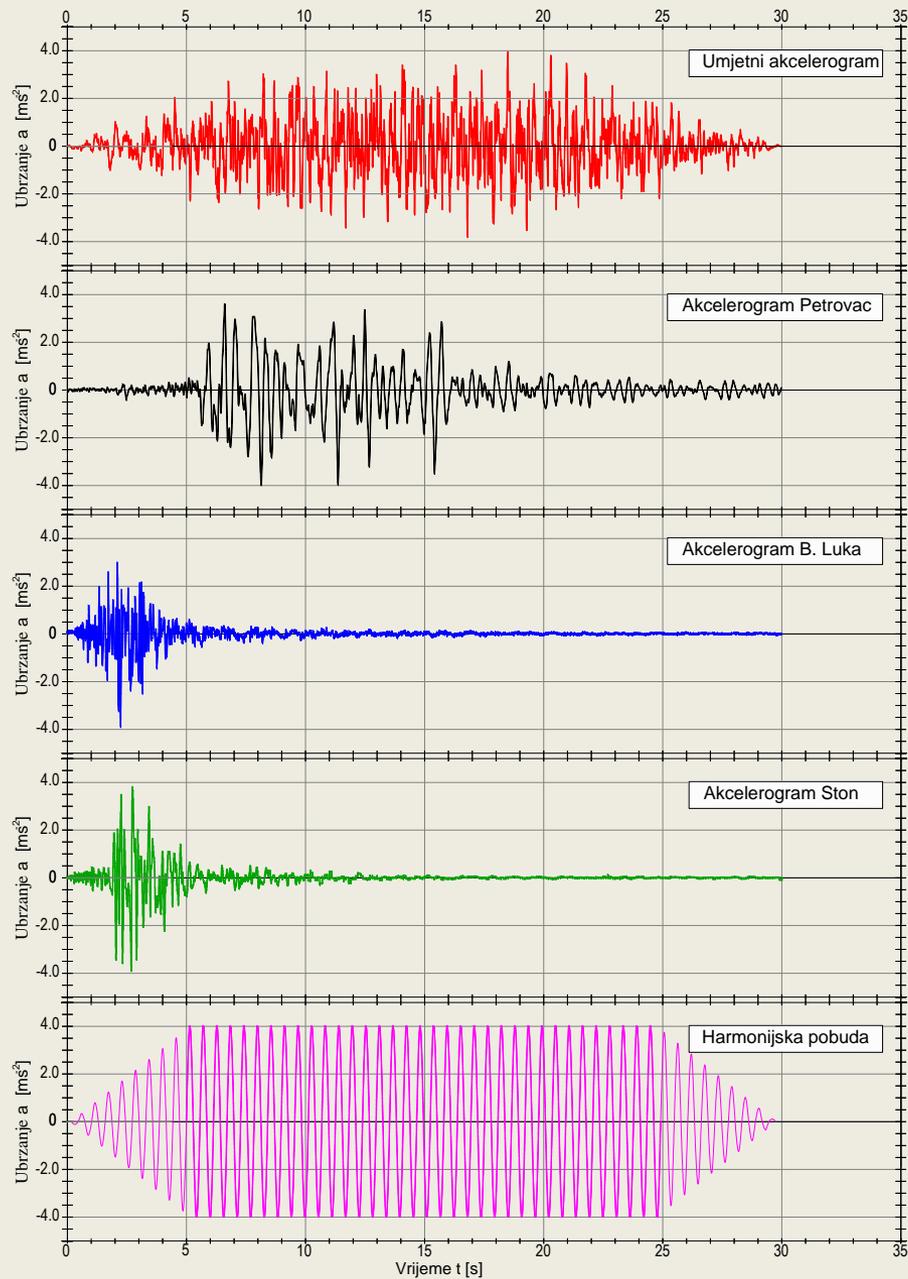
- $a_{gmax}=0,25$  g
- $a_{gmax}=0,30$  g

## Kolaps konstrukcije

- $a_{gmax}=0,35$  g
- $a_{gmax}=0,40$  g

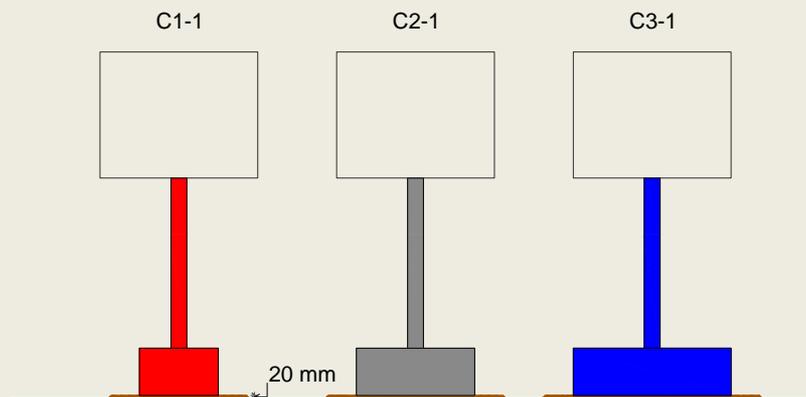
Prije i poslije svake  
pobude  
Određene su dinamičke  
karakteristike konstrukcije



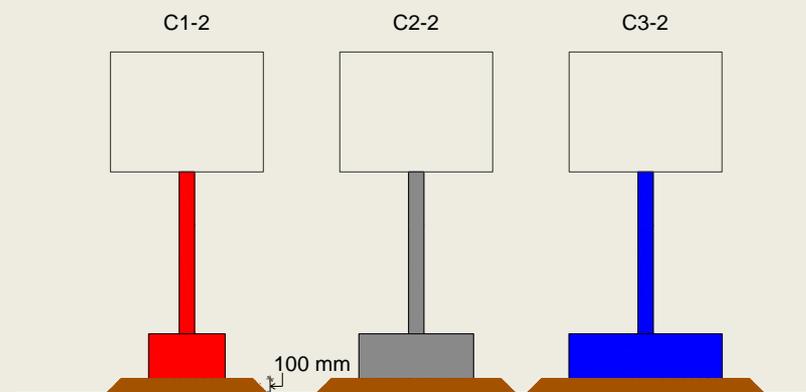




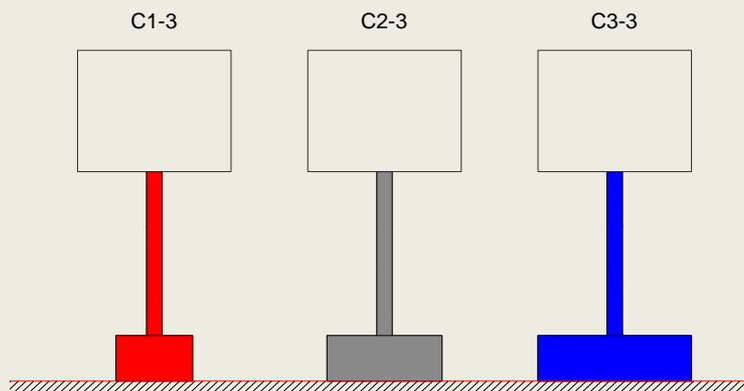
Stupovi s temeljem na  
sloju kamenog pijeska  
debljine 20 mm

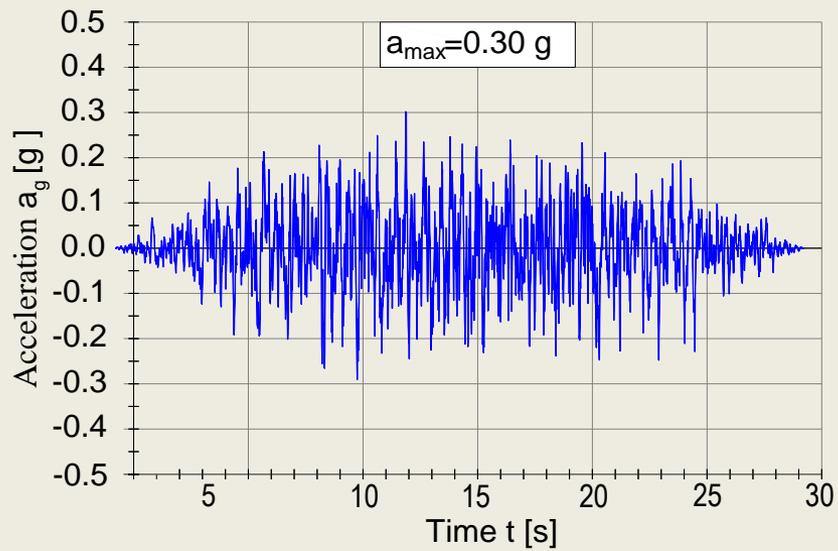


Stupovi s temeljem na  
sloju kamenog pijeska  
debljine 100 mm

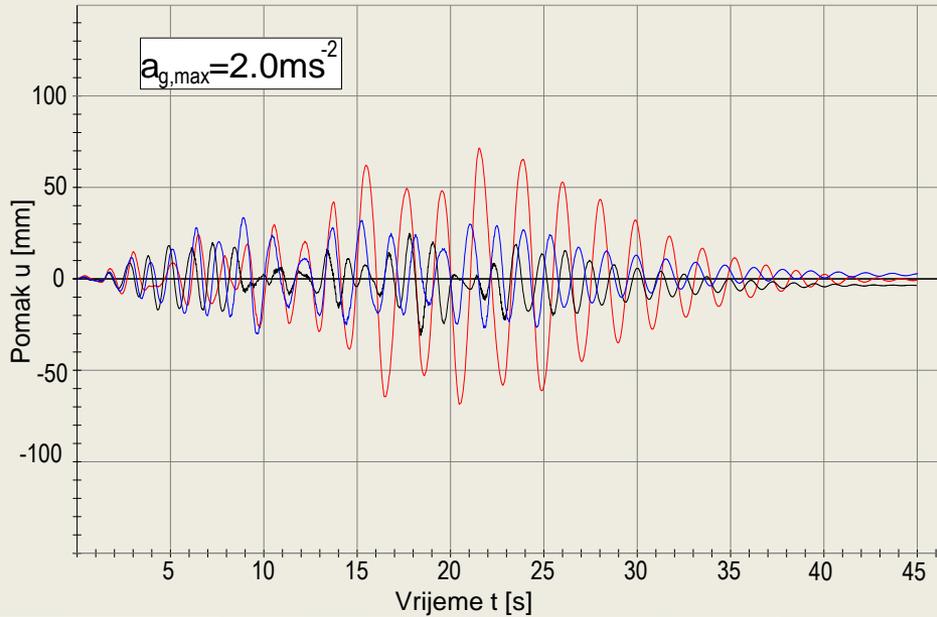
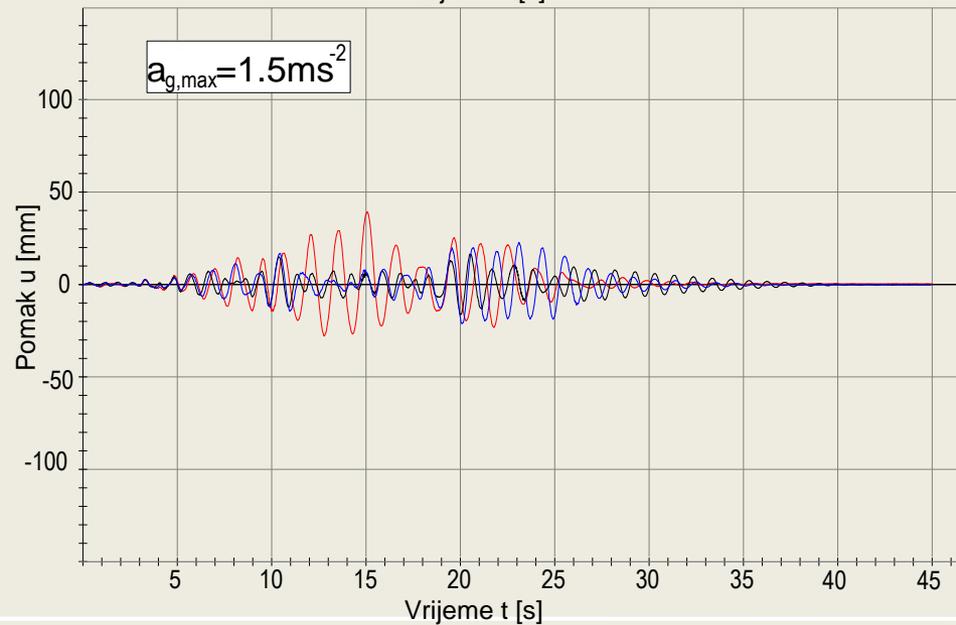
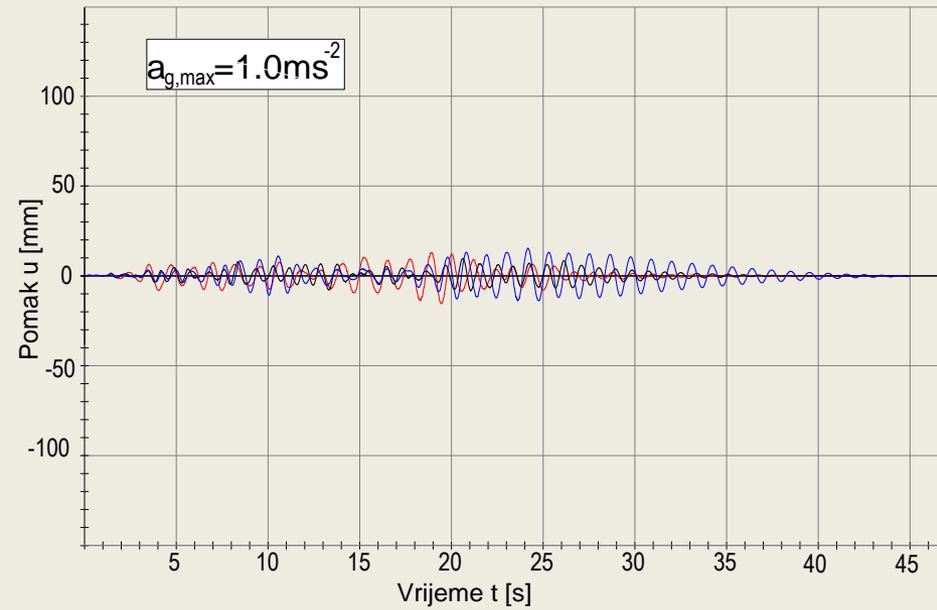
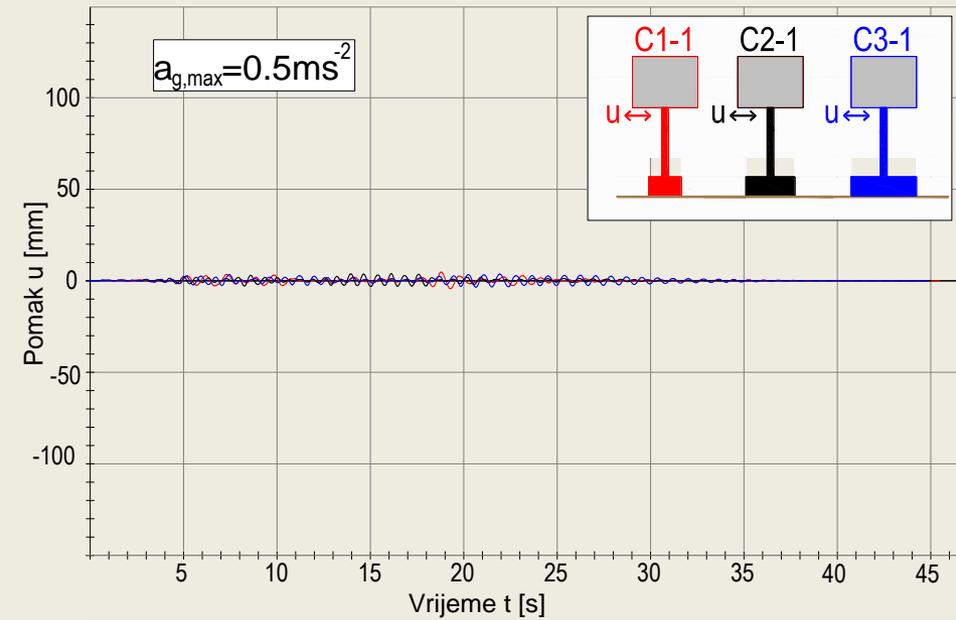


Stupovi s temeljem  
zavarenim za  
platformu

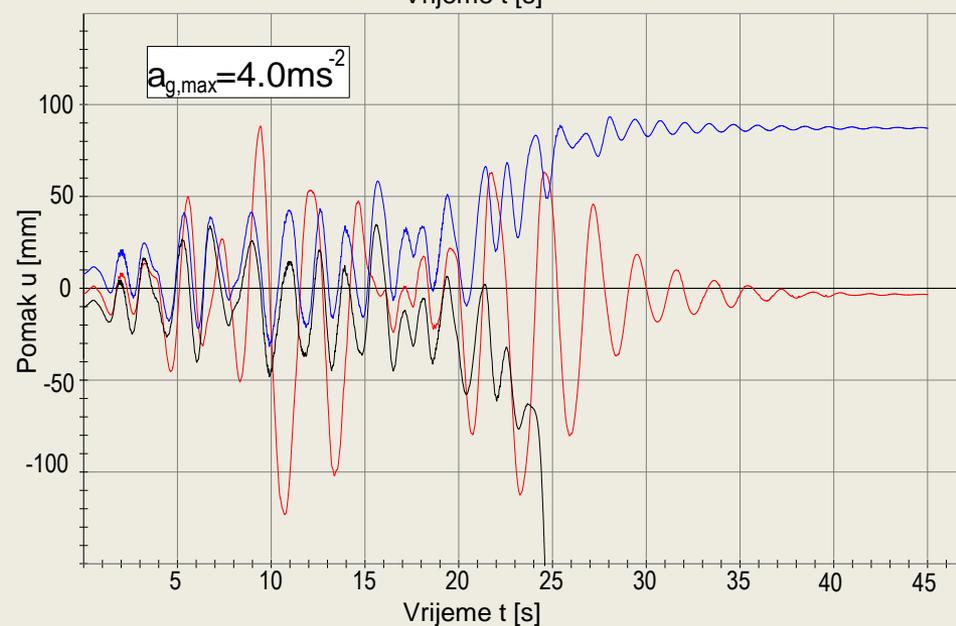
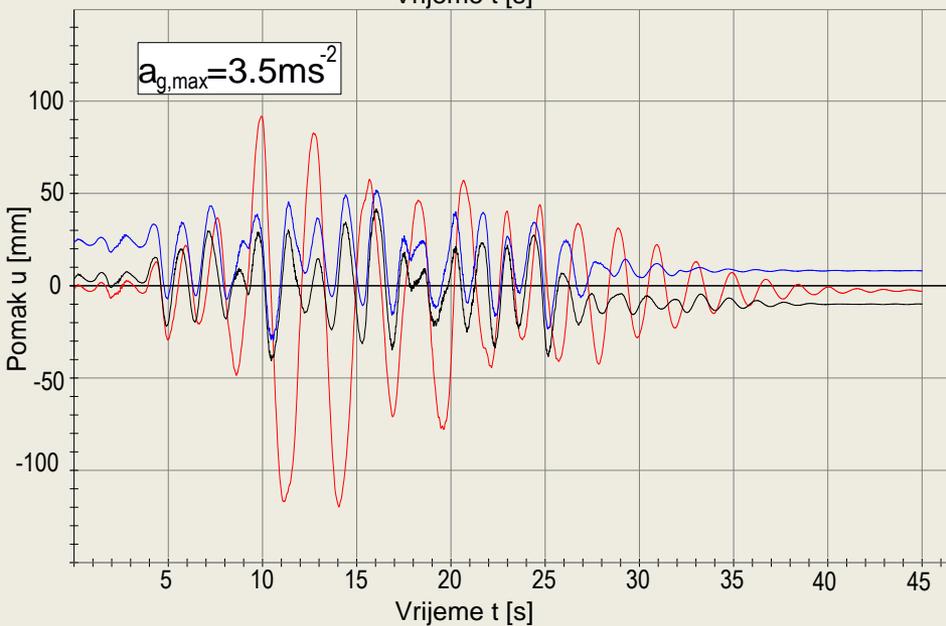
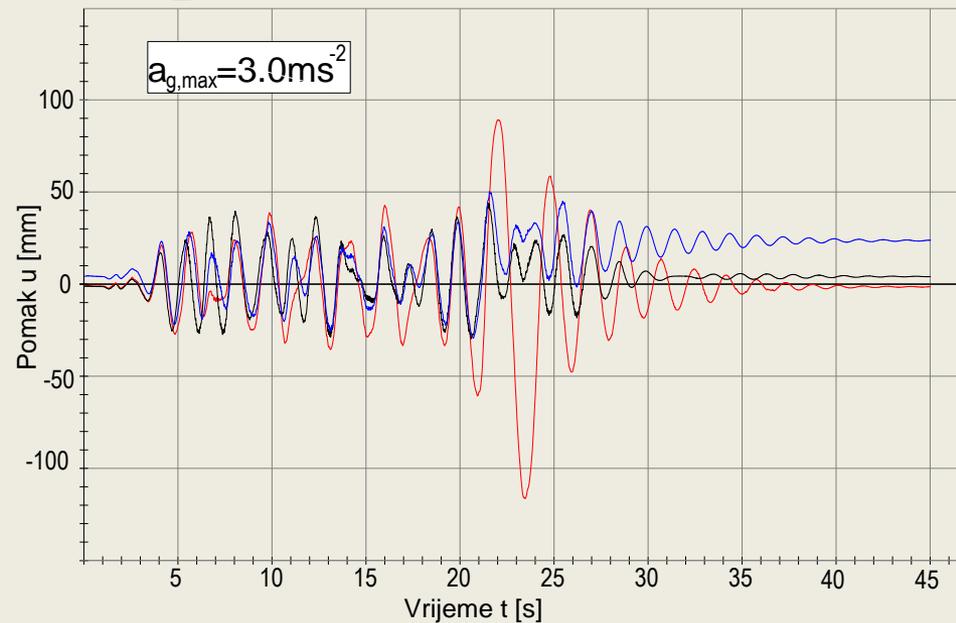
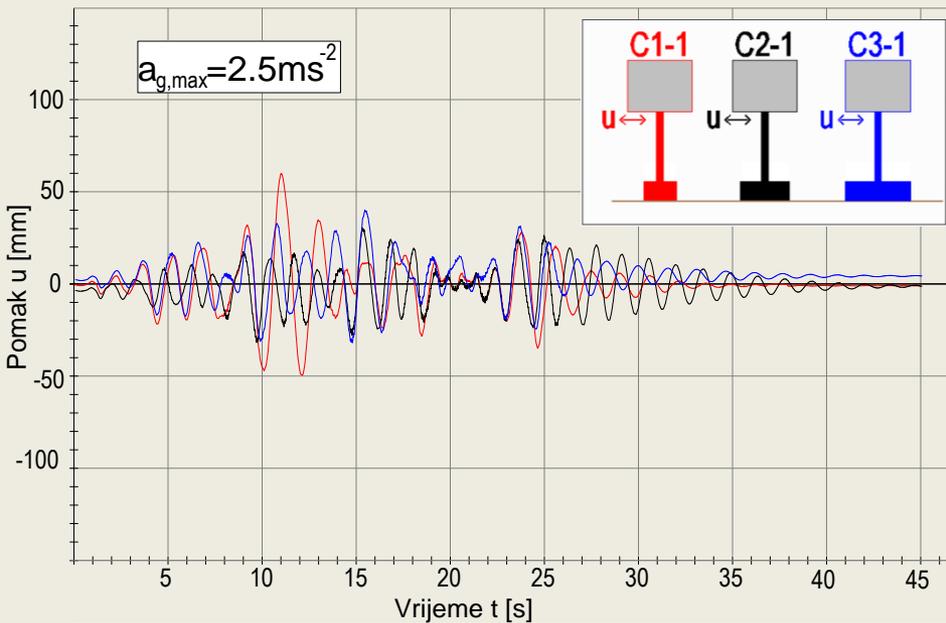




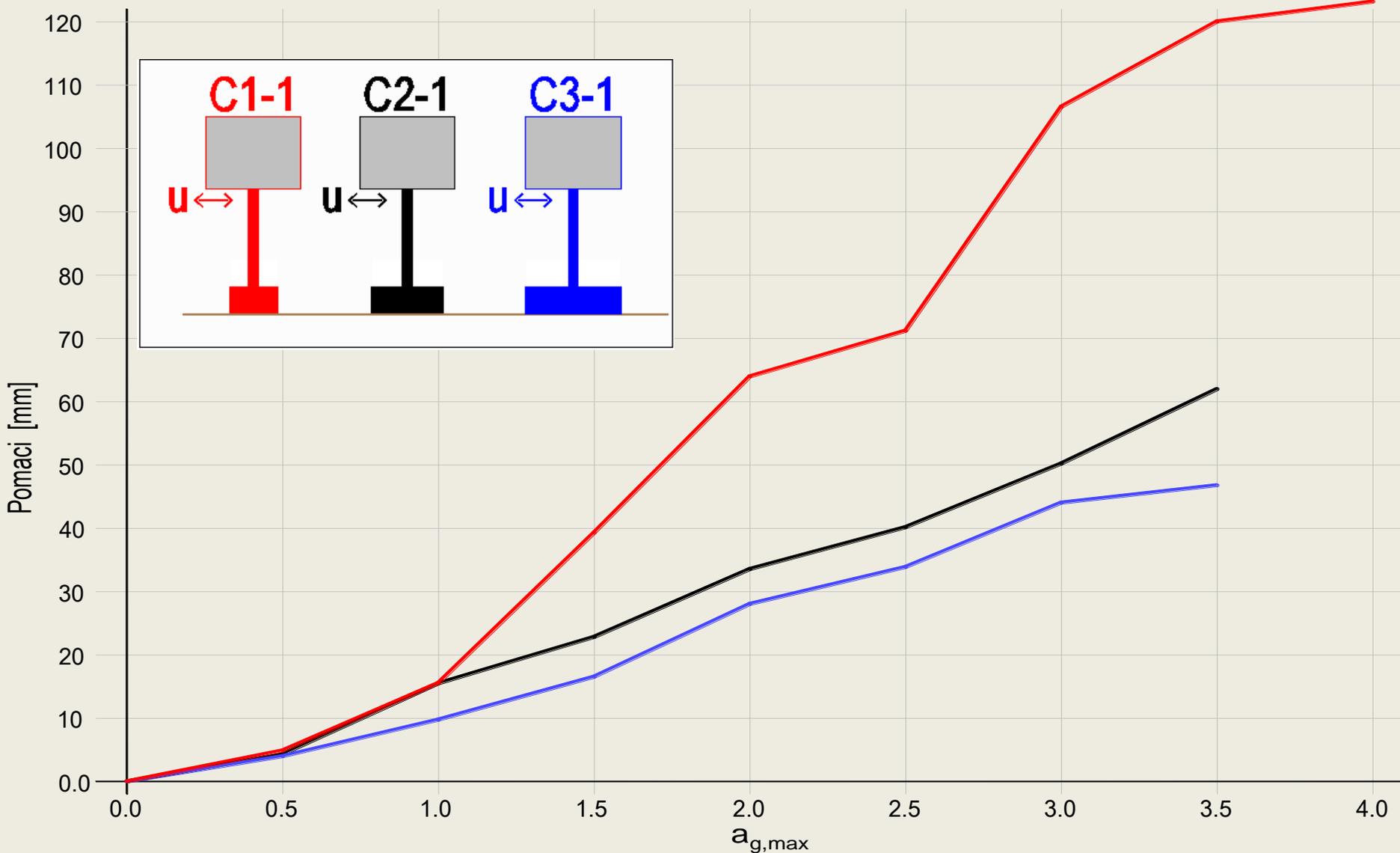
# Pomaci vrha stupa u vremenu



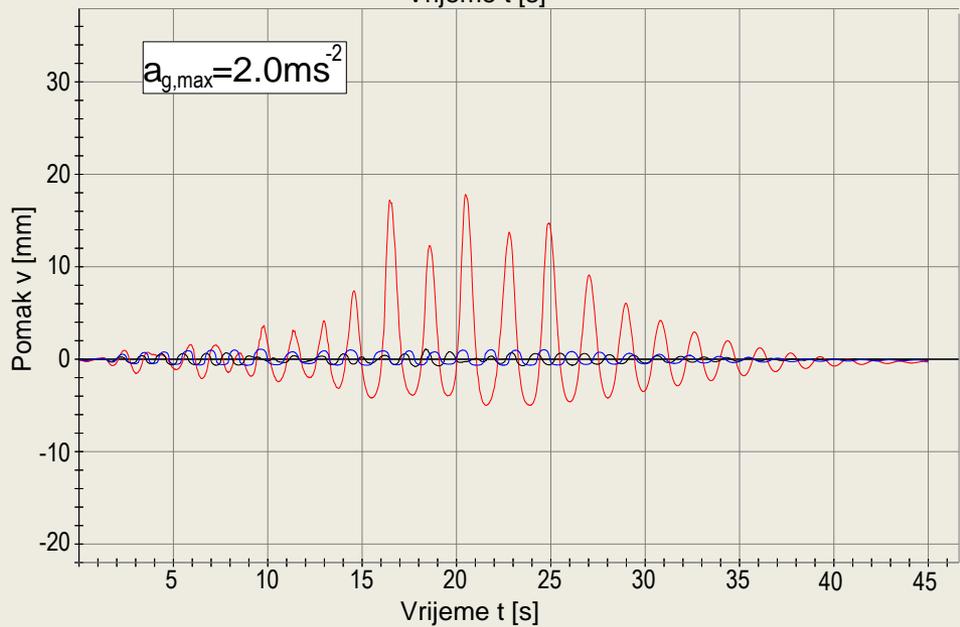
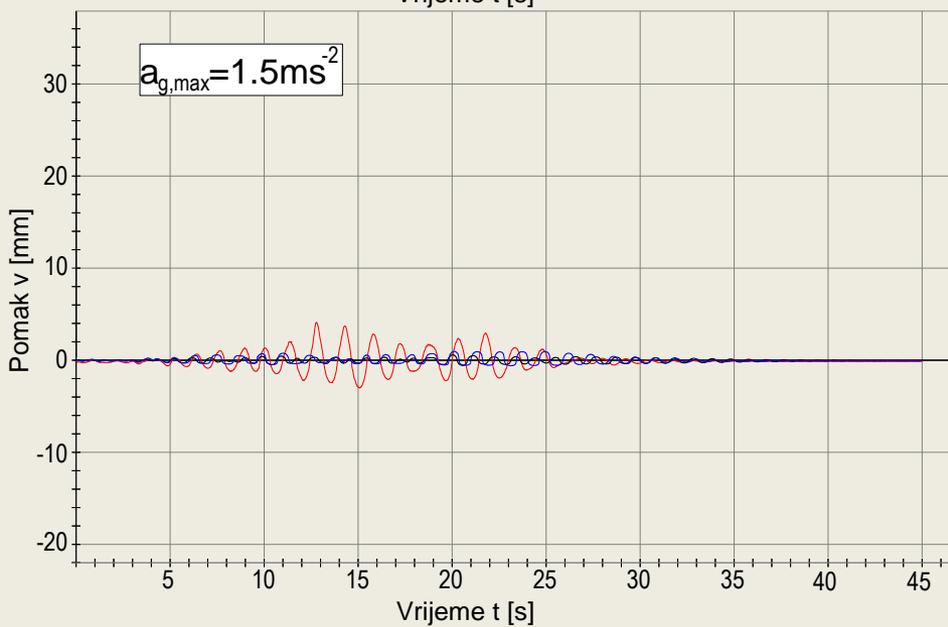
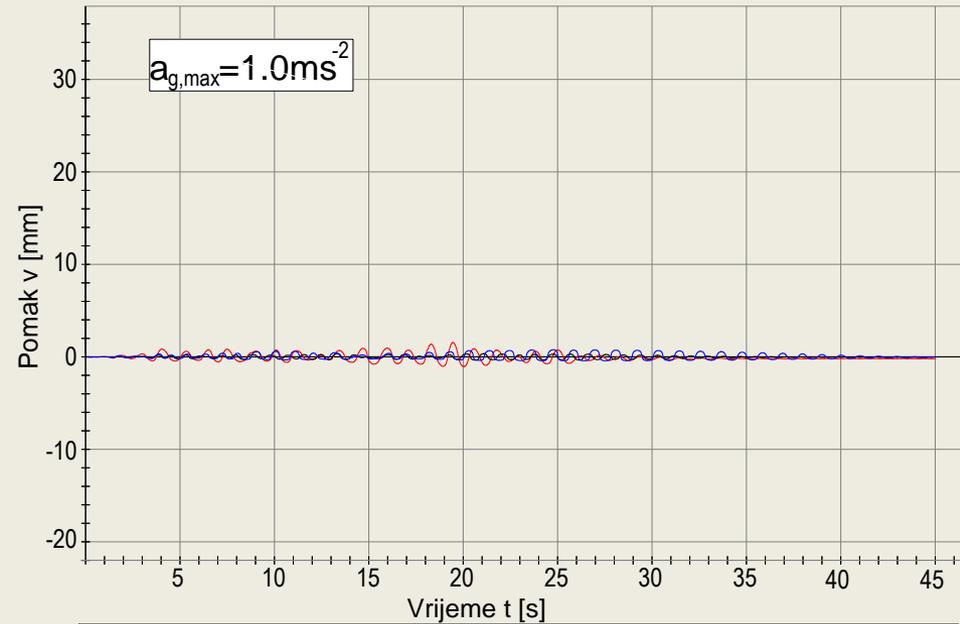
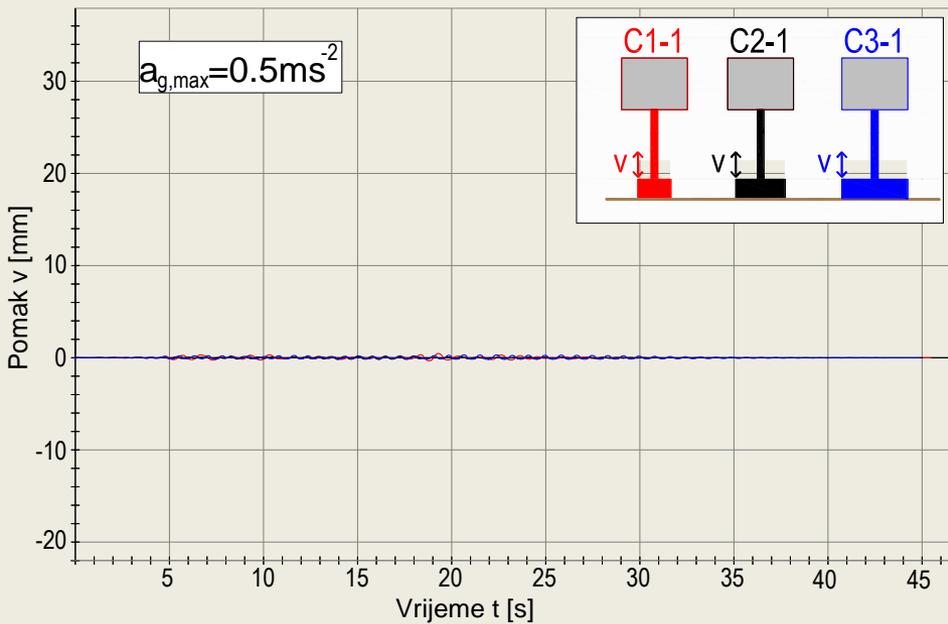
# Pomaci vrha stupa u vremenu



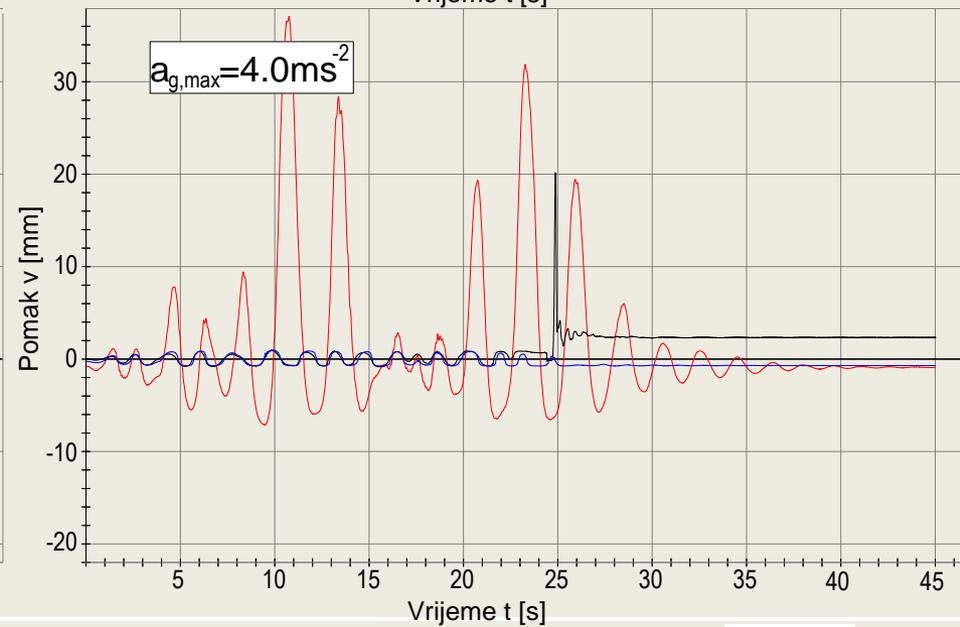
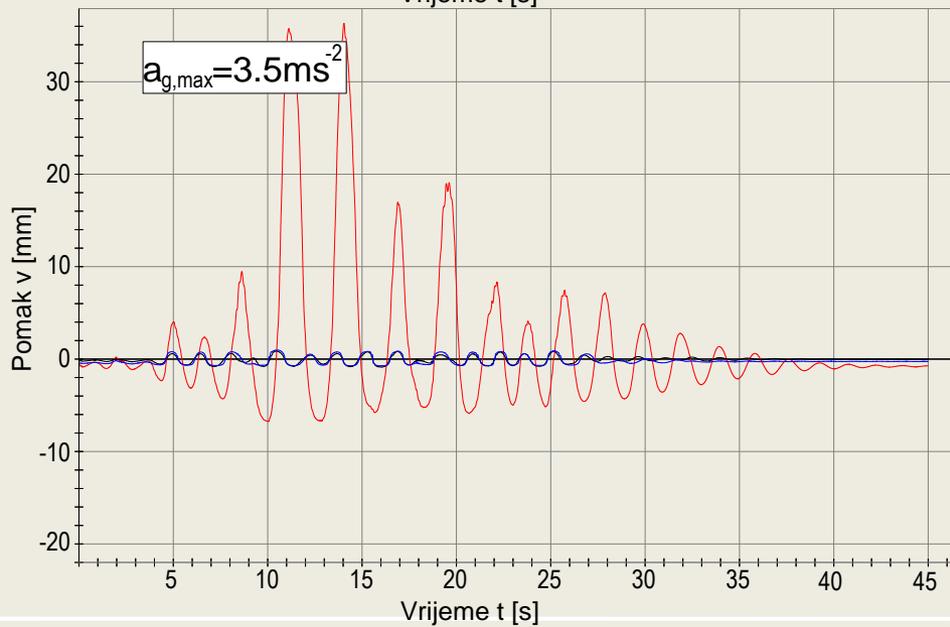
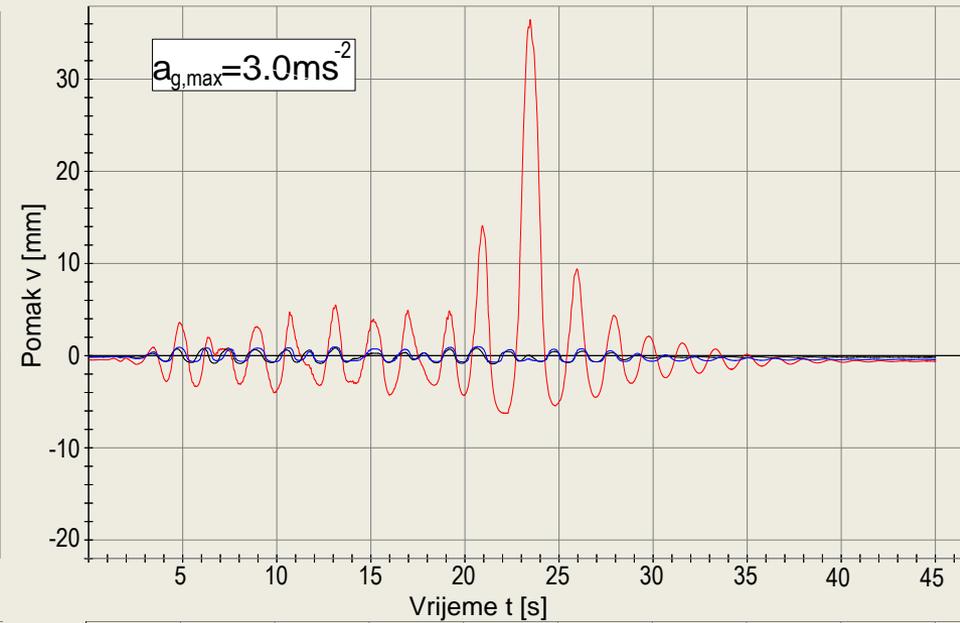
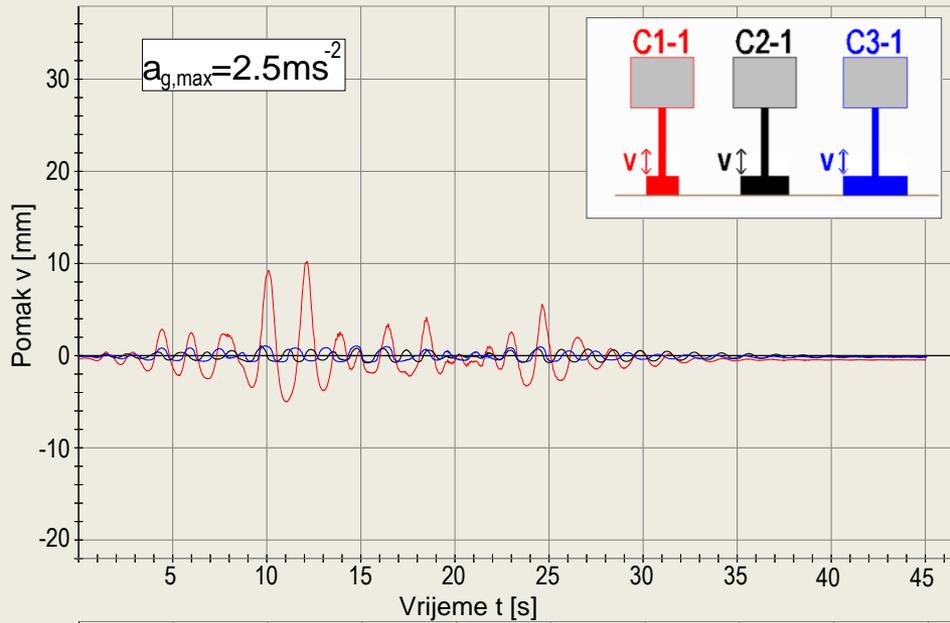
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



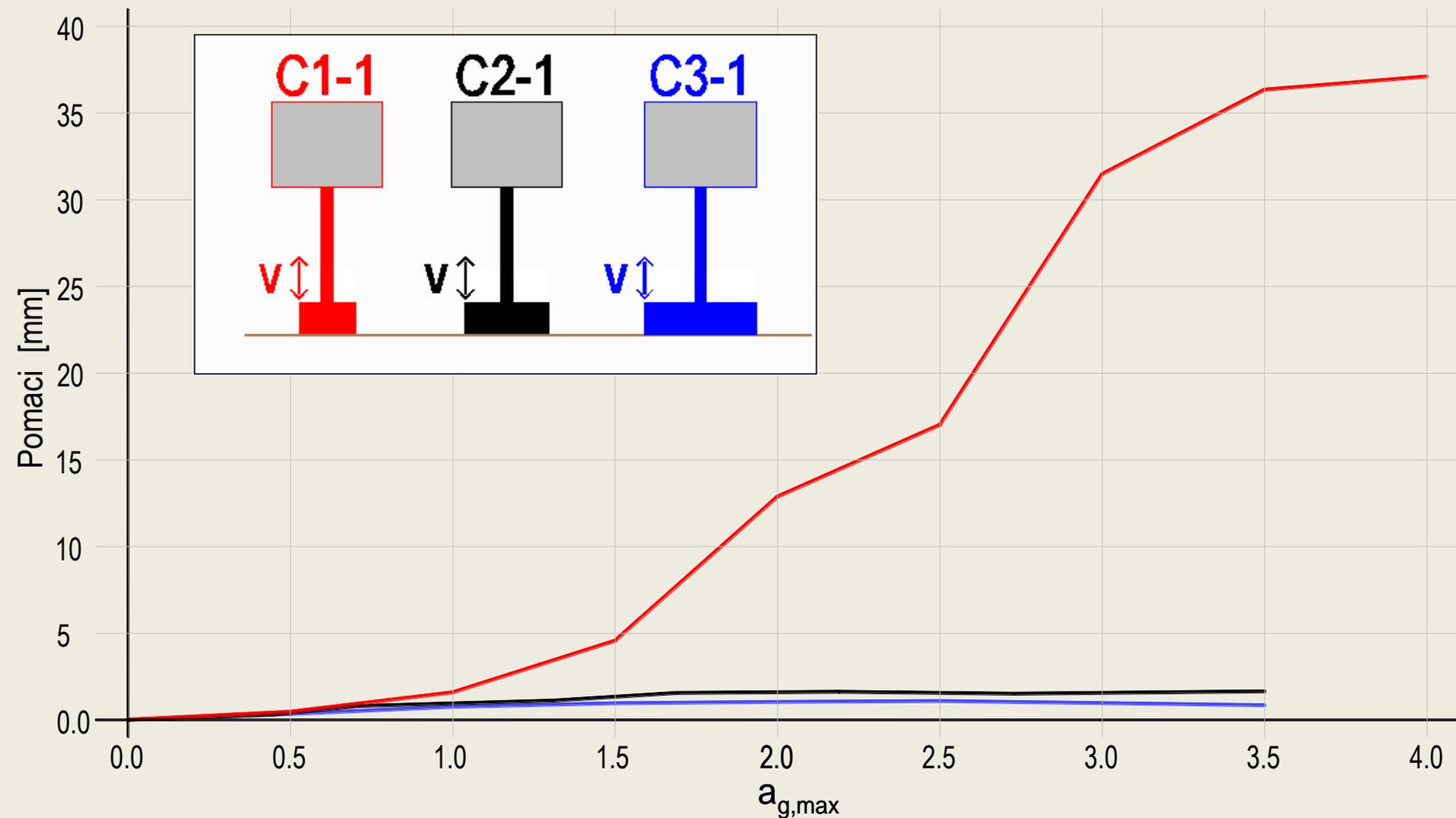
# Pomaci vrha temelja u vremenu



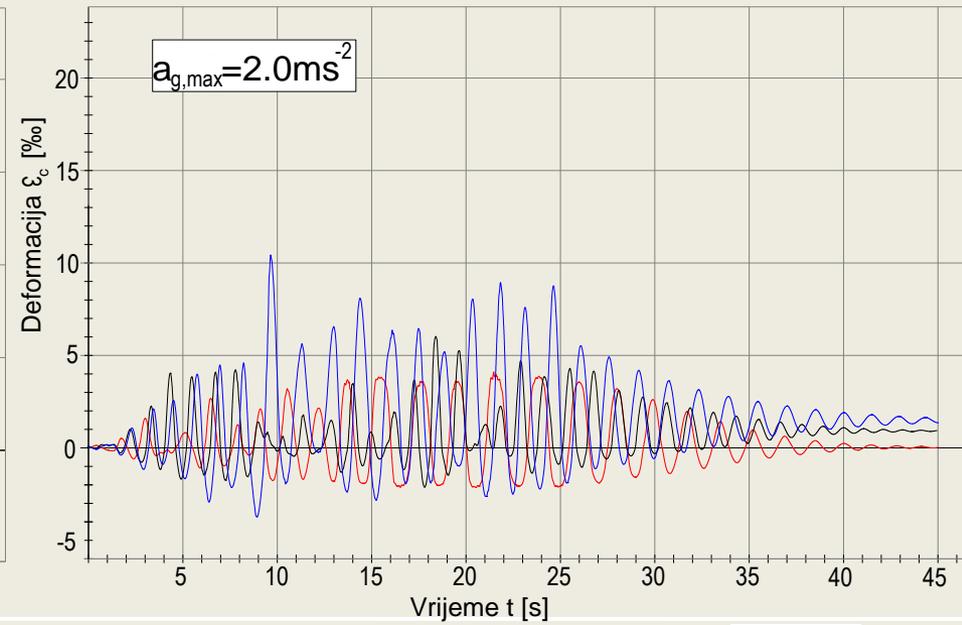
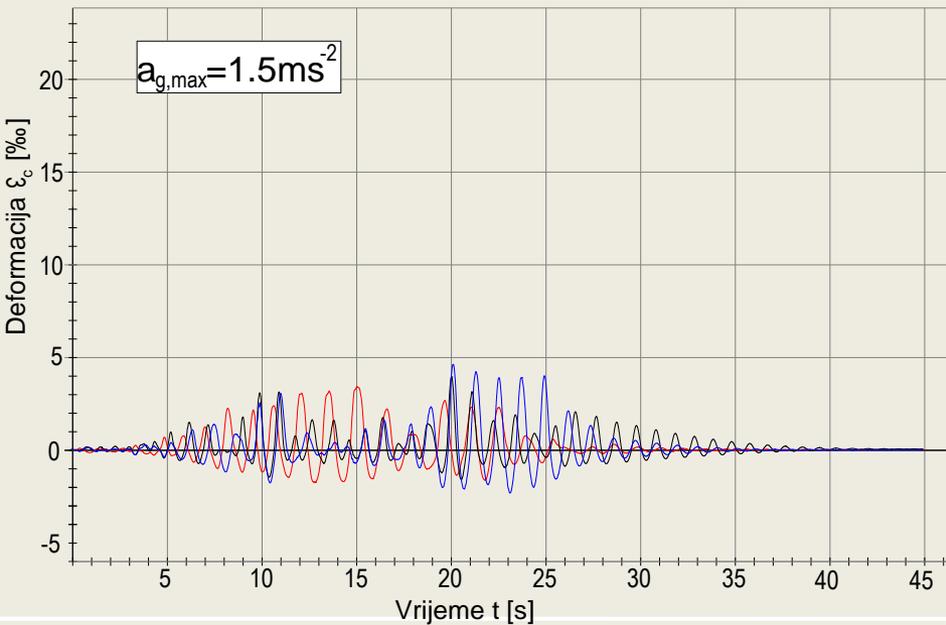
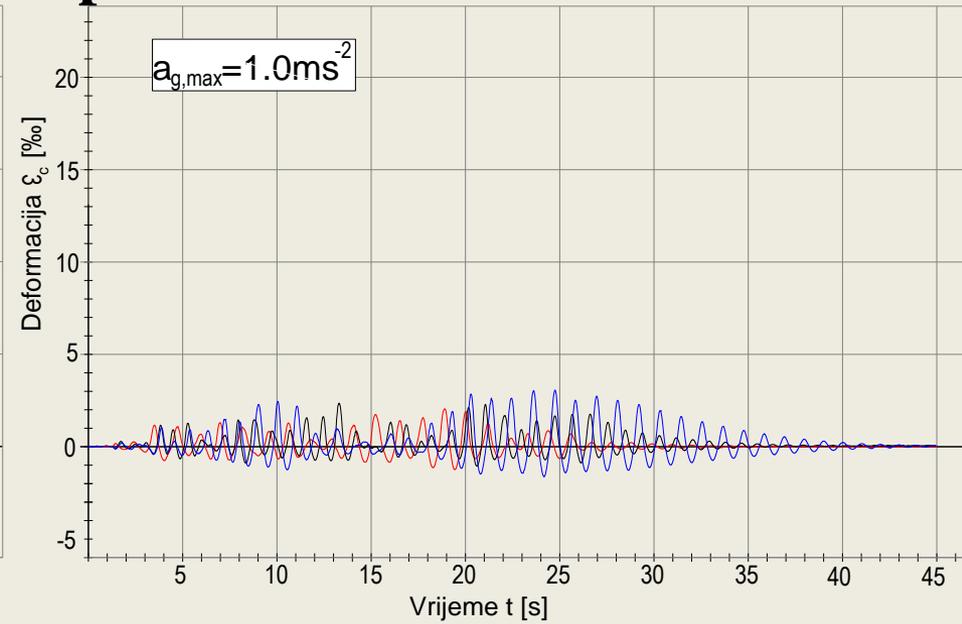
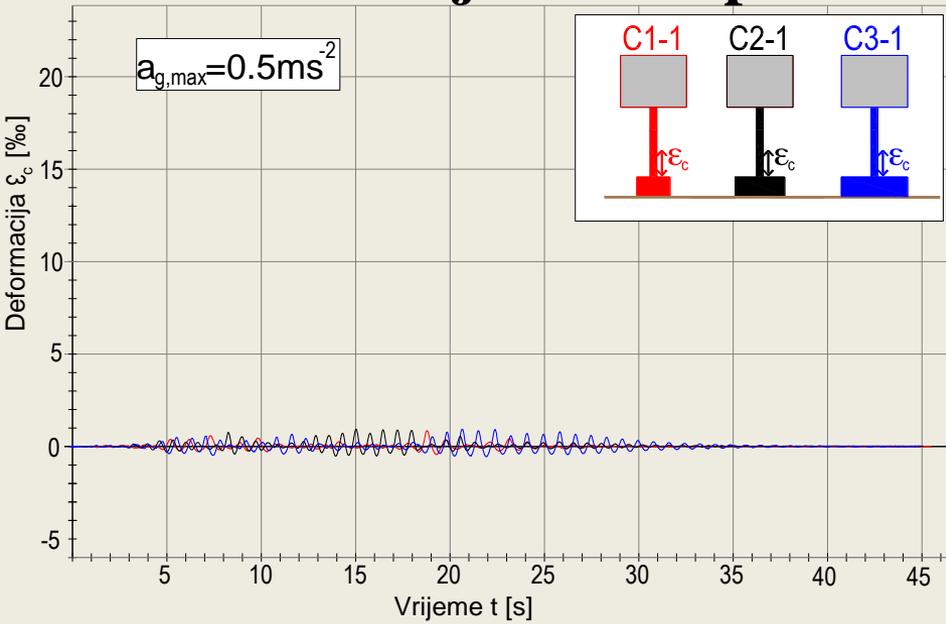
# Pomaci vrha temelja u vremenu



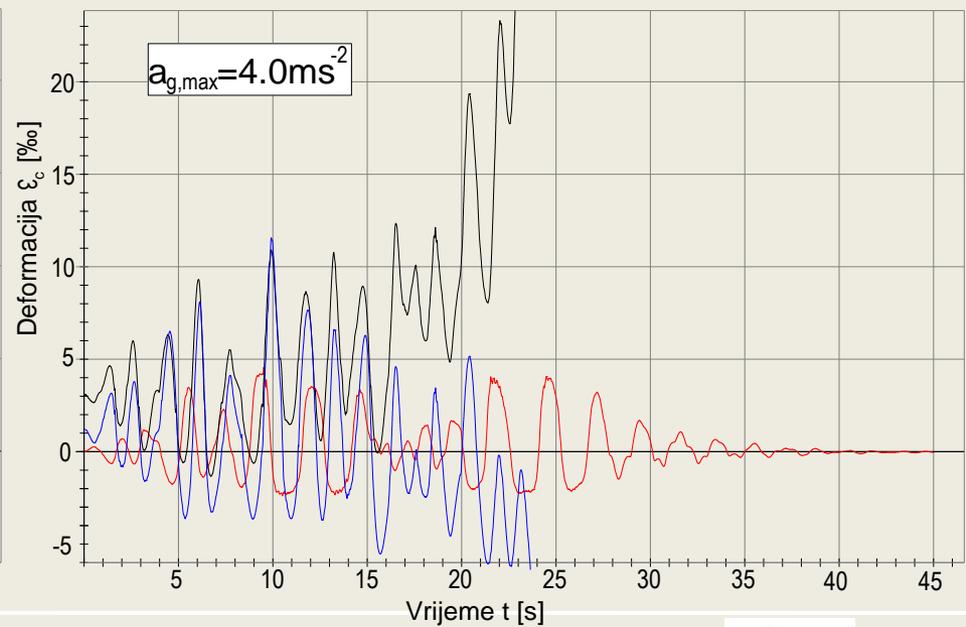
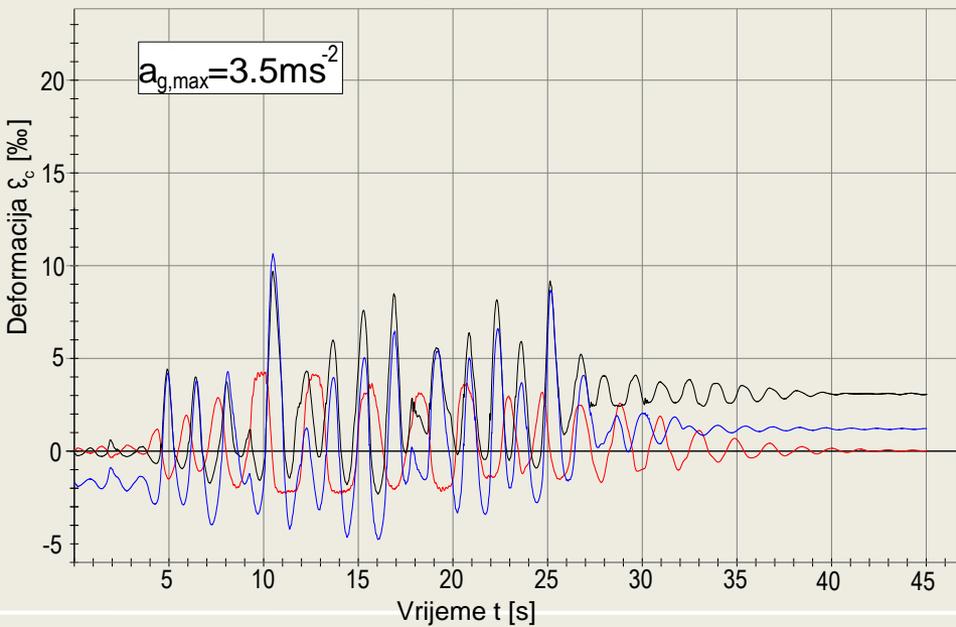
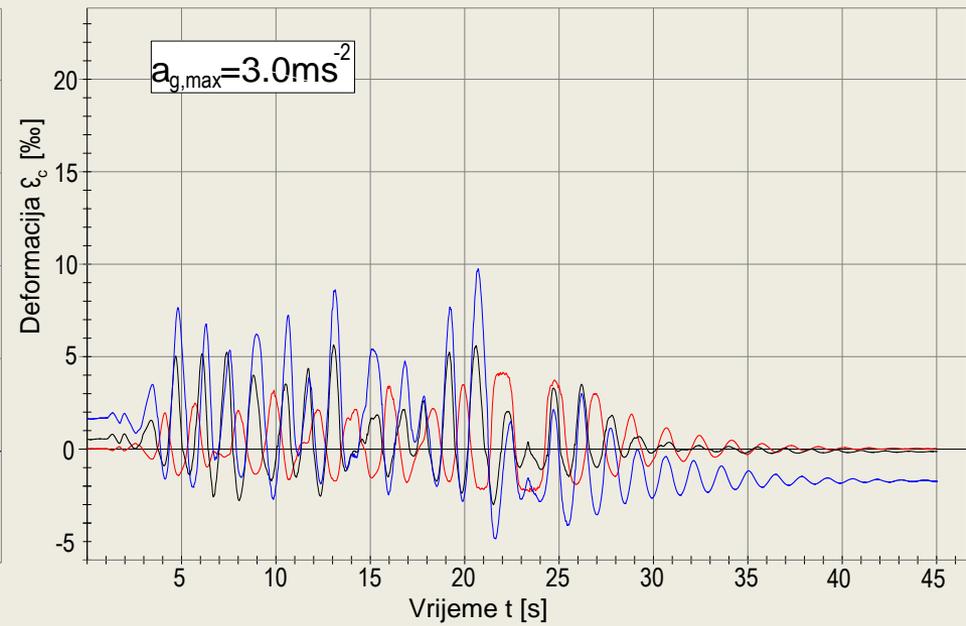
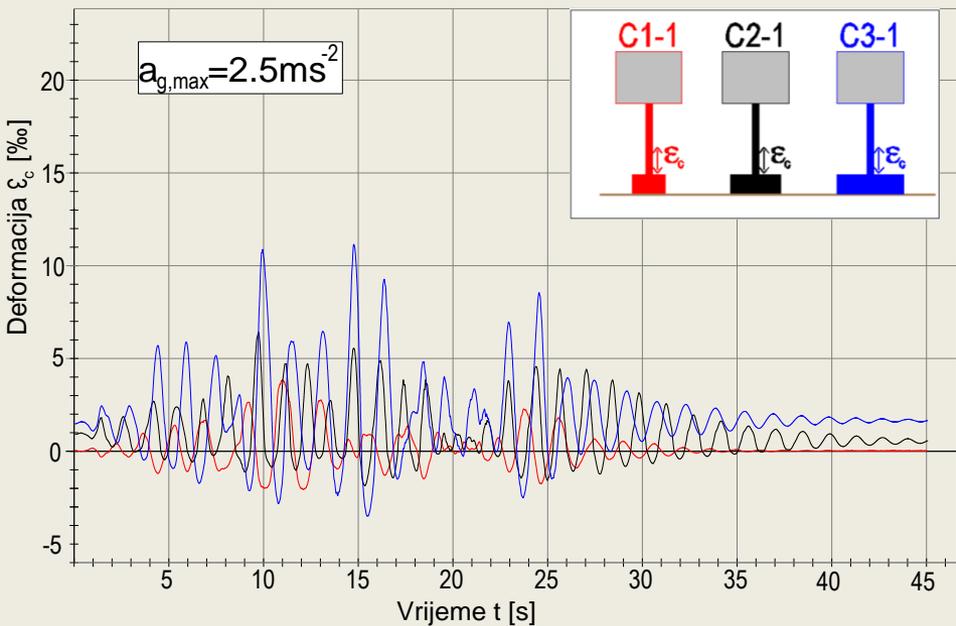
# Maksimalni pomaci vrha temelja u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



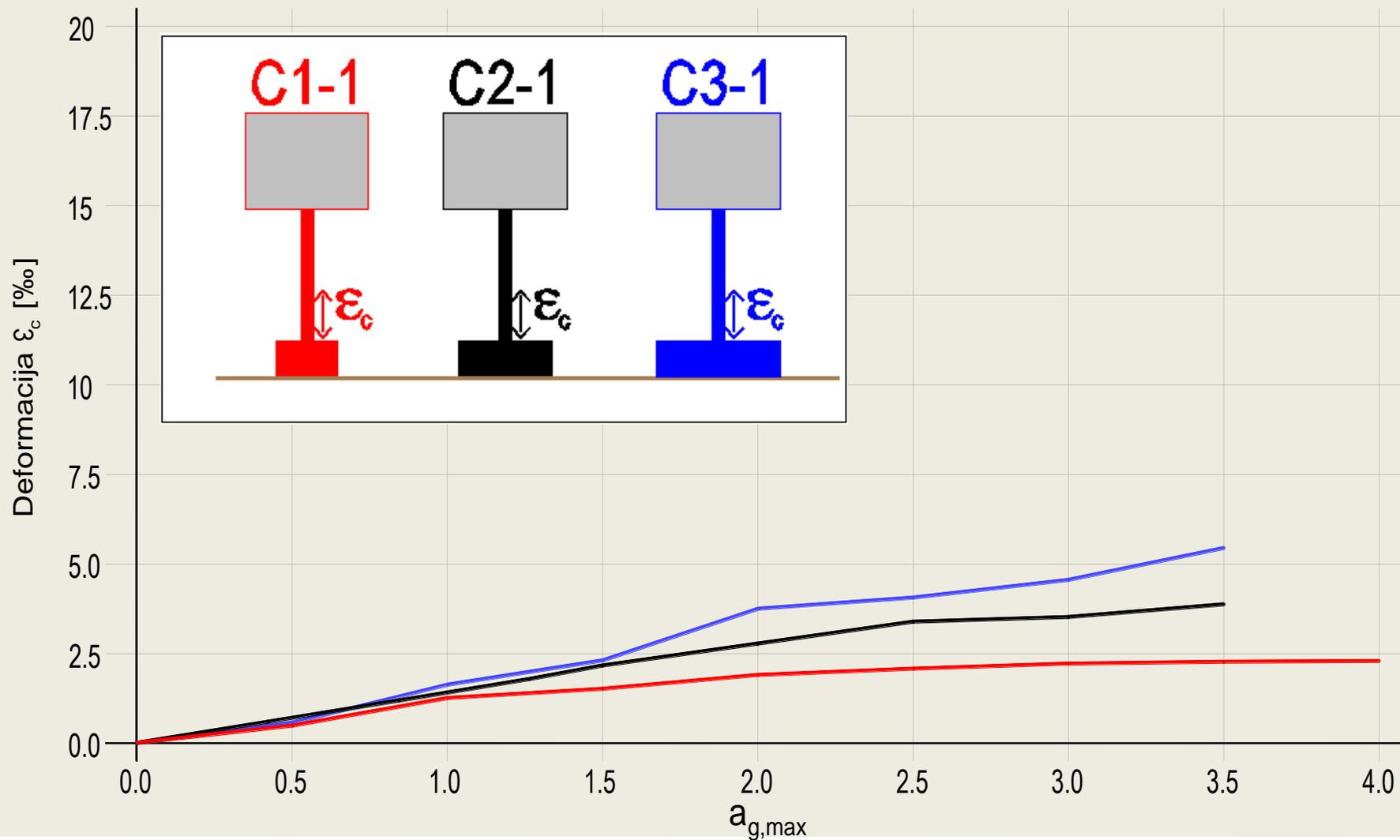
# Deformacije betona pri dnu stupa s desne strane u vremenu



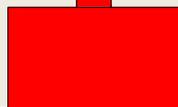
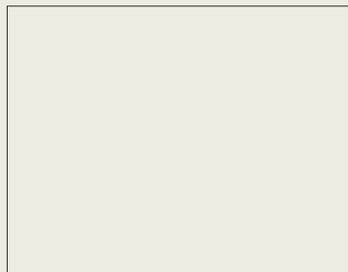
# Deformacije betona pri dnu stupa s desne strane u vremenu



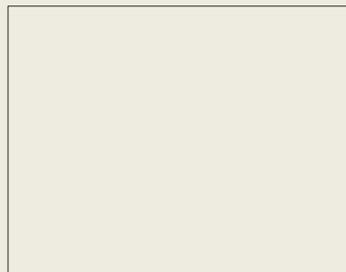
# Maksimalne (tlačne) deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



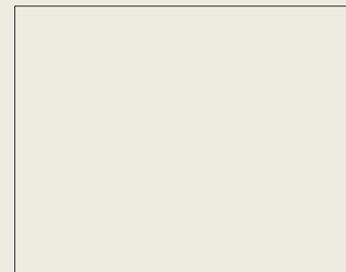
C1-2



C2-2



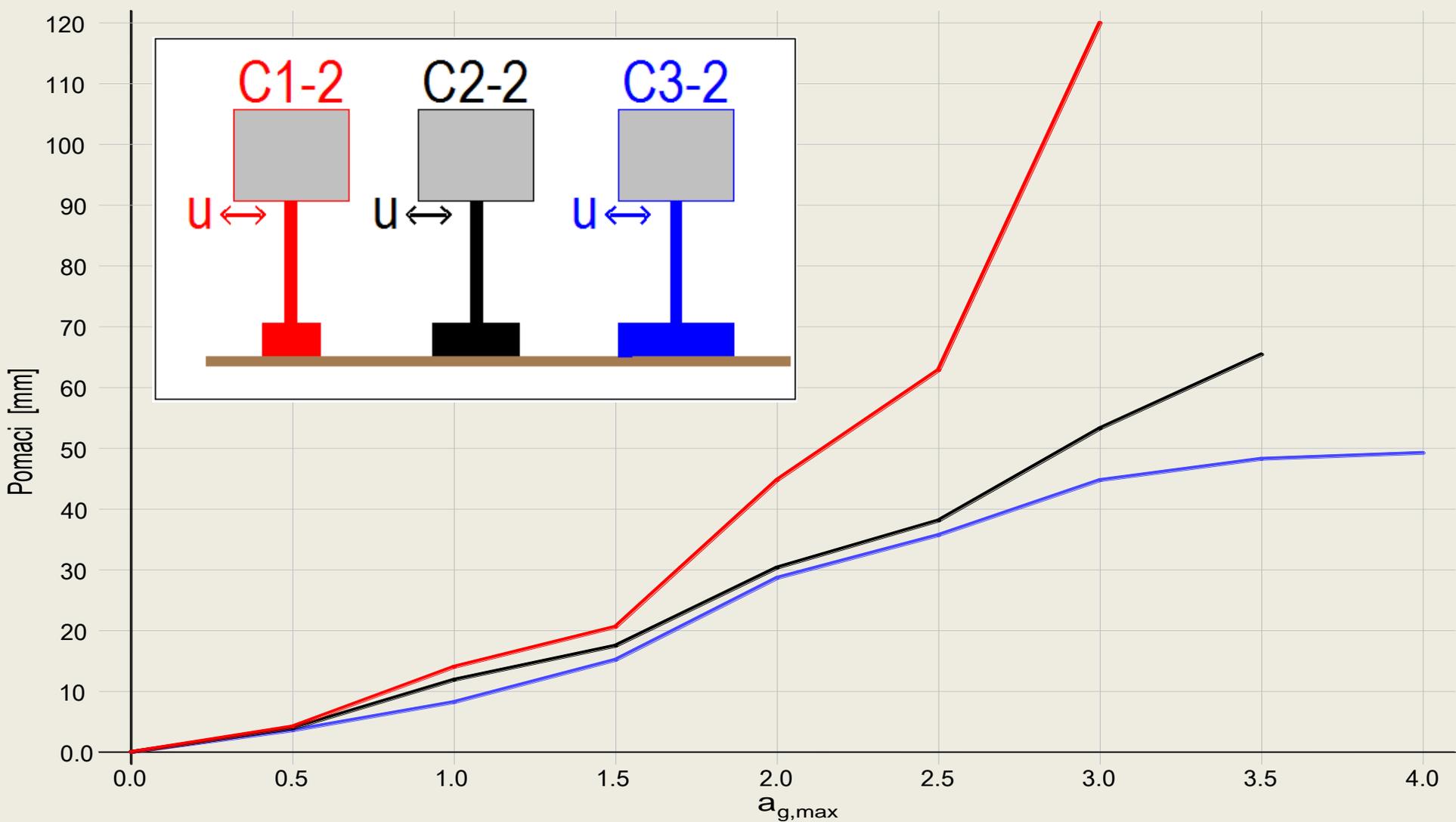
C3-2



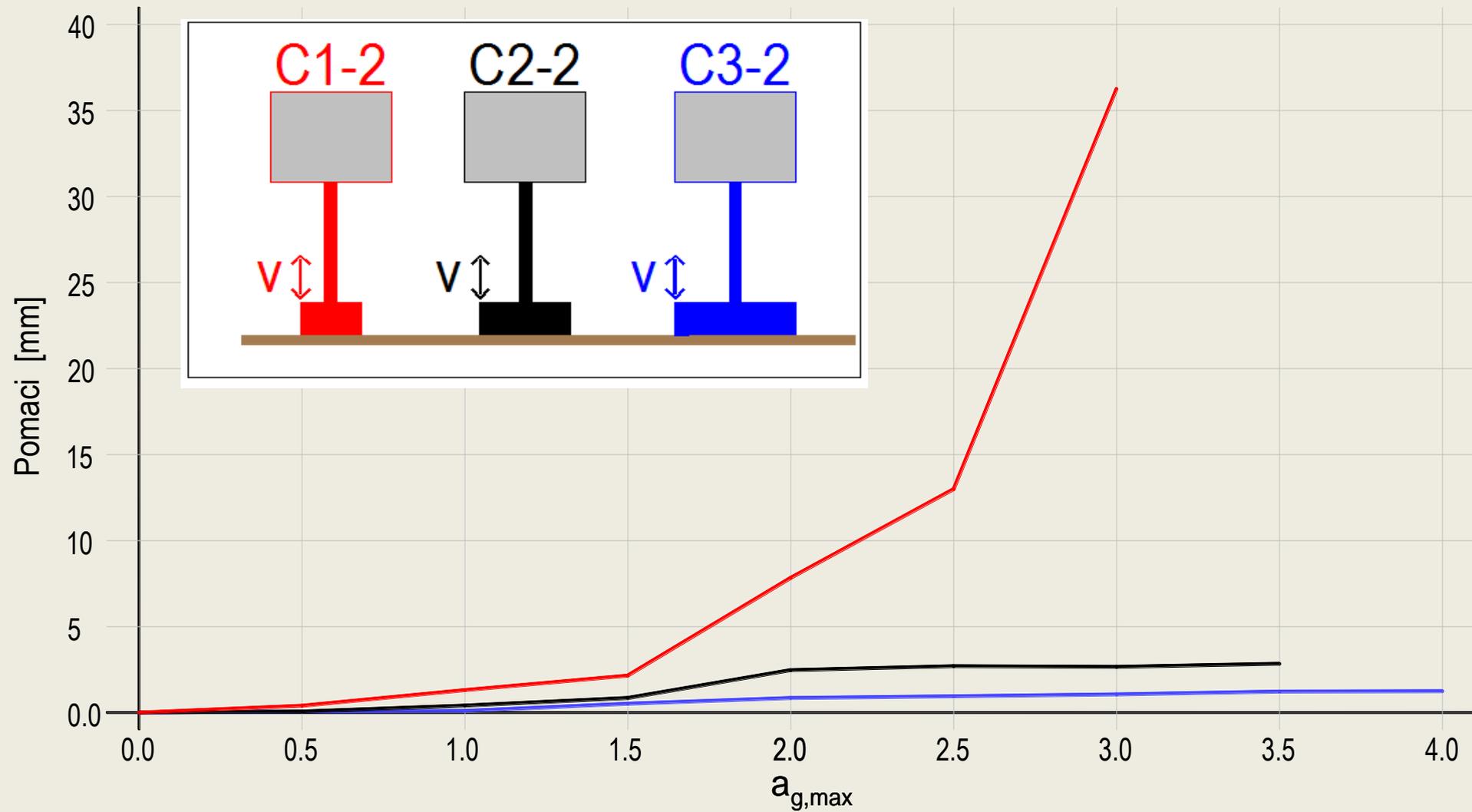
100 mm



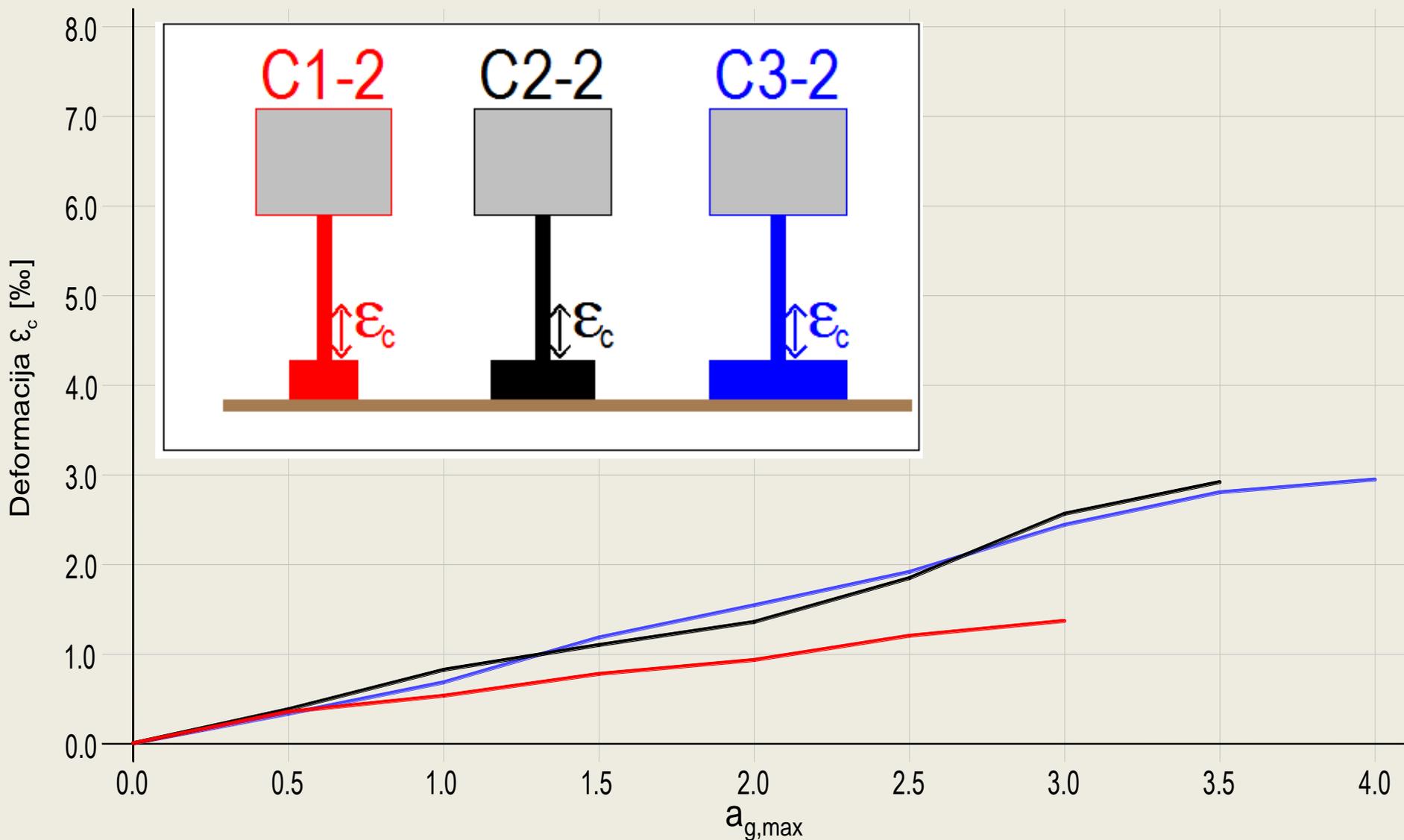
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



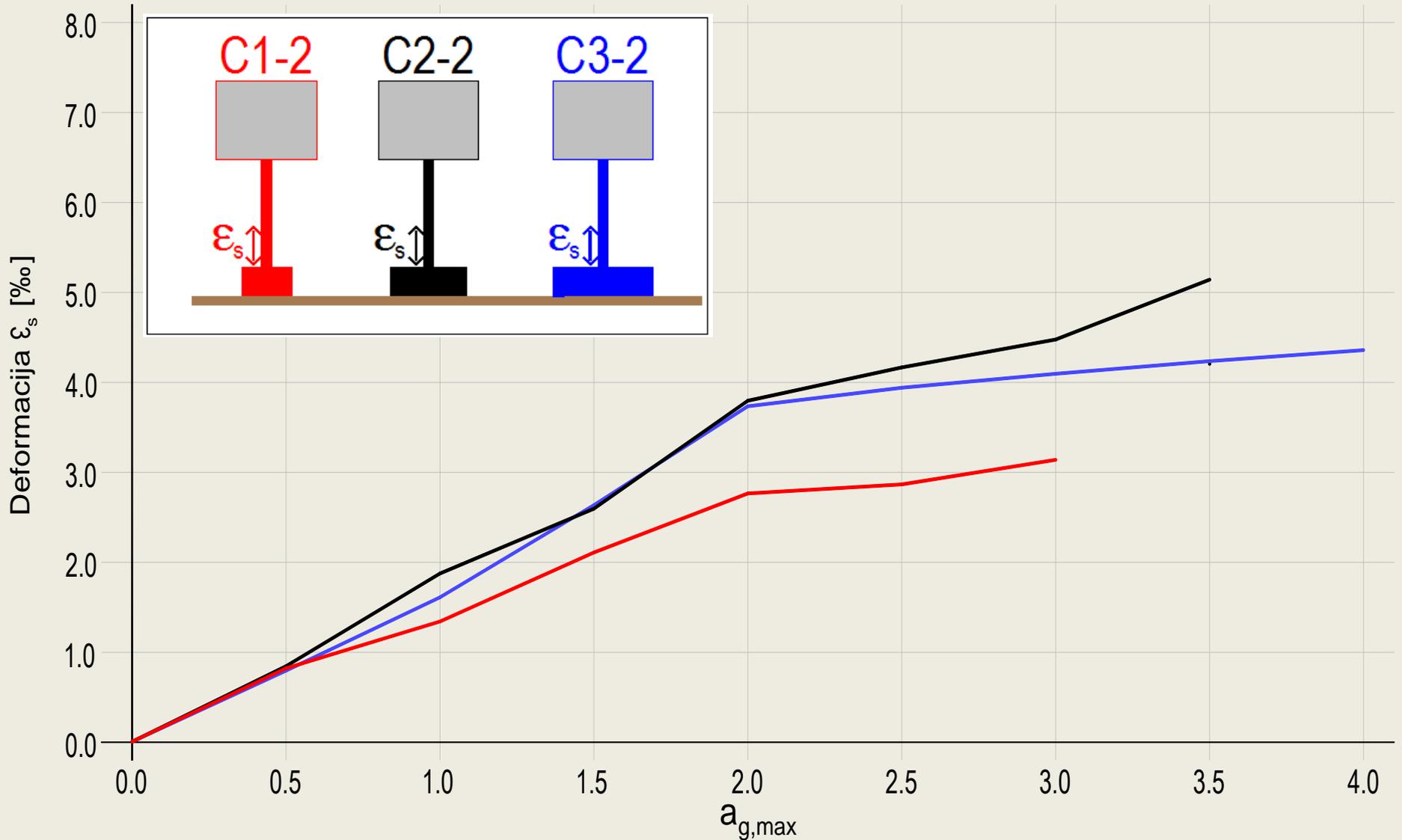
# Maksimalni pomaci vrha temelja u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



# Maksimalne deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



# Maksimalne deformacije armature u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge



➤ Prvi period nakon svake od pobuda

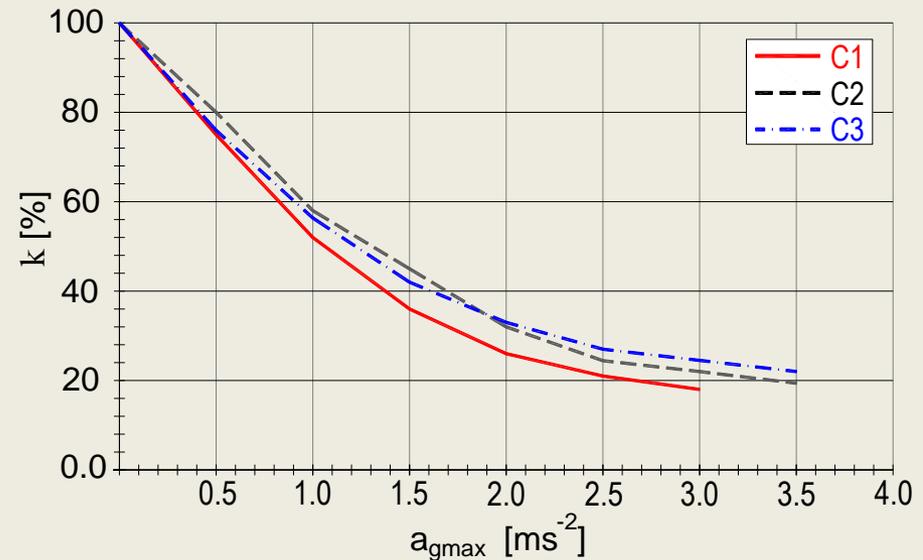
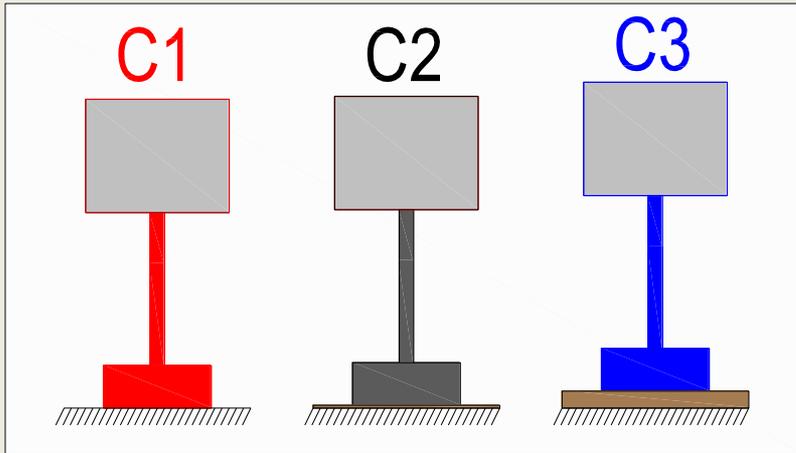
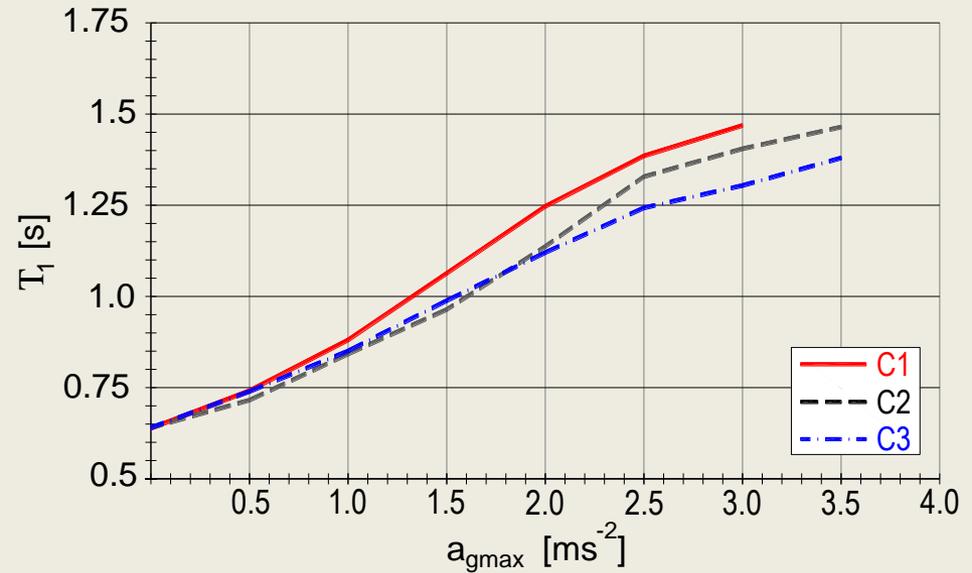
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$k = m \times \omega^2$$

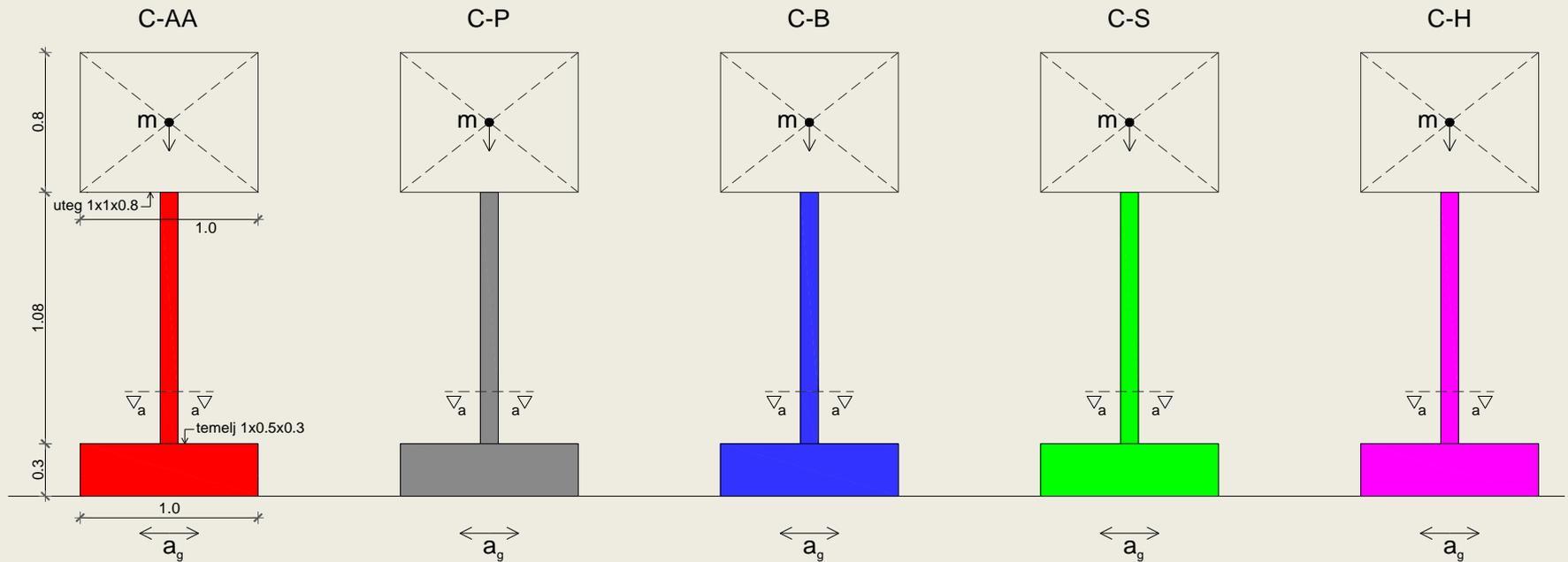
$$k = m \times \frac{4\pi^2}{T^2}$$



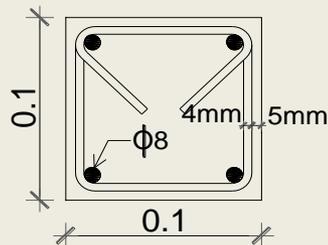
- **Na temelju analize rezultata provedenih eksperimentalnih testova, mogu se donijeti niže navedeni zaključci:**
  - ❑ Pri potresu dolazi do dinamičke interakcije sustava konstrukcija-temelj-tlo, pri tome svaka od navedenih sastavnica utječu na ponašanje sustava.
  - ❑ Umetanje sloja kamenog šljunka ili pijeska između dna temelja i čvrstog tla mijenja ponašanje stupova pri potresu.
  - ❑ Uz pravilno projektiranje, taj sloj može poslužiti kao protupotresna izolacija.
  - ❑ Ponašanje stupova s temeljima na debelom sloju pijeska bilo je povoljnije nego ponašanje stupova koji su bili pridržani za platformu.



# Eksperimentalno istraživanje utjecaja tipa potresa na ponašanje armiranobetonskih konzolnih stupova



Presjek a-a



$$\lambda=75$$

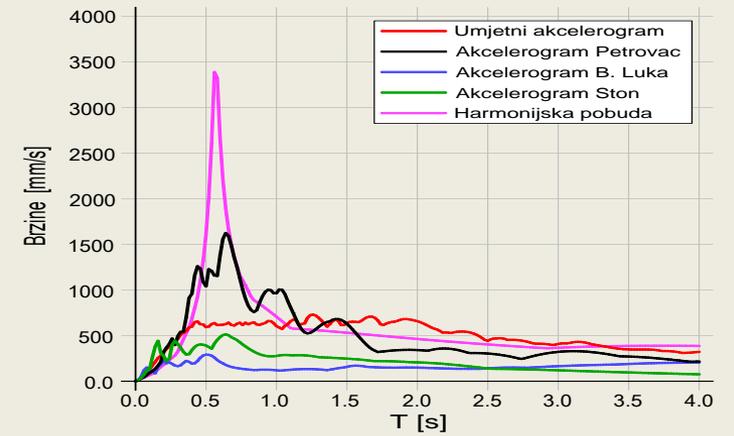
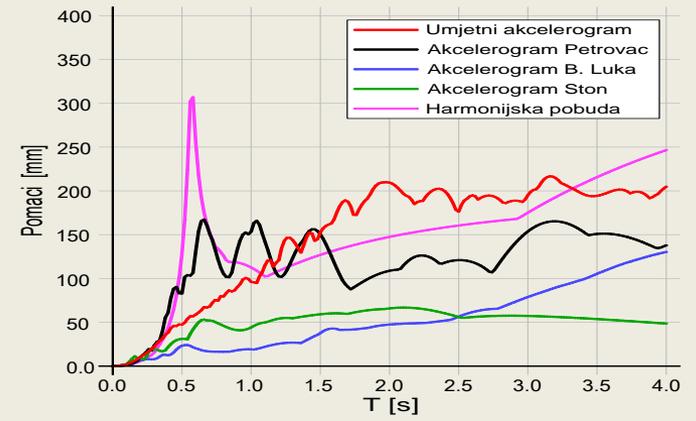
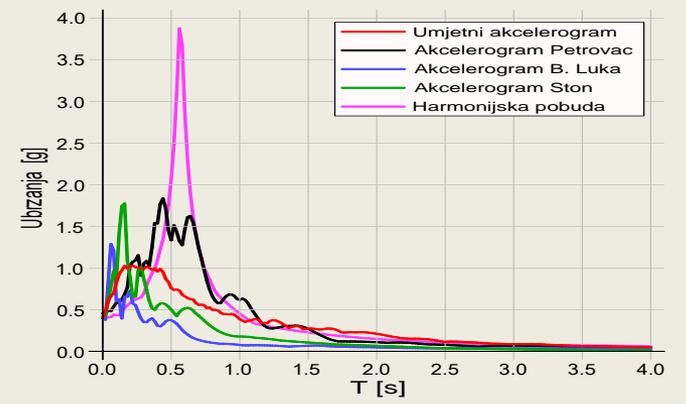
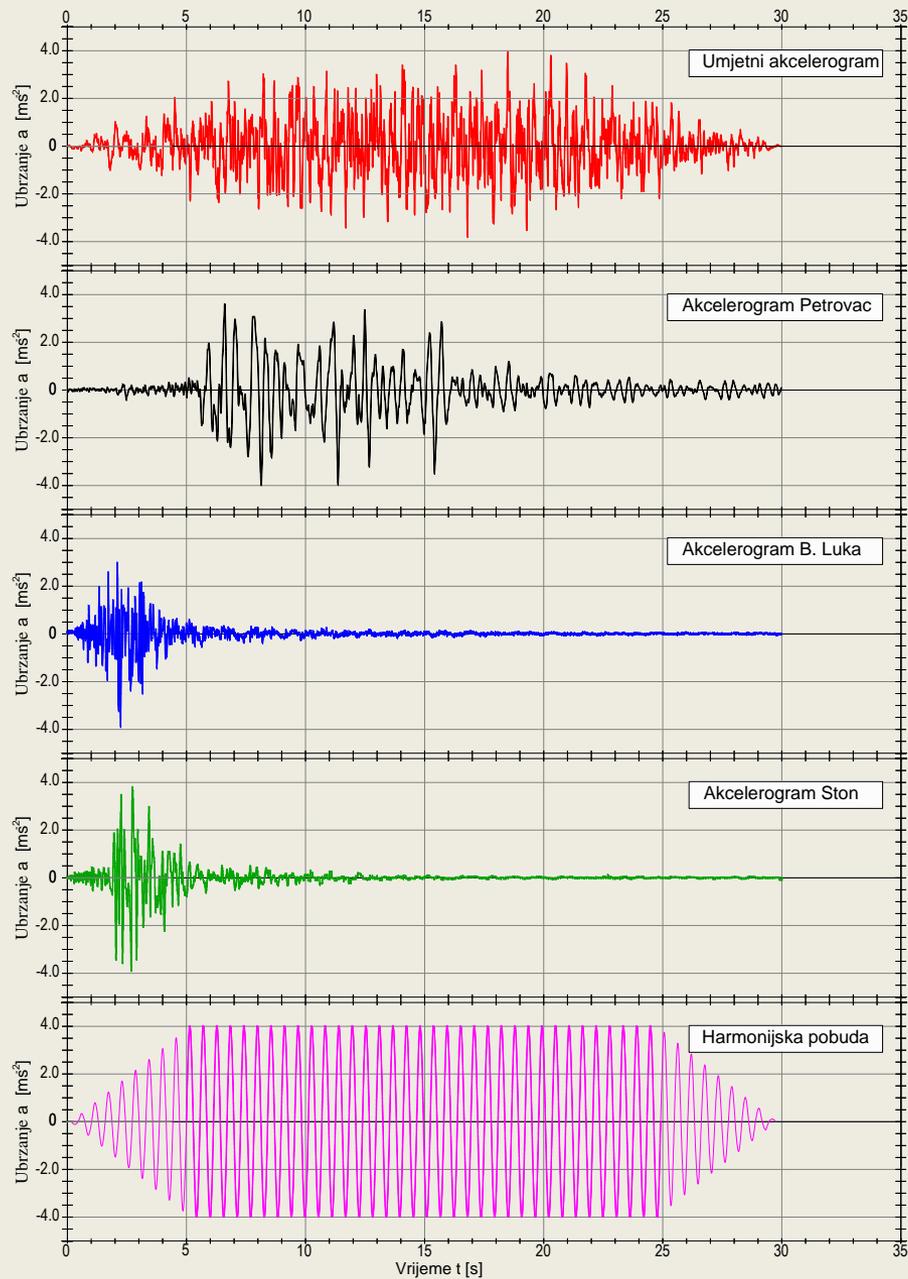
$$m= 2 \text{ t}$$

širina temelja 0.5 m

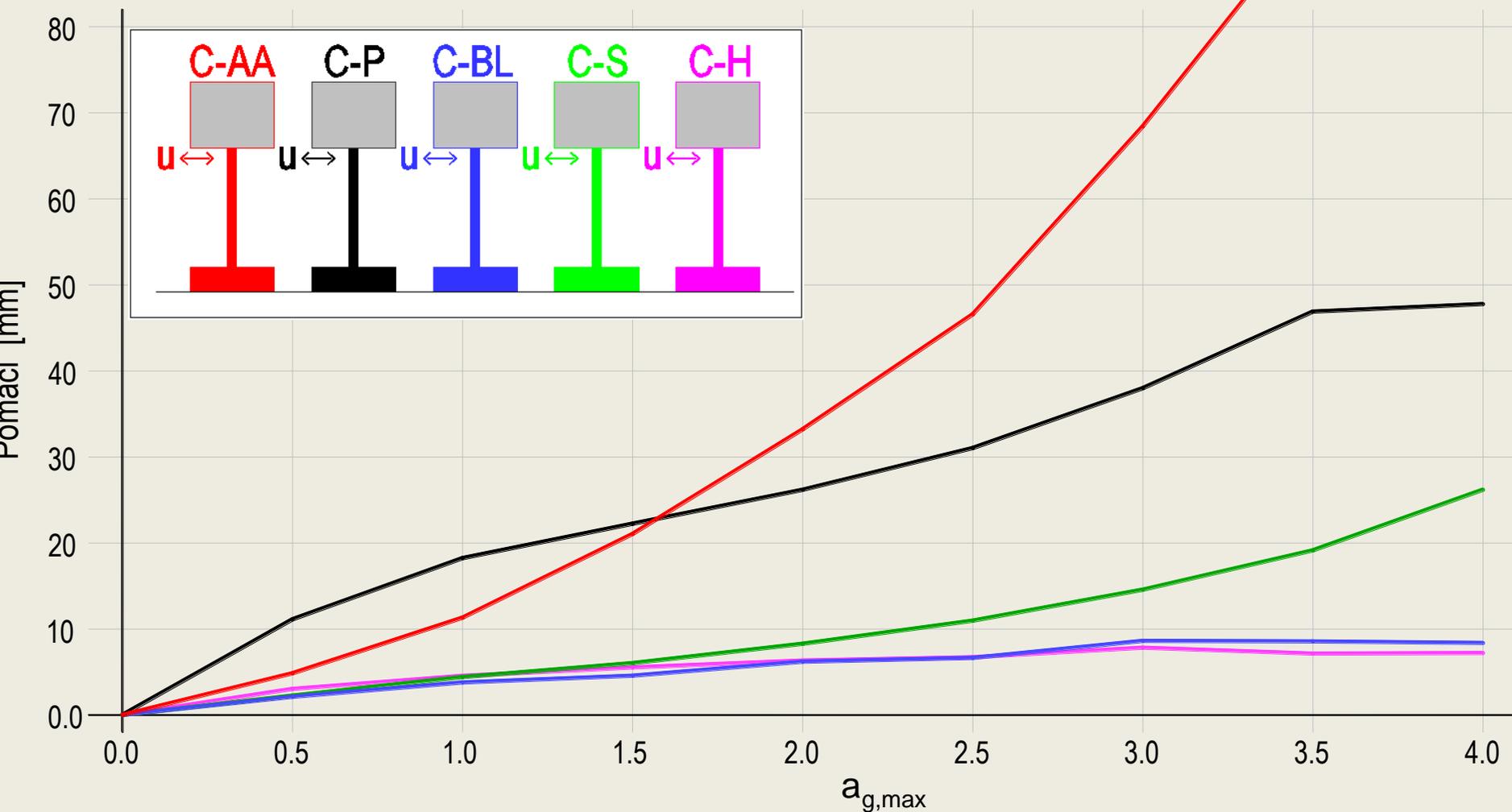
beton:  $f_c= 37.2 \text{ MPa}$

armatura:  $f_s= 605 \text{ MPa}$

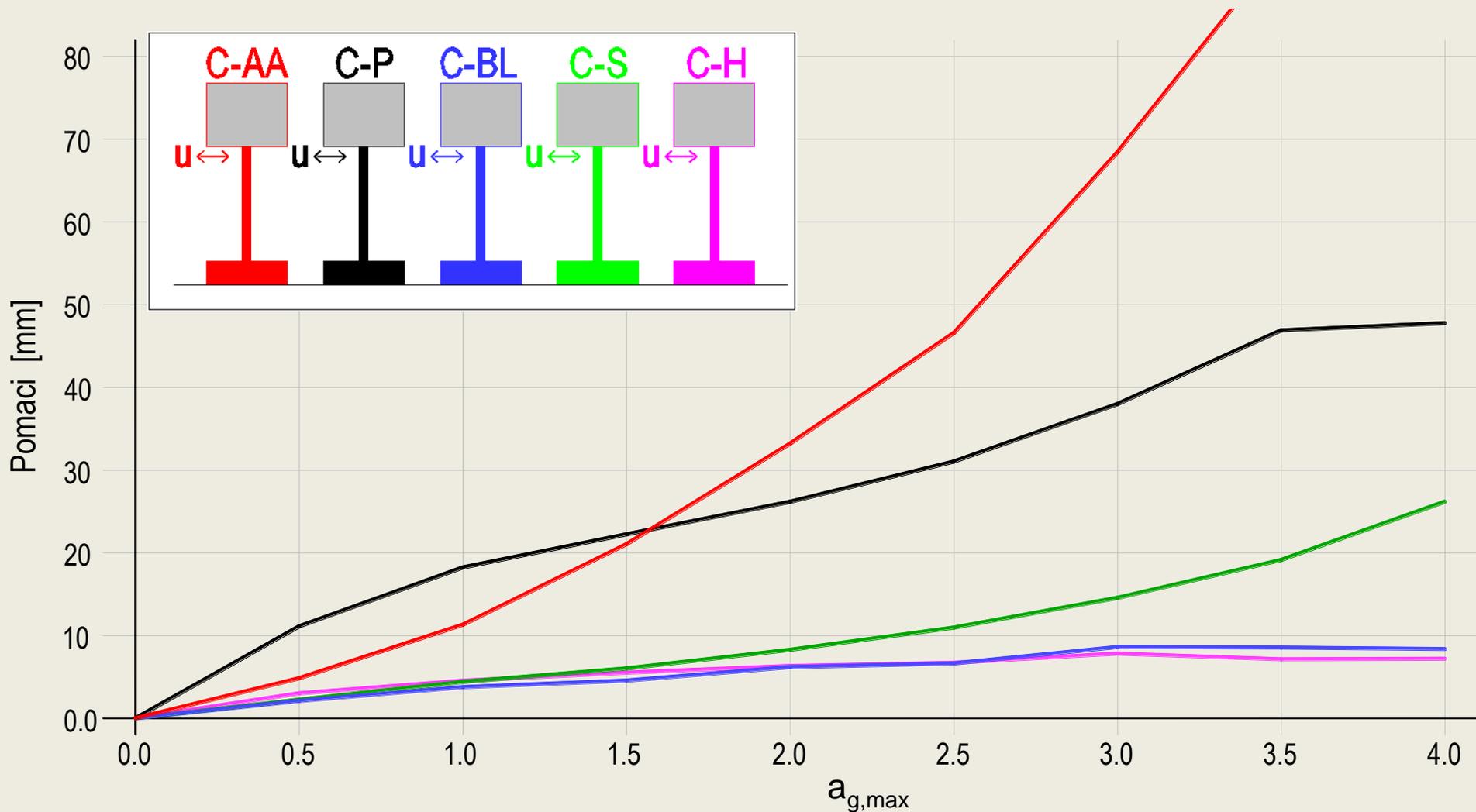




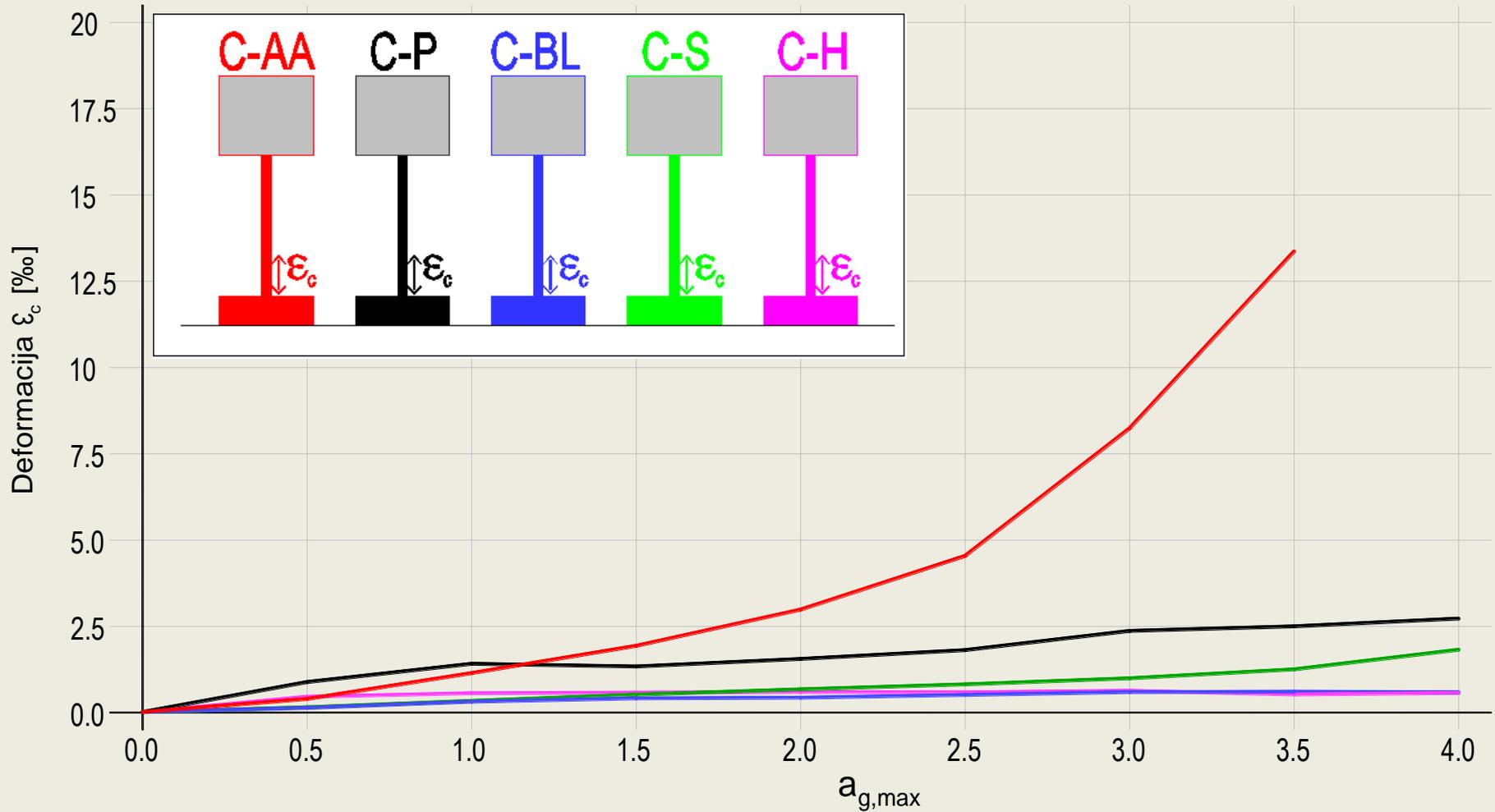
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



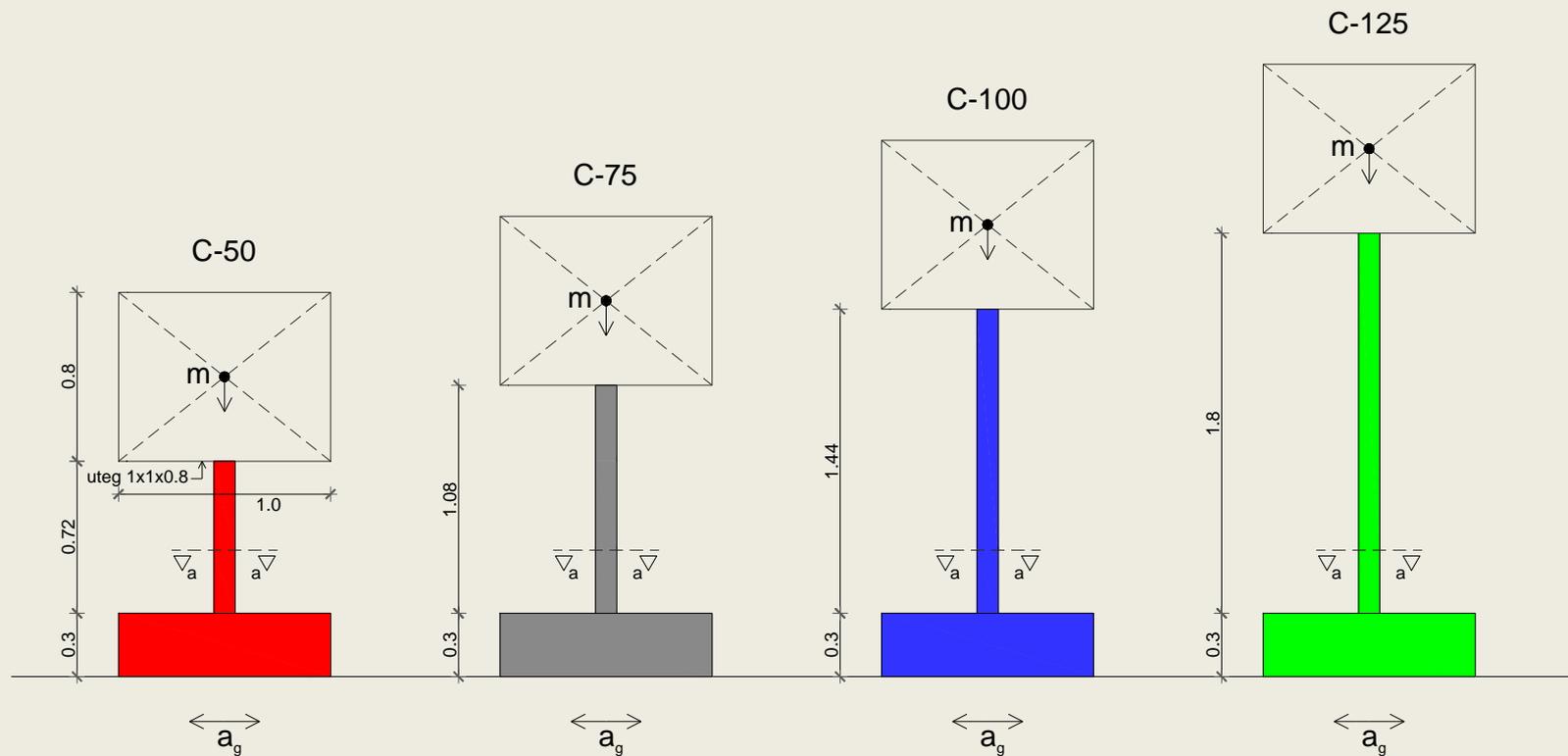
# Maksimalne (tlačne) deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



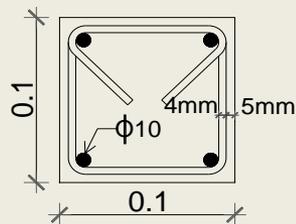
- **Na temelju analize rezultata provedenih eksperimentalnih testova, mogu se donijeti niže navedeni zaključci:**
  - ❑ Pri dinamičkim analizama potresne otpornosti realnih građevina treba koristiti što više registriranih akcelerograma prethodnih potresa na predmetnim lokacijama iz što bližih područja, kao i umjetno generirane akcelerograme.
  - ❑ Za različite tipove građevina (meke, srednje krute, krute) treba odabrati najnepovoljnije očekivane tipove akcelerograma.
  - ❑ Predominantni period odabranih akcelerograma treba biti veći od osnovnog perioda elastične konstrukcije.
  - ❑ Pri formiranju umjetnog akcelerograma na bazi elastičnog spektra odgovora, horizontalni dio krivulje maksimalnih spektralnih ubrzanja treba usvojiti dostatno dug, vodeći računa o realnoj mogućnosti pojave takvog potresa.



# Eksperimentalno istraživanje utjecaja visine (vitkosti) armiranobetonskih stupova na njihovo ponašanje pri potresu



Presjek a-a



$\lambda=50-125$

$m= 2 \text{ t}$

širina temelja 0.5 m

beton:  $f_c= 37.2 \text{ MPa}$

armatura:  $f_s= 605 \text{ MPa}$



# Izgled karakterističnih stupova prije ispitivanja

Stup	Kružna frekvencija $\omega_1$ (rad /s)	Period $T_1$ (s)	Prirodna frekvencija $f_1$ (Hz)
C-50	13.4994	0.4654	2.1485
C-75	9.8175	0.6400	1.5625
C-100	7.0673	0.8890	1.1248
C-125	5.9841	1.0500	0.9524



C-50



C-75



C-100

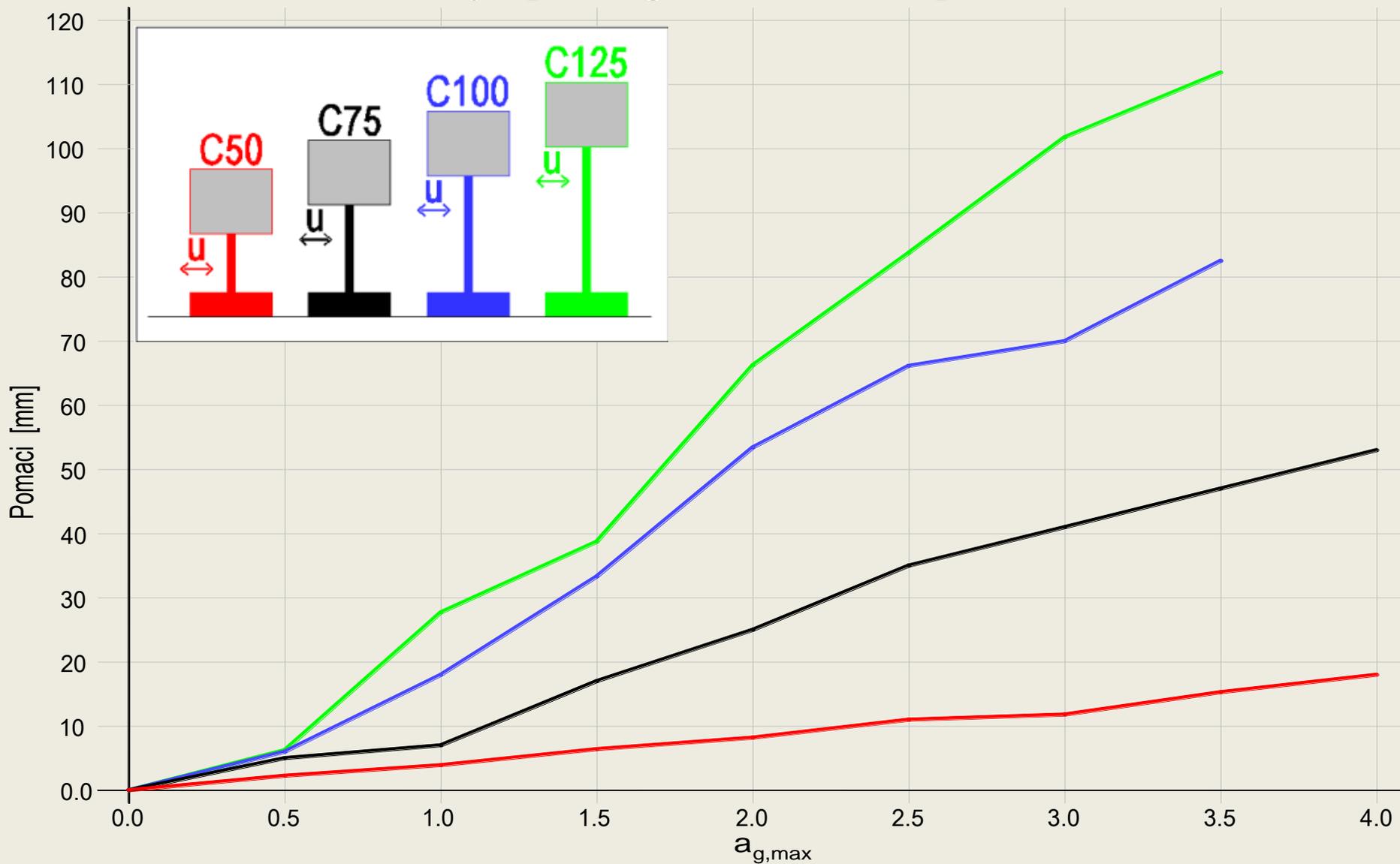


C-125

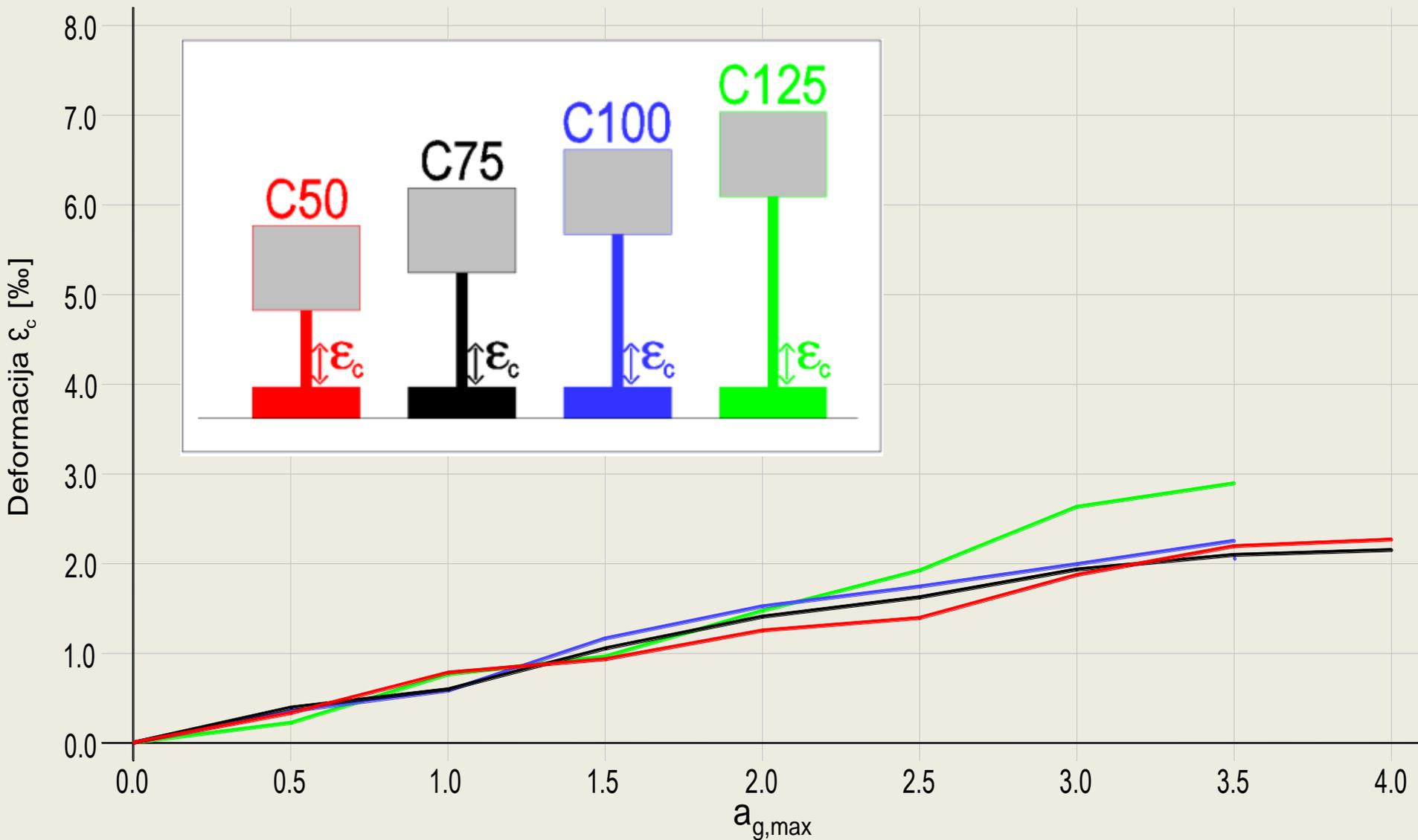




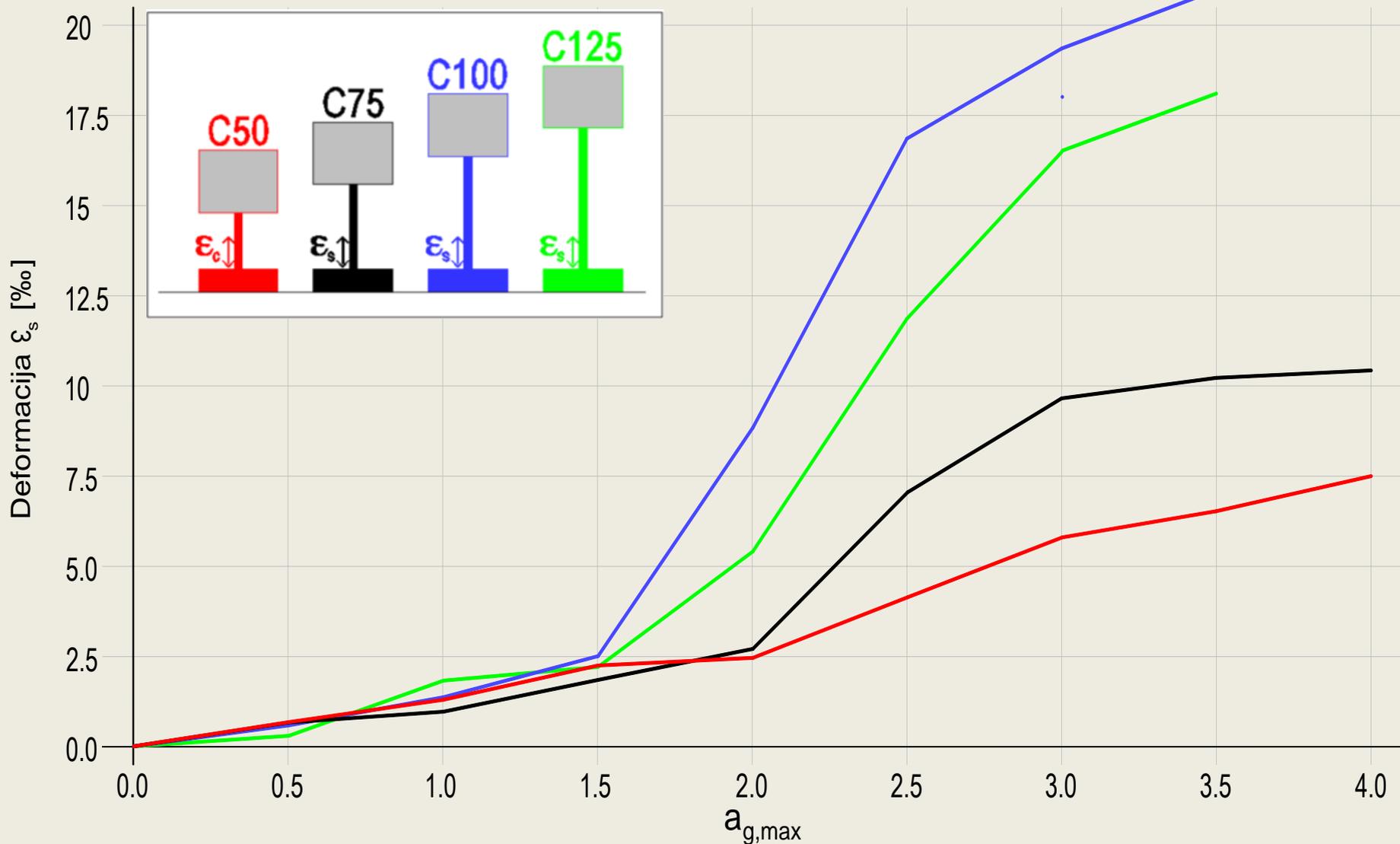
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalne (tlačne) deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalne deformacije armature u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude

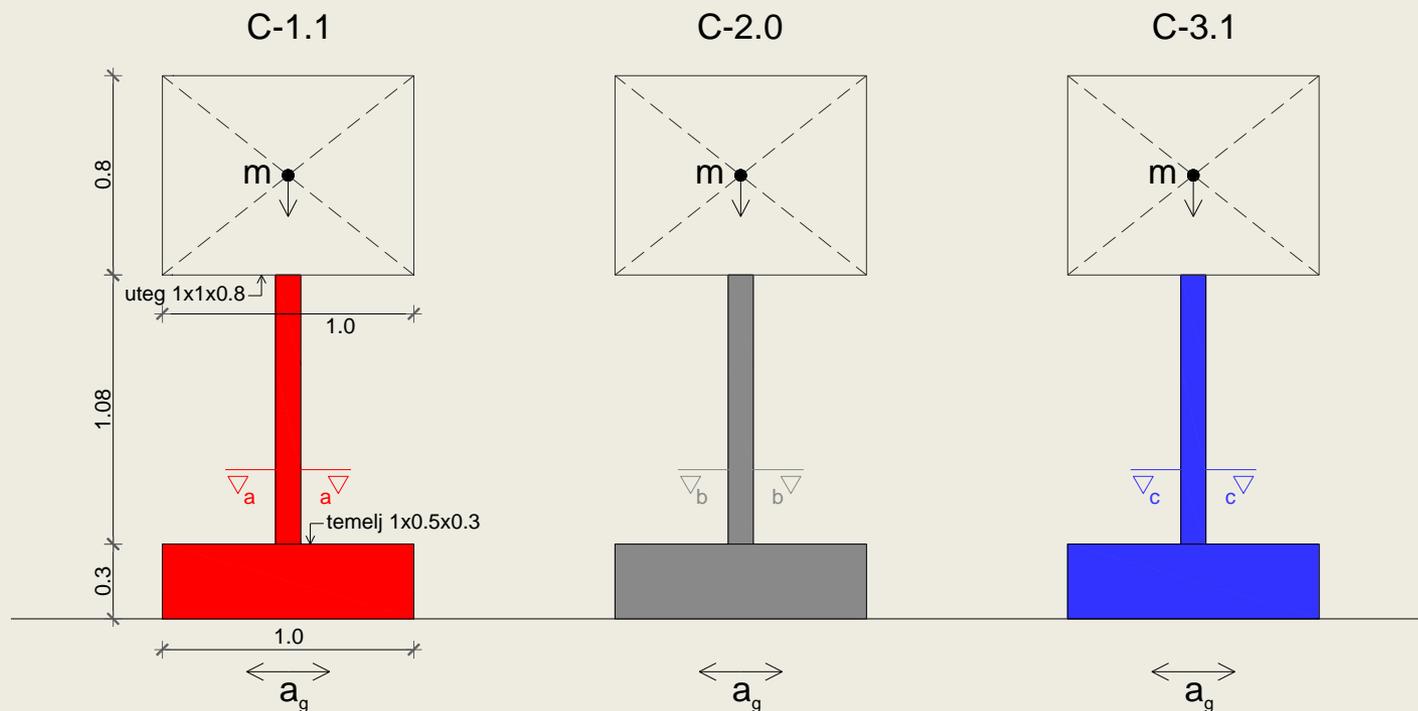


- **Na temelju analize rezultata provedenih eksperimentalnih testova, mogu se donijeti niže navedeni zaključci:**

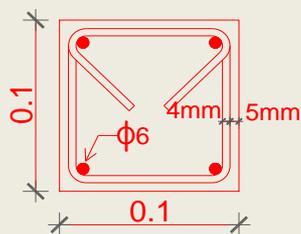
- Vitkost stupova ima značajan utjecaj na njihovo ponašanje i graničnu nosivost pri potresu.
- U odnosu na utjecaj vitkosti pri statičkom opterećenju, pri provedenim testovima razmatranih stupova izloženih horizontalnom ubrzanju podloge on nije bio jako izražen.
- Relativno povoljnije ponašanje vitkih stupova pri potresu nego pri stalnom vertikalnom opterećenju objašnjava se time da su generirane potresne sile u konstrukciji funkcije vremena (nisu stacionarne), da su u izravnoj ovisnosti o tekućoj krutosti konstrukcije, te da se gibanje konstrukcije prilagođava dinamičkoj pobudi.
- Vitki stupovi su mekši i podatniji pri potresu, te se znatno lakše prilagode gibanju podloge.



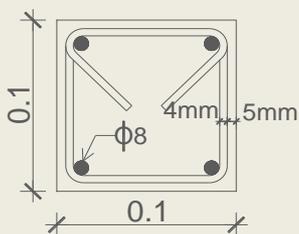
# Eksperimentalno istraživanje utjecaja količine vertikalne armature na ponašanje armiranobetonskih stupova pri potresu



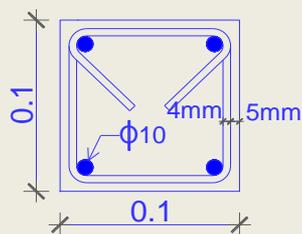
Presjek a-a



Presjek b-b



Presjek c-c



$$\lambda=75$$

$$m=2\text{ t}$$

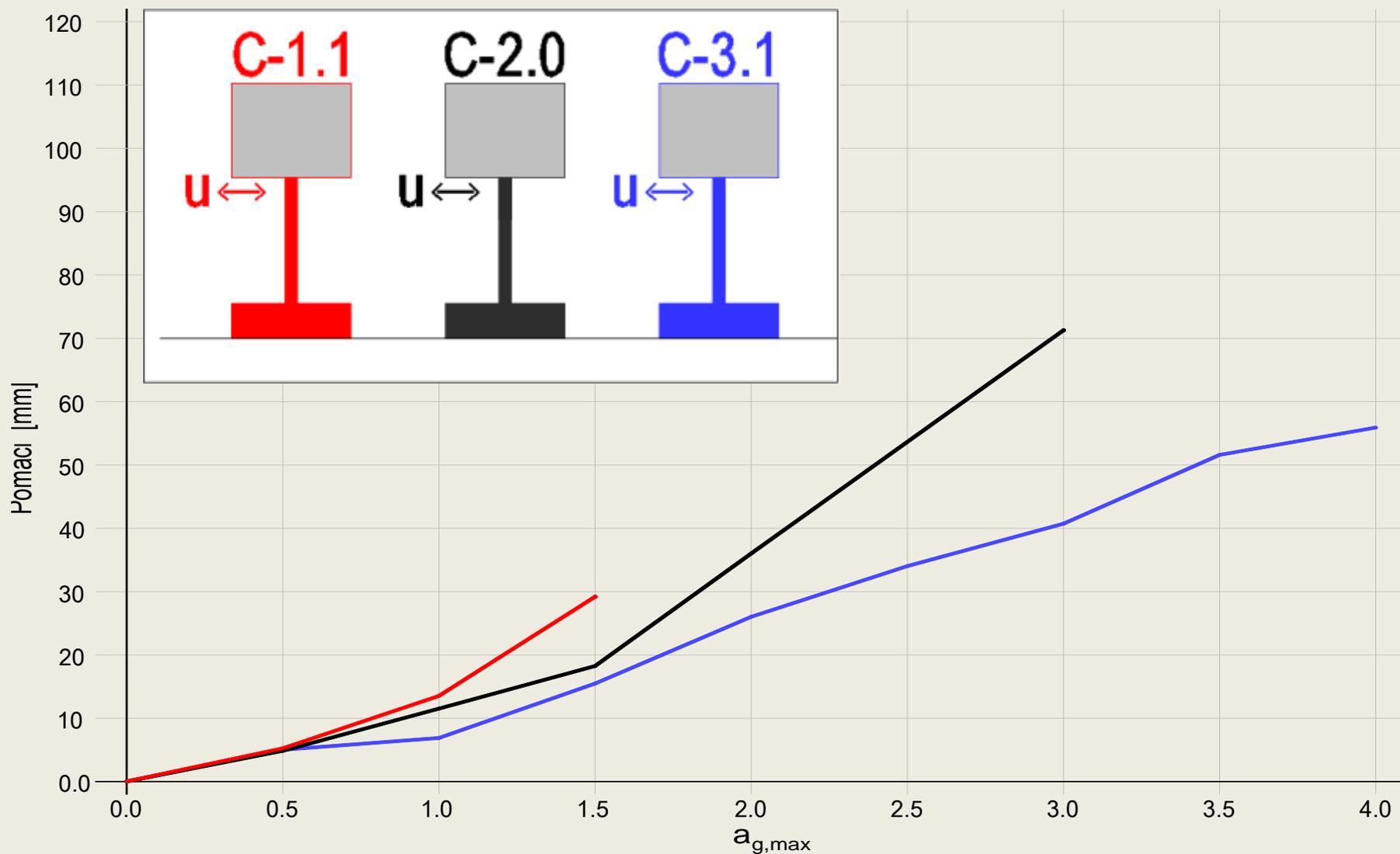
širina temelja 0.5 m

beton:  $f_c=37.2\text{ MPa}$

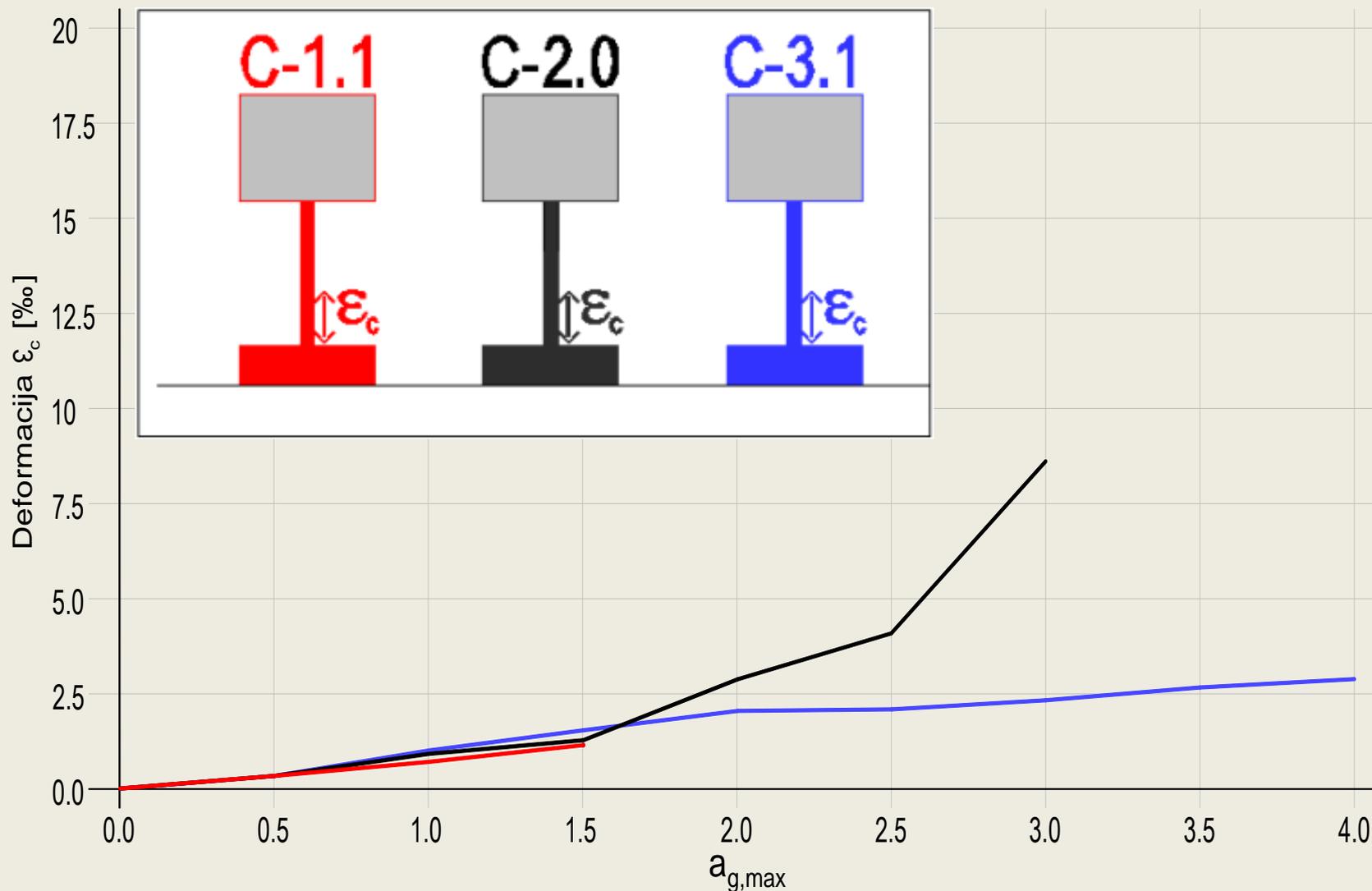
armatura:  $f_s=605\text{ MPa}$



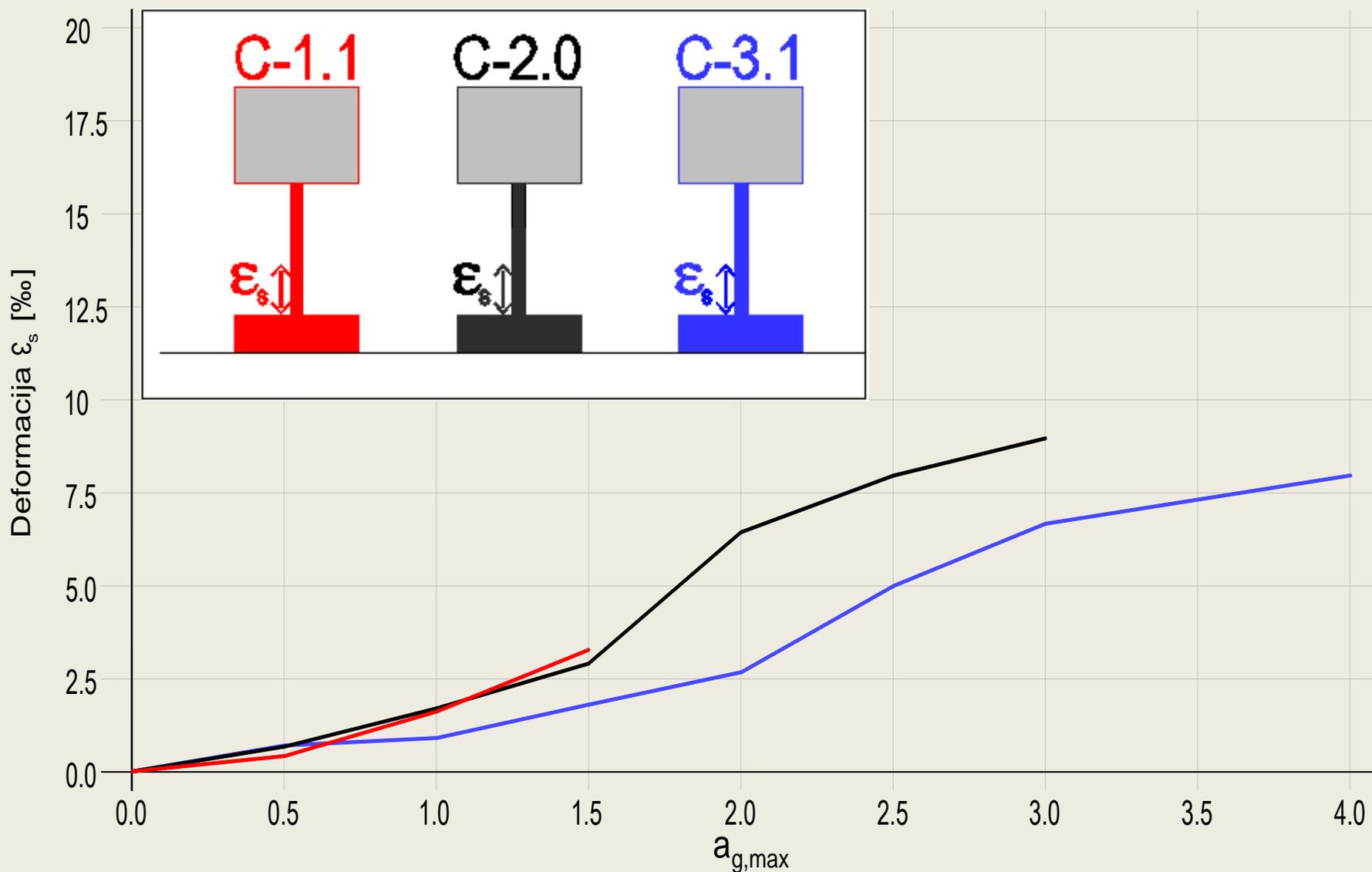
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalne deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalne deformacije armature u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



C-1.1



C-2.0



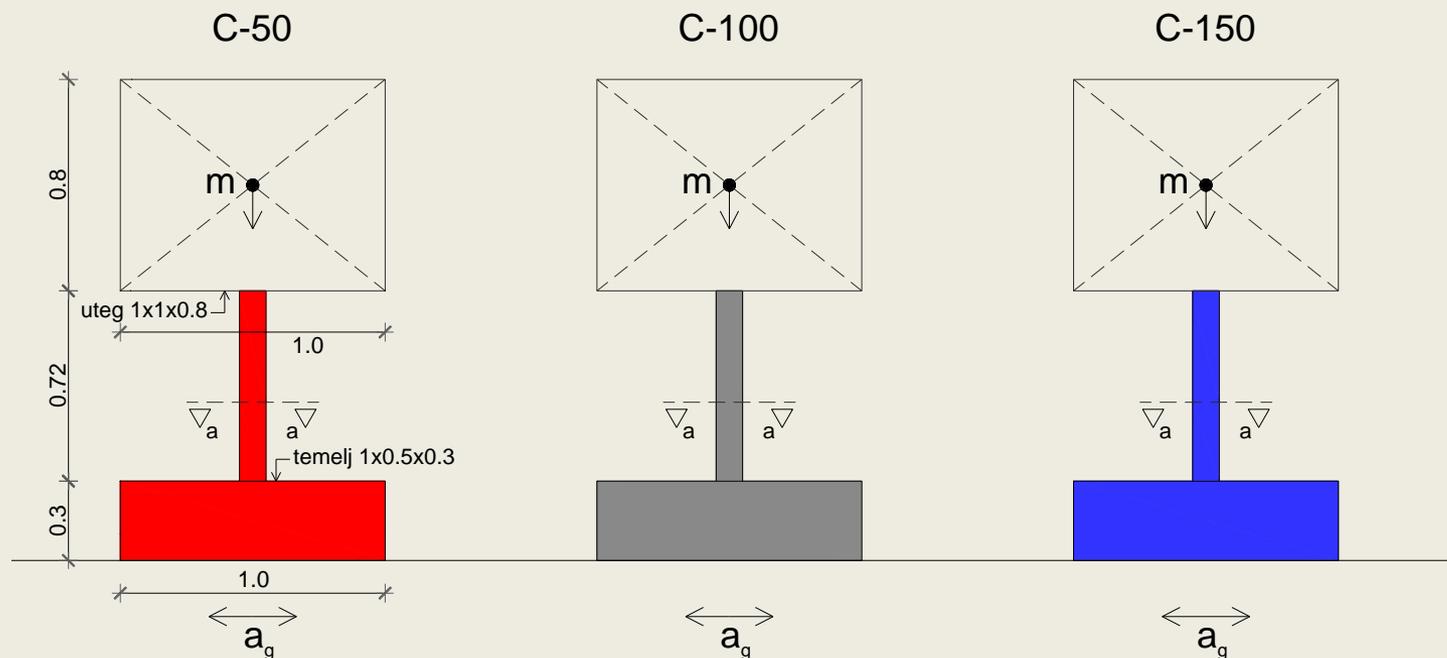
C-3.1



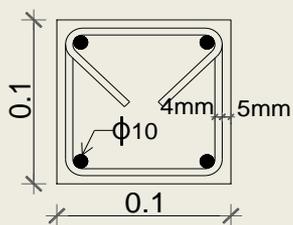
- **Na temelju analize rezultata provedenih eksperimentalnih testova, mogu se donijeti niže navedeni zaključci:**
  - ❑ Povećanjem količine (površine) uzdužne armature smanjuju se maksimalni pomaci stupa, kao i deformacije u armaturi i betonu, te mu se značajno povećava granična nosivost.
  - ❑ Povećavanje granične nosivosti nije proporcionalno povećanju količine uzdužne armature.
  - ❑ Veća tlačna armatura u stupu značajno povećava tlačnu nosivost stupa, smanjuje tlačne deformacije u betonu i doprinosi njegovoj duktilnosti.
  - ❑ Pri projektiranju stupova u područjima s jačim očekivanim potresima treba koristiti visoke postotke armiranja uzdužnom armaturom, a izbjegavati stupove s malim postotkom armiranja.



# Eksperimentalno istraživanje utjecaja razmaka spona na ponašanje armiranobetonskih stupova pri potresu



Presjek a-a



$$\lambda=50$$

$$m=2\text{ t}$$

širina temelja 0.5 m

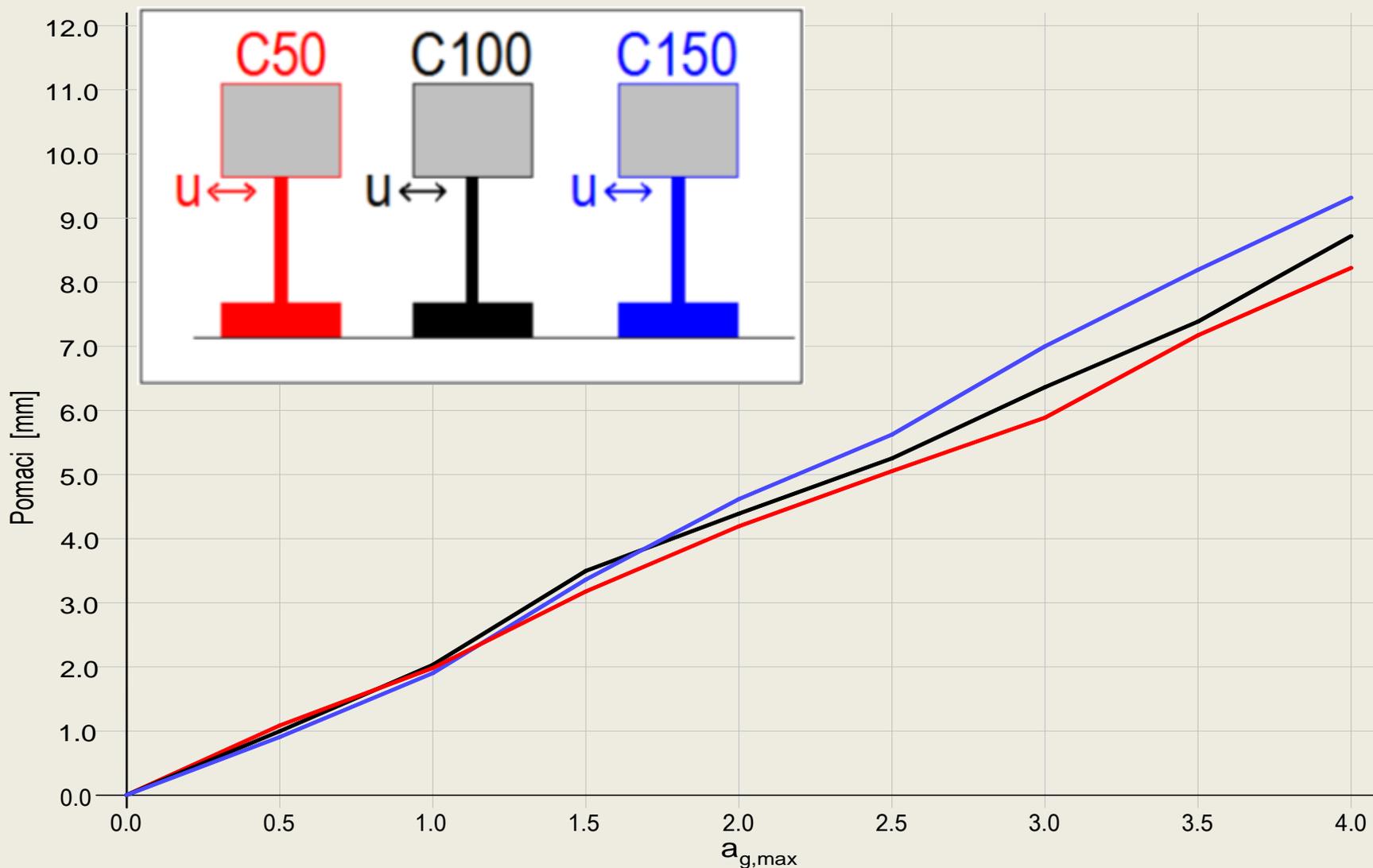
beton:  $f_c=37.2\text{ MPa}$

armatura:  $f_s=605\text{ MPa}$

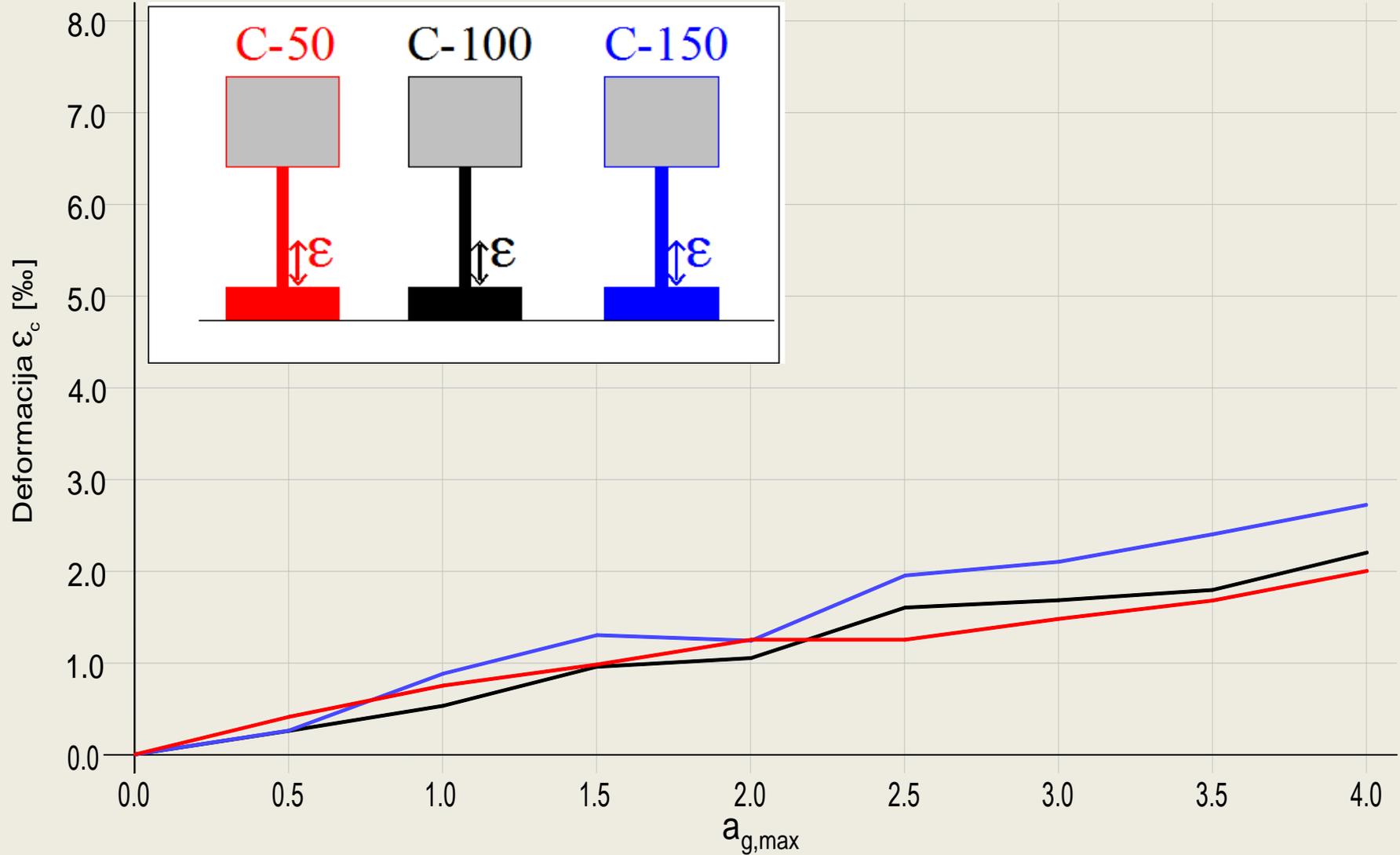




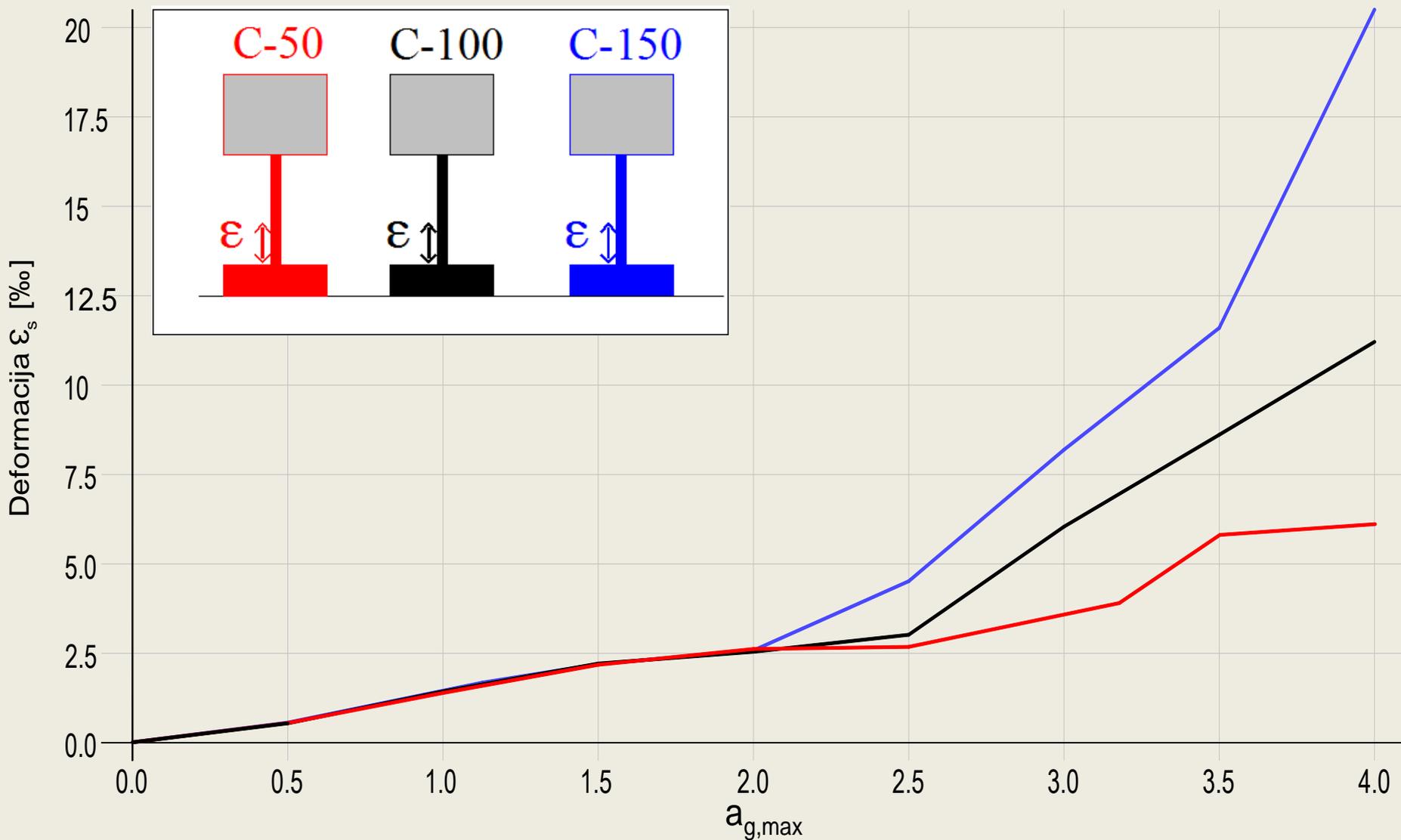
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



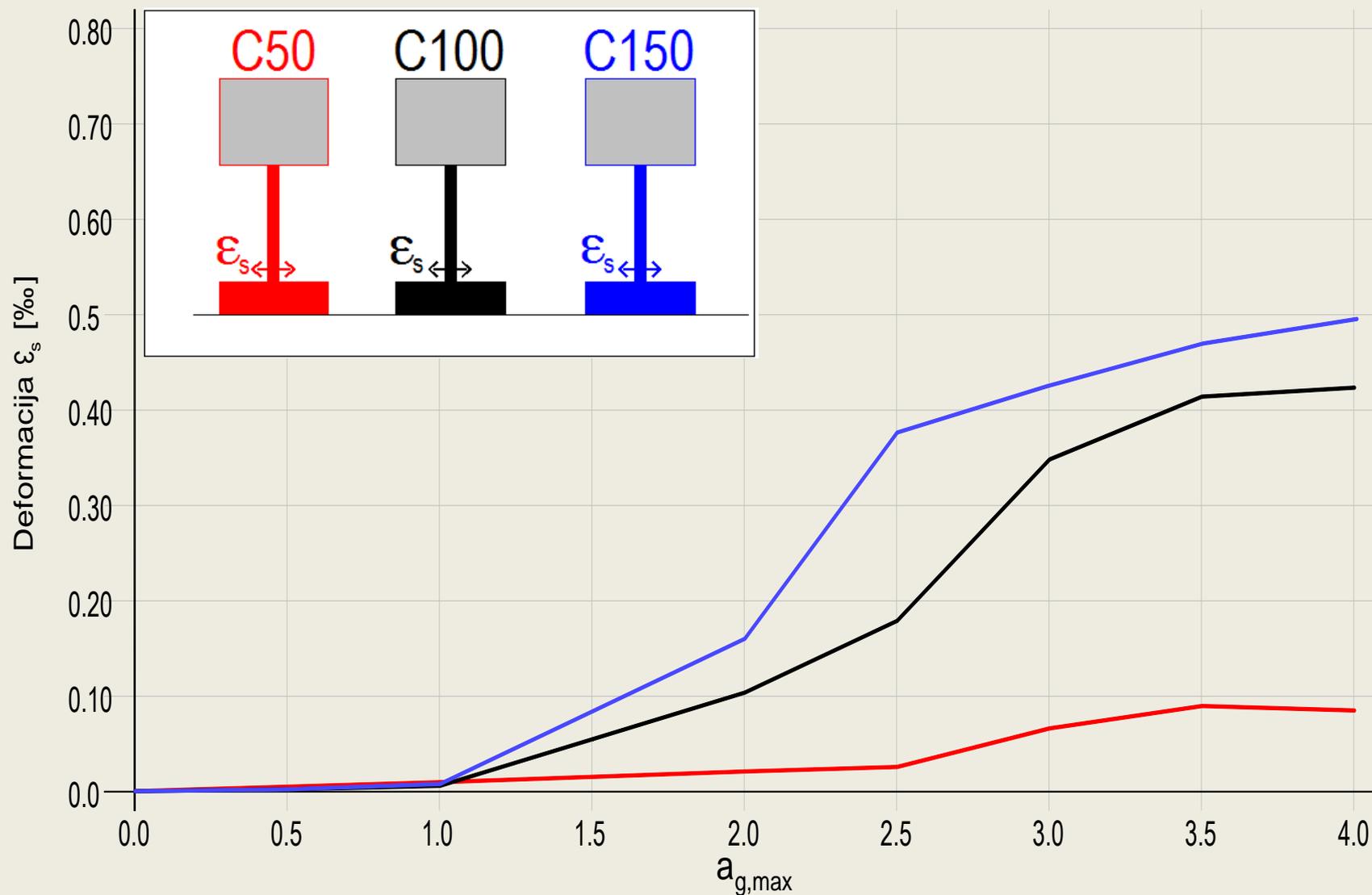
# Maksimalne deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



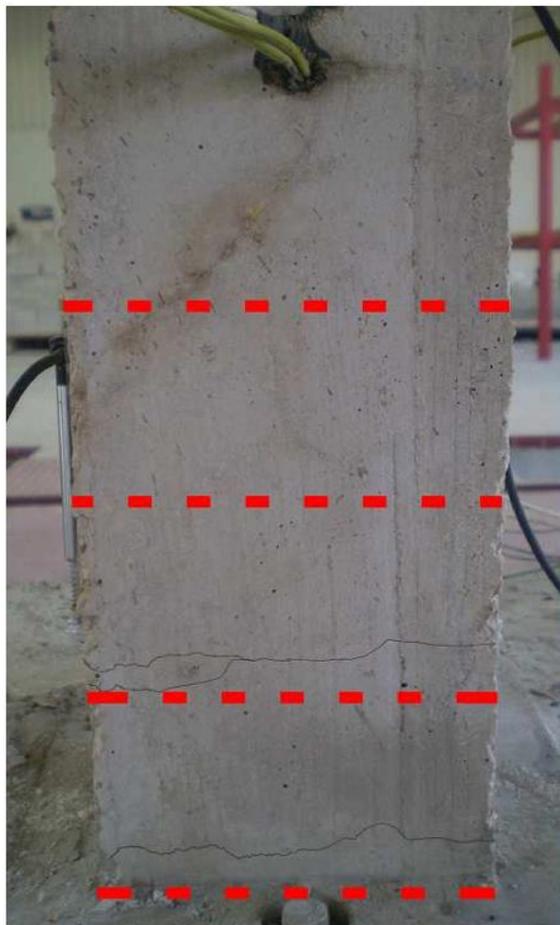
# Maksimalne deformacije armature u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



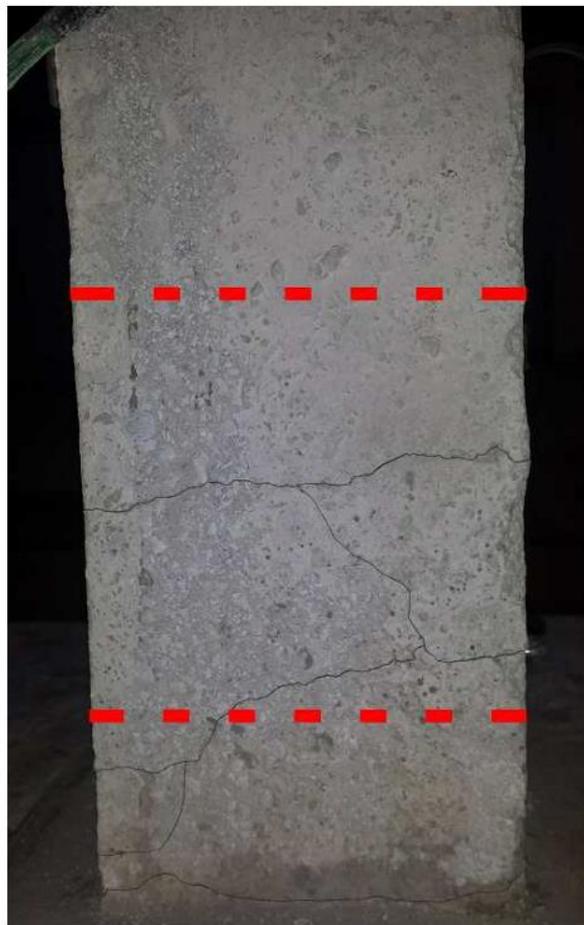
# Maksimalne deformacije poprečne armature u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



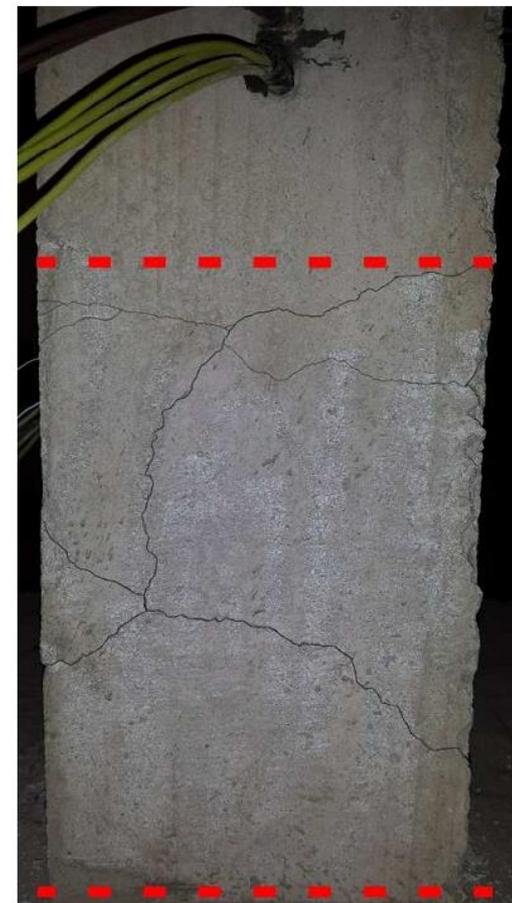
# Izgled stupova pri dnu nakon završenog testiranja



C-50



C-100

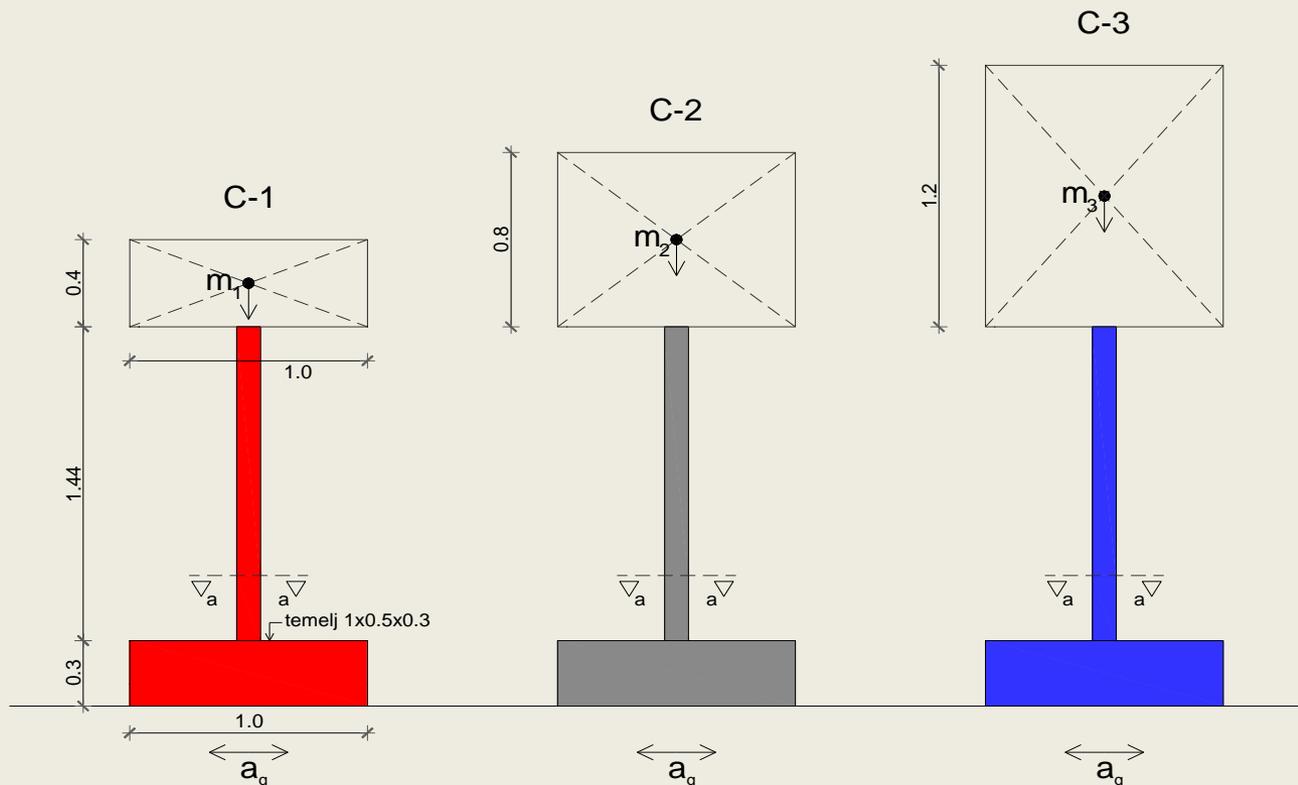


C-150

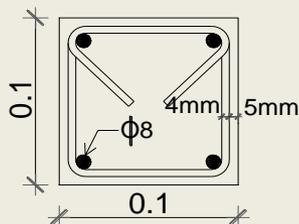
- **Na temelju analize rezultata provedenih eksperimentalnih testova, mogu se donijeti niže navedeni zaključci:**
  - ❑ Uz jednaki oblik i površinu poprečnog presjeka spona, razmak spona ima veliki utjecaj na ponašanje betonskih stupova pri potresu.
  - ❑ Smanjenjem razmaka spona, stupovi se ukrućuju.
  - ❑ Smanjivanjem razmaka spona značajno se reduciraju zone pukotina u betonu, smanjuje se razmak i širina pukotina. Također se smanjuju i deformacije (naprezanja) u sponama.
  - ❑ Povećava se tlačna nosivost betona. Smanjuje se deformacija vertikalne armature, odnosno povećava se nosivost armature.
  - ❑ Treba preferirati što manji razmak spona u stupu, uz adekvatno smanjenje njenog profila, vodeći računa o mogućnosti kvalitetne ugradnje betona.



# Eksperimentalno istraživanje utjecaja veličine mase na vrhu armiranobetonskih stupova na njihovo ponašanje pri potresu



Presjek a-a



$\lambda=100$

$m= 1 \text{ t}; 2 \text{ t}; 3 \text{ t}$

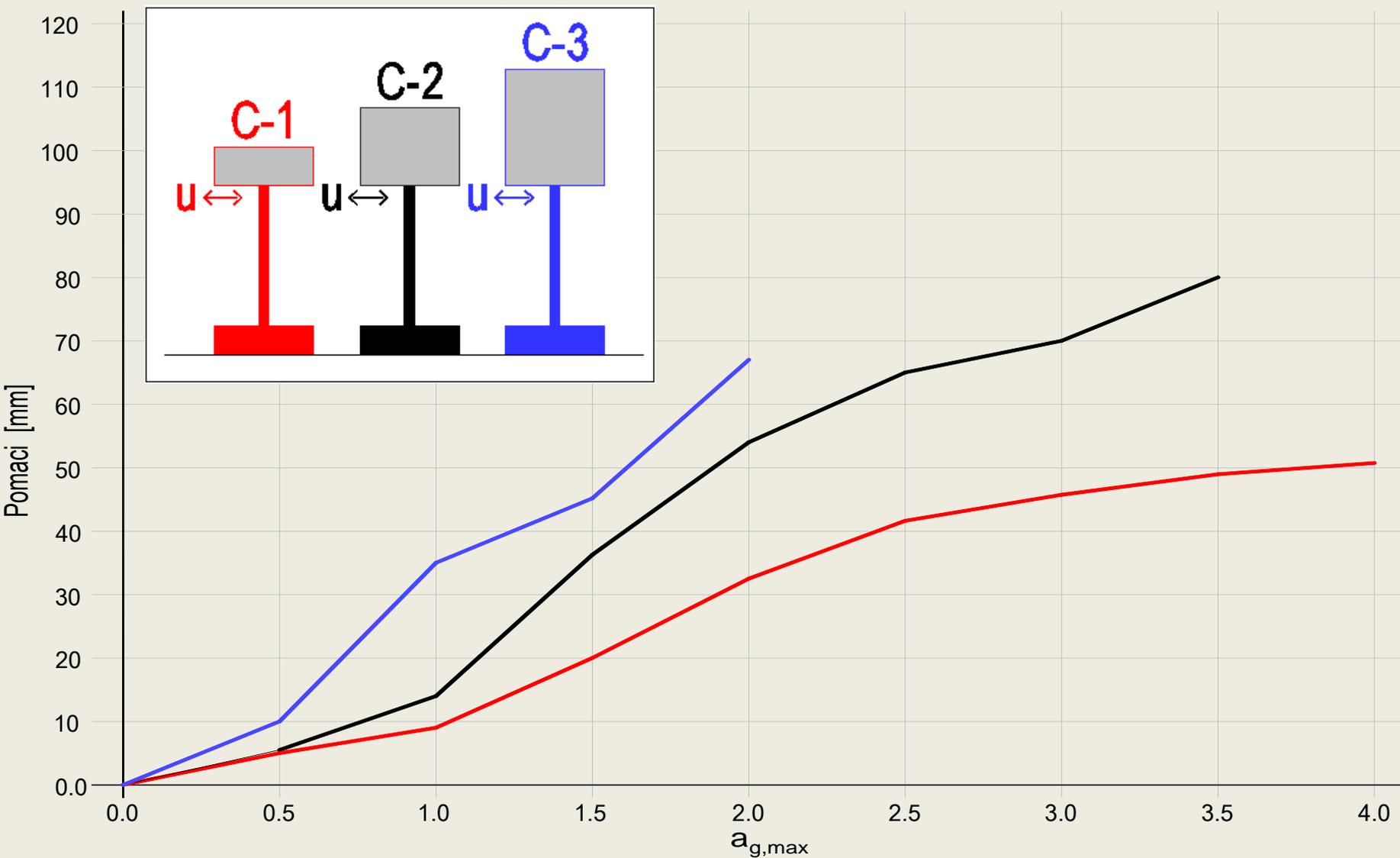
širina temelja 0.5 m

beton:  $f_c= 37.2 \text{ MPa}$

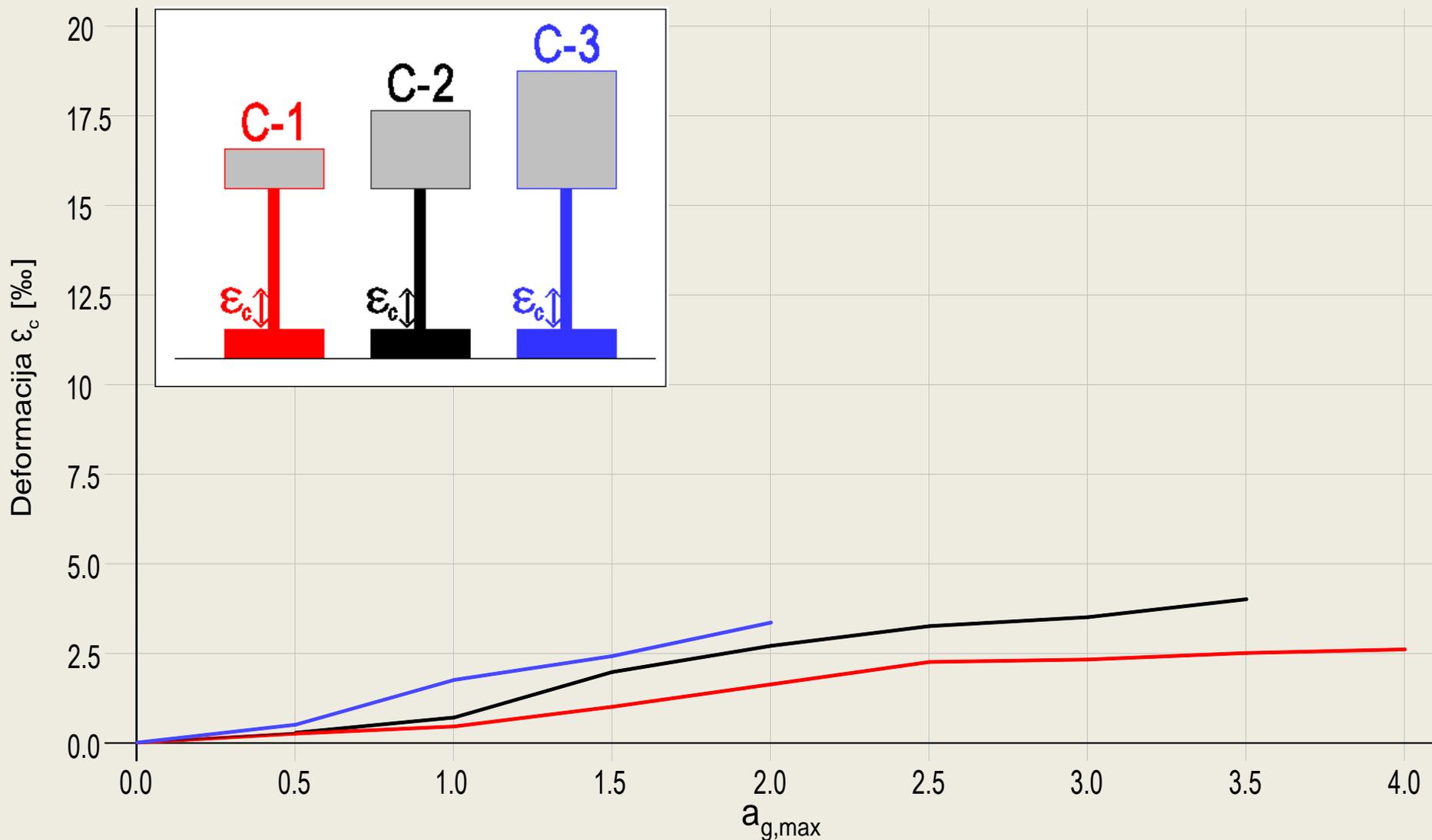
armatura:  $f_s= 605 \text{ MPa}$



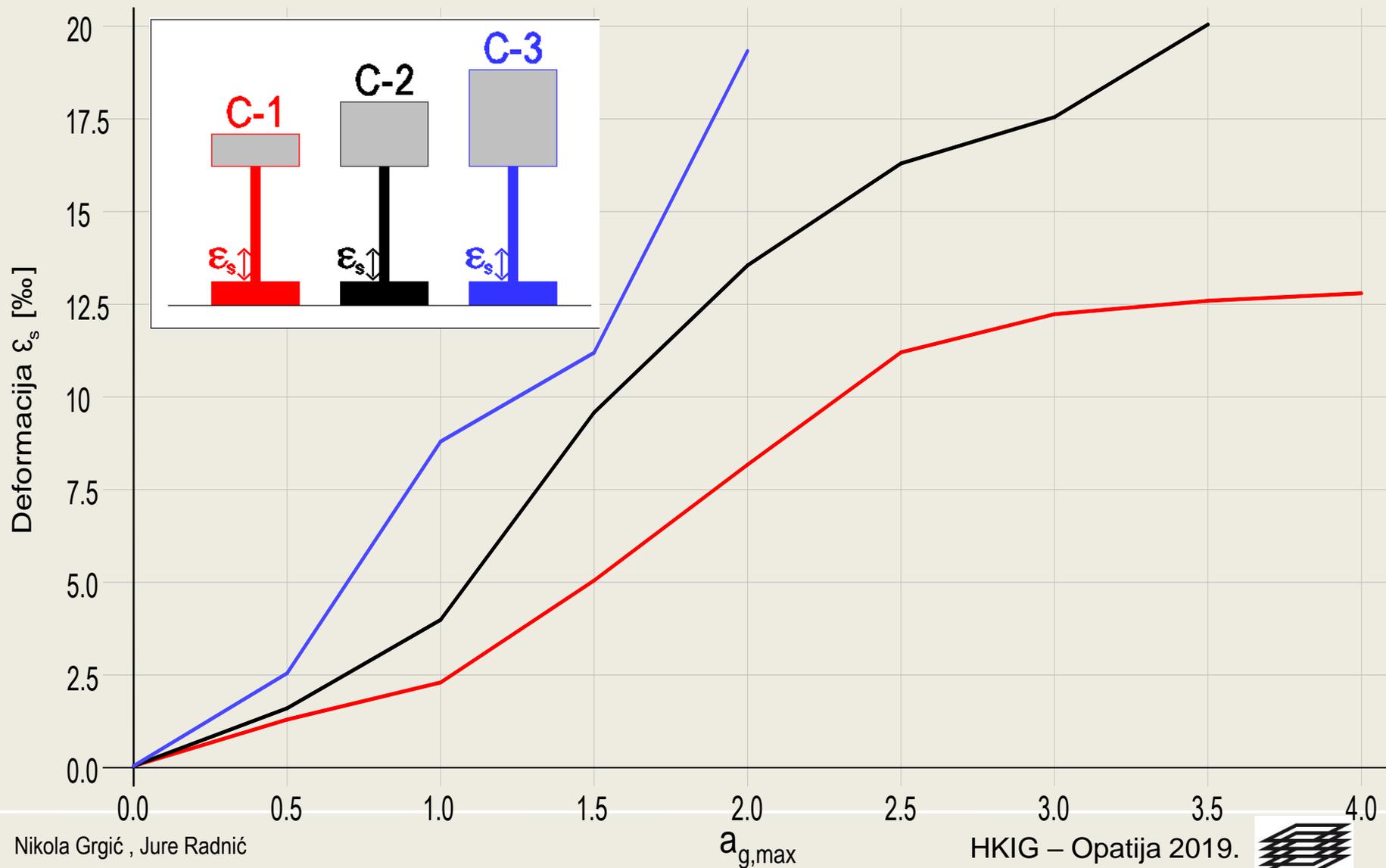
# Maksimalni pomaci vrha stupa u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalne deformacije betona u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



# Maksimalne deformacije armature u ovisnosti o maksimalnom ubrzanju podloge za različite pobude



- **Na temelju analize rezultata provedenih eksperimentalnih testova, mogu se donijeti niže navedeni zaključci:**
  - ❑ Povećavanjem mase na vrhu konzolnog armiranobetonskog stupa, povećavaju se njegovi pomaci, te deformacije betona i armature tijekom potresnog djelovanja.
  - ❑ Povećavanjem mase stupovima se smanjuje granična nosivost.
  - ❑ Smanjenje nije proporcionalno povećanju mase već, nešto manje.
  - ❑ Povećavanjem mase na vrhu stupa, smanjuju se njegovi prirodni periodi slobodnih vibracija, što ima za posljedicu induciranje manjih potresnih sila.
  - ❑ U praksi treba izbjegavati velike koncentrirane mase (težine) na vrhu betonskih konzolnih stupova, a osobito kod građevina u područjima visoke seizmičnosti.



# NUMERIČKI MODEL ZA STATIČKU I DINAMIČKU ANALIZU KONSTRUKCIJA

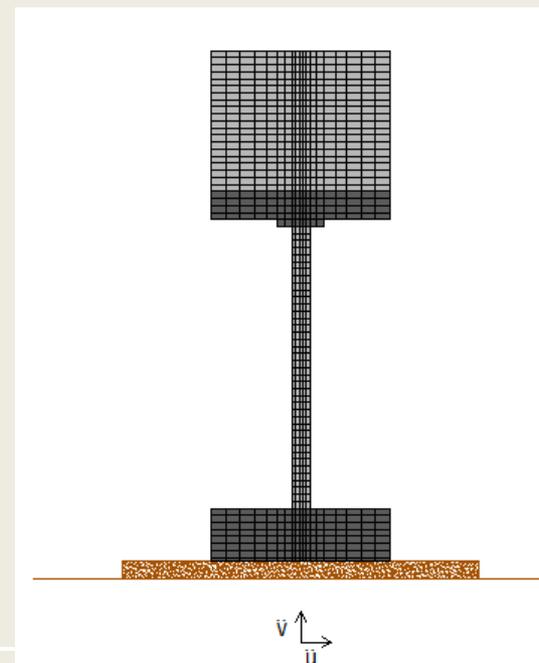
- Za prostornu diskretizaciju konstrukcije, temelja i okolnog tla koristi se Metoda konačnih elemenata
- Za vremensku diskretizaciju problema koristi se Metoda konačnih diferencija
- Za direktnu integraciju jednadžbi gibanja koristi se Newmarkov implicitno-eksplicitni vremenski algoritam kojeg je u inkrementalno – iterativnom obliku razvio Hughes

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1} + \dot{\mathbf{u}}_{n+1}) = \mathbf{f}_{n+1}$$

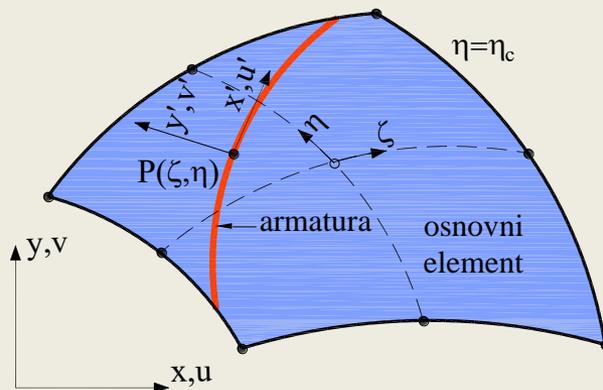
$$\mathbf{K}_{\tau}^* \Delta \mathbf{u} = (\mathbf{f}^*)^i$$

$$\mathbf{K}_{\tau}^* = \frac{\mathbf{M}}{\beta \Delta t^2} + \gamma \frac{\mathbf{C}_{\tau}}{\beta \Delta t} + \mathbf{K}_{\tau}$$

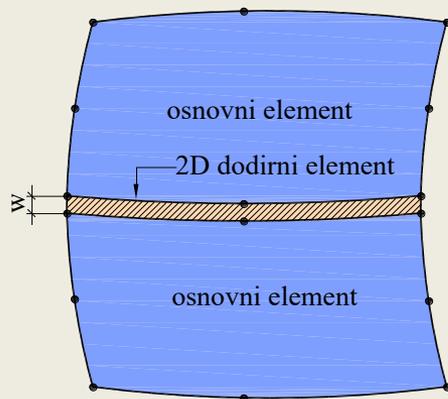
$$\mathbf{f}^* = \mathbf{f}_{n+1} - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}^i - \mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}^i, \dot{\mathbf{u}}_{n+1}^i)$$



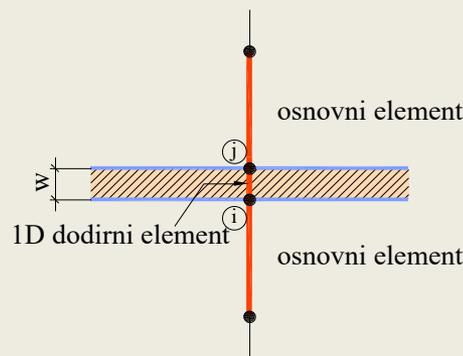
# Konačni elementi korišteni pri numeričkim simulacijama



## a) Osnovni 2D osmočvorni (eng "serendipity") element za armirani beton i tlo



b.1 2D dodirni šestočvorni element

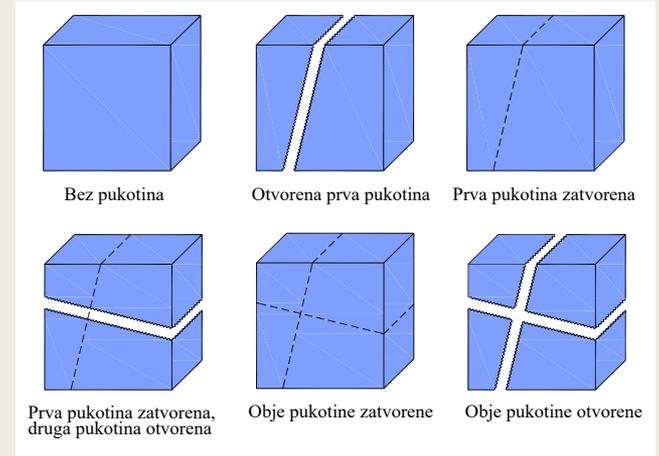
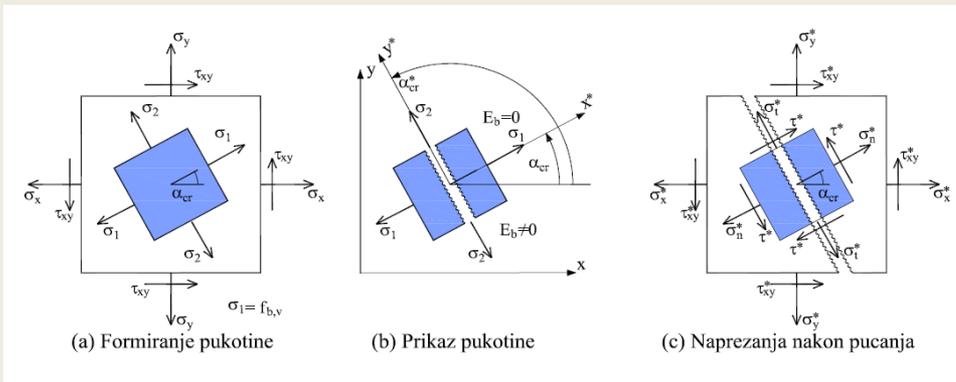


b.2 1D dodirni dvočvorni element

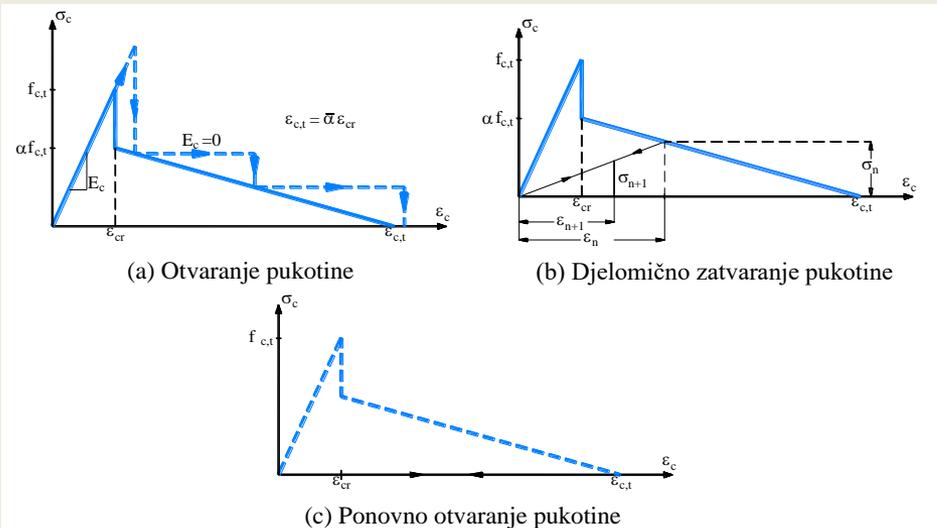
## b) Dodirni 2D (kontakti) elementi na spoju temelja i tla



# Modeli materijala- Model armiranog betona

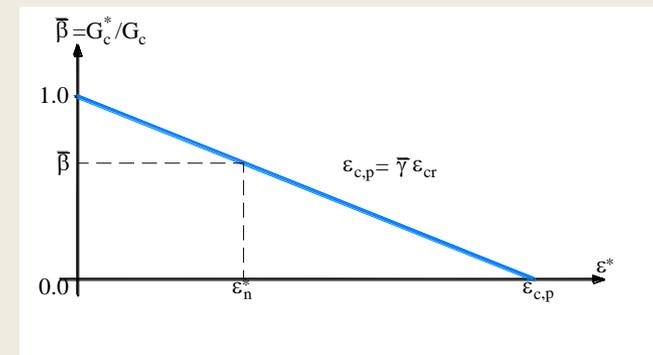


## Model pukotina



## Veza naprezanje-deformacija za beton nakon pojave pukotine

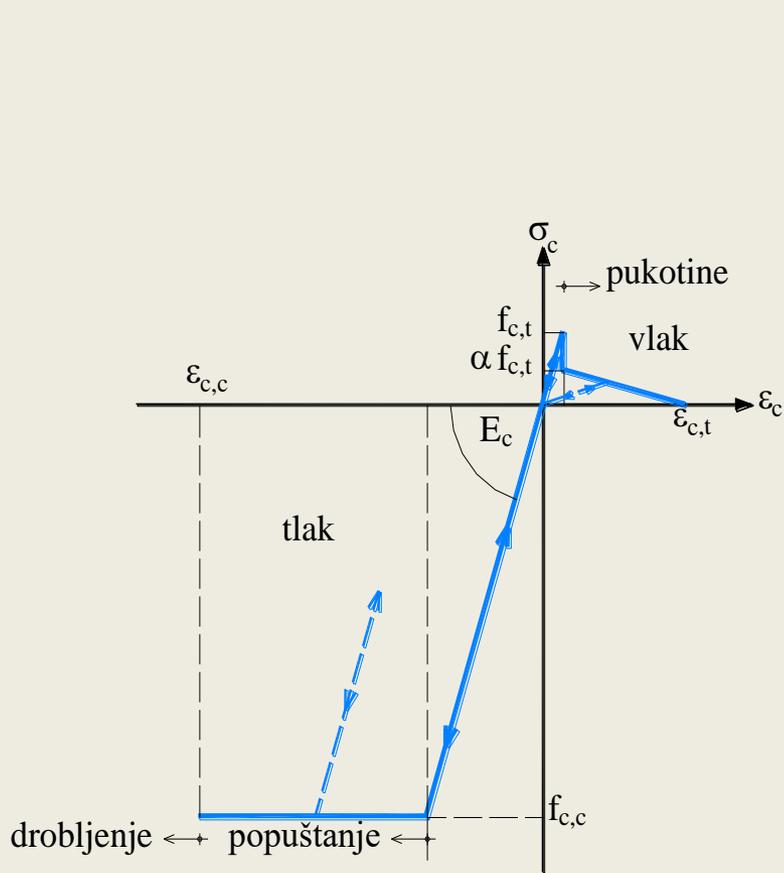
## Moguća stanja pukotina u betonu



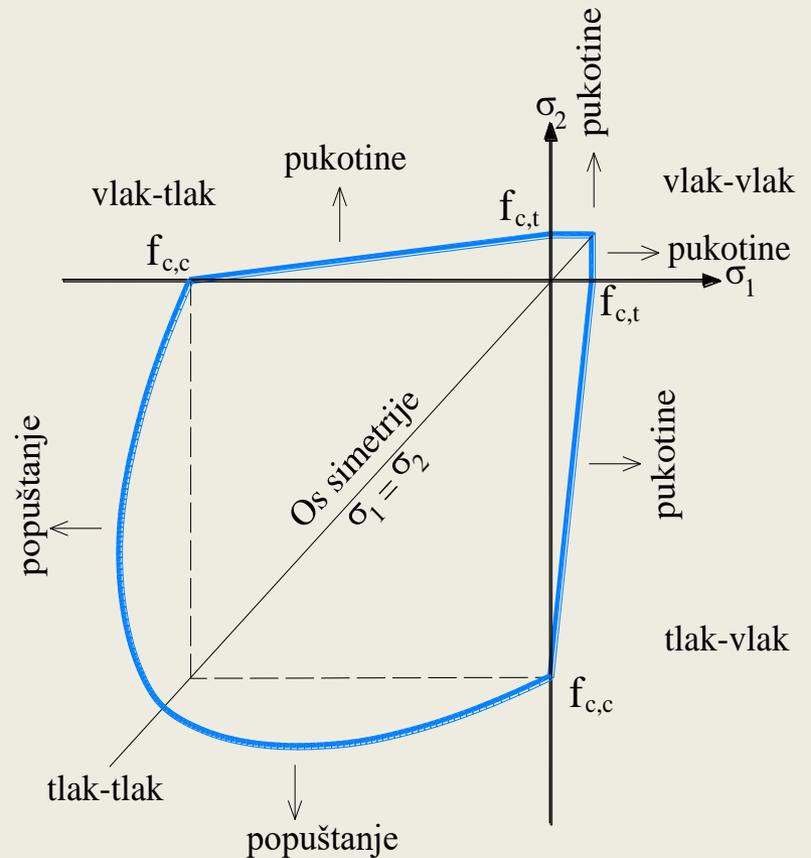
## Model posmične krutosti puknutog betona



# Modeli materijala- beton



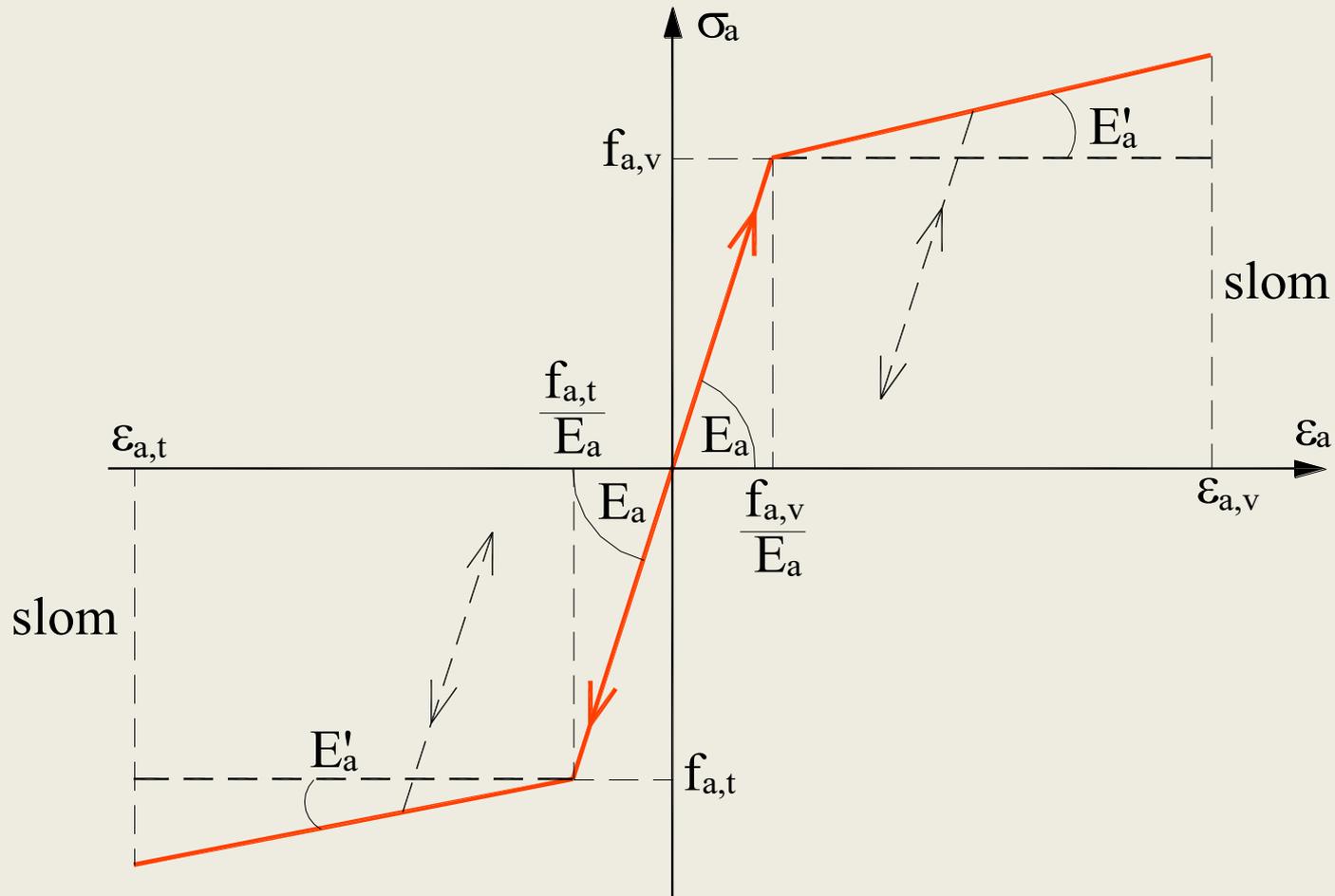
(i) jednodimenzionalni prikaz



(ii) 2D prikaz u polju glavnih naprežanja



# Modeli materijala- armatura



Veza naprežanje-deformacija za betonski čelik (armaturu)



# Mogućnost simulacije slijedećih efekata

- **Promjena geometrije konstrukcije (geometrijska nelinearnost)**
- **Nelinearni efekti materijala (materijalna nelinearnost):**

## BETON

- popuštanje i drobljenje u tlaku
- otvaranje pukotina u vlaku
- mehanizam otvaranja i zatvaranja pukotina
- vlačna krutost betona koji ima pukotine
- posmična krutost betona koji ima pukotine

## ARMATURA

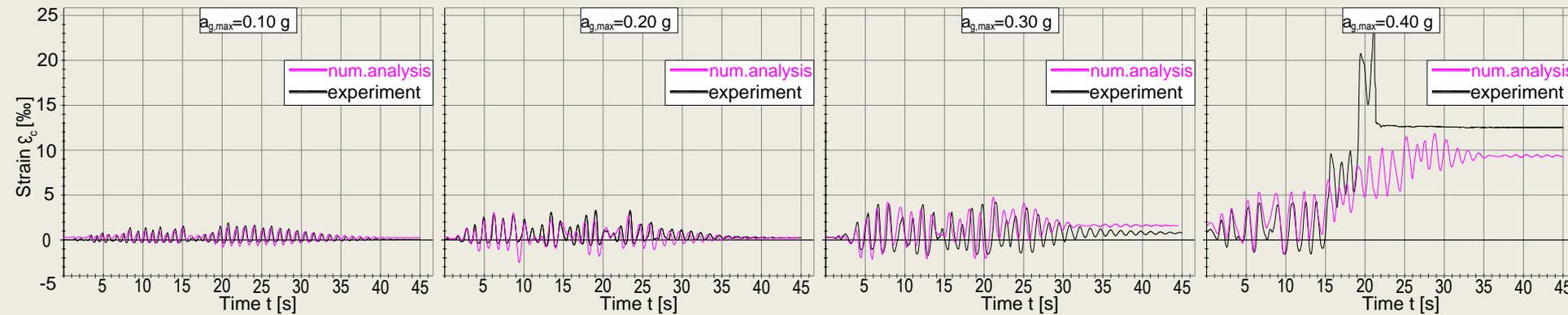
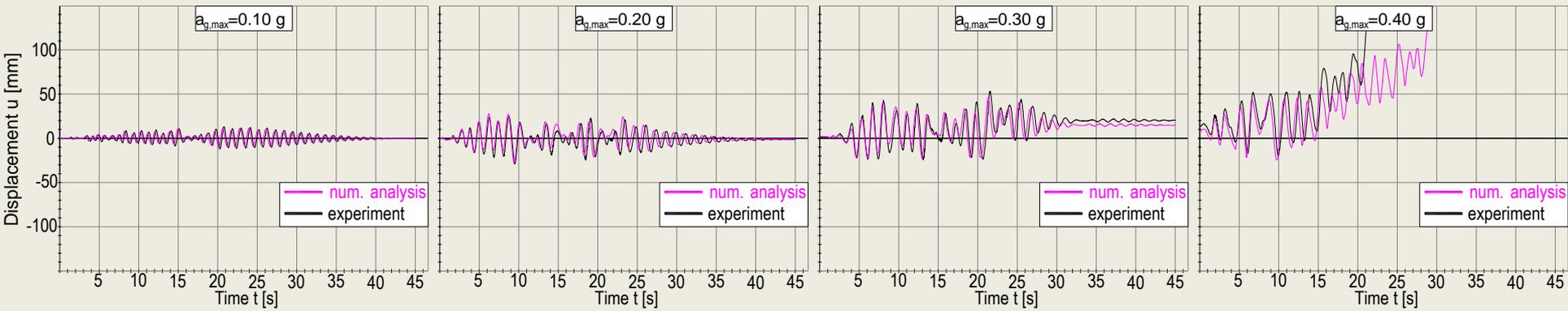
- nelinearno ponašanje u vlaku i tlaku

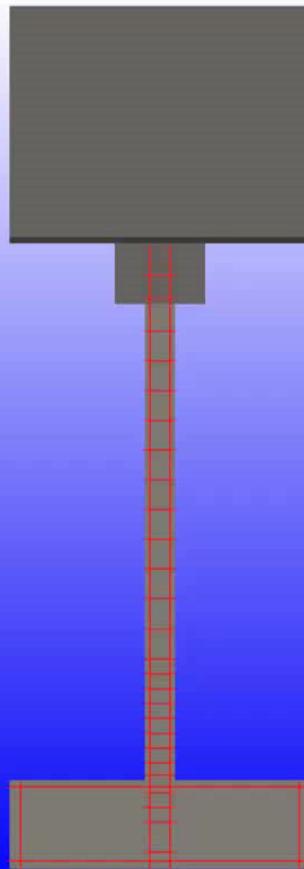
## TLO

- popuštanje i drobljenje u tlaku
- otvaranje pukotina u vlaku
- mehanizam otvaranja i zatvaranja pukotina
- posmično popuštanje i slom
- anizotropna svojstva čvrstoće i krutosti u vert. i horiz. smjeru
- vlačna krutost tla koje ima pukotine
- posmična krutost tla koje ima pukotine









# Hvala na pažnji

