

# Dinamički odgovor jednokatnih modela s dodanim 3D printanim dijagonalnim elementima

---

Ćepić, Anamarija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:619432>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Anamarija Čepić**

**Dinamički odgovor jednokatnih modela s dodanim 3D printanim  
dijagonalnim elementima**

**Završni rad**

**Rijeka, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij  
Građevinarstvo  
Mehanika II**

**Anamarija Čepić  
0114030913**

**Dinamički odgovor jednokatnih modela s dodanim 3D printanim  
dijagonalnim elementima**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2021.**

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti

Znanstvena grana: Tehnička mehanika

Tema završnog rada

**DINAMIČKI ODGOVOR JEDNOKATNIH MODELA S DODANIM 3D PRINTANIM  
DIJAGONALNIM ELEMENTIMA**

**DYNAMIC RESPONSE OF A SINGLE-STOREY MODEL WITH ADDED 3D PRINTED  
DIAGONAL ELEMENTS**

Kandidatkinja: **ANAMARIJA ČEPIĆ**

Kolegij: **MEHANIKA 2**

Završni rad broj: **21-P-36**

**Zadatak:**

Izvesti jednadžbu kretanja za pojednostavljeni jednokatni model (na principu koncentrirane mase i opruge) te za isti takav model s dodanim dijagonalnim štapom. Izračunati krutost sustava bez dijagonalnog štapa. U odabranom softveru modelirati element koji će biti isprintan na 3D printeru te pričvršćen za jednokatni model. Osmisliti i provesti seriju laboratorijskih ispitivanja na jednokatnim ranije opisanim modelima koji su pričvršćeni na Quanser potresni stol. Mjerenja pomaka izvršiti optičkim mjernim sustavom te obraditi rezultate. Usporediti ponašanje jednokatnog modela bez i s dodanim dijagonalnim elementima. Predložiti nastavak istraživanja.

**Tema rada je uručena:** 24. veljače 2021.

Komentorica:

doc. dr. sc. Edita Papa Dukić  
dipl. ing. građ.

Mentorica:

doc. dr. sc. Nina Čeh  
dipl. ing. građ.

## ***IZJAVA***

Završni rad sam izradila samostalno, u suradnji s mentoricom i komentoricom uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Anamarija Čepić

U Rijeci, 20. rujna 2021.

Završni/Diplomski rad sadrži eksperimentalna ispitivanja provedena na laboratorijskoj opremi nabavljenoj u okviru projekta

**Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci**

Voditelj projekta      prof. dr. sc. Nevenka Ožanić  
Šifra projekta          RC.2.2.06-0001  
Financijer projekta    Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)  
                                  Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH  
Pravna nadležnost     Republika Hrvatska

U Rijeci, 20. 9. 2021.

Mentor:

doc. dr. sc. Nina Čeh

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Nini Čeh i komentorici doc. dr. sc. Editi Papa Dukić na svoj ukazanoj pomoći i strpljenju prilikom izrade ovoga završnog rada. Također se zahvaljujem i svojoj obitelji koja mi je bila najveća podrška tijekom studiranja.

## **SAŽETAK**

Završni rad „Dinamički odgovor jednokatnih modela s dodanim 3D printanim dijagonalnim štapovima“ bavi se promatranjem oscilacija jednokatnih okvirnih modela uslijed djelovanja potresnih valova iz četiri potresna zapisa (El Centro, Kobe, Cape Mendocino i Northridge). Posebno se promatraju jednokatni modeli bez i sa dijagonalnim štapovima. Eksperimenti su provedeni u Laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci na potresnoj platformi Quanser ST-III i snimana optičkim mjernim sustavom GOM mbH PONTOS 3D 4M. Na temelju usporedbe dobivenih rezultata za okvir bez dijagonala i s dodanim dijagonalama donesen je zaključak da ovakvi 3D printani dijagonalni elementi smanjuju amplitude oscilacija okvira i povećavaju prigušenje.

Ključne riječi: potresni zapis, jednokatni model, dijagonalni štapovi, smanjenje oscilacija



## **ABSTRACT**

The undergraduate thesis „Dynamic response of single-storey models with added 3D printed diagonal elements" deals with the observation of oscillations of a single-storey frame model due to seismic waves from four seismic records (El Centro, Kobe, Cape Mendocino, and Northridge). Single-storey models without and with added diagonal rods are observed separately. All experiments are conducted in the Laboratory for structures at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka on the Quanser ST-III seismic platform and monitored with the GOM mbH PONTOS 3D 4M optical measuring system. Based on the comparison between the results obtained for the model without and with added diagonals, it is concluded that 3D printed diagonal elements as these decrease the amplitudes of oscillations of the frame, as we as increase the damping.

Keywords: seismic record, single-storey model, diagonal rods, reducing oscillations

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. O POTRESIMA I NJIHOVOM UTJECAJU NA KONSTRUKCIJU .....	2
2.1. Vršno ubrzanje tla .....	3
2.2. Ponašanje konstrukcija tijekom potresa .....	4
3. JEDNADŽBA KRETANJA ZA POJEDNOSTAVLJENI JEDNOKATNI MODEL.....	5
4. OPIS OPREME I MODELA .....	7
4.1. Korištena oprema .....	7
4.1.1. <i>Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M i upravljačka jedinica s GOM programskim paketom za 3D analizu pomaka i deformacija</i> .....	7
4.1.2. <i>Potresna platforma Quanser STI-III</i> .....	9
4.1.3. <i>3D printer Prusa i3 MK3S</i> .....	10
4.2. Opis modela .....	12
5. PROVEDENI EKSPERIMENTI .....	16
5.1. Krutost sustava bez dijagonalnih štapova .....	16
5.2. Obrada podataka potresanja jednokatne konstrukcije sa dijagonalnim štapovima .....	18
5.2.1. <i>Potresni zapis „El Centro“</i> .....	20
5.2.2. <i>Potresni zapis „Northridge“</i> .....	25
5.2.3. <i>Potresni zapis „Kobe“</i> .....	26
5.2.4. <i>Potresni zapis „Cape Mendocino“</i> .....	27
6. DISKUSIJA .....	28
7. ZAKLJUČAK .....	32
8. LITERATURA.....	33

## Popis tablica

Tablica 1. Masa jednokatne konstrukcije .....	12
Tablica 2. Vrijednost krutosti $k$ [N/m] .....	17
Tablica 3. Prikaz vremena i amplituda za Okvir 1 potresnog zapisa "El Centro" .....	21
Tablica 4. Logaritamski dekrement $\delta$ modela sa dijagonalnim štapovima .....	22
Tablica 5. Prigušenje modela $\zeta$ sa dijagonalnim štapovima.....	22
Tablica 6. Prikaz vremena i amplituda za Okvir 2 potresnog zapisa "El Centro" .....	23
Tablica 7. Logaritamski dekrement $\delta$ modela bez dijagonalnih štapova.....	24
Tablica 8. Prigušenje modela $\zeta$ bez dijagonalnih štapova.....	24

## Popis slika

Slika 1. Karta potresnih područja Republike Hrvatske [2].....	3
Slika 2. DST i DMA dijagrami.....	5
Slika 3. Skica okvira u nedeformiranom i u deformiranom stanju.....	5
Slika 4. Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M .....	8
Slika 5. Potresna platforma Quanser STI-III.....	10
Slika 6. Dijagonalni štapovi, prikaz iz AutoCAD-a .....	11
Slika 7. Ispunjeni dijagonalni štap bez šupljina .....	13
Slika 8. Ispunjeni dijagonalni štap zrakasto izbušen .....	13
Slika 9. Dijagonalni štap zrakasto izbušen sa unutarnjom šupljinom .....	14
Slika 10. Dijagonalni štap zrakasto izbušen bez unutarnje šupljine.....	15
Slika 11. Dijagonalni štap zrakasto izbušen sa unutarnjom šupljinom .....	15
Slika 12. Sustav za mjerenje pomaka .....	16
Slika 13. Odnos sile $F$ [N] i pomaka $\Delta$ [mm] .....	17
Slika 14. Oscilacije okvira prilikom potresnog zapisa "El Centro" .....	18
Slika 15. Okvir 2 prilikom ispitivanja na potresnom stolu.....	19
Slika 16. Okvir 1 prilikom ispitivanja na potresnom stolu.....	19
Slika 17. Prikaz pomaka nakon što se baza potpuno smiri.....	20
Slika 18. Prikaz potresnog zapisa „El Centro“ prije nego se baza smiri .....	25
Slika 19. Potresni zapis "Northridge" .....	26
Slika 20. Potresni zapis "Kobe" .....	26
Slika 21. Potresni zapis "Cape Mendocino" .....	27
Slika 22. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu.....	28
Slika 23. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu.....	29
Slika 24. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu.....	30
Slika 25. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu.....	31

## 1. UVOD

Potresi su nerijetka pojava u prirodi. Nepredvidivi su, nije ih moguće spriječiti te je iz tog razloga potrebno poduzeti potrebne korake kako bi se unaprijed umanjila mogućnost nastajanja štetnih posljedica za građevine.

U povijesti, prilikom izgradnje, se nije pretjerano vodila briga o štetnim posljedicama potresnih razaranja te se danas na građevinama koje su izgrađene u to vrijeme događaju znatna oštećenja. Od samog početka gradnje bitno je dobro procijeniti oscilacije građevine tijekom potresa jer njena sanacija, ukoliko oscilacije nisu dobro procijenjene, može biti izrazito skupa.

U ovom radu je predloženo kako dodavanjem dijagonalnih štapova možemo znatno smanjiti oscilacije građevine. Oscilacije jednostavnog jednokatnog okvira, njihove amplitude i prigušenja prikazani su kroz eksperimente modela prilikom potresanja različitim potresnim zapisima koji su se dogodili u povijesti. Ukupno su provedena ispitivanja na četiri potresna zapisa, pomaci su mjereni optičkim metodama, a zatim su podaci obrađeni i prikazani grafički. Svi eksperimenti su provedeni na jednokatnom modelu bez i sa dijagonalnim učvršćenjima te su dane usporedbe njihovih dinamičkih odgovora na pobudu podloge na kojoj se nalaze.

## 2. O POTRESIMA I NJIHOVOM UTJECAJU NA KONSTRUKCIJU

Potresi su serija vibracija na zemljinoj površini uzrokovana skupinom elastičnih (seizmičkih) valova nastali oslobađanjem energije uzrokovane pomicanjem tektonskih ploča. U pravilu imamo dvije vrste seizmičkih valova, a to su longitudinalni (P-valovi) i transverzalni (S-valovi).

Longitudinalni valovi su brži te se šire paralelno, dok su transverzalni valovi sporiji za 1,7 od longitudinalnih valova, a šire se na način da čestice vala titraju okomito na smjer širenja. [1]

Za određivanje jačine potresnih valova koriste se dvije mjere, to su jakost i magnituda. Richterovom ljestvicom od 0 do 9 se opisuje magnituda valova te se magnituda izražava u stupnjevima. Ispod 2° prema Richterovoj ljestvici smatraju se mikro potresi koji se ni ne osjećaju, dok se potresi od 9° opisuju kao katastrofalni potresi koji uništavaju sve u krugu nekoliko tisuća kilometara. Magnituda seizmičkih valova se mjeri seizmografima.

Mercalli-Cancani-Siebergovom (MCS) ljestvicom se opisuje jakost potresa, razornost potresa, posljedice te doživljaj ljudi koji su osjetili potres. Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica ima 12 stupnjeva od kojih se 1., najslabiji stupanj, opisuje kao nezamjetljiv potres kojega bilježe jedino seizmografi, dok se 12., najjači stupanj, opisuje kao veliki katastrofalan potres u kojemu se ruši do temelja sve što je izgrađeno ljudskom rukom, površina Zemlje mijenja svoj oblik, jezera se zatrpavaju, a rijeke mijenjaju korita.

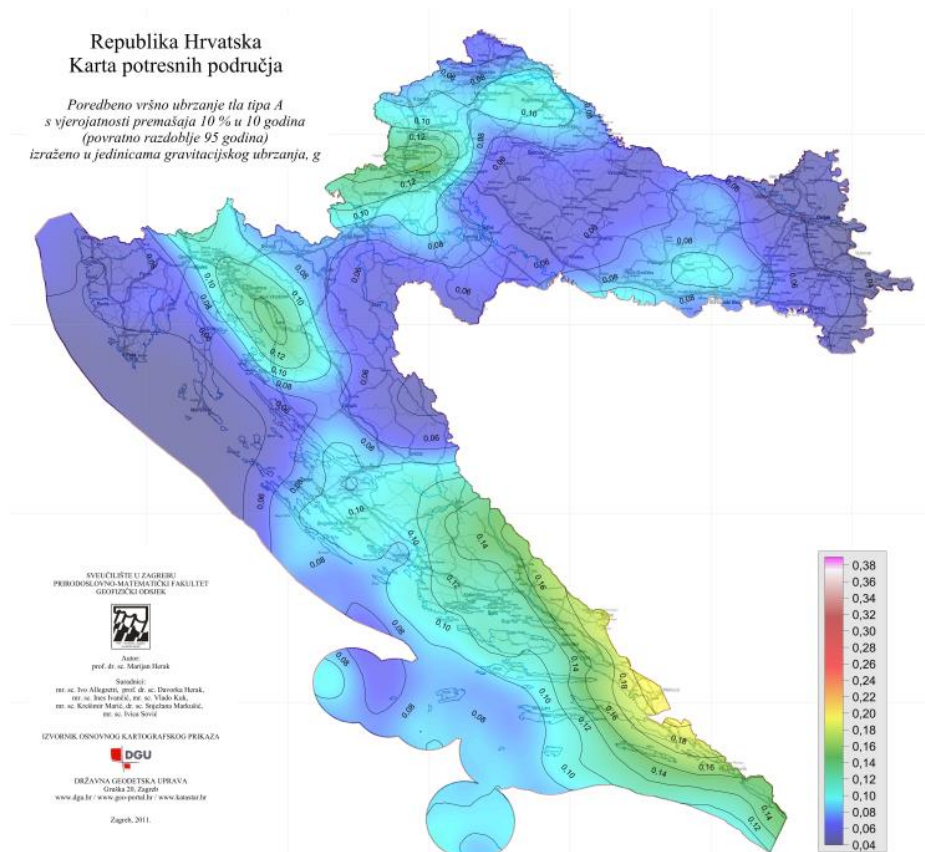
U ovom radu su na pojednostavljenom jednodimenzionalnom modelu provedena ispitivanja sa zapisima nekoliko potresa. Potresi koji su korišteni prilikom ispitivanja su:

- potres u Northridgeu koji se dogodio 17. 1. 1994. jačine 6,4° prema Richterovoj ljestvici,
- potres u El Centru koji se dogodio 15. 10. 1979. jačine 6,5° prema Richterovoj ljestvici,
- potres u Kobeu koji se dogodio 16. 1. 1995. jačine 7,3° prema Richterovoj ljestvici,
- potres u Cape Mendocinu koji se dogodio 25. 4. 1992. jačine 7,2° prema Richterovoj ljestvici.

## 2.1. Vršno ubrzanje tla

Vršno ubrzanje je jednako maksimalnom ubrzanju tla koje se dogodilo tijekom potresa na određenoj lokaciji. Vršno ubrzanje je dobiveno na temelju mjerenja trešnje tla u jednoj zemljopisnoj točki, za razliku od Richterove ljestvice i Mercalli-Cancani-Siebergove ljestvice koje mjere jakost i magnitudu potresnih valova.

Kako bi građevine tijekom svojega vijeka bile otporne na potrese, izrađene su karte potresnih područja prema kojima se projektira. Na kartama potresnih područja označene su vrijednosti vršnog ubrzanja tla te su označene različitim bojama ovisno o njegovoj ubrzanja. U Republici Hrvatskoj je, prema takvoj karti iz 2011. godine, najveća vrijednost vršnog ubrzanja tla 0,19 na području Dubrovačko-Neretvanske županije, dok je najmanja vrijednost 0,04 na području Vukovarsko- Srijemske županije.[2]



Slika 1. Karta potresnih područja Republike Hrvatske [2]

## **2.2. Ponašanje konstrukcija tijekom potresa**

Prilikom potresanja tla dolazi do gibanja podloge, odnosno oslonca građevine, što se prenosi na samu građevinu i dolazi do njene vibracije, potresanja i oscilacija. Građevine manje visine se smatraju sigurnije, ali to nije uvijek tako. Frekvencija same zgrade određena je njenom masom i krutošću.

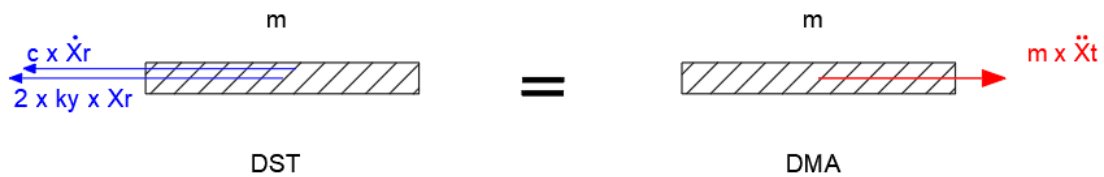
Kada se frekvencija potresnih valova poklopi sa vlastitom frekvencijom građevine dolazi do rezonancije. Tada se poklope oscilacije građevina sa oscilacijama potresnih valova te dodatni potresni val pojačava njenu vibraciju. Time dolazi do sve većih oscilacija građevine, što može dovesti do velikih deformacija, oštećenja, pa i do rušenja. Ukoliko se u blizini nalaze građevine koje imaju različite rezonancije postoji mogućnost da se one međusobno oštete. Prilikom projektiranja građevina jedan od mogućih ciljeva je osigurati da građevina nema vlastitu frekvenciju koja se može poklopiti s frekvencijama ubrzanja tla, kako ne bi došlo do rezonancije.

Motivirani time u ovom smo radu krenuli sa proučavanjem dinamičkog ponašanja jednokatnog modela okvira.



### 3. JEDNADŽBA KRETANJA ZA POJEDNOSTAVLJENI JEDNOKATNI MODEL

Kako bismo odredili dinamički odgovor jednodimenzionalnog modela za početak je potrebno izvesti jednadžbu kretanja koristeći Newtonov drugi zakon (Slika 2.).[3]



Slika 2. DST i DMA dijagrami

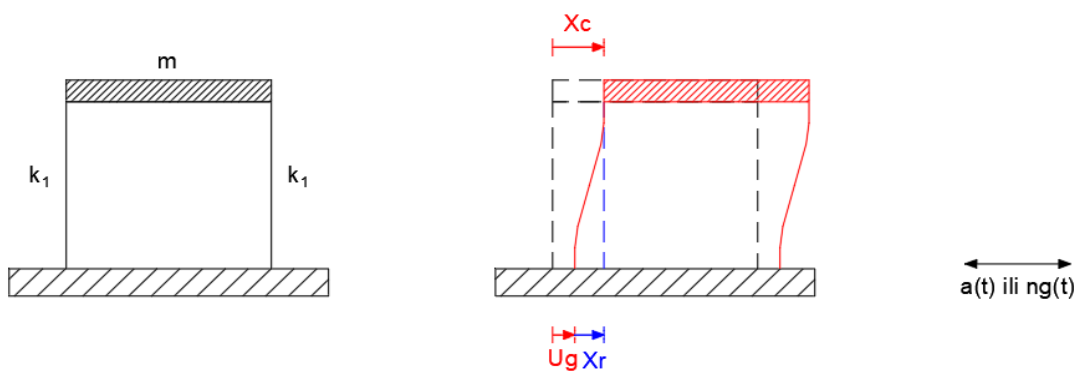
Jednadžbu kretanja izvodimo prema Newtonovom drugom zakonu:

$$-2k_1x_r - c\dot{x}_r = m \cdot \ddot{x}_t \quad (1)$$

$$m\ddot{x}_t + c\dot{x}_r + kx_r = 0 \quad (2)$$

Iz jednadžbe (1) možemo izračunati potpuni pomak  $x_t$  kao (Slika 3.):

$$x_t = n_g + x_r \quad (3)$$



Slika 3. Skica okvira u nedeformiranom i u deformiranom stanju

Derivacije jednačbe (3) uzimajući u obzir vrijeme su:

$$\dot{x}_t = \dot{n}_g + \dot{x}_r \quad (4)$$

$$\ddot{x}_t = \ddot{n}_g + \ddot{x}_r \quad (5)$$

Nakon što uvrstimo derivacije u početnu jednačbu dobivamo konačnu jednačbu kretanja za okvir podvrgnut nekoj funkciji ubrzanja podloge (7):

$$m(\ddot{n}_g + \ddot{x}_r) + c\dot{x}_r + kx_r = 0, \quad (6)$$

odnosno

$$m\ddot{x}_r + c \cdot \dot{x}_r + kx_r = -m\ddot{n}_g, \quad (7)$$

gdje su:

m - masa tijela,

c - koeficijent prigušenja,

k - krutost sustava,

$x_r, \dot{x}_r, \ddot{x}_r$  – relativni pomaci mase obzirom na podlogu (oslonac/bazu) i njihove derivacije po vremenu (brzina i akceleracija),

$\ddot{n}_g$  - akceleracija tla ili baze (akceleracija potresa ili potresanje potresnog stola).

## 4. OPIS OPREME I MODELA

Svi opisani eksperimenti provedeni su u laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci koristeći opremu u nastavku, na modelu opisanom u dijelu 4.2.

### 4.1. Korištena oprema

#### 4.1.1. *Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M i upravljačka jedinica s GOM programskim paketom za 3D analizu pomaka i deformacija*

Optički mjerni sustav se sastoji od mjerne glave sa dvije kamere, nosača, kofera, laserskog pokazivača, kalibracijskog objekta, para leća, LED osvjetljenja i foto ćelija.

Sustav kamera se primjenjuje za 3D beskontaktno optičko mjerenje deformacija i pomaka. Na početku se cijeli sustav kalibrira, a zatim kamere snimaju tijekom eksperimenta na temelju praćenja površine ispitanog modela. Površina je označena crno-bijelim točkama kako bi uređaj mogao prepoznati površinu na svim fotografijama. Rezultat mjerenja su koordinate točaka na površini modela. [4]

Tehničke karakteristike sustava su:

- snimanje do 168 fps rezolucijom od 2400x1728 piksela, te do 1300 fps rezolucijom od 2400x168 piksela,
- jedan par leća žarišne dužine 20 mm pogodan za mjerne volumene od 25 x 90 mm<sup>2</sup> do 2150 x 1600 mm<sup>2</sup>,
- kalibracijski objekt za snimanje mjernog volumena od 350 x 260 mm<sup>2</sup> do 500 x 370 mm<sup>2</sup>



Slika 4. Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M

GOM programski paket uključuje programe Aramis i Pontos. Aramis programski paket koristi se za upravljanje 3D optičkim mjernim sustavom te pomoću njega obrađujemo podatke o deformacijama i naprezanjima na površini modela dok pomoću programskog paketa Pontos dobivamo informacije o ubrzanju točaka ili elemenata modela kojega koristimo, pomaku ili brzini.

Tehničke karakteristike upravljačke jedinice i programskog paketa su:

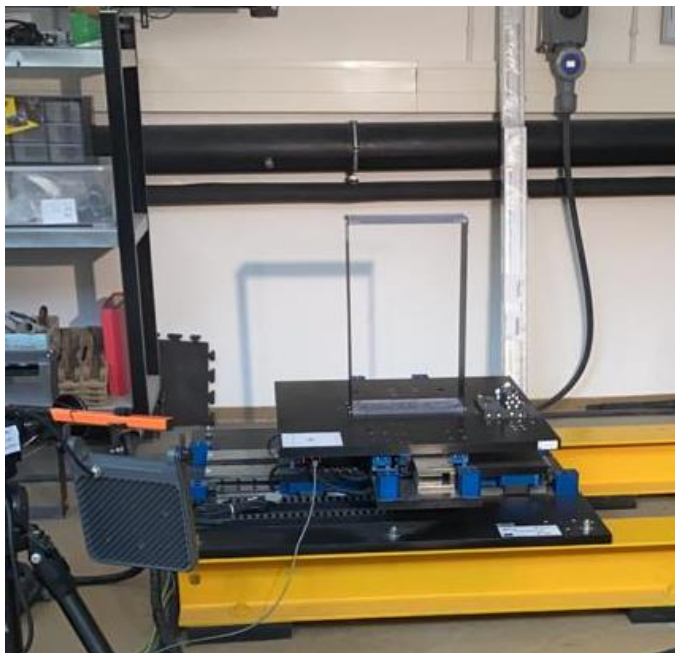
- računalo: 64GB RAM, 2 procesora 3.10 GHz,
- Aramis i Pontos softveri verzije v6. 3. 1 do v8.

#### 4.1.2. *Potresna platforma Quanser STI-III*

Sustav se sastoji od dvije dvoosne potresne platforme Quanser STI-III koje pokreće elektromagnetski motor, te uključuje kontrolnu hardware ploču, software te podložne ploče za dvoosne platforme. Potresne platforme imaju ulogu simuliranja dinamičke pobude, odnosno potresnih zapisa prilikom izrade eksperimentalnog dijela završnog rada. Platforme su neovisne jedna o drugoj te se mogu koristiti svaka zasebno ovisno o potrebama eksperimenta koji se provodi. Također je moguće zasebno provoditi dva eksperimenta u isto vrijeme jer se svaka platforma regulira zasebno. Prilikom eksperimenta za ovaj završni rad je korištena samo jedna platforma. Na Slici 5. je prikazan sustav potresne platforme. [4]

Tehničke karakteristike sustava su:

- tlocrtna dimenzija svake platforme  $625 \times 525 \text{ mm}^2$ ,
- hod svake platforme u svakom od dva smjera je 15 cm, a raspon radnih frekvencija između 0 i 20Hz,
- svaka platforma uz maksimalni teret od 130 kg može proizvesti ubrzanje do 1g u svakom od dva smjera,
- svaka platforma bez ikakvog tereta može proizvesti ubrzanje od 2,8g u x smjeru i 4,5g u y smjeru,
- osna udaljenost platformi može biti od 0 m do 2,5m.



Slika 5. Potresna platforma Quanser STI-III

#### 4.1.3. 3D printer Prusa i3 MK3S

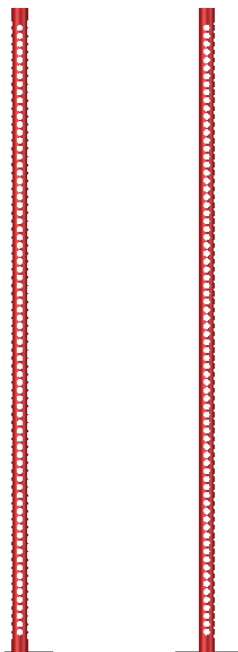
3D printer koji će se koristiti za ispisivanje dijagonala je marke Prusa i3 MK3 te koristi FFD tehnologiju (eng. *fused filament deposition*). Filament se spaja otapanjem te se takva tehnologija naziva još i „sjedinjavanje žarnom niti“ (eng. *fused filament fabrication*) (FFF). Filamenti su plastični materijali razvučeni u obliku žice te namotani na kolut. [5]

Postupak rada 3D printera je slijedeći; mlaznica izbacuje zagrijani filament taložeći ga u tankim slojevima jedan na drugi oblikujući 3D tijelo. Prije 3D printanja software razbija model na slojeve u kojima se izvodi printanje. Vrijeme printanja ovisi o postavkama brzine printanja, dimenzijama modela kao i o filamentu koji se koristi prilikom printanja.

Filament koji je korišten prilikom izrade dijagonala koje su se koristile za učvršćivanje jednokatne konstrukcije je TPU flex filament. TPU flex filament je promjera 1,75 mm. Prilikom printanja je filament potrebno zagrijati na 230-250 stupnjeva Celzijevih.

Prilikom modeliranja dijagonalnih štapova za učvršćivanje jednokatne konstrukcije je korišten program AutoCAD te su u njemu izrađeni 3D modeli. Dijagonalni štapovi su šuplji iznutra te

su zrakasto izbušeni kao što je prikazano na Slici 6. Visina printanog 3D modela iznosi 20 cm, promjer vanjskog ruba iznosi 0,05 cm, dok promjer unutarnje šupljine iznosi 0,03 cm.



Slika 6. Dijagonalni štapovi, prikaz iz AutoCAD-a

Postavke printanja se podešavaju u softveru proizvođača koji se zove PrusaSlicer. Nacrt iz AutoCAD-a je izvezen kao Lytography (.stl) dokument. Prilikom izbora filameta u PrusaSlicer programu, automatski se povlače podaci o potrebnoj temperaturi mlaznice i podloge. [6]

Tehničke karakteristike 3D printera:

- volumen dostupan za printanje: 25x21x21cm,
- debljina linije: 0,05-0,35 mm,
- promjer filameta: 1,75 mm,
- maksimalna brzina printanja: 200+ mm/s,
- površina printera se sastoji od odvojivih magnetskih čeličnih limova s različitim površinskim oblogama.

## 4.2. Opis modela

Prilikom izrade eksperimentalnog dijela korišten je okvir jednokatne konstrukcije visine 502 mm, širine 306 mm i debljine 108 mm. Okvir je sastavljen od krute ploče, vijaka, stijenki i pločica. Masa okvira je prikazana u Tablici 1. u poglavlju 5.1.

Sustav jednokatne konstrukcije, bez dijagonalnih štapova, koja je korištena prilikom izrade završnog rada sastavljen je od ploče, bočnih pločica, vijaka i stijenki. Ukupna masa sustava jednokatne konstrukcije korištena prilikom izrade završnog rada iznosi 741,5 g. Vrijednost masa svakog pojedinačnog elementa je prikazana u Tablici 1.

*Tablica 1. Masa jednokatne konstrukcije*

	Kom.	Masa [g]
Kruta ploča	1	467,8
Polovica stijenke	2	231,5
Vijak	6	12,6
Pločica	2	29,6
Ukupna masa okvira=		741,5

Kako bismo povećali krutosti modela dodali smo dijagonalne štapove. Modelirani su u AutoCADu i printani 3D printerom opisanim u poglavlju 4.1.3. Izrađeno je pet različitih vrsta dijagonalnih štapova (Slike 7.-11.), ali je za ispitivanje odabrana vrsta dijagonalnih štapova koji su zrakasto izbušeni i imaju šupljinu, model iz AutoCADa prikazan je na Slici 9. Primjeri dijagonalnih štapova su prikazani u nastavku zajedno sa dimenzijama.

Prva vrsta dijagonalnog štapa je potpuno ispunjeni štap bez zrakastih šupljina, prikazan je na Slici 7. Visina štapa iznosi 20 cm, a promjer 5 cm.





Slika 7. Ispunjeni dijagonalni štap bez šupljina

Slijedeći štap je izrađen zrakasto izbušen. Zrake kojima je bušen štap su udaljenje 10 mm i promjera 2 mm. Visina štapa je 200 mm i promjera 5 mm. Štap je ispunjen iznutra, prikazan je na Slici 8.



Slika 8. Ispunjeni dijagonalni štap zrakasto izbušen

Treća vrsta dijagonalnih štapova su štapovi sa šupljinom iznutra i zrakasto izbušeni. Promjer unutarnje šupljine štapa iznosi 3 mm, vanjski promjer je 5 mm, a visina štapa iznosi 200 mm. Zrakaste šupljine su na udaljenosti od 10 mm, a promjer zrakastih šupljina je 2 mm. Štap je prikazan na Slici 9.



Slika 9. Dijagonalni štap zrakasto izbušen sa unutarnjom šupljinom

Nakon što su isprintane prethodne 3 vrste dijagonalnih štapova utvrđeno je kako bi se štapovi mogli dodatno zrakasto izbušiti. Nakon toga su modelirane još dvije vrste štapova prikazane u nastavku.

Četvrta vrsta dijagonalnog štapa je modelirana tako da su zrake na udaljenosti od 2,5 mm, promjer zraka je ostao 2 mm, visina štapa je 200 mm, promjer štapa je 5 mm. Štap prikazan na Slici 10. je bez unutarnje šupljine.



Slika 10. Dijagonalni štap zrakasto izbušen bez unutarnje šupljine

Peta vrsta dijagonalnog štapa također ima zrakaste šupljine, ali od prethodnog modela se razlikuje samo po unutarnjoj šupljini. Sve dimenzije su kao i kod prethodnog dijagonalnog štapa. Štap je korišten prilikom ispitivanja provedenih na potresnom stolu, a na jednokatni model okvira je pričvršćen užetom. Uzdužni presjek dijagonalnog štapa je prikazan na Slici 11.



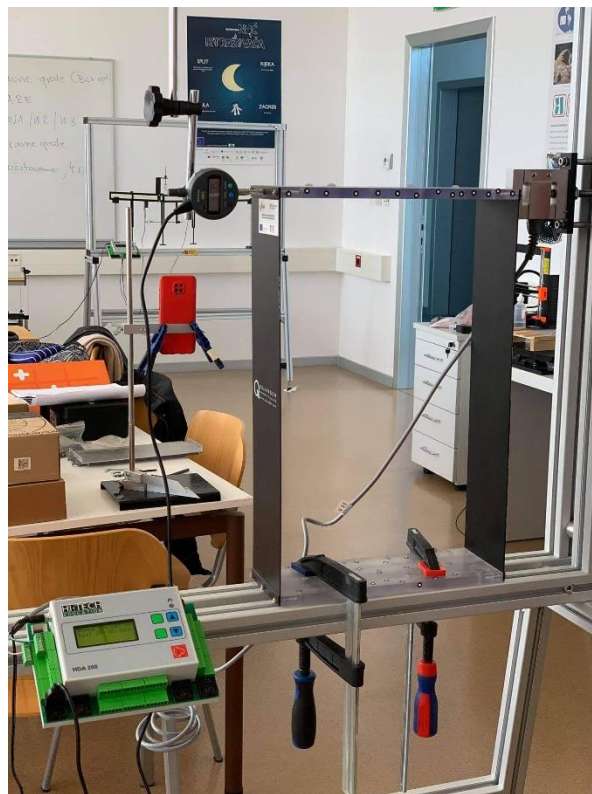
Slika 11. Dijagonalni štap zrakasto izbušen sa unutarnjom šupljinom

## 5. PROVEDENI EKSPERIMENTI

### 5.1. Krutost sustava bez dijagonalnih štapova

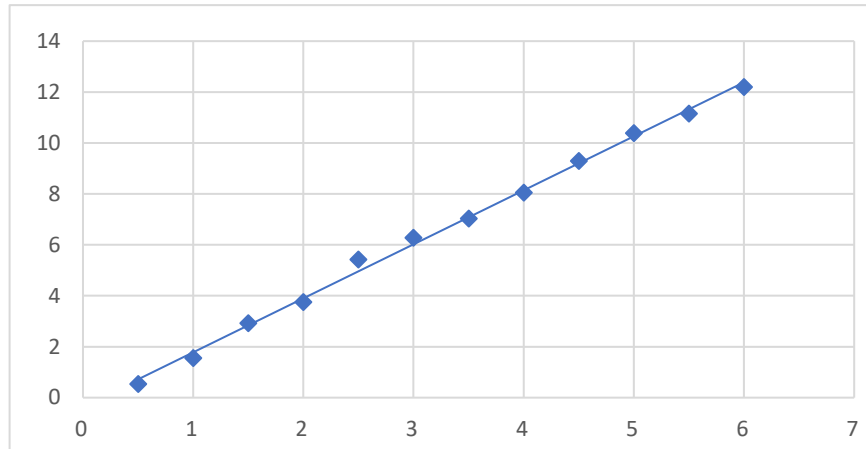
Prvo ispitivanje koje je provedeno u laboratoriju je ispitivanje krutosti sustava bez dijagonalnih štapova.

Krutost je dobivena tako da je okvir jednokatne konstrukcije, koji je dinamički ispitivan kasnije, pričvršćen za jedan veći, vanjski, okvir na kojemu je postavljen sustav za nanošenje sile i mjerni uređaj, to jest mikroura. Mjerenje je izvedeno na način da je namještena određena sila na sustavu za nanošenje sile te je na mikrouri očitana pomak kojega je ona izazvala na sustavu. Pomak je mjeren u milimetrima, a sila u Newtonima. Sustav je prikazan na Slici 12.



Slika 12. Sustav za mjerenje pomaka

Odnos između pomaka  $\Delta$  [mm] i sile  $F$  [N] prikazan je na Slici 13.



Slika 13. Odnos sile  $F$  [N] i pomaka  $\Delta$  [mm]

Opterećenje je na okvir nanoseno u intervalima od 0,5 N. U Tablici 2. su prikazani rezultati pomaka  $\Delta$  prilikom opterećivanja određenom silom te srednja vrijednost pomaka.

Izračunata krutost je omjer između sile i pomaka. U Tablici 2. su prikazane vrijednosti krutosti sustava za svaku nanosenu silu i srednja krutost, koja je korištena u nastavku analize.

Tablica 2. Vrijednost krutosti  $k$  [N/m]

SILA [N]	Pomak $\Delta$ [mm]	Pomak $\Delta$ [m]	Krutost [N/m]
0,5	0,54	0,00054	925,9259259
1	1,56	0,00156	641,025641
1,5	2,92	0,00292	513,6986301
2	3,76	0,00376	531,9148936
2,5	5,42	0,00542	461,2546125
3	6,28	0,00628	477,7070064
3,5	7,04	0,00704	497,1590909
4	8,05	0,00805	496,8944099
4,5	9,3	0,0093	483,8709677
5	10,39	0,01039	481,2319538
5,5	11,16	0,01116	492,8315412
6	12,2	0,0122	491,8032787

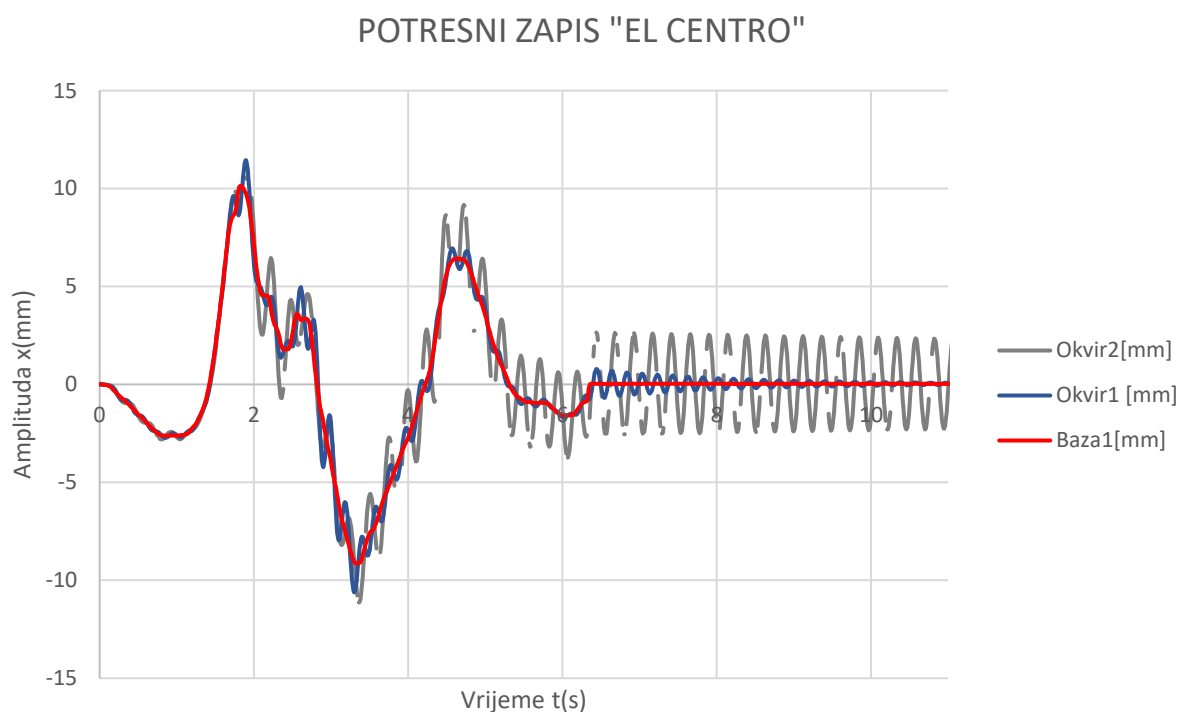
$$k = 541,276496$$

Srednja vrijednost krutosti dobivena ispitivanjem iznosi  $k = 0,541276$  N/mm.

## 5.2. Obrada podataka potresanja jednokatne konstrukcije sa dijagonalnim štapovima

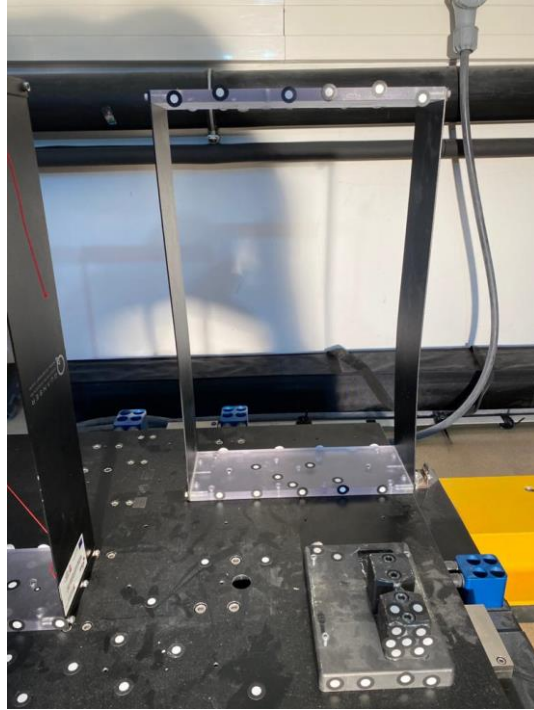
Eksperiment je proveden na potresnom stolu opisanom u poglavlju 4.1.2. Pobuda i odgovor modela snimani su optičkim mjernim sustavom opisanim u poglavlju 4.1.1.

Nakon provedenih eksperimenata podaci su obrađeni u programu GOM Correlate iz kojega su dobiveni dijagrami u kojima su jasno prikazane oscilacije okvira jednokatne konstrukcije bez dijagonalnih štapova i s dijagonalnim štapovima. Jedan od dijagrama koji je dobiven obradom podataka je prikazan na Slici 14.

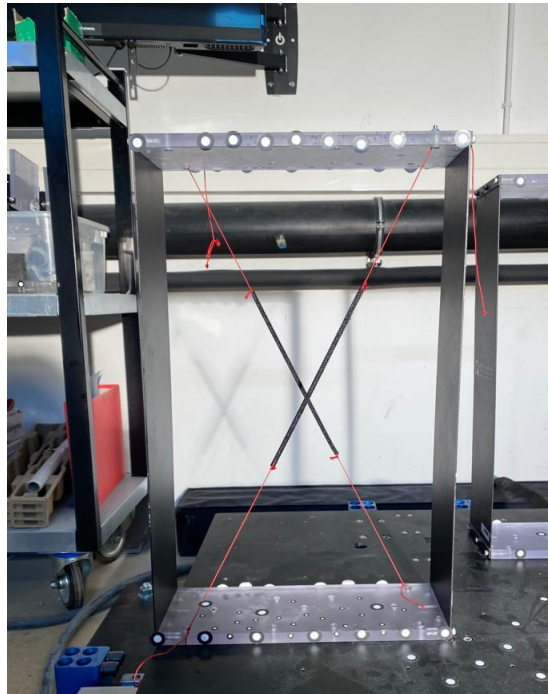


Slika 14. Oscilacije okvira prilikom potresnog zapisa "El Centro"

Na slici su jasno prikazani pomaci podloge (potresni zapisi) te oscilacije Okvira 1 i Okvira 2. Okvir 2 označava jednokatnu konstrukciju koja nema dijagonalne štapove, dok Okvir 1 označava jednokatnu konstrukciju koja ima dodane dijagonalne štapove. Slika 16. prikazuje Okvir 1 prilikom ispitivanja na potresnom stolu, dok Slika 15. prikazuje izgled Okvira 2 prilikom ispitivanja na potresnom stolu.



Slika 15. Okvir 2 prilikom ispitivanja na potresnom stolu



Slika 16. Okvir 1 prilikom ispitivanja na potresnom stolu

Korištenjem dobivenih vrijednosti iz Tablica 1. i 3. iz poglavlja 4.2.1. izračunata je vrijednost za vlastitu kružnu frekvenciju  $\omega_n$ , periodu  $T$  i frekvenciju  $f$  za okvir bez dijagonala:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{541,276496}{0,742}} = 27,009 \text{ rad/s}$$

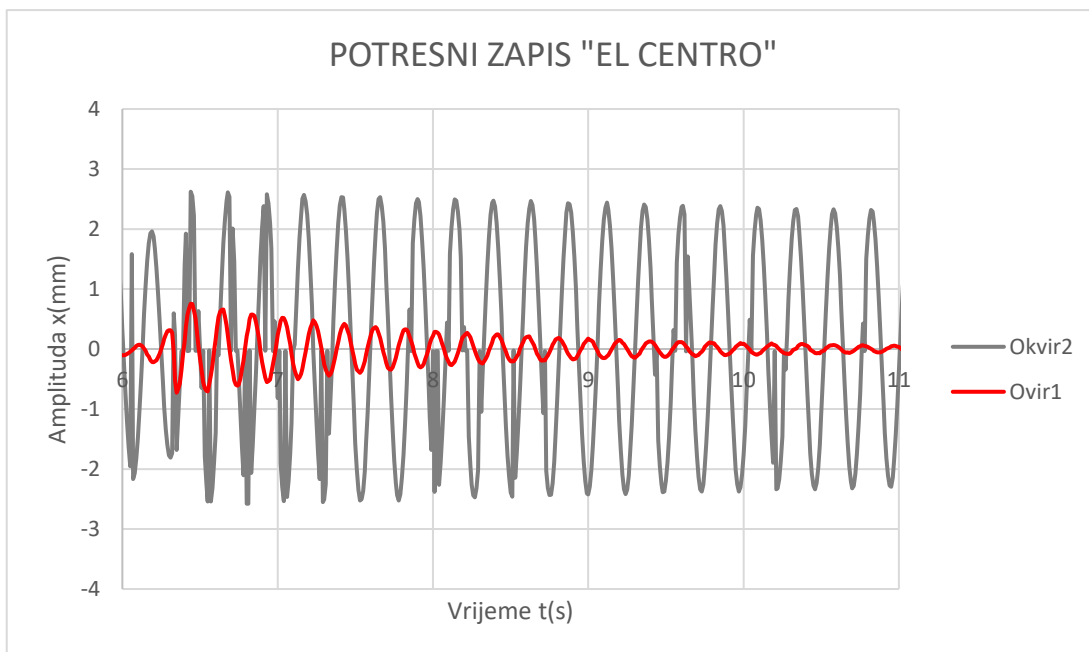
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{27,009} = 0,2326 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,2326} = 4,2986 \text{ Hz}$$

Od pomaka Okvira 1 i 2 su oduzeti pomaci Baze. Time su dobiveni relativni pomaci gornje etaže u odnosu na bazu. Period  $T$  je očitano iz dijagrama oscilacija na Slici 15.

### 5.2.1. Potresni zapis „El Centro“

Na Slici 15. su prikazane oscilacije Okvira 1 i Okvira 2 oko ravnotežnog položaja prilikom posljednjeg dijela provedbe eksperimenta za potresni zapis „El Centro“. U tom dijelu eksperimenta potresni stol miruje, dok okvir oscilira slobodnim prigušenim oscilacijama.



Slika 17. Prikaz pomaka nakon što se baza potpuno smiri

Iz prikazanog dijagrama na Slici 17. su iščitani podaci za period osciliranja  $T$  Okvira 1 i Okvira 2 za 10 uzastopnih amplituda. Amplitude se nalaze u Tablici 3. i Tablici 4.



### 5.2.1.1. Okvir s dijagonalnim štapovima

Tablica 3. Prikaz vremena i amplituda za Okvir 1 potresnog zapisa "El Centro"

Okvir 1- El Centro		
Broj	Vrijeme	Amplituda
1	438,86	0,653902
2	438,67	0,570861
3	438,47	0,522795
4	438,27	0,475698
5	438,07	0,421406
6	437,87	0,364434
7	437,68	0,329252
8	437,49	0,282849
9	437,28	0,269667
10	437,08	0,244653

Period osciliranja  $T$  prema navedenim podacima iz Tablice 3. iznosi 0,19 dok frekvencija za Okvir 1 iznosi:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,19} = 5,26316 \text{ Hz,}$$

a kružna frekvencija iznosi:

$$\omega = f2\pi = 5,26316 * 2\pi = 33,0694.$$

Kako bismo izračunali veličinu prigušenja okvira, izračunat je logaritamski dekrement  $\delta$  iz susjednih amplituda u slobodnim prigušenim oscilacijama iz formule[3]:

$$\delta_1 = \frac{1}{j} * \ln\left(\frac{u_1}{u_{j+1}}\right) = \frac{1}{10} * \ln(1,145466) = 0,013581$$

Rezultati logaritamskih dekremenata su prikazani u Tablici 4. Iz dobivenih rezultata je određena srednja vrijednost korištena za daljnji proračun.

Tablica 4. Logaritamski dekrement  $\delta$  modela sa dijagonalnim štapovima

	Logaritamski dekrement $\delta$
$\delta_1$	0,013581
$\delta_2$	0,0087956
$\delta_3$	0,009441
$\delta_4$	0,012119
$\delta_5$	0,014525
$\delta_6$	0,010152
$\delta_7$	0,015191
$\delta_8$	0,004773
$\delta_9$	0,009735

Srednja vrijednost logaritamskog dekrementa  $\delta = 0,010924$

Iz prethodnih podataka izračunat je odnos prigušenja  $\zeta$ :

$$\zeta_1 = \frac{1}{2\pi j} * \ln \frac{u_j}{u_{j+1}} = \frac{1}{2\pi 10} * \ln(1,145466) = 0,002162$$

Tablica 5. Prigušenje modela  $\zeta$  sa dijagonalnim štapovima

	Prigušenje $\zeta$
$\zeta_1$	0,002162
$\zeta_2$	0,001399
$\zeta_3$	0,001503
$\zeta_4$	0,001929
$\zeta_5$	0,002312
$\zeta_6$	0,001616
$\zeta_7$	0,002418
$\zeta_8$	0,00076
$\zeta_9$	0,001549

Srednja vrijednost prigušenja  $\zeta = 0,001739$

Vlastita kružna frekvencija za model sa dijagonalnim štapovima iznosi:

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,19} = 33,07$$

Iz podataka za odnos prigušenja  $\zeta$  je izračunata srednja vrijednost, a iz dobivenih vrijednosti izračunat koeficijent prigušenja  $c$ :

$$c_1 = \zeta * 2m * \omega_n = 0,001739 * 2 * 0,742 * 33,07 = 0,08534$$

### 5.2.1.2. Okvir bez dijagonalnih štapova

Tablica 6. Prikaz vremena i amplituda za Okvir 2 potresnog zapisa "El Centro"

Okvir 2 -El Centro		
Broj	Vrijeme	Amplituda
1	438,82	2,612469
2	438,57	2,576929
3	438,33	2,570385
4	438,09	2,529216
5	437,84	2,53023
6	437,6	2,500772
7	437,36	2,49354
8	437,11	2,473734
9	436,87	2,466109
10	436,63	2,428673

Period osciliranja T prema navedenim podacima u Tablici 4. iznosi 0,24 dok frekvencija za Okvir 2 iznosi:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,24} = 4,16667 \text{ Hz,}$$

Frekvencija  $f$  modela sa dijagonalnim štapovima je u odnosu na frekvenciju modela bez dijagonalnih štapova veća za 1,09649 Hz.

Kružna frekvencija za model bez dijagonalnih štapova iznosi:

$$\omega = f2\pi = 4,16667 * 2\pi = 26,18.$$

Logaritamski dekrement je izračunat iz susjednih amplituda u slobodnim prigušenim oscilacijama iz formule:

$$\delta_1 = \frac{1}{j} * \ln\left(\frac{u_1}{u_{j+1}}\right) = \frac{1}{10} * \ln(1,0137916) = 0,001370$$

Tablica 7. Logaritamski dekrement  $\delta$  modela bez dijagonalnih štapova

	Logaritamski dekrement $\delta$
$\delta_1$	0,00137
$\delta_2$	0,00025266
$\delta_3$	0,001615
$\delta_4$	-0,0000401
$\delta_5$	0,0011711
$\delta_6$	0,0002896
$\delta_7$	0,00079746
$\delta_8$	0,00030871
$\delta_9$	0,00152966

Srednja vrijednost logaritamskog dekrementa  $\delta = 0,00081045$

Iz prethodnih podataka izračunat je odnos prigušenja  $\zeta$ :

$$\zeta_1 = \frac{1}{2\pi j} * \ln \frac{u_j}{u_{j+1}} = \frac{1}{2\pi 10} * \ln \left( \frac{u_1}{u_{j+1}} \right) = 0,000218$$

Tablica 8. Prigušenje modela  $\zeta$  bez dijagonalnih štapova

	Prigušenje $\zeta$
$\zeta_1$	0,000218
$\zeta_2$	0,0000405
$\zeta_3$	0,000257
$\zeta_4$	-0,0000064
$\zeta_5$	0,000186
$\zeta_6$	0,0000461
$\zeta_7$	0,000127
$\zeta_8$	0,0000491
$\zeta_9$	0,0002435

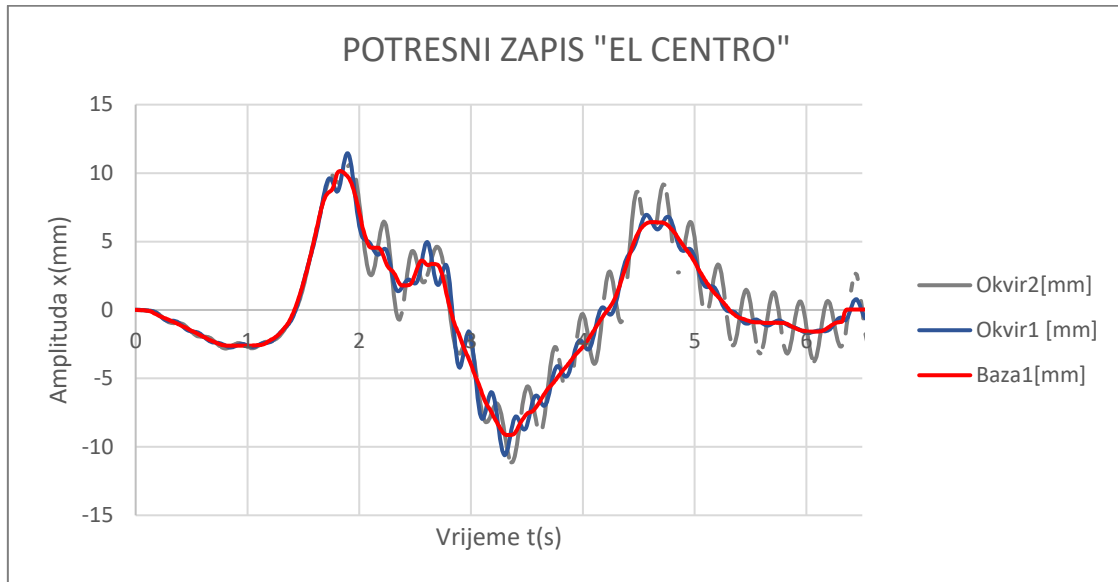
Iz podataka za odnos prigušenja  $\zeta$  je izračunata srednja vrijednost, a iz dobivenih vrijednosti izračunat koeficijent prigušenja  $c$ :

Srednja vrijednost prigušenja  $\zeta = 0,000129$

$$c_2 = \zeta * 2m * \omega_n = 0,000219 * 2 * 0,742 * 28,16 = 0,009152$$

Kružna frekvencija  $\omega_n$  je prethodno izračunata u poglavlju 5.2.

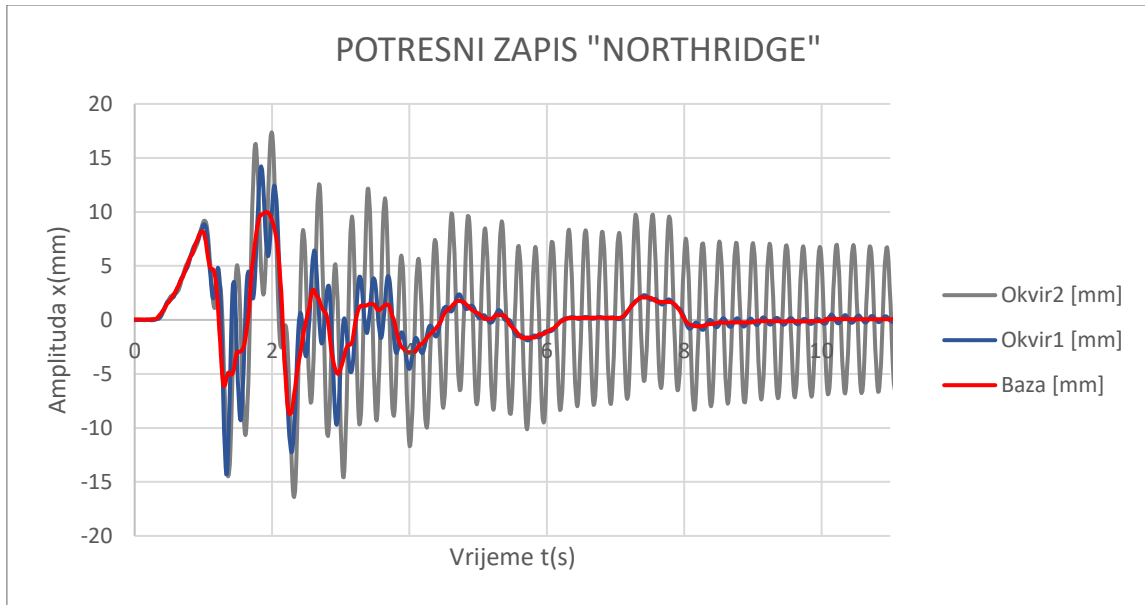
Podaci tijekom djelovanja potresnog zapisa El Centro prikazani su na Slici 18. Potresni zapis je u ispitivanju skaliran na najveći pomak od 1 cm.



Slika 18. Prikaz potresnog zapisa „El Centro“ prije nego se baza smiri

### 5.2.2. Potresni zapis „Northridge“

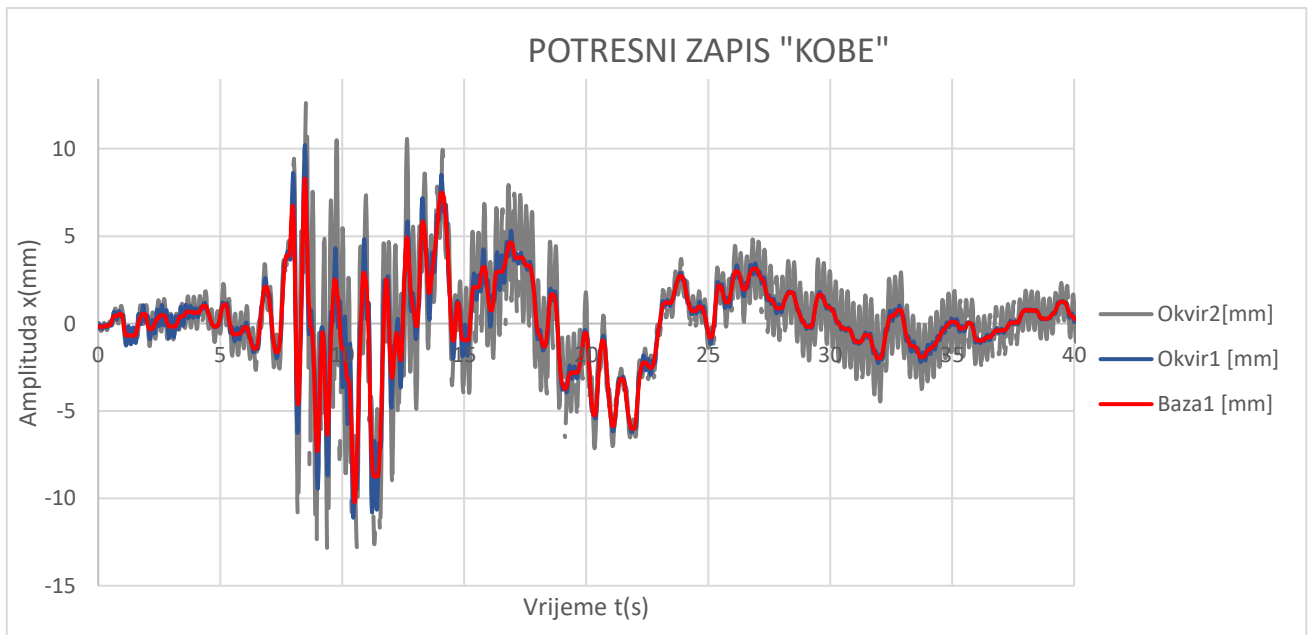
Podaci za potresni zapis Northridge (Slika 19.) dobiveni su obradom podataka oscilacija koje su dobivene optičkim mjernim sustavom opisanim u poglavlju 4.1.1. Potresni zapis je skaliran na najveći pomak potresne platforme od 1 cm.



Slika 19. Potresni zapis "Northridge"

### 5.2.3. Potresni zapis „Kobe“

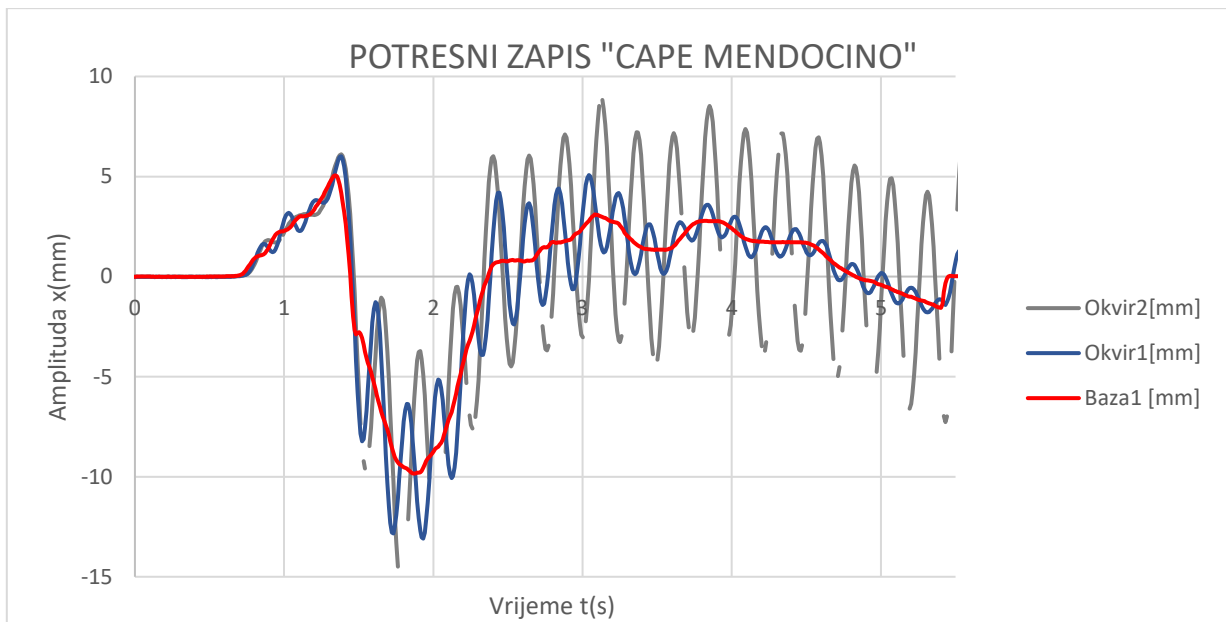
Podaci za potresni zapis Kobe (Slika 20.) dobiveni su obradom podataka oscilacija koje su dobivene optičkim mjernim sustavom opisanim u poglavlju 4.1.1. Potresni zapis je skaliran na najveći pomak potresne platforme od 1 cm.



Slika 20. Potresni zapis "Kobe"

#### 5.2.4. Potresni zapis „Cape Mendocino“

Podaci za potresni zapis Cape Mendocino (Slika 21.) dobiveni su obradom podataka oscilacija koje su dobivene optičkim mjernim sustavom opisanim u poglavlju 4.1.1. Potresni zapis je skaliran na najveći pomak potresne platforme od 1 cm.

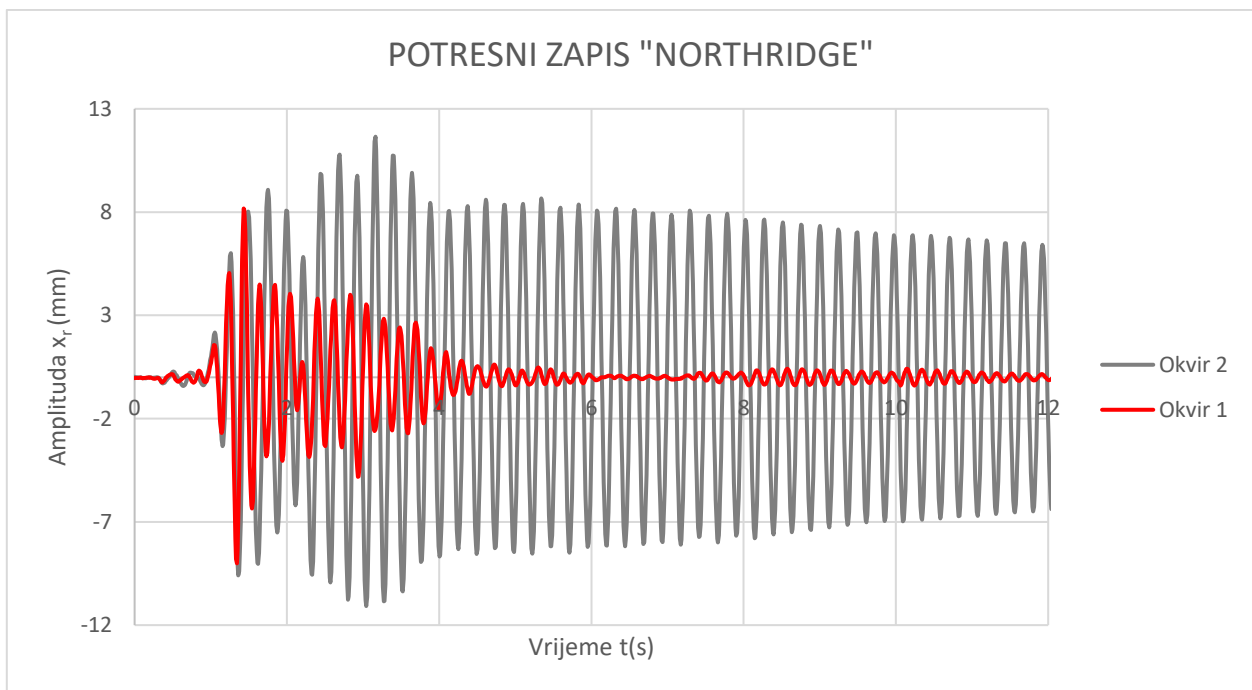


Slika 21. Potresni zapis "Cape Mendocino"

## 6. DISKUSIJA

U ovom poglavlju će biti dana usporedba relativnih pomaka za okvir bez i sa dodanom dijagonalnim štapovima kako bi na temelju toga mogli zaključiti da li i koliko dijagonalni elementi doprinose dinamičkom odgovoru okvira.

Relativni pomak potresnog zapisa Northridge Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu je prikazan na Slici 22.

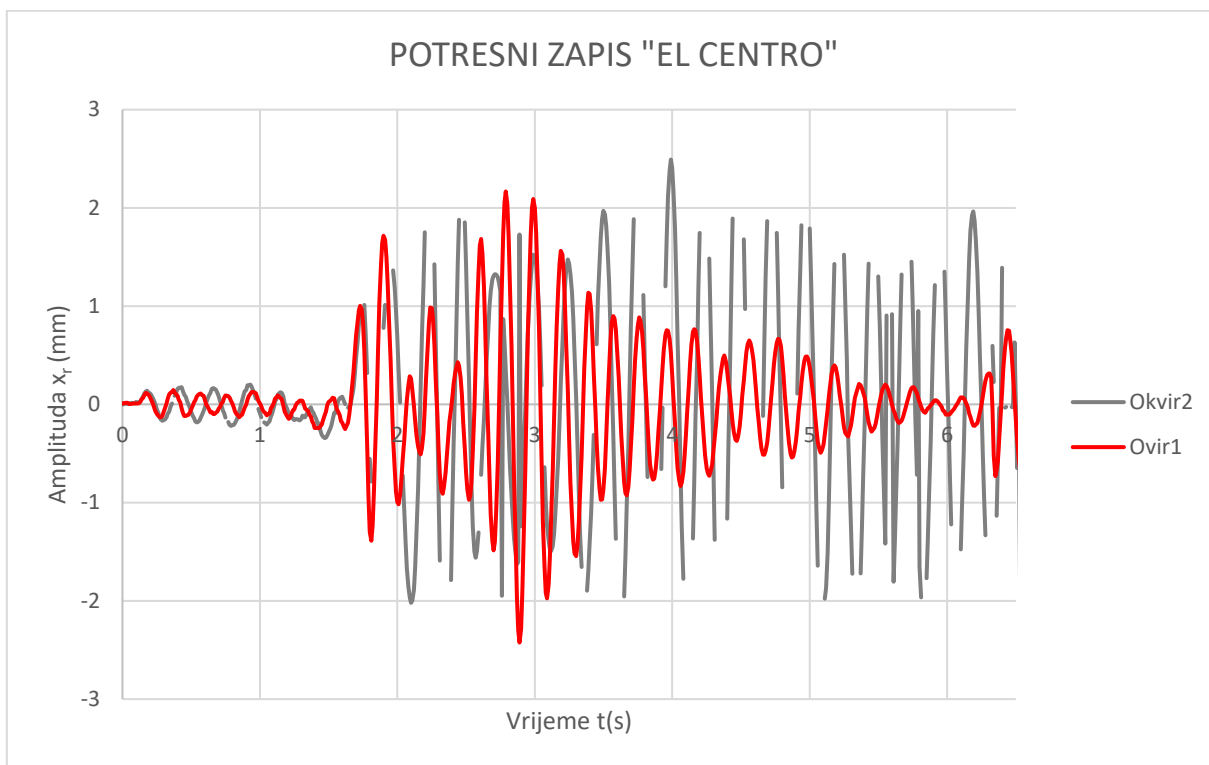


Slika 22. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu

Iz prikaza na Slici 22. je vidljivo kako su pomaci Okvira 2 puno veći od pomaka Okvira 1 te kako se amplituda oscilacija kod Okvira 1 smanjuje puno brže nego kod Okvira 2. Razlog prvome je veća krutost okvira koji ima dodane 3D printane dijagonalne elemente, a drugome gotovo 10 puta veće prigušenje kod okvira s dodanim dijagonalama (izračunato i u cjelini 5.2.1.). Početne oscilacije oba okvira su približno jednake, ali kako vrijeme odmiče tako dolazi i do sve veće razlike u oscilacijama. U dijelu dijagrama kada su oscilacije Okvira 1 približne nula, Okvir 2 i dalje pokazuje značajne oscilacije.



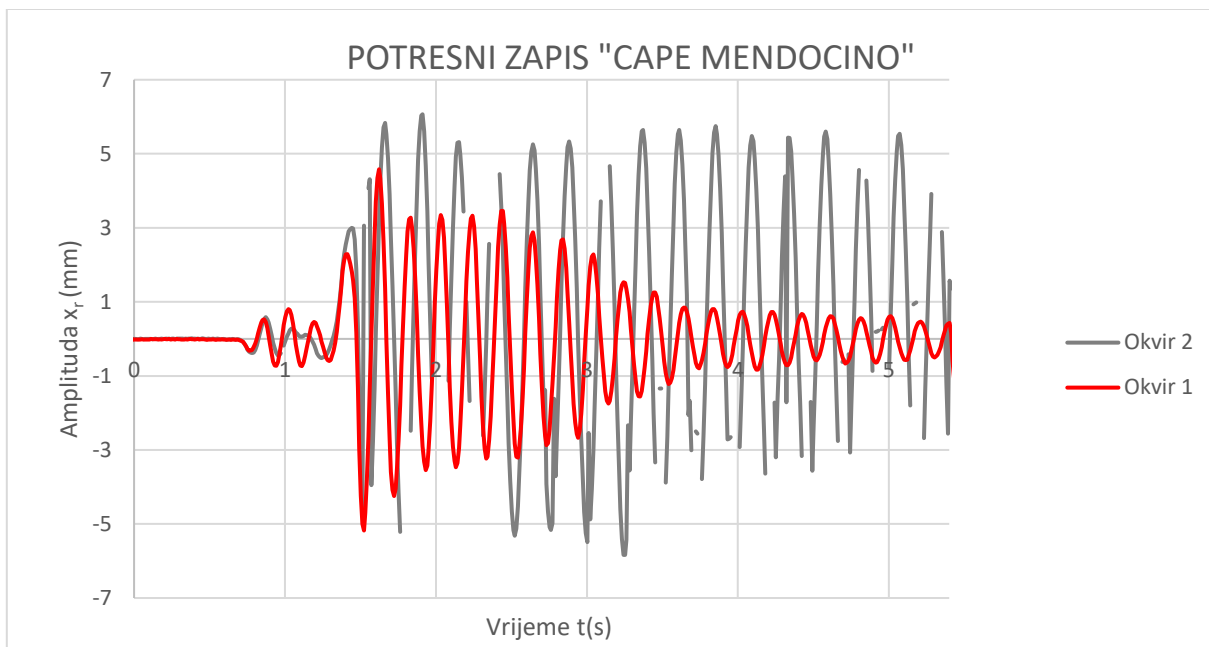
Relativni pomak potresnog zapisa El Centro Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu je prikazan na Slici 23.



Slika 23. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu

Potresni zapis El Centro je zapis u kojemu se kod 3,5s javljaju maksimalne oscilacije na Okviru 2, dok se na Okviru 1 maksimalne oscilacije javljaju u vremenu od 3s. Nakon tog vremenskog perioda se oscilacije Okvira 1 umiruju, dok kod Okvira 2 oscilacije nastavljaju u približno istim vremenskim razmacima i amplitudama.

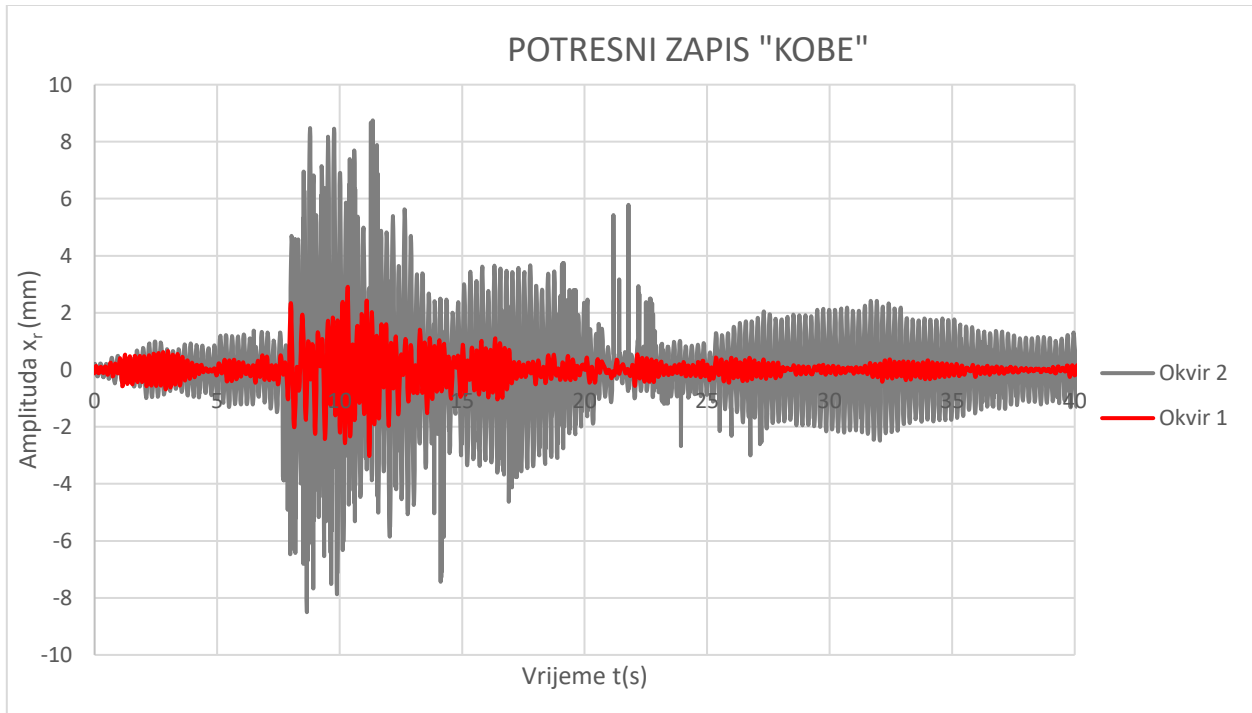
Relativni pomak potresnog zapisa Cape Mendocino Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu je prikazan na Slici 23.



Slika 24. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu

Potresni zapis Cape Mendocino je najkratkotrajniji potresni zapis za koji su provedeni eksperimenti na potresnoj ploči. Kod ovog potresnog zapisa su oscilacije na početnom dijelu dijagrama približno iste za oba okvira. Okvir 1 prije Okvira 2 doseže maksimalnu oscilaciju te se u dijelu kada su kod Okvira 2 oscilacije najveće, postupno umiruje. Okvir 2 tijekom većeg dijela vremena pokazuje približno jednake oscilacije.

Relativni pomak potresnog zapisa Kobe Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu je prikazan na Slici 24.



Slika 25. Prikaz pomaka Okvira 1 i Okvira 2 u odnosu na bazu

Potresni zapis Kobe je dugotrajan te su kod njega vidljive različite oscilacije u različitim vremenski intervalima. Na početku je potresni zapis slabiji, a zatim se oscilacije naglo povećavaju. U dijelu dijagrama od 7 s do 12 s su vidljive maksimalne oscilacije Okvira 1 i Okvira 2. Nakon tog perioda se potres djelomično umiruje, a zatim ponovno dolazi do njegovog jačanja, a time i povećanja amplituda oscilacija oba okvira. Kod Okvira 2 su oscilacije izražajnije, dok su kod Okvira 1 oscilacije manje. Razlog tome je veća krutost okvira koji ima dodane 3D printane dijagonalne elemente. Ovdje je, kao i u ostala 3 eksperimenta, primijećeno značajno brže smirivanje oscilacija Okvira 1, koji posjeduje bitno veći koeficijent prigušenja od Okvira 2.

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je najprije opisano određivanje jačine potresnih valova, vršno ubrzanje tla te ponašanje konstrukcije tijekom potresa. Ponašanje konstrukcije u nastavku rada je prikazano kroz analizu oscilacija jednostavnog jednokatnog okvira, njihovih amplituda i prigušenja prilikom potresanja različitim potresnim zapisima koji su se dogodili u povijesti.

Prije nego su provedeni eksperimenti na jednostavnom jednokatnom okviru odvrnutom potresnim zapisima, dizajnirane su i isprintane 3D printerom četiri vrste dijagonalnih štapova sa različitim brojem šupljina, koje će biti dodane jednokatnom okviru. Dijagonalni štapovi sa najviše šupljina korišteni su prilikom provedbe eksperimenata.

Eksperimenti su provedeni u Laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci na potresnoj platformi Quanser ST-III, a pomaci platforme su praćeni optičkim mjernim sustavom GOM mbH PONTOS 3D 4M.

Obradom podataka za svaki potresni zapis dobiven je dijagram koji prikazuje pomak baze i pomak okvira bez i sa dijagonalnim štapovima.

Provedenim eksperimentima na jednostavnom jednokatnom okviru utvrđeno je kako su oscilacije za okvir sa dijagonalnim štapovima znatno manje od oscilacija okvira bez dijagonalnih štapova, što je i bio cilj rada. U svim potresnim zapisima je primijećeno značajno brže smirivanje oscilacija, odnosno značajno veće prigušenje kod okvira kojemu je uvećana krutost dodavanjem dijagonalnih štapova.

U nastavku istraživanja bi se eksperimenti na jednokatnoj konstrukciji mogli provesti i sa preostalim isprintanim dijagonalnim štapovima te usporediti sa dobivenim rezultatima na prethodnom provedenim eksperimentima.

## 8. LITERATURA

- [1] “Potres – Wikipedija.” <https://hr.wikipedia.org/wiki/Potres#Objašnjenje> (accessed Sep. 19, 2021).
- [2] “Karte potresnih područja RH - IGIS | IGIS.” <http://www.i-gis.hr/index.php/9-vanjski/17-karte-potresnih-podrucja-rh> (accessed Sep. 19, 2021).
- [3] “Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering, 2nd edition,” *Earthquake Spectra*, vol. 17, no. 3. p. 549, 2001, doi: 10.1193/1.1586188.
- [4] “Katalog laboratorijske i terenske opreme Građevinskog fakulteta u Rijeci,” 2017.
- [5] “FDM 3D printing - Fused Deposition Modeling also know as FFF.” <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/fdm-3d-printing/> (accessed Sep. 19, 2021).
- [6] “Original Prusa i3 MK3S kit.” <https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/180-original-prusa-i3-mk3s-kit.html> (accessed Sep. 19, 2021).
- [7] C. Houqun, W. Shengxin, and D. Faning, “Determination of correlation design seismic motion parameters on dam Site,” *Seism. Saf. High Arch Dams*, pp. 53–81, 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803628-0.00003-3.