

# Dinamički odgovor jednokatnog modela s različitim krutostima ploče na pobudu podloge

---

Beljuli, Aldin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:157:206812>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



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

Aldin Beljulji

Dinamički odgovor jednokatnog modela s različitim krutostima ploče na pobudu podloge

Završni rad

Rijeka, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET  
Preddiplomski sveučilišni studij  
Mehanika 2

Aldin Beljulji

JMBAG : 0114036088

Dinamički odgovor jednokatnog modela s različitim krutostima ploče na pobudu podloge

Završni rad

Rijeka, rujan 2023

Zavod: **Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku**  
Predmet: **Mehanika II**  
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 25

Pristupnik: **Aldin Beljulji (0114036088)**  
Studij: **Građevinarstvo**

Zadatak: **Dinamički odgovor jednokatnog modela s različitim krutostima ploče na pobudu podloge**

### Opis zadatka:

Opisati dinamičko ponašanje jednokatnog okvira s deformabilnim stupovima i masom koncentriranom na vrhu pri seizmičkoj pobudi: izvesti jednadžbu kretanja za prisilne oscilacije, objasniti opterećenje od pomaka podloge i vlastitu frekvenciju okvira. Isplanirati i provesti eksperimentalna mjerenja dinamičkog odgovora dva okvirna modela pobuđena na potresnoj platformi: okvira s krutom pločom na vrhu, te okvira s deformabilnom pločom na vrhu. Ponašanje mjeriti optičkim mjernim sustavom, te obraditi podatke. Usporediti eksperimentalno dobivene podatke s računski dobivenima, usporediti ponašanje dva različita okvira, te donijeti zaključke.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.  
Rok za predaju rada: 20. rujna 2023.

Mentor: Doc. dr. sc. Nina Čeh

## IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i 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.

---

Aldin Beljulji

U Rijeci, rujan 2023.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Nini Čeh na uloženom trudu, pomoći i volji prilikom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se svim članovima svoje obitelji što su mi bili velika podrška tijekom studija.

## SAŽETAK

Završni rad se bavi proučavanjem i praćenjem dinamičkog odgovora jednostavne jednokatne konstrukcije na potresno opterećenje i to s naglaskom na razlike u ponašanju kod sustava koji imaju krute krovne konstrukcije i sustava kojima su krovne konstrukcije manje krutosti. Eksperimenti su provedeni u Laboratoriju za konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Rijeci pomoću potresne platforme na kojoj se nalazi jednokatni model i snimani optičkim mjernim sustavom. Ponašanje modela je praćeno tijekom pet eksperimenata, prvi u kojem smo pratili njihove slobodne oscilacije, a ostala četiri gdje su pobuđeni na različite potresne zapise. Na temelju tih rezultata se radi usporedba dinamičkog odgovora okvira sa krutom pločom i okvira sa deformabilnom pločom.

Ključne riječi : potresno opterećenje, jednokatni model, oscilacije, potresni zapis, dinamičke karakteristike

## **ABSTRACT**

This undergraduate thesis studies and observes the dynamic response of a simple one-story structure to seismic loading, with an emphasis on the differences in the behavior of systems with rigid roof structures and systems with deformable roof structures. The experiments were carried out in the Structures Laboratory at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka using a seismic platform on which the one-story model was attached, and recorded by an optical measuring system. The behavior of the models was monitored during five experiments, the first where we monitored their free oscillations, and the other four where they were excited with different seismic records. Based on these results, a comparison of the dynamic response of a frame with a rigid plate and a frame with a deformable plate is made.

Key words: seismic load, one-story model, oscillations, seismic record, dynamic characteristics



## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. POTRESI I NJIHOV UTJECAJ NA KONSTRUKCIJE .....	2
2.1. Uzroci nastanka potresa i potresni valovi .....	2
2.2. Utjecaj potresa na konstrukcije .....	6
3. JEDNADŽBA KRETANJA .....	9
4. KARAKTERISTIKE OPREME I MODELA .....	11
4.1. Oprema .....	11
4.1.1. Potresna platforma Quanser STI – III .....	11
4.1.2. Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M i upravljačka jedinica .....	12
4.2. Model .....	13
5. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA .....	17
5.1. Slobodne oscilacije .....	17
5.2. Potresni zapis „NORTHRIDGE“ .....	20
5.3. Potresni zapis „KOBE“ .....	21
5.4. Potresni zapis „EL CENTRO“ .....	24
5.5. Potresni zapis „CAPE MENDOCINO“ .....	26
6. ZAKLJUČAK .....	27
7. LITERATURA .....	28

## Popis slika

Slika 1 : Podjela Zemlje na tektonske ploče .....	3
Slika 2 : Longitudinalni val .....	3
Slika 3 : Transverzalni val .....	4
Slika 4 : Loveov val .....	5
Slika 5 : Rayleighjev val .....	5
Slika 6 : Ruševine u Skoplju 1963. godine .....	7
Slika 7 : Ruševine u Skoplju 1963. godine .....	7
Slika 8 : Ruševine u Petrinji 2020. godine .....	8
Slika 9 : Ruševine u Petrinji 2020. godine .....	8
Slika 10 : DST i DMA .....	10
Slika 11 : Pomak modela pri potresnom opterećenju : .....	11
a) model sa krutom pločom	
b) model sa deformabilnom pločom	
Slika 12 : Potresna platforma Quanser STI – III .....	13
Slika 13 : Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M .....	14
Slika 14 : Jednokatni model sa krutom pločom .....	15
Slika 15 : Jednokatni model sa deformabilnom pločom .....	17
Slika 16 : Jednokatni model sa deformabilnom pločom .....	17
Slika 17 : Dijagram apsolutnih pomaka krute ploče u vremenu .....	19
Slika 18 : Uvećani prikaz apsolutnih pomaka krute ploče u vremenu .....	20
Slika 19 : Dijagram apsolutnih pomaka deformabilne ploče u vremenu .....	21
Slika 20 : Uvećani prikaz apsolutnih pomaka deformabilne ploče u vremenu .....	21
Slika 21 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Northridge“ .....	22
Slika 22 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „Northridge“ .....	23
Slika 23 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Kobe“ .....	24
Slika 24 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Kobe“ .....	24
Slika 25 : Dijagram apsolutnih pomaka baze izazvanih potresom „Kobe“ .....	25
Slika 26 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „Kobe“ .....	25

Slika 27 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „El Centro“ .....	26
Slika 28 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „El Centro“ .....	27
Slika 29 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Cape Mendocino“ .....	28
Slika 30 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „Cape Mendocino“ .....	28

## Popis tablica

Tablica 1 : Masa jednokatnog modela sa krutom pločom .....	15
Tablica 2 : Rezultati ispitivanja krutosti okvira .....	16
Tablica 3 : Masa jednokatnog modela sa deformabilnom pločom .....	18

# 1. UVOD

Potres je nepoželjna i iznenadna prirodna pojava koja se događa zbog oslobađanja energije unutar ograničenog područja Zemlje, a nije ju moguće spriječiti ni točno predvidjeti. Geofizička disciplina koja se bavi proučavanjem nastanka potresa i njihovog utjecaja na objekte i samu građu Zemlje zove se seizmologija. Poznaje se da su najčešći uzroci potresa tektonski valovi i sile. [1] Potresi predstavljaju veliku opasnost za ljude, građevine i okoliš pa je stoga potrebno poduzeti korake kojima možemo spriječiti ili ublažiti djelovanja potresa kako oni ne bi izazvali velike štete. Između ostalog, jedan od tih koraka je bolje razumjeti dinamičko ponašanje konstrukcija provođenjem niza eksperimenata u laboratoriju. U laboratoriju se koriste umanjeni modeli koji prilično dobro oponašaju stvarnu konstrukciju, a i njihov odgovor na potresno opterećenje.

U ovom završnom radu želimo saznati koji će od dva okvira, bio to okvir sa krutom pločom ili sa deformabilnom pločom na vrhu imati manje oscilacije kada je podvrgnut potresnom opterećenju. Provedeno je u konačnosti pet eksperimenata na dva različita jednokatna modela. U prvom eksperimentu smo pratili njihove slobodne oscilacije prilikom kojih smo ručno nanijeli pomak, a u ostala četiri eksperimenta su okviri podvrgnuti dinamičkoj pobudi iz različitih potresnih zapisa. Optički smo izmjerili dinamičke odgovore na pobudu podloge te odredili pri kojoj frekvenciji je došlo do najvećih oscilacija. Svi podaci dobiveni optičkim mjerenjem su obrađeni i grafički prikazani. Na kraju su dane usporedbe dinamičkih odgovora dvaju okvira na pobudu podloge.

Redom su objašnjeni pojmovi potresa i njihovog utjecaja na konstrukcije. Zatim je izvedena jednadžba kretanja kako bismo sa razumijevanjem mogli provesti ove analize. Opisane su i općenite karakteristike opreme koja se koristila, kao i samih modela na kojima su vršeni eksperimenti te je na kraju opisano izvođenje eksperimenata i dana usporedba rezultata. Cilj ovog rada je vidjeti koji model ima bolje dinamičke karakteristike odnosno manje oscilacije pri dinamičkoj pobudi.

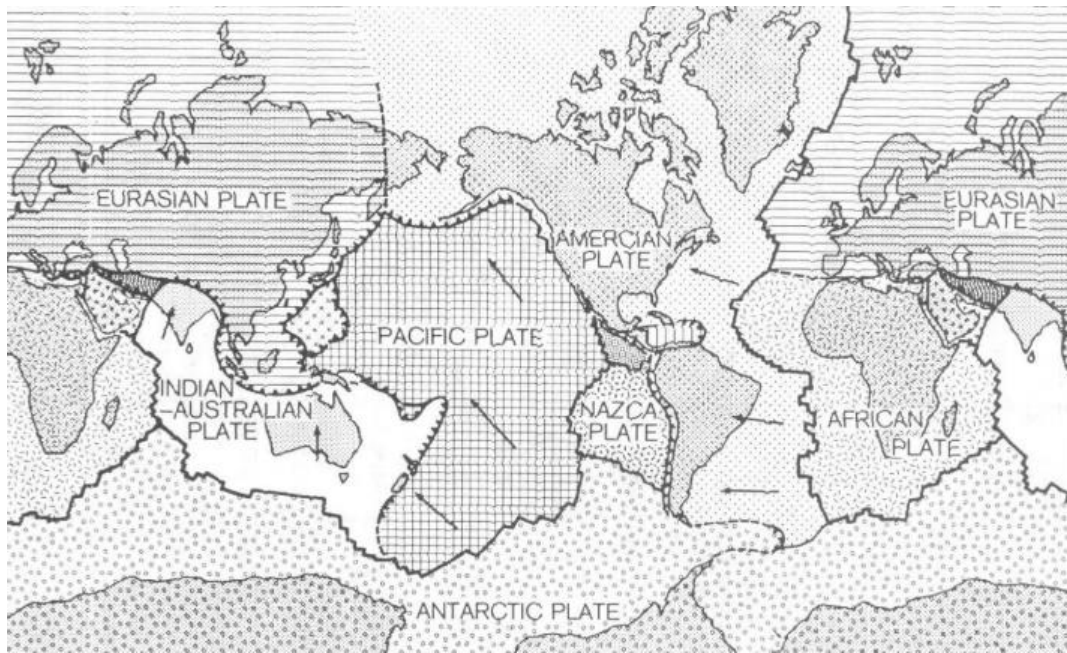
## **2. POTRESI I NJIHOV UTJECAJ NA KONSTRUKCIJE**

Potres je kratko periodično gibanje tla uzrokovano prirodnim silama u unutrašnjosti Zemlje, koje može biti toliko jako da ga ljudi osjete i da ga seizmografi zabilježe na širem području, a također može izazvati oštećenja i rušenje konstrukcija. Potres nastaje u trenutku pucanja stijene što znači da oslobođena energija jednim svojim dijelom prelazi u seizmičku energiju koja se sastoji od dva potresna vala, sporijeg transverzalnog i bržeg longitudinalnog vala. Zato možemo reći kako su potresi neizbježna pojava koja se događa već dugi period vremena. Unatoč tome prvi potres je zabilježen pomoću seizmografa tek u 19. stoljeću. [2]

### **2.1. UZROCI NASTANKA POTRESA I POTRESNI VALOVI**

Potresi se događaju u Zemljinoj kamenoj kori, odnosno u litosferi, a najčešće na mjestima dodira dviju tektonskih ploča koje se gibaju jedna u odnosu na drugu. Podjela tektonskih ploča se može vidjeti na slici 1. Osim tektonskih potresa razlikujemo i druge, poput vulkanskih potresa koji su izazvani podrhtavanjem Zemljine kore pri erupciji vulkana, ruševnih potresa koji su izazvani podrhtavanjem bočnih zidova i urušenih svodova podzemnih šupljina i umjetnih potresa, odnosno potresa uzrokovanih utjecajem čovjeka poput miniranja ili eksplozija. [3]

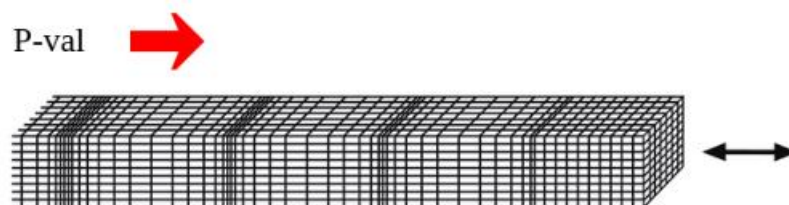
Važno je napomenuti da 90% svih potresa na Zemlji odlazi na tektonske potrese. Do samog gibanja tektonskih ploča dolazi zbog temperaturne razlike između vruće Zemljine jezgre i hladnije Zemljine površine. To uzrokuje rasjede i duž njih tektonske ploče naliježu jedna na drugu što dovodi do puno neravnina, uleguća i ispupčenja. Prilikom relativnih kretanja ploče na rasjedima oslobađa se energija koja se širi u svim smjerovima u obliku seizmičkih valova koji dolaze na površinu Zemlje i dolazi do potresa. [5]



Slika 1 : Podjela Zemlje na tektonske ploče [3]

Seizmički, odnosno potresni valovi se dijele na dvije osnovne skupine : prostorni i površinski valovi. [3]

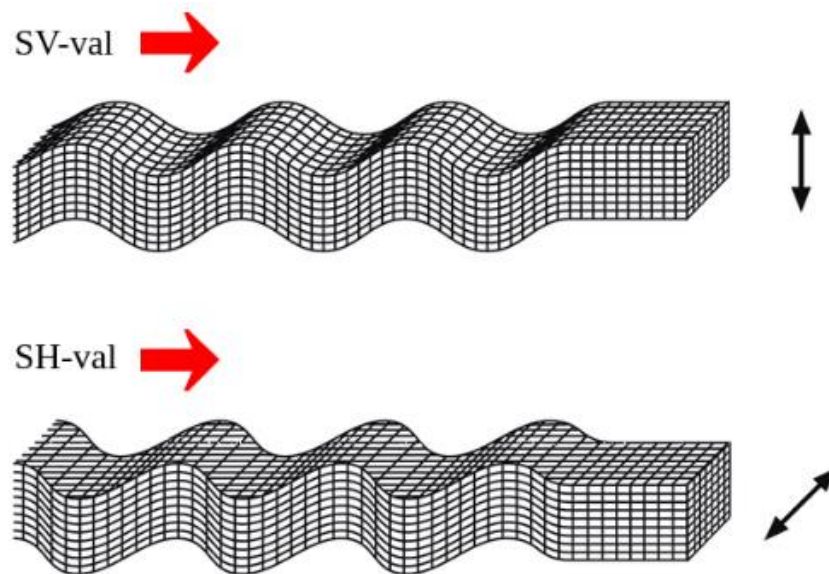
Prostorni valovi nastaju u samom žarištu potresa i putuju u svim smjerovima kroz Zemljinu unutrašnjost. Njih još možemo podijeliti na longitudinalne i transverzalne valove. Longitudinalni valovi su najbrži te su i primarni pa se mogu skraćeno zapisati P-valovi. Izazvani su normalnim napreznjima u materijalu i pripadnim deformacijama. Čestice osciliraju oko ravnotežnog položaja u pravcu širenja vala kao što je prikazano na slici 2. Zato što uzrokuju kompresiju, odnosno zbijanje sredstava kroz koje prolaze još ih nazivamo i kompresijskim valovima. [3]



Slika 2 : Longitudinalni val [5]

Za razliku od njih, transverzalni valovi su sporiji i oni se prenose titranjem čestica u smjeru okomitom na samo rasprostiranje vala. Također su i sekundarni valovi pa ih možemo zapisati kao S-valovi. Još ih zovemo i posmičnim valovima jer uzrokuju smicanje dijelova sredstava kroz koje prolaze. Iako su S-valovi sporiji, njihove amplitude mogu biti višestruko veće nego od amplitude P-valova, što znači da uzrokuju jače podrhtavanje tla i veće štete. [5]

Razlikujemo i SH-valove kod kojih dolazi do zbijanja i rastezanja čestica stijene, a kod SV-valova dolazi do smicanja odnosno titranja u smjeru poprečnom na smjer gibanja vala kao što prikazuje slika 3.

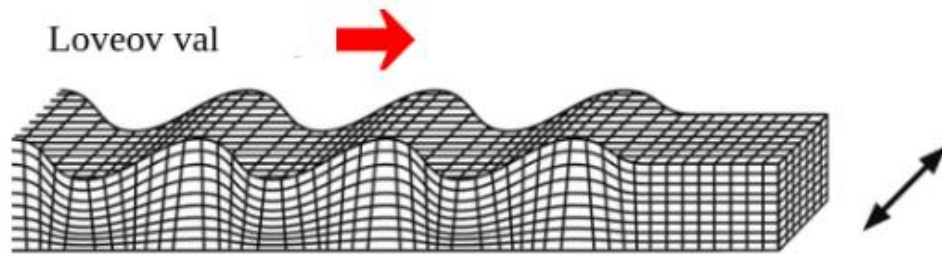


Slika 3 : Transverzalni val [5]

Druga osnovna skupina valova su površinski valovi koji se dijele na Loveove valove i Rayleighjeve valove. [3]

Loveovi valovi uzrokuju pomicanje čestica sredstava s jedne strane na drugu. Čestice im titraju poprečno na smjer gibanja vala kao na slici 4, a pošto su brži od Rayleighjevih valova, prije nailaze na prijemnik. [3]

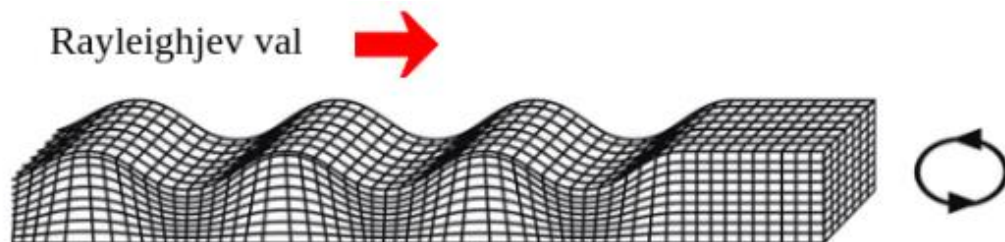




Slika 4 : Loveov val [5]

Rayleighjev val za razliku od Loveova vala ima i vertikalnu komponentu gibanja. U ovom slučaju čestice titraju po elipsama odnosno okomito na površinu Zemlje kao na slici 5. Kod ovakvih valova kako se elipsa povećava tako se amplituda smanjuje. Poznati su kao valovi prizemnog kotrljanja. [3]

Slika 5 :



Rayleighjev val [5]

Spominjući amplitude, odnosno veličinu pomaka, njih možemo odrediti na osnovi magnitude. Magnituda potresa je veličina je razmjerna energiji potresnih valova oslobođenih u žarištu potresa i jednaka je u svim seizmološkim postajama koje bilježe potres. Ljestvica preko koje se izražava magnituda je Richterovaljestvica i razvrstana je u 10 magnituda. [5]

## 2.2. UTJECAJ POTRESA NA KONSTRUKCIJE

Kroz povijest, potresi su svojim djelovanjima nanijeli velike štete, ne samo ljudskim životima već i na raznim građevinama. Prilikom potresa dolazi do gibanja tla i podloge, odnosno oslonca građevine. Gibanje se sa tla prenosi na samu građevinu što uzrokuje njeno osciliranje i vibriranje. Do najvećih gibanja i oscilacija dolazi kada se frekvencija potresa podudara sa frekvencijom same zgrade, odnosno kada dođe do rezonancije. Što se frekvencije duže podudaraju to dolazi do većih i jačih oscilacija što dovodi građevinu u stanje deformiranja, a na koncu i do rušenja. Kako bi to spriječili ili bolje rečeno, umanjili, brojni stručnjaci, uključujući inženjere i seizmologe su pokušali naći način za pouzdanije projektiranje građevina, što nas dovodi do protupotresne gradnje. Danas to uključuje pridržavanje skupa propisa pod nazivom Eurokod 8, gdje se mogućnost potresa uključuje i u projektiranje i u gradnju.

Prvi detaljniji pravilnik je na snagu stupio 1963. godine, povodom potresa u Skoplju što znači da su građevine izgrađene poslije 1963. prilično otporne na djelovanje potresa, za razliku od onih koje su izgrađene prije navedene godine. Starije zgrade su najčešće građene od opeke ili drva, te nisu bile niti projektirane niti građene kako bi izdržale opterećenja potresom [4]

Za primjer utjecaja potresa na građevine se može uzeti upravo potres na našim područjima bivše Jugoslavije, u Sjevernoj Makedoniji u Skoplju, gdje se 1963. godine dogodio potres magnitude 6,9 na Richterovoj ljestvici. Tada je srušeno više od 75 % zgrada i kuća te ostavilo oko 200 tisuća stanovnika bez krova nad glavom. [6] Na slikama 6 i 7 se mogu vidjeti neke od ruševina.



Slika 6 : Ruševine u Skoplju 1963. godine [6]



Slika 7 : Ruševine u Skopju 1963. godine [6]

Također potres koji je privukao veliku pažnju na našim područjima je potres kod Petrinje 2020. godine. Najjači potres je bio magnitude 6,2 po Richterovoj ljestvici na dubini od 10 km kao rezultat plitkog rasjeda klizanja unutar Euroazijske ploče. Potres se osim u Petrinji osjetio i u drugim državama, poput Bosne i Hercegovine gdje su u više gradova na sjeverozapadu građevine pretrpjele oštećenja i poput Slovenije gdje su u nekim područjima i gradovima na slovensko – hrvatskoj granici također vidljiva oštećenja na pojedinim građevinama. Gradovi poput Zagreba, Siska, Karlovca i drugih su isto pogođeni potresom. [7] Na slikama 8 i 9 se mogu vidjeti ruševine kuća i zgrada.



Slika 8 : Ruševine u Petrinji 2020. godine [7]



Slika 9 : Ruševine u Petrinji 2020. godine [7]

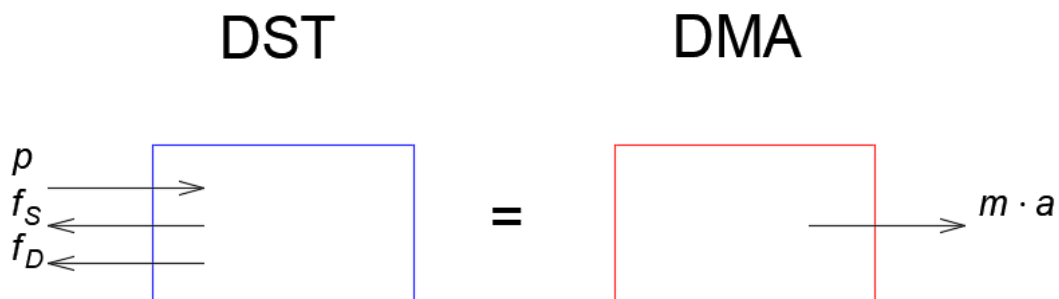
Uzimajući u obzir sve prije navedene potrebe, naša ideja je vidjeti da li promjena krutosti utječe na veličinu pomaka konstrukcije pri potresnim opterećenjima. Kako bismo spriječili ili umanjili urušavanje objekata, potrebno je bolje razumjeti dinamički odgovor konstrukcija, a u svrhu toga ćemo ovdje izvesti eksperimente na umanjenim modelima. Rezultati će nam reći koji je model i s kojom krutošću imao bolji odgovor na potresno opterećenje.

### 3. JEDNADŽBA KRETANJA

Analiziran je jednokatni model koji se sastoji od dva bočna zida, baze, vijaka i šaraka te krute ili deformabilne ploče na vrhu.

Prvi korak za određivanje dinamičkog odgovora jednokatnog modela je izvođenje jednadžbe kretanja pomoću drugog Newtonovog zakona. Jednadžba kretanja se dobiva izjednačavanjem dijagrama slobodnog tijela (DST) i dijagrama masa puta ubrzanje (DMA).

Sile koje djeluju na masu tijela iz DST – a su vanjska sila  $p$ , elastična sila  $f_S$  i sila prigušenja  $f_D$ . Dok iz DMA djeluje sila koja je umnožak mase i ubrzanja kao što se može vidjeti na slici 10.



Slika 10 : DST i DMA

Preko drugog Newtonovog zakona proizlazi jednakost:

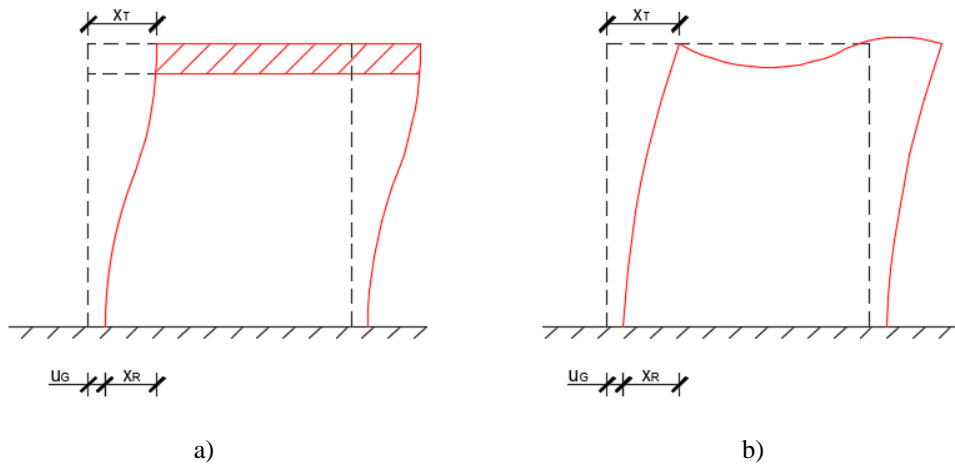
$$-f_S - f_D + P = m \cdot a \quad (1)$$

Gdje su elastična sila i sila prigušenja jednake:

$$f_S = k \cdot x_R, \quad (2)$$

$$f_D = c \cdot \dot{x}_R, \quad (3)$$

Na slici 11 su prikazani apsolutni i relativni pomak ploča.



Slika 11 : Pomak modela pri potresnom opterećenju : a) model sa krutom pločom

b) model sa deformabilnom pločom

Uvođenjem jednačbi (2) i (3) u jednačbu (1) dobivamo sljedeći izraz:

$$-k \cdot x_R - c \cdot \dot{x}_R + P = m \cdot \ddot{x}_T \quad (4)$$

Sređivanjem jednačbe (4) dobivamo sljedeću jednačbu:

$$k \cdot x_R + c \cdot \dot{x}_R + m \cdot \ddot{x}_T = -P \quad (5)$$

Izraz za ukupni odnosno totalni pomak možemo zapisati pomoću slike (11) koji glasi:

$$x_T = u_G + x_R \quad (6)$$

Pomoću derivacije jednačbe (6) po vremenu dobivamo sljedeće zapise:

$$\dot{x}_T = \dot{u}_G + \dot{x}_R \quad (7)$$

$$\ddot{x}_T = \ddot{u}_G + \ddot{x}_R \quad (8)$$

Uvođenjem jednačbe (8) u jednačbu (5) dobivamo jednačbu kretanja:

$$k \cdot x_R + c \cdot \dot{x}_R + m \cdot (\ddot{u}_G + \ddot{x}_R) = 0 \quad (9)$$

Kada sredimo jednačbu (9) dobivamo konačni izraz jednačbe kretanja:

$$k \cdot x_R + c \cdot \dot{x}_R + m \cdot \ddot{x}_R = -m \cdot \ddot{u}_G, \quad (10)$$

gdje su:

$k$  – krutost,

$c$  - koeficijent prigušenja,

$m$  - masa tijela,

$x_R$  – relativni pomak mase u odnosu na podlogu,

$x_T$  – apsolutni pomak mase u odnosu na podlogu,

$\dot{x}_R$  – brzina (derivacija relativnog pomaka po vremenu),

$\ddot{x}_R$  – ubrzanje (derivacija brzine po vremenu),

$\ddot{u}_G$  – ubrzanje podloge uzrokovano djelovanjem potresnog stola.



## 4. KARAKTERISTIKE OPREME I MODELA

### 4.1. OPREMA

Ekperimente ne bi bilo moguće izvesti da nema opreme koja pripada Građevinskom fakultetu u Rijeci koja se sastoji od potresne ploče Quanser STI – III i optičkog mjernog sustava GOM mbH PONTOS 3D 4M i njegove upravljačke jedinice.

#### 4.1.1. Potresna platforma Quanser STI – III

Na slici 12 se nalazi sustav koji je pokretan elektromagnetskim motorom, a sastoji se od dvije dvoosne potresne platforme na kojima se ispituje utjecaj dinamičke pobude poput potresa i slično na modelima. Dvije platforme se mogu koristiti odvojeno i također se mogu istovremeno koristiti za dva različita ispitivanja, a ispitani model može biti oslonjen i na jednoj i na drugoj platformi. Dok se ispitivanje odvija na obje platforme istovremeno je dopuštena veća maksimalna masa, a pobuda koju one proizvode može biti jednaka ili različita. Dimenzije širine i duljine platforme iznosi  $625 \times 625 \text{ mm}^2$ . Pomaci svake platforme u svakom od dva smjera iznosi 15 cm, dok raspon radnih frekvencija varira između 0 i 20 Hz. Osnovna udaljenost platformi može iznositi od 1 m do 2,5 m. [8]



Slika 12 : Potresna platforma Quanser STI – III [8]

#### 4.1.2. Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M i upravljačka jedinica

Sastoji se od kalibracijskog objekta, mjerne glave s dvije kamere, nosača, kablova, para leća, laserskog pokazivača, kofera, foto ćelija, LED osvjetljenja kao što se može vidjeti na slici 13. Primarna svrha mu je 3D beskontaktno optičko mjerenje pomaka i deformacija. Nakon početne kalibracije, cijeli tijek eksperimenta je sniman kamerama i na temelju praćenja površine ispitanog modela, koja se mora na odgovarajući način obraditi, kao rezultat daju podatke o položaju točaka na površini modela. Kalibracijski objekt za snimanje mjernog volumena je preko 2000 mm<sup>2</sup>. [8]

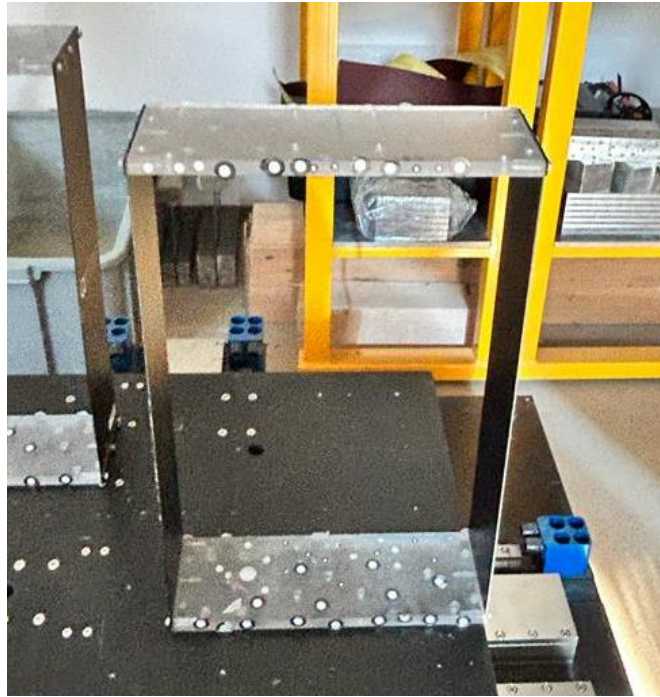


Slika 13 : Optički mjerni sustav GOM mbH PONTOS 3D 4M [8]

#### 4.2. MODEL

Jednadžbu kretanja i ponašanje samog modela možemo dobiti poznavajući potrebne parametre poput mase, krutosti i koeficijenta prigušenja.

Radi se o jednokatnom modelu visine 502 mm, širine 306 mm i debljine 108 mm. Koristili smo dva različita modela. Prvi model se sastoji od krute ploče, dvije bočne ploče (zidovi), šest vijaka i dvije podložne pločice kao što prikazuje slika 14.



Slika 14 : Jednokatni model sa krutom pločom

Mase pojedinačnih elemenata i ukupna masa se mogu vidjeti u Tablici 1.

Element	Kom.	Masa [ g ]	Ukupna masa [ g ]
kruta ploča	1	467,80	467,80
½ bočnih ploča	2	231,50	231,50
vijak	6	2,10	12,60
podložna pločica	2	14,80	29,60
Ukupna masa			741,50

Tablica 1 : Masa jednokatnog modela sa krutom pločom

Kako bismo dobili krutost, moramo nanesti silu u inkrementima od 0,50 N iz čega dobivamo sljedeću formulu:

$$k = \frac{F}{x}, \quad (11)$$

gdje nam F predstavlja silu, a x predstavlja pomak. Iz tablice 2 se mogu očitati podaci. [9]

silu [N]	pomak [mm]	krutost [N/m]
0,50	0,00054	925,93
1,00	0,00156	641,03
1,50	0,00292	513,70
2,00	0,00376	531,91
2,50	0,00542	461,25
3,00	0,00628	477,71
3,50	0,00704	497,16
4,00	0,00805	496,89
4,50	0,00930	483,87
5,00	0,01039	481,23
5,50	0,01116	492,83
6,00	0,12200	491,80
krutost		541,28

Tablica 2 : Rezultati ispitivanja krutosti okvira [9]

Pomoću mase i krutosti možemo dobiti kutnu brzinu  $\omega$  koja nam je kasnije potrebna za izračun frekvencije  $f$  i periode  $T$ .

Krutost cijelog okvira sa krutom pločom bez donjeg dijela iznosi  $k = 541,30$  N/m, a masa je  $m = 741,50$  g.

Izraz za kružnu frekvenciju  $\omega$  glasi:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{541,30}{0,7415}} = 27,02 \text{ rad/s} \quad (12)$$

Frekvenciju  $f$  možemo izraziti sljedećim zapisom:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{27,02}{2 \cdot \pi} = 4,30 \text{ Hz} \quad (13)$$

Recipročnom vrijednošću dobivamo izraz za periodu  $T$ :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{4,30} = 0,233 \text{ s} \quad (14)$$

Drugi model se sastoji od deformabilne ploče, dvije bočne ploče na dnu (zidova), šest vijaka i dvije podložne pločice kao što prikazuju slike 15 i 16.



Slika 15 : Jednokatni model sa deformabilnom pločom



Slika 16 : Jednokatni model sa deformabilnom pločom

Mase pojedinačnih elemenata i ukupna masa se mogu vidjeti u Tablici 3.

Element	Kom.	Masa [ g ]	Ukupna masa [ g ]
deformabilna ploča	1	186,30	186,30
½ bočnih ploča	2	231,50	231,50
vijak	6	2,10	12,60
Ukupna masa			430,40

Tablica 3 : Masa jednokatnog modela sa deformabilnom pločom

S obzirom da deformabilna ploča i bočne ploče imaju približno jednak modul elastičnosti  $E$  i moment inercije  $I$ , krutost okvira sa deformabilnom pločom možemo dobiti iz uvjeta  $EI_b = EI_c$  preko sljedećeg izraza: [10]

$$k = \left( \frac{96}{7} \cdot \frac{E \cdot I}{h^3} = \frac{96}{7} \cdot \frac{70000 \cdot \frac{108 \cdot 1,54^3}{12}}{502^3} \right) \cdot 1000 \quad (15)$$

$$k = 249,44 \text{ N/m}$$

Pomoću mase i krutosti dobivamo izraz za kružnu frekvenciju  $\omega$  koji glasi:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{249,44}{0,4304}} = 24,07 \text{ rad/s} \quad (16)$$

Frekvenciju  $f$  možemo izraziti sljedećim zapisom:

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{24,07}{2 \cdot \pi} = 3,83 \text{ Hz} \quad (17)$$

Recipročnom vrijednošću dobivamo izraz za periodu  $T$ :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{3,83} = 0,26 \text{ s} \quad (18)$$

## 5. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

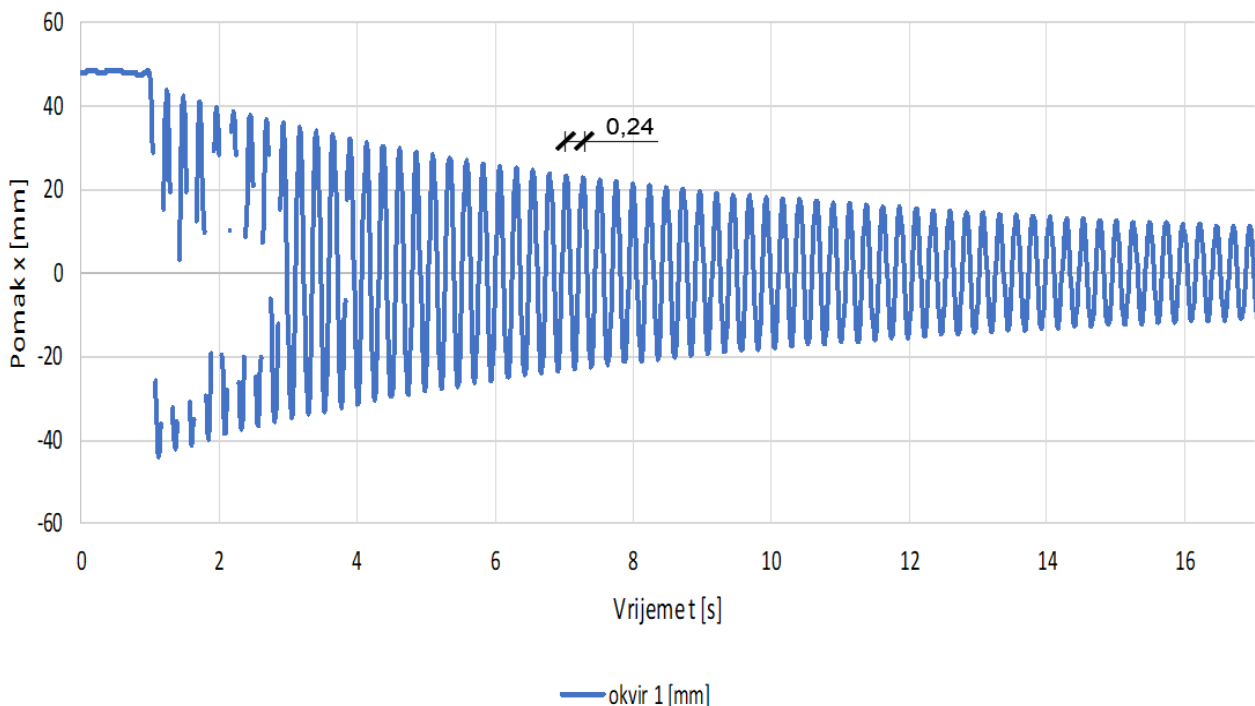
### 5.1. Slobodne oscilacije

U eksperimentu 3 smo na oba jednokatna modela (sa krutom i sa deformabilnom pločom) pobudili slobodne oscilacije. Drugačije rečeno, na oba modela smo pomak nanijeli ručno kako bismo mogli usporediti dugotrajnost njihovih perioda  $T$  i njihove frekvencije  $f$ . Također cilj nam je usporediti vrijednosti perioda  $T$  i frekvencija  $f$  iz eksperimenta sa vrijednostima koje smo dobili u proračunu. U narednim eksperimentima okvir 1 predstavlja model sa krutom pločom, a okvir 2 predstavlja model sa deformabilnom pločom.

Prema proračunu te vrijednosti glase:

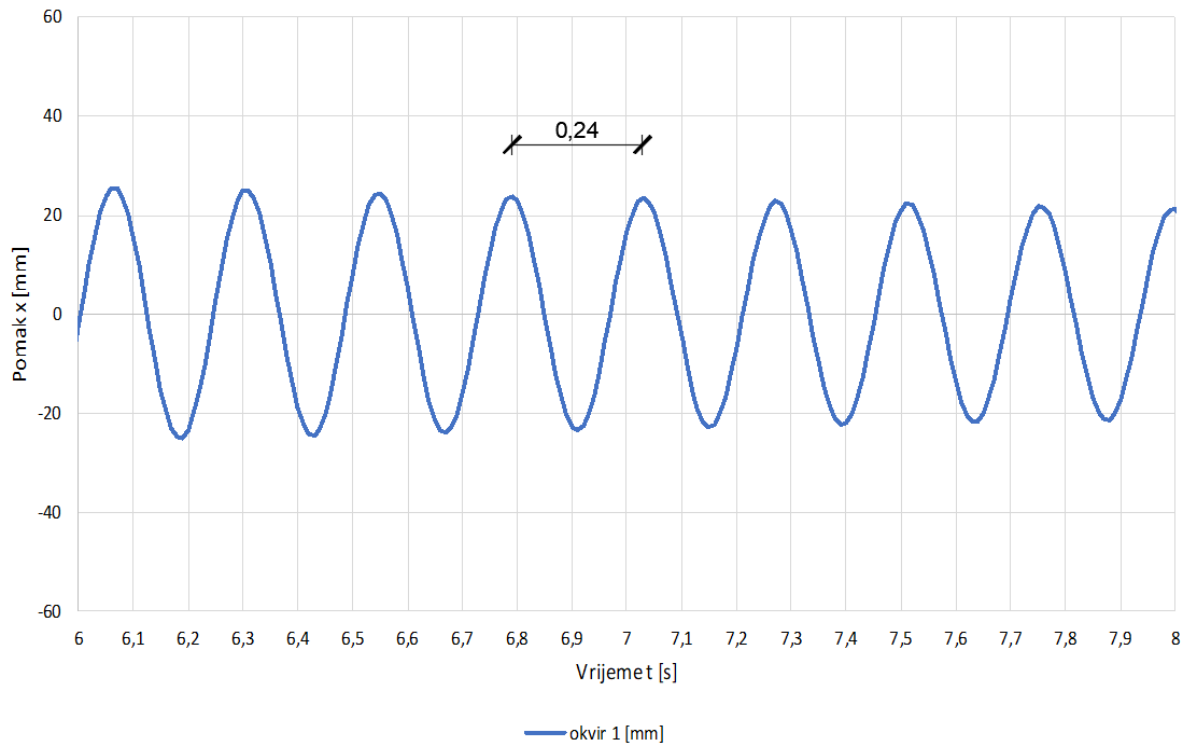
- jednokatni model sa krutom pločom:  $T = 0,233 \text{ s}$  ;  $f = 4,30 \text{ Hz}$
- jednokatni model sa deformabilnom pločom:  $T = 0,26 \text{ s}$  ;  $f = 3,83 \text{ Hz}$

Prema eksperimentu te vrijednosti se mogu očitati sa slike (17) i slike (19).



Slika 17 : Dijagram apsolutnih pomaka krute ploče u vremenu

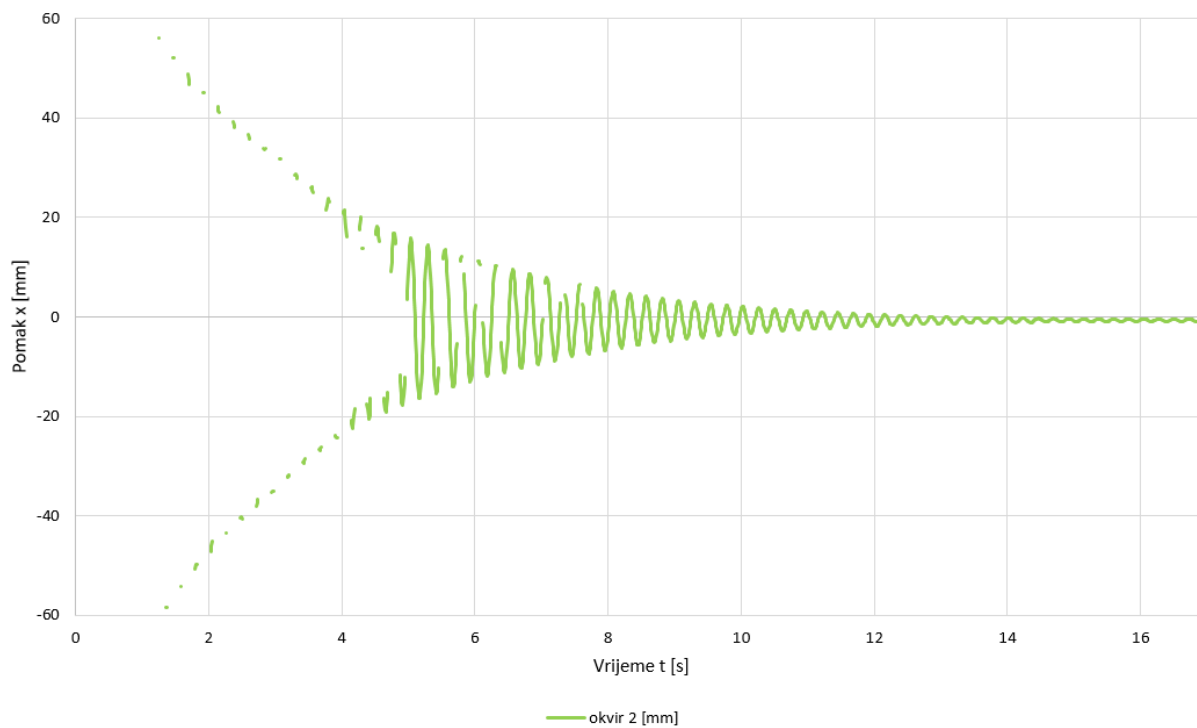
Kao što možemo vidjeti na slici 17 okvir sa krutom pločom ima rupe u svom dijagramu. Do toga je došlo jer je prilikom ručnog nanošenja pomaka i puštanja okvira, brzina okvira bila prebrza da ju optički mjerni sustav snimi i poslika što je rezultiralo takvim izgledom grafa. Također to vrijedi za rupe u svim sljedećim dijagramima.



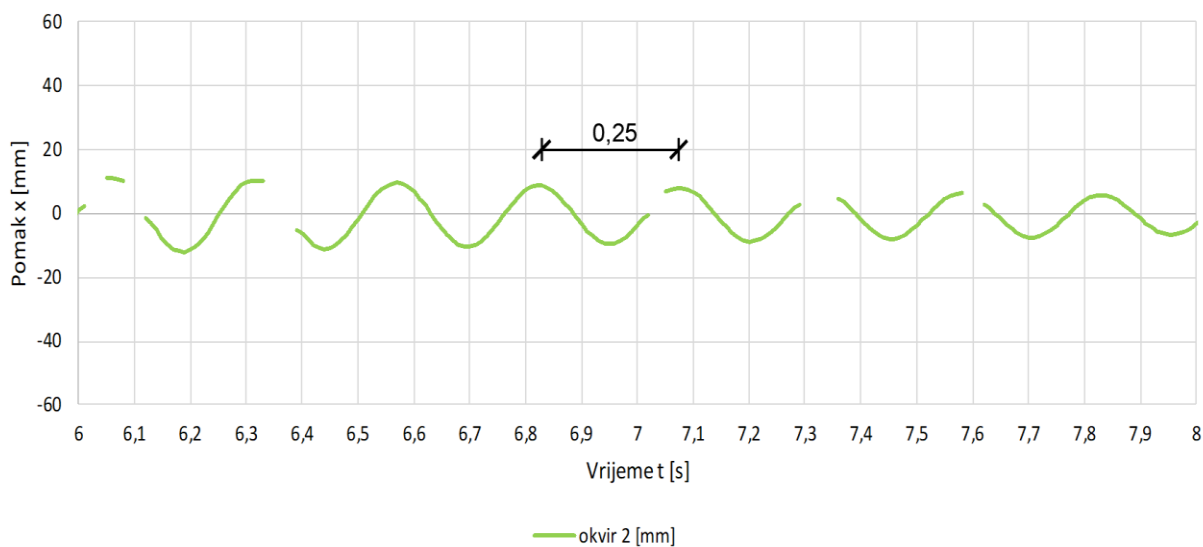
Slika 18 : Uvećani prikaz apsolutnih pomaka krute ploče u vremenu

Okvir 1 predstavlja model sa krutom pločom, tu je očitana vrijednost periode  $T = 0,24$  s, dok je frekvencija  $f = 4,17$  Hz. Na slici 18 možemo vidjeti uvećani prikaz i pravilni tok amplitude.





Slika 19 : Dijagram apsolutnih pomaka deformabilne ploče u vremenu

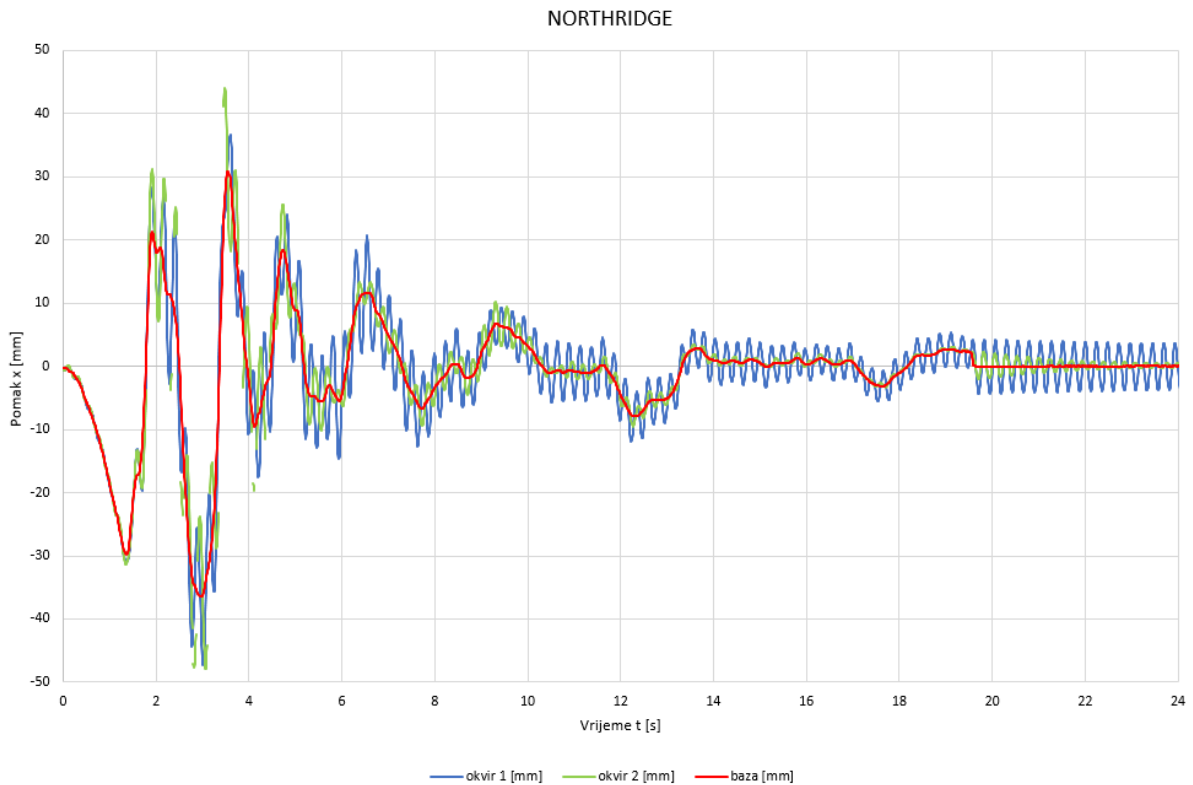


Slika 20 : Uvećani prikaz apsolutnih pomaka deformabilne ploče u vremenu

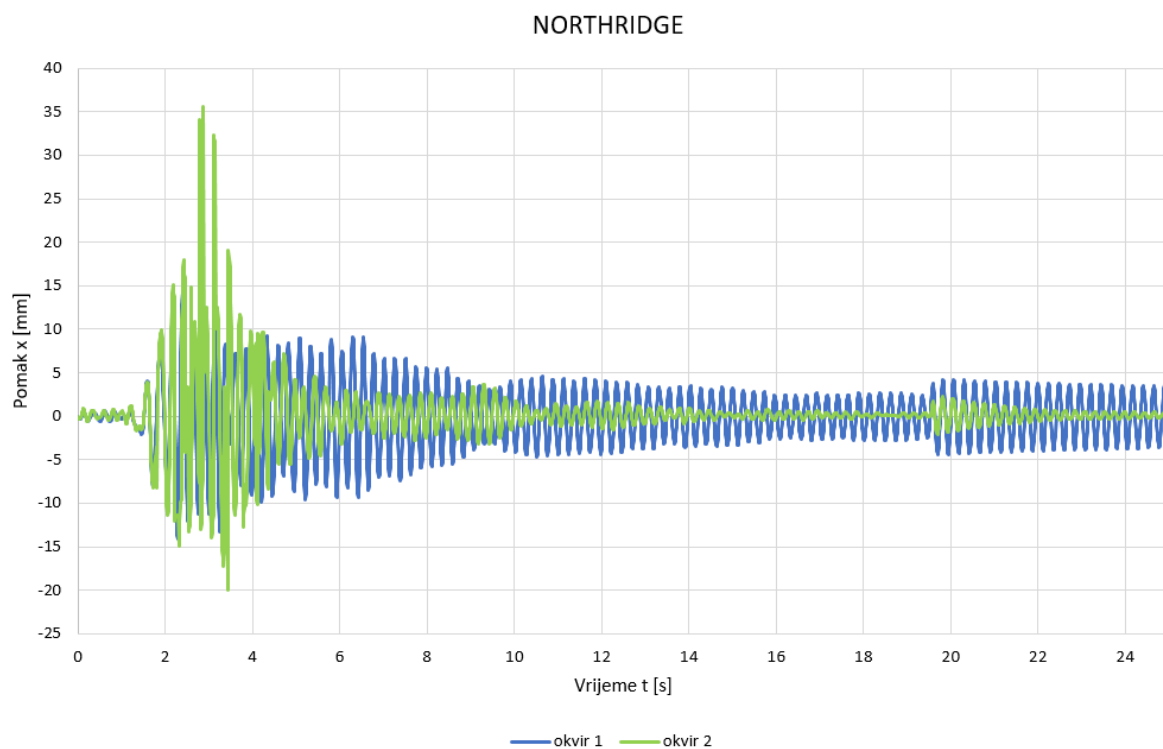
Okvir 2 predstavlja model sa deformabilnom pločom, tu je očitana vrijednost periode  $T = 0,25$  s, dok je frekvencija  $f = 4,0$  Hz.

## 5.2. Potresni zapis „NORTHRIDGE“

U eksperimentu 4 su modeli podvrgnuti pobudi potresa koji se dogodio u Northridge – u Los Angelesu 1994. godine. Ovaj potres je izazvao pomake od čak 60 cm, koje smo na potresnom stolu skalirali na maksimalne pomake od 4 cm, kako bismo što točnije prikazale oscilacije. Trajanje eksperimenta iznosi 10,27 s. Najveći apsolutni pomak uzrokovan ovom pobudom iznosi 4,79 cm i dogodio se na okviru 2. Apsolutni pomaci se mogu vidjeti na slici 21, a relativni pomaci na slici 22.



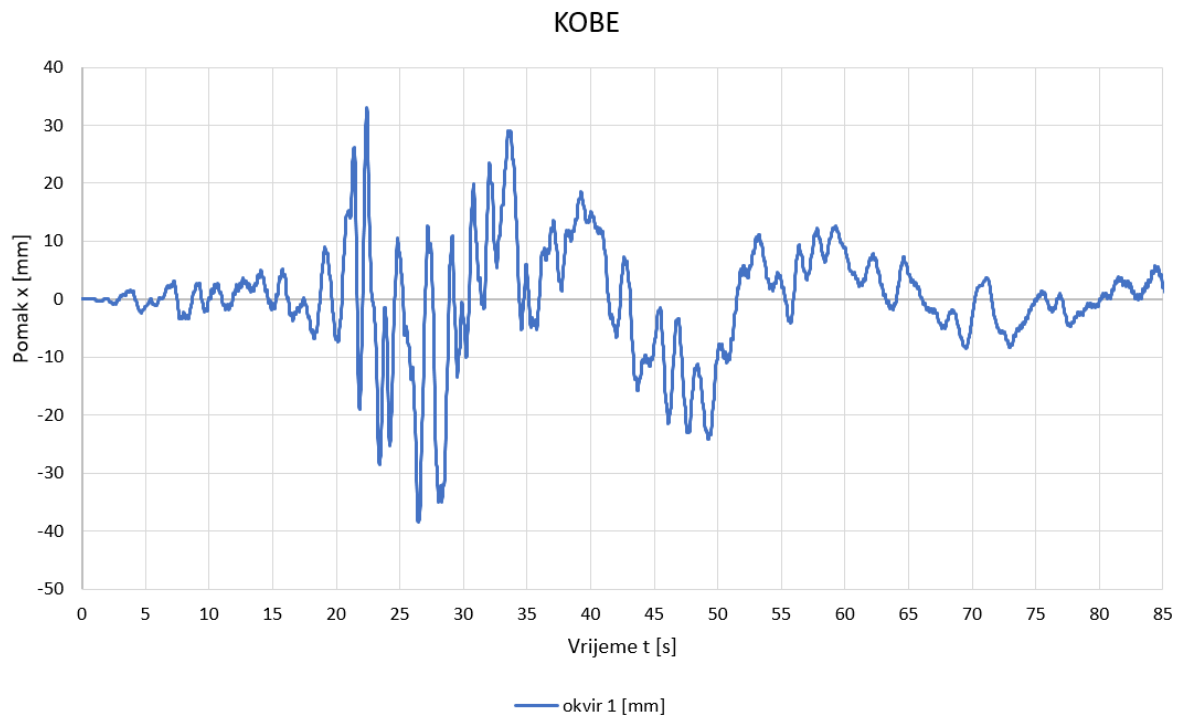
Slika 21 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Northridge



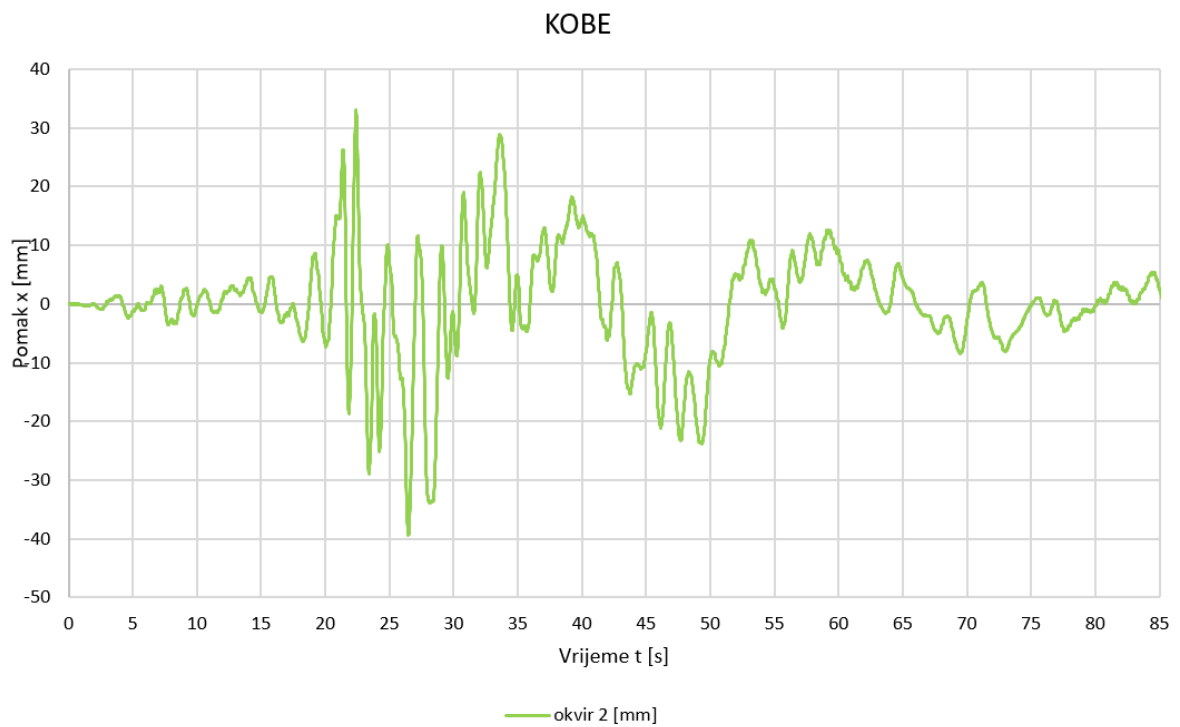
Slika 22 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „Northridge

### 5.3. Potresni zapis „KOBE“

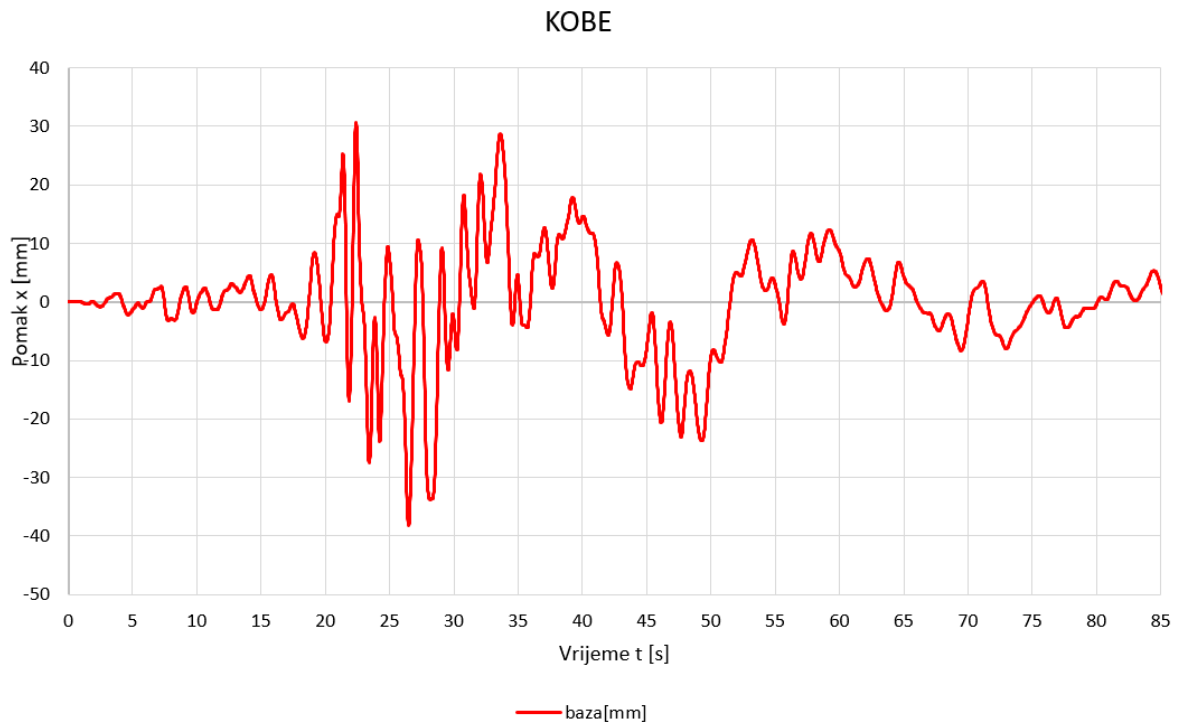
U eksperimentu 5 su modeli podvrgnuti pobudi potresa koji se dogodio gradu Kobe u Japanu 1995. godine. Ovaj potres je izazvao pomake od 10 - 20 cm, koje smo na potresnom stolu skalirali na maksimalne pomake od 4 cm, kako bismo što točnije prikazale oscilacije. Trajanje eksperimenta iznosi 24,09 s. Najveći pomak uzrokovan ovom pobudom iznosi 3,92 cm i također se dogodio na okviru 2. Apsolutni pomaci se mogu vidjeti na slikama 23, 24 i 25, dok se relativni pomaci mogu vidjeti na slici 26.



Slika 23 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Kobe“

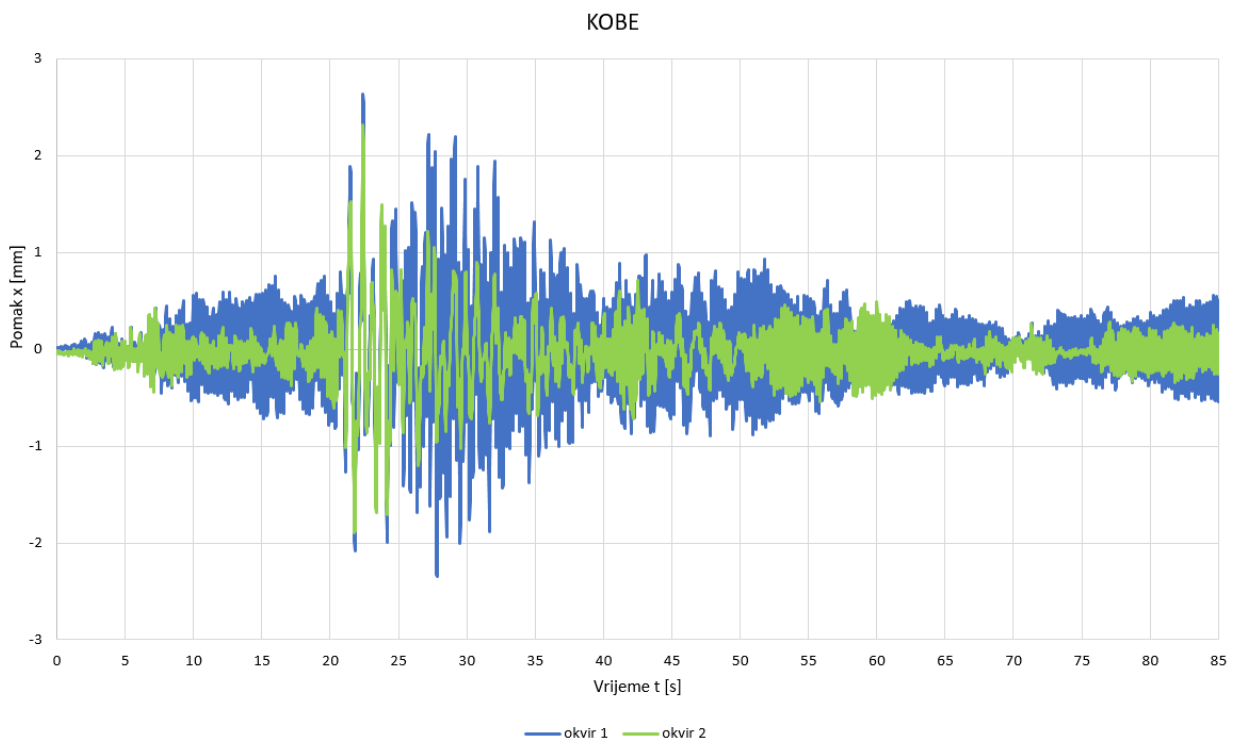


Slika 24 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Kobe“



Slika 25 : Dijagram apsolutnih pomaka baze izazvanih potresom „Kobe“

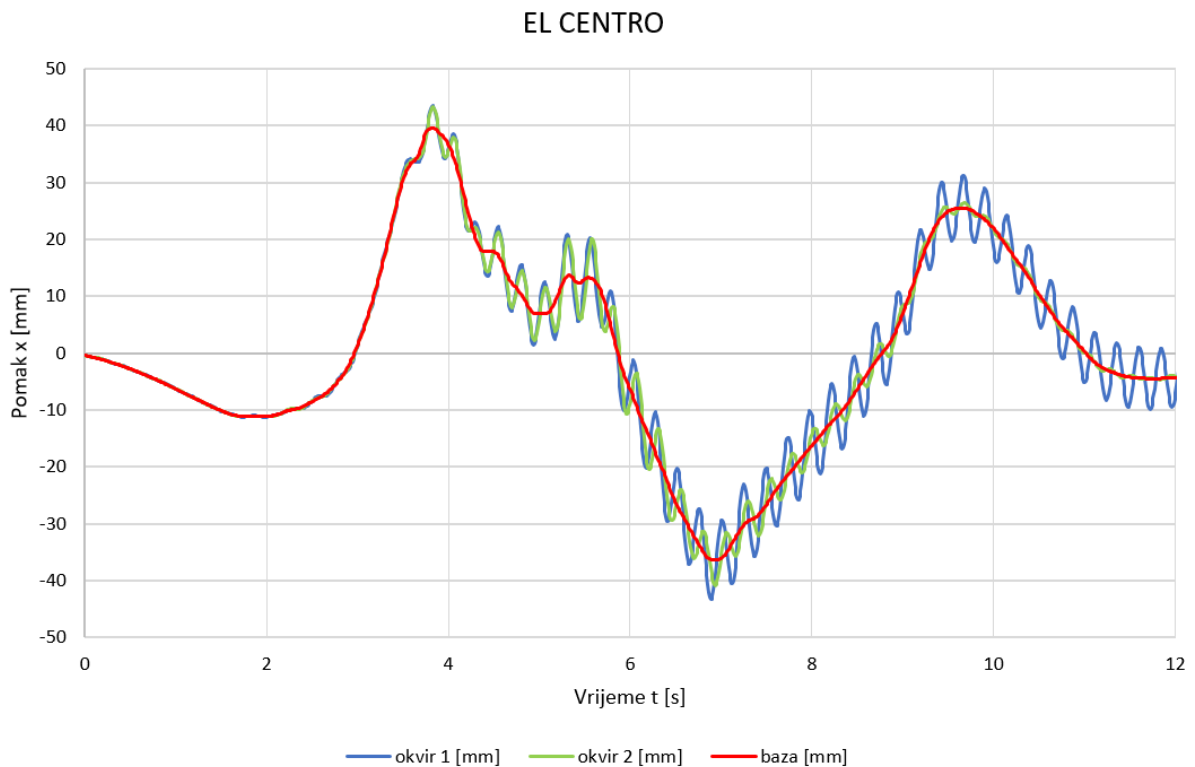
Zbog jako sličnih pomaka, svaki dijagram je prikazan posebno kako bi se dobio bolji uvid u same pomake oba okvira.



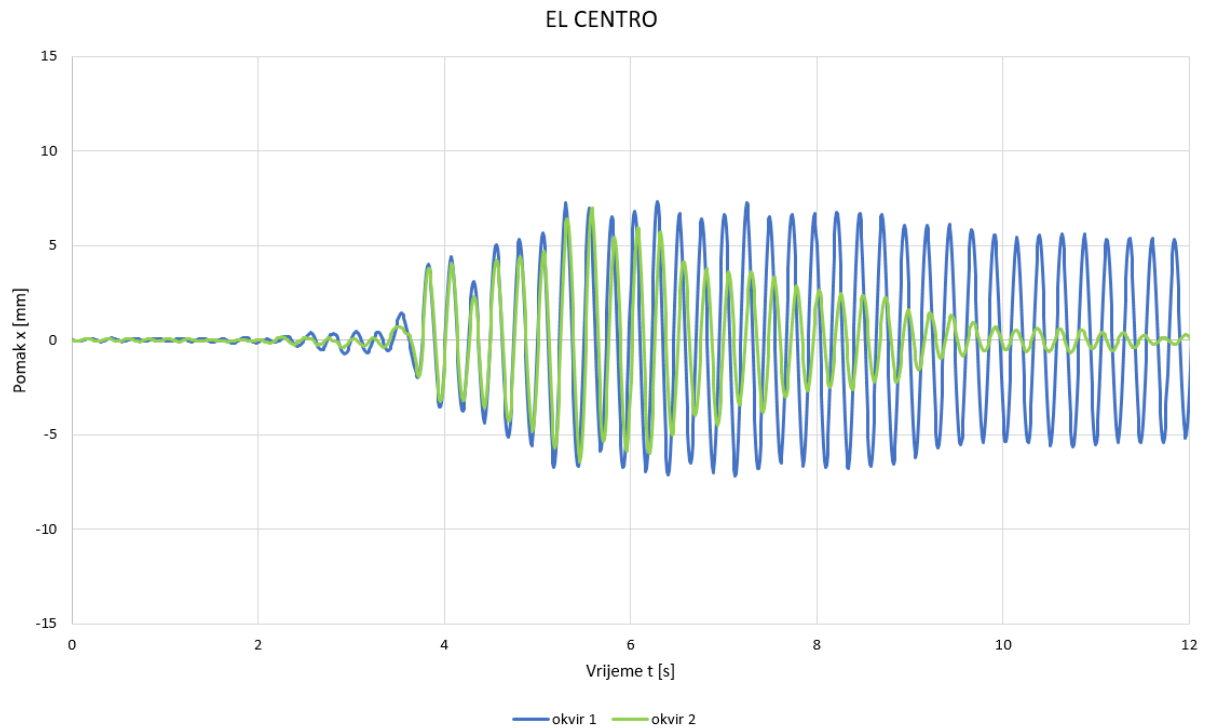
Slika 26 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „Kobe“

#### 5.4. Potresni zapis „EL CENTRO“

U eksperimentu 6 su modeli podvrgnuti pobudi potresa koji se dogodio u Imperial Valley, Kalifornija u SAD – u 1979. godine. Ovaj potres je izazvao pomake od 55 - 60 cm, koje smo na potresnom stolu skalirali na maksimalne pomake od 4 cm, kako bismo što točnije prikazale oscilacije. Trajanje eksperimenta iznosi 10,37 s. Najveći pomak uzrokovan ovom pobudom iznosi 4,35 cm i dogodio se na okviru 1. Apsolutni pomaci se mogu vidjeti na slici 27, a relativni pomaci na slici 28.



Slika 27 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „El Centro“

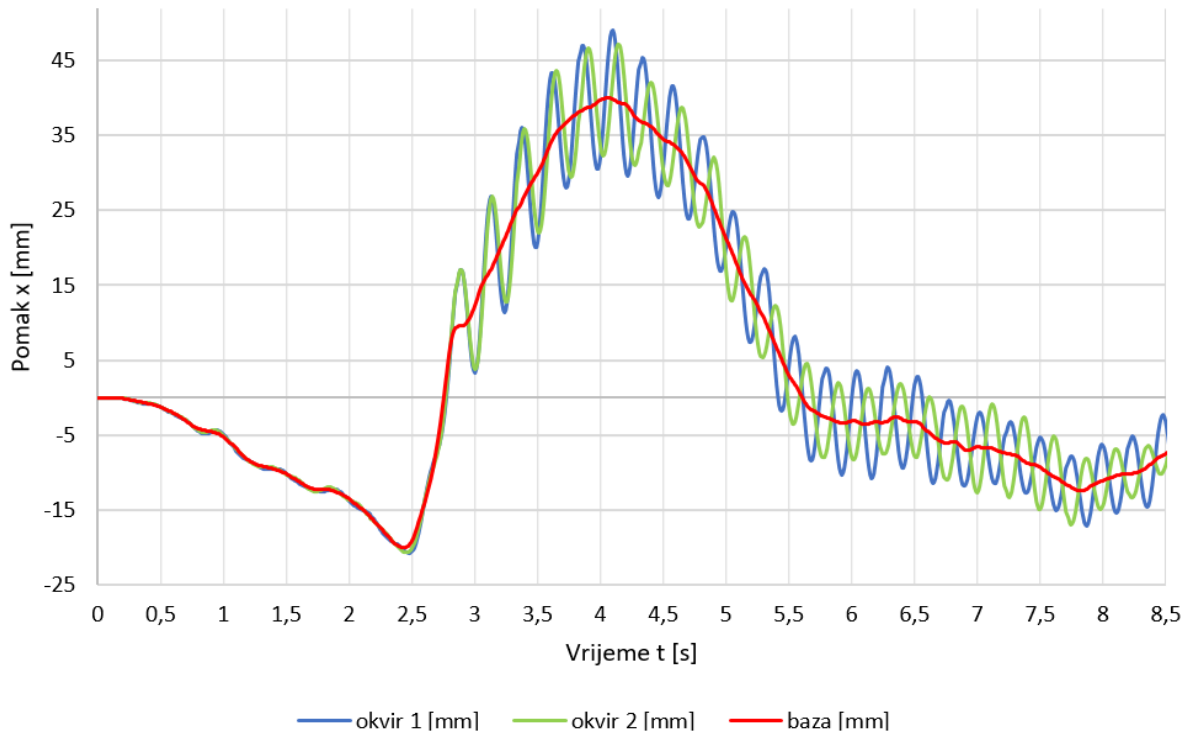


Slika 28 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „El Centro“

### 5.5. Potresni zapis „CAPE MENDOCINO“

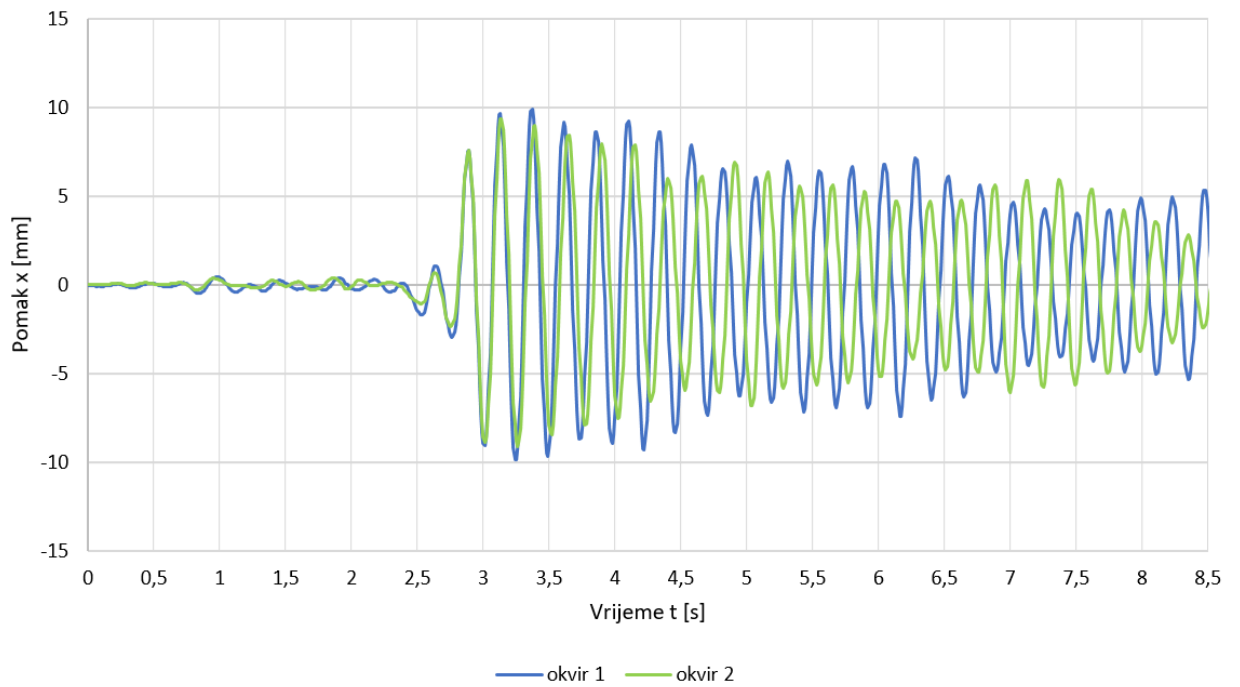
U eksperimentu 7 su modeli podvrgnuti pobudi potresa koji se dogodio u sjevernoj Kaliforniji u SAD – u 1992. godine. Ovaj potres je izazvao pomake od 40 cm, koje smo na potresnom stolu skalirali na maksimalne pomake od 4 cm, kako bismo što točnije prikazale oscilacije. Trajanje eksperimenta iznosi 10,15 s. Najveći pomak uzrokovan ovom pobudom iznosi 4,91 cm i dogodio se na okviru 1. Apsolutni pomaci se mogu vidjeti na slici 29, a relativni pomaci na slici 30.

### CAPE MENDOCINO



Slika 29 : Dijagram apsolutnih pomaka okvira izazvanih potresom „Cape Mendocino“

### CAPE MENDOCINO



Slika 30 : Dijagram relativnih pomaka okvira izazvanih potresom „Cape Mendocino“



## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio istražiti dinamički odgovor jednokatne konstrukcije na potresno opterećenje i to s naglaskom na razlike u ponašanju kod konstrukcija koje imaju krute krovne konstrukcije i konstrukcija kojima su krovne konstrukcije manje krutosti. Rezultate smo uspjeli dobiti pomoću eksperimentalnih ispitivanja, koja smo prikazali pomoću dijagrama. Na dijagramima se mogu očitati vrijednosti pomaka  $x$  i periode  $T$  te dobiti frekvencije  $f$ .

U jednom eksperimentu smo na oba modela ručno nanijeli pomak kako bismo pratili njihove slobodne oscilacije. Na temelju tih rezultata može se vidjeti kako su se oscilacije kod deformabilne ploče smanjile u kraćem vremenskom periodu nego kod krute ploče. Ulogu u tome je imala masa jer je deformabilna ploča lakša od krute ploče, a jednaku ulogu je imao i koeficijent prigušenja  $c$ .

Za usporedbu možemo uzeti eksperimente 4 i 5 koji su po ponašanju naša dva okvira jako slična. Amplitude pomaka su prilično velike i nepravilnog toka. U ova dva eksperimenta je okvir sa deformabilnom pločom imao veće pomake u odnosu na okvir sa krutom pločom. Prilikom prve nagle pobude, zbog manje krutosti okvir sa deformabilnom pločom je fleksibilniji.

Za razliku od eksperimenata 4 i 5, u eksperimentima 6 i 7 amplitude pomaka su mirnijeg toka. Ovi potresi su bili kraći u odnosu na potrese i eksperimenta 4 i 5. U ovom slučaju, okvir sa krutom pločom ima nešto veće pomake, od okvira s deformabilnom pločom.

Na kraju možemo zaključiti kako je okvir sa deformabilnom pločom, manjom krutošću i manjom masom pogodniji pri dinamičkoj pobudi jer pri kraćim i jačim potresima ima manje oscilacije u odnosu na okvir sa krutom pločom, dok i nakon završetka dugotrajnijih potresa njegove slobodne oscilacije brže opadaju.

## 7. LITERATURA

- [1] „Potres - Hrvatska enciklopedija“ ;  
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49792>
- [2] „Što je potres - Srce“ ; <https://hrcak.srce.hr/file/145596>
- [3] „Potresno inženjerstvo (odabrana poglavlja)“ , Čaušević Mehmed
- [4] „Zgradonačelnik – Obnova nakon potresa“ ; <https://www.zgradonacelnik.hr/obnova-nakon-potresa/potres-pridrzanje-propisa-o-gradnji-kljuc-je-sigurnog-koristenja-zgrada/1026/>
- [5] „Potresni valovi – Seizmološki pojmovnik“ ;  
[https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija\\_geofizike/seizmoloski\\_pojmovnik](https://www.pmf.unizg.hr/geof/popularizacija_geofizike/seizmoloski_pojmovnik)
- [6] „Potres u Skoplju 1963. - Wikipedija“ ;  
[https://hr.wikipedia.org/wiki/Potres\\_u\\_Skoplju\\_1963.](https://hr.wikipedia.org/wiki/Potres_u_Skoplju_1963.)
- [7] „Potres kod Petrinje 2020.“ ; [https://hr.wikipedia.org/wiki/Potres\\_kod\\_Petrinje\\_2020.](https://hr.wikipedia.org/wiki/Potres_kod_Petrinje_2020.)
- [8] „Katalog laboratorijske opreme“ ;  
[https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog\\_laboratorijske\\_i\\_terenske\\_opreme\\_GF\\_Rijeka.pdf](https://www.gradri.uniri.hr/files/Katalog_laboratorijske_i_terenske_opreme_GF_Rijeka.pdf)
- [9] Završni rad, Škreblin Ena ;  
<https://repository.gradri.uniri.hr/islandora/object/gradri%3A1174/datastream/PDF/view>
- [10] „Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering“ , Anil K. Chopra