

# Dinamički odziv dugačkih konstrukcija na višestruku potresnu pobudu oslonaca

---

**Drpić, Nikolina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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:157:144874>

*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**

**Nikolina Drpić**

**Dinamički odziv dugačkih konstrukcija na višestruku potresnu  
pobudu oslonaca**

**Završni rad**

**Rijeka, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski studij  
Mehanika 2**

**Nikolina Drpić  
JMBAG: 0115060058**

**Dinamički odaziv dugačkih konstrukcija na višestruku potresnu  
pobudu oslonaca**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2020.**

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti

Znanstvena grana: Tehnička mehanika

Tema završnog rada

**DINAMIČKI ODAZIV DUGAČKIH KONSTRUKCIJA NA VIŠESTRUKU POTRESNU  
POBUDU OSLONACA**

**DYNAMIC RESPONSE OF LONG-SPAN STRUCTURES SUBJECT TO MULTIPLE  
SUPPORT EARTHQUAKE EXCITATION**

Kandidat: **NIKOLINA DRPIĆ**

Kolegij: **MEHANIKA 2**

Završni rad broj: **20-P-66**

**Zadatak:**

Izvesti jednadžbu kretanja za slobodno oslonjenu gredu s dodanom koncentriranom masom te s tri dodane koncentrirane mase na koju djeluje potresno opterećenje oslonaca. Osmisliti i provesti niz eksperimenata umanjenog modela slobodno oslonjene grede s dodanim koncentriranim masama oslonjenog na potresnim platformama. Eksperimente pratiti optičkim metodama i analizirati informacije o njihovom odazivu. Usporediti eksperimentalno dobivene rezultate s predikcijama iz jednadžbi i donijeti zaključke. Komentirati primjenu pojednostavljenog modela za dobivanje informacija o stvarnim konstrukcijama.

**Tema rada je uručena:** 24. veljače 2020.

**Mentorica:**

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



## **IZJAVA**

Završni rad izradila 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.

---

Nikolina Drpić

U Rijeci, 15. rujna 2020.

## IZJAVA

Završni/Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

**Experimental study of bridge structures considering the asymmetric effect under multiple support excitation**

Voditelj projekta Doc. dr. sc. Nina Čeh

Financijer projekta MZO RH i Ministarstvo znanosti i tehnologije Narodne Republike Kine

Završni/Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

**Experimental study of a large span structure considering multiple support excitation**

Voditelj projekta Prof. dr. sc. Gordan Jelenić

Financijer projekta MZO RH i Ministarstvo znanosti i tehnologije Narodne Republike Kine

Završni/Diplomski rad nastao je kao rezultat rada 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, 3. 9. 2020.

Mentor:

doc. dr. sc. Nina Čeh

## ZAHVALA

Ogromno hvala mojoj mentorici doc. Nini Čeh na njezinoj posvećenosti, vremenu, razumijevanju i pomoći koje mi je pružila tijekom pisanja završnog rada.

Veliko hvala cijeloj mojoj obitelji koja uvijek bodri i podržava moje odabire.

Mariu veliko hvala koji me uz svu podršku potaknuo da uopće krenem ovim putem, kao i mojoj „antistres loptici“ Đuri.

I za kraj, hvala prijateljima koji su olakšali teške dane.

## **SAŽETAK**

U područjima čestih potresnih aktivnosti, temeljni problem su nepovoljni učinci prostorne promjenjivosti potresnog djelovanja na seizmički odziv oslonaca konstrukcija velikih raspona, uslijed potresa. Nejednolikom pobudom više oslonaca uvelike se utječe na sigurnost i trajnost dugačkih konstrukcija, odnosno konstrukcija s velikim udaljenostima oslonaca, kao što su primjerice dugački mostovi, tuneli i sl. Posljedica potresnih pobuda može biti otkazivanje rasponskog sklopa uslijed relativnih pomaka oslonaca.

Temeljni cilj dinamičke analize je odrediti odziv konstrukcije, odnosno njene pomake, brzinu, ubrzanje te unutarnje sile i naprezanja u konstrukciji koja nastaju uslijed djelovanja potresa. U ovom radu biti će prikazani i komentirani postupci pronalaženja dinamičkog odziva konstrukcije uslijed višestruke pobude oslonaca na temelju eksperimentalno dobivenih podataka o ponašanju pojednostavljenog i umanjenog modela jedne takve konstrukcije.

Ključne riječi: seizmički odziv oslonaca konstrukcija velikih raspona, potresno djelovanje, potres, višestruka pobuda oslonaca, dinamička analiza

## **ABSTRACT**

In earthquake-prone areas, the fundamental problem is the negative effects of multi-support excitation during seismic actions on the dynamic response of supports of large-span structures, due to earthquakes. Multi-support excitation affects long-span structures with significant distance between the supports, such as long bridges, tunnels, etc. This effect plays an important role in their safety and durability since the consequence of such effects may result in structural failure due to excessive relative displacements between the supports.

The basic aim of dynamic analysis is to determine the response of the structure, its displacements, velocities, acceleration and internal forces and stresses in the structure that occur due to earthquake excitations. In this work, the procedures of finding the dynamic response of a structure due to multiple-support excitation will be presented and commented, based on experimentally obtained behavior of a simplified small-scale model of such long-span structure.

**Keywords:** the dynamic response of supports of large-span structures, seismic actions, earthquake, multiple-support excitation, dynamic analysis

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SEIZMIČKA AKTIVNOST.....	2
2.1. Seizmičnost.....	3
2.2. Rasjedi i potresni valovi.....	5
2.3. Učinak prostorne promjenjivosti potresne pobude na potresni odziv konstrukcije.....	7
3. TEORIJSKI DIO.....	8
3.1. Formiranje jednačbe kretanja – 1 stupanj slobode.....	8
3.2. Formiranje jednačbe kretanja – 3 stupnja slobode.....	11
3.3. Oblici osciliranja sustava s 3 stupnja slobode.....	15
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	15
4.1. Laboratorijska oprema.....	15
4.2. Opis modela i postupak mjerenja.....	17
4.3. Ispitivanje dinamičkog odziva slobodne oslonjene grede.....	19
5. ZAKLJUČAK.....	44
6. LITERATURA.....	45

## **POPIS SLIKA**

Slika 1. Primjeri vanjskih djelovanja na konstrukciju

Slika 2. Rasprostranjenost potresnih zona

Slika 3. Seizmička karta RH

Slika 4. Karta potresnih područja RH

Slika 5. Tri osnovna tipa rasjeda

Slika 6. Vrste potresnih valova

Slika 7. Prisilno prigušeno osciliranje uslijed pomaka oslonaca sustava s jednim stupnjem slobode

Slika 8. Sustav s 3 stupnjeva slobode kretanja

Slika 9. Grafički prikaz slaganja globalne matrice krutosti za ravnu gredu opisanu s 5 grednih konačnih elemenata

Slika 10. Tri osnovna oblika osciliranja sustava s 3 stupnja slobode

Slika 11. Tlocrt korištene laboratorijske opreme

Slika 12. Optički mjerni sustav GOM

Slika 13. Kalibracijski križ

Slika 14. Model spreman za mjerenje

Slika 15. Oznake promatranog sustava

Slika 16. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 17. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 18. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 19. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 20. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 21. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 22. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 23. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 24. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 25. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 26. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 27. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 28. Graf funkcije pobude u vremenu Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 29. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 30. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 31. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 32. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 33. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 34. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 35. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 36. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 37. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 38. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 39. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 40. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 41. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 42. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 43. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 44. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 45. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 46. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 47. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 48. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 49. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 50. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 51. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 52. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 53. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 54. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 55. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 56. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 57. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Slika 58. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 59. Graf funkcije pobude u vremenu

Slika 60. Graf funkcije pobude u vremenu



- Slika 61. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 62. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 63. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi
- Slika 64. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 65. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 66. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 67. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 68. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 69. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi
- Slika 70. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 71. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 72. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 73. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 74. Graf funkcije pobude u vremenu
- Slika 75. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

## 1. UVOD

Projektiranje statički otpornih konstrukcija koje su u mogućnosti oduprijeti se snažnom dinamičkom djelovanju, kao što je primjerice potres, zahtijeva razumijevanje ponašanja konstrukcija pod utjecajem dinamičkog djelovanja. Kod dinamičkih djelovanja na konstrukciju javljaju se velike razlike u intezitetu i smjeru djelovanja u vremenu, a na promjenu deformacija konstrukcije utječu ubrzanja mase, odnosno inercijalne sile.

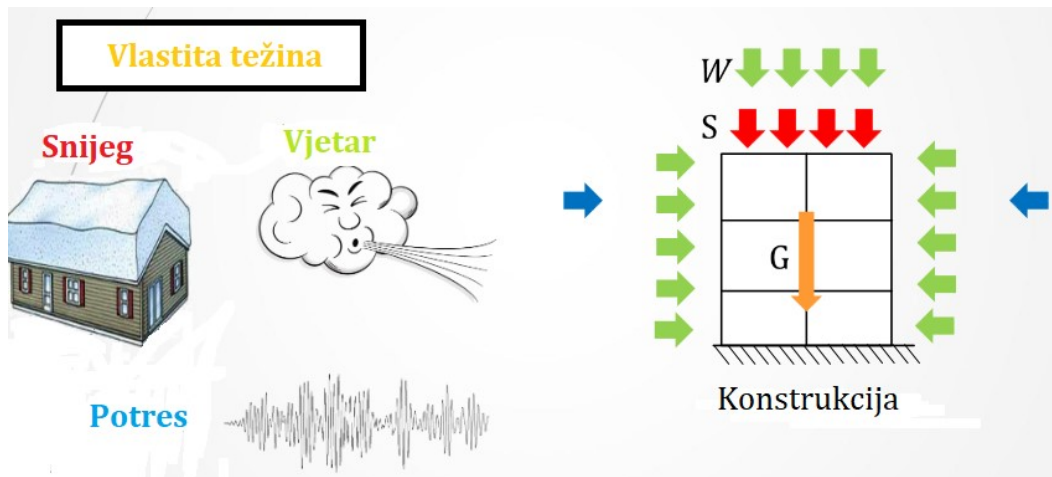
U ovom će se radu proučavati utjecaji dinamičkog djelovanja na dugačke konstrukcije, pa će se tako eksperimentima simulirati ponašanje dugačkih konstrukcija pod utjecajem potresnog opterećenja, a za bolje razumijevanje istog objašnjeni su osnovni pojmovi iz seizmologije, a koji su od velikog interesnog područja i za građevinske inženjere. Teorijskim dijelom prikazan je način formiranja jednadžbi kretanja, najprije za sustav s jednim stupnjem slobode osciliranja, a analogno njemu formirane su i jednadžbe kretanja za sustav s tri stupnja slobode.

Fenomen nejednolike potresne pobude oslonaca, na koji je stavljen naglasak u ovome radu, pojavljuje se zbog nejednake udaljenosti epicentra potresa od oslonaca konstrukcije. Kašnjenje potresnog vala dogodit će se na osloncu čija je udaljenost od epicentra veća.

Eksperimentalnom dijelu uvelike je doprinijela dobra opremljenost laboratorija Građevinskog fakulteta u Rijeci za konstrukcije opremom za potresnu simulaciju. Laboratorij posjeduje dva potresna stola što omogućuje simulaciju nejednolike dinamičke pobude. Analizirati će se podaci eksperimenata provedenih na slobodno oslonjenoj gredi kojoj će se pobuda zadavati u obliku različitih funkcija pomaka.

## 2. SEIZMIČKA AKTIVNOST

Prilikom modeliranja konstrukcija u proračun se uzimaju vanjska djelovanja na konstrukciju.



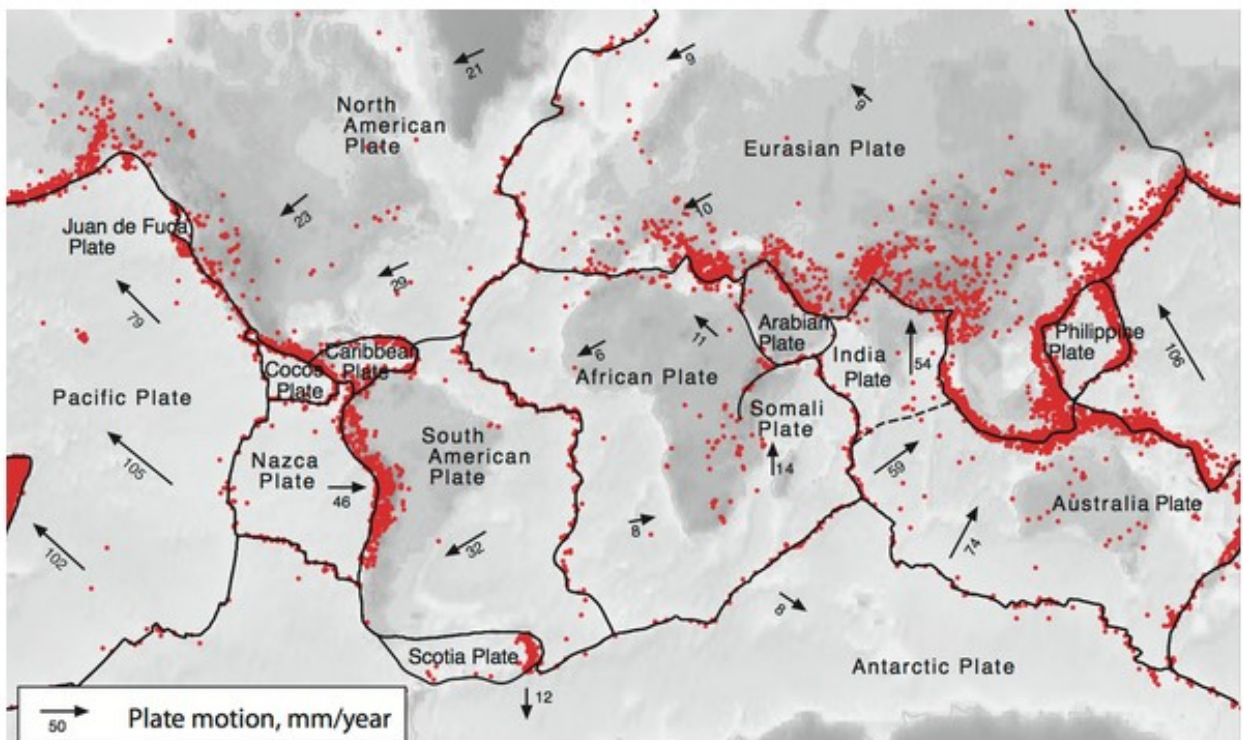
Slika 1. Primjeri vanjskih djelovanja na konstrukciju [11]

Jedno od kompleksnijih, zacijelo i najznačajnijih, vanjskih djelovanja su svakako djelovanja potresa zbog njihove potencijalne visoke moći razaranja. Upravo iz tog razloga bitno je da se kod projektiranja konstrukcija, osim ispunjenja ekonomskih i vizualnih zahtjeva, te statičke otpornosti ispune i zahtjevi za odgovor konstrukcija na sile uzrokovane pomicanjem tla. [1]

Od velike važnosti za izgradnju sigurnih konstrukcija biti će poznavanje seizmičnosti regije, odnosno učestalost i intezitet (magnituda) potresa. Seizmologija, kao grana geofizike, bavi se proučavanjem potresa, njihovih posljedica i popratnih istraživanja, od kojih dio rezultata ima bitnu primjenu u građevinarstvu (potresno inženjerstvo, inženjerska seizmologija, protuseizmička gradnja). Teme u seizmologiji koje imaju bitnu ulogu u građevinarstvu su dane u nastavku. [1]

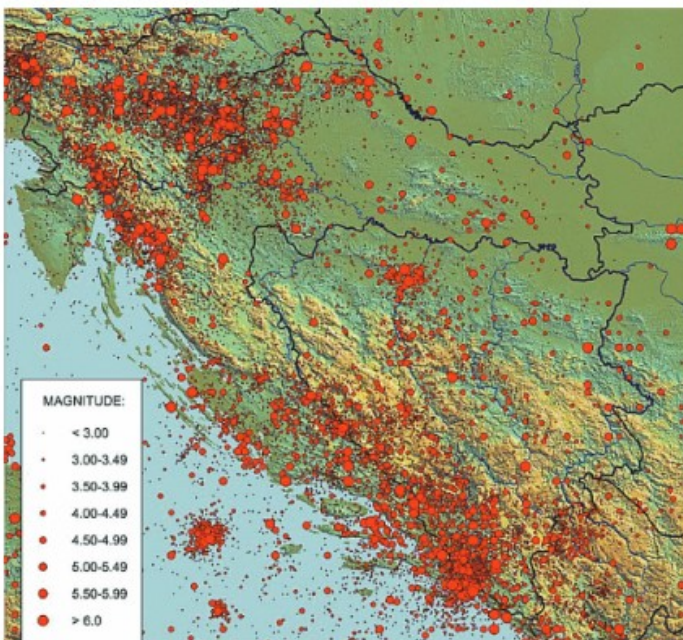
## 2.1. Seizmičnost

Pri projektiranju konstrukcija određuje se u kojoj će se mjeri uzeti u obzir potresno djelovanje, a stupanj seizmičnosti ovisi o povijesti zabilježenih potresa na tom području. U potresno ugroženim zemljama, kao što su zemlje Bliskog Istoka, Kina, SAD i bivši SSSR, već se dulji niz godina posvećuje istraživanju, bilježenju i prognoziranju potresa. U drugoj polovici 20. stoljeća usavršavanjem seizmografa i razvojem računala omogućeno je proučavanje seizmičkih pojava na globalnoj razini. Prikupljanje podataka rezultiralo je kartama koje prikazuju učestalost i jačinu potresa za promatrano područje te ukazalo da potresna aktivnost nije jednoliko raspodijeljena po cijeloj površini Zemlje, već je učestala na granicama potresnih ploča. [4]

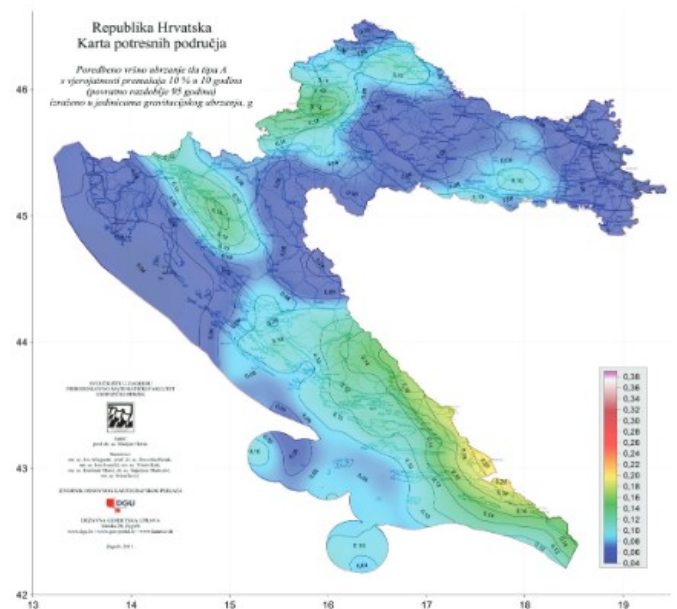


Slika 2. Rasprostranjenost potresnih zona

Prikupljenim seizmološkim i geološkim podacima o lokaciji na kojoj se planira izgradnja nekog građevinskog objekta moći će se predvidjeti moguća potresna opterećenja tijekom uporabnog razdoblja konstrukcije. Slika 3. prikazuje kartu seizmičnosti Hrvatske i okolnih područja na kojoj su prikazani epicentri oko 30 000 potresa, a usporedno s njom prikazana je karta, Slika 4., potresnih područja za povratno razdoblje od 95 godina na kojoj su prikazane vrijednosti vršnog ubrzanja tla. Usporedbom karata vidljivo je da su najveća ubrzanja tla (žuta i zelena boja na karti) upravo na mjestima gdje je najveća koncentracija potresa na karti seizmičke aktivnosti (crvene točke na karti).



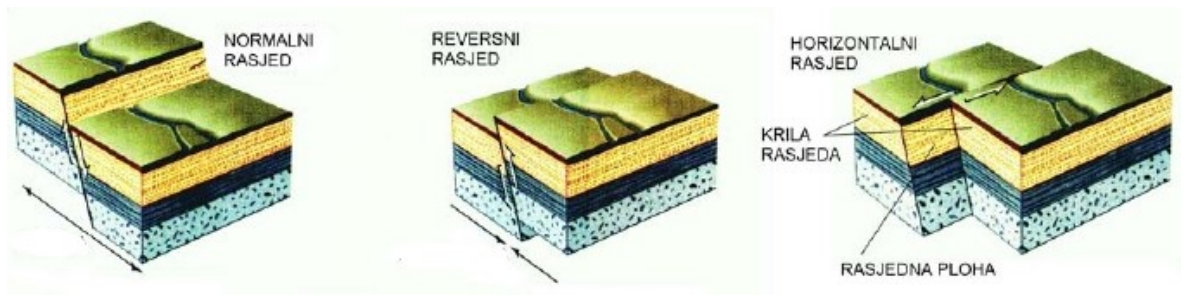
Slika 3. Seizmička karta RH [6]



Slika 4. Karta potresnih područja RH [6]

## 2.2. Rasjedi i potresni valovi

Geološkim istraživanjima dokazano je da se stijene koje čine dio Zemljinog tvrdog plašta, litosfere, stalno deformiraju. Prilikom opterećenja stijene silama gravitacije, ekspanzije ili kompresije, odnosno u trenutku kada neka od tih sila nadjača čvrstoća stijena, dolazi do pucanja i pomicanja stijenske mase te stvaranja rasjeda. Stvaraju se dva stijenska bloka – krila koja se kreću duž rasjedne plohe – paraklaze. Razlikuju se tri osnovna tipa rasjeda: horizontalni, vertikalni i dijagonalni ( reversni ). [11]



Slika 5. Tri osnovna tipa rasjeda [11]

U trenutku nastajanja rasjedne plohe granica posmične čvrstoće materijala je prijeđena i nastaje s iznenadno otpuštanje deformacijske energije koja se rasprostire u obliku valova koji su uzrok potresa. Mjesto na kojem počinje pucanje naziva se hipocentar, a njegova vertikalna projekcija na površini Zemlje epicentar. [11]

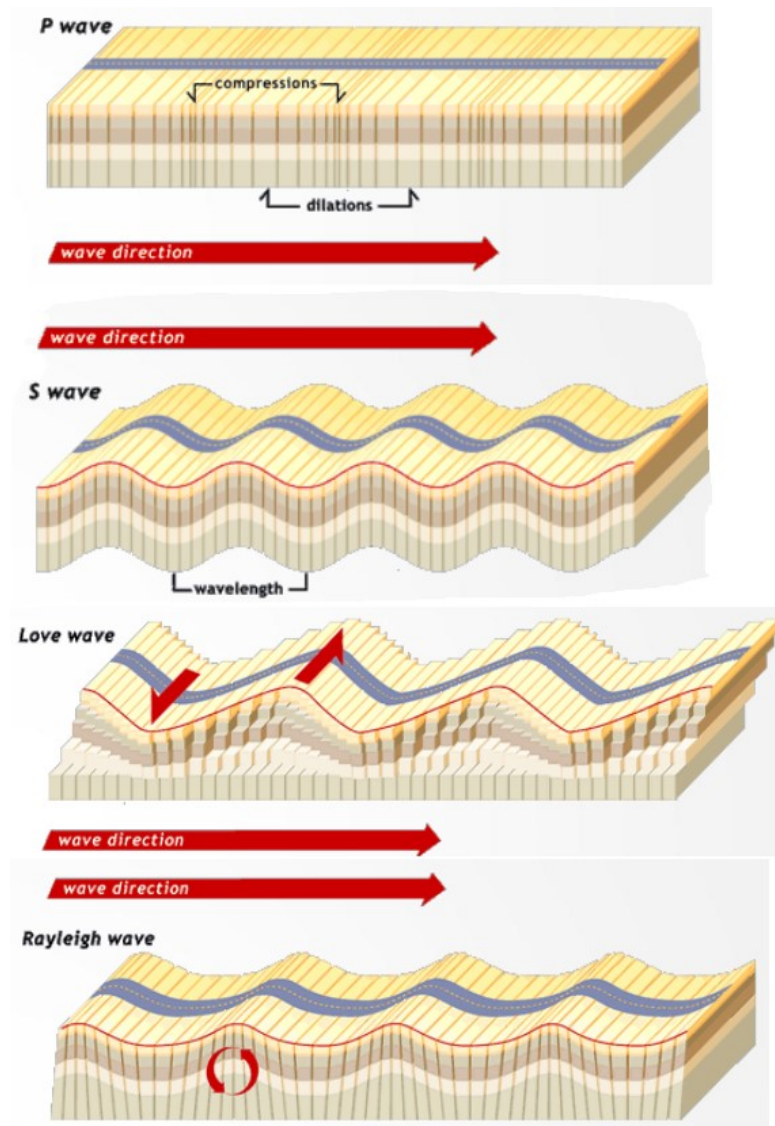
Prostorni valovi su oni koji se prostiru u unutrašnjosti Zemlje. Dijele se na primarne ili uzdužne valove (P-valovi) i sekundarne, poprečne ili posmične (S-valove). Razlika je što kod P-valova čestice osciliraju u smjeru širenja te se javlja razrjeđivanje i zgušćivanje čestica, dok kod S-valova čestice osciliraju okomito na smjer širenja valova.

Valovi koji se prostiru površinom Zemlje, površinski, su valovi kod kojih čestice osciliraju u horizontalnoj ravnini koja je okomita na smjer širenja valova (L-valovi ili Lov ) i eliptično u ravnini koja je okomita na površinu Zemlje R-valovi ili Rayleigh). [11]

Brzina širenja valova ovisit će o gustoći i elastičnosti tla i medija. Upravo zbog toga, kod geotehničkih ispitivanja tla, koriste se seizmičke metode koje se bave mjerenjem brzine



seizmičkih valova kroz tlo izazvanih umjetnom pobudom kako bi se dobili podaci o dubini slojeva različitih materijala. [8]



Slika 6. Vrste potresnih valova [11]

### **2.3. Učinak prostorne promjenjivosti potresne pobude na potresni odziv konstrukcije**

Kod dugačkih elemenata sa značajnim razmakom između oslonaca čija je duljina reda veličine potresnog vala, učinak prostorne promjenjivosti potresne pobude na seizmički odziv očituje se u velikoj mjeri. Kod takvih konstrukcija potresna pobuda javlja se u različitom vremenu na jednom osloncu u odnosu na drugi i može rezultirati urušavanjem nosive konstrukcije zbog relativnih pomaka oslonaca. Najnepovoljniji položaj epicentra je na pravcu uzdužne osi konstrukcije, a najpovoljniji kada se epicentar potresa nalazi približno na jednakoj udaljenosti od svih oslonca. Prolazak valova opisuje se brzinom širenja potresnih valova po površini tla (podaci se dobivaju iz snimljenih podataka za vrijeme potresa). Lokalni uvjeti temeljenja na mjestima oslonaca imaju veliki utjecaj na amplitude i frekvencije potresnih valova. [3]



### 3. TEORIJSKI DIO

Ubrzanjem tla u vremenu najbolje se opisuje ponašanje tla tijekom potresa. Ulazeći u diferencijalnu jednadžbu kretanja, ubrzanje tla izravno predstavlja djelovanje na konstrukciju i time utječe odziv sustava pri djelovanju potresa. [4]

U nastavku su izložene teorijske pretpostavke te izvodi i načini rješavanja jednadžbi kretanja prisilnih oscilacija sustava s jednim i više stupnjeva slobode.

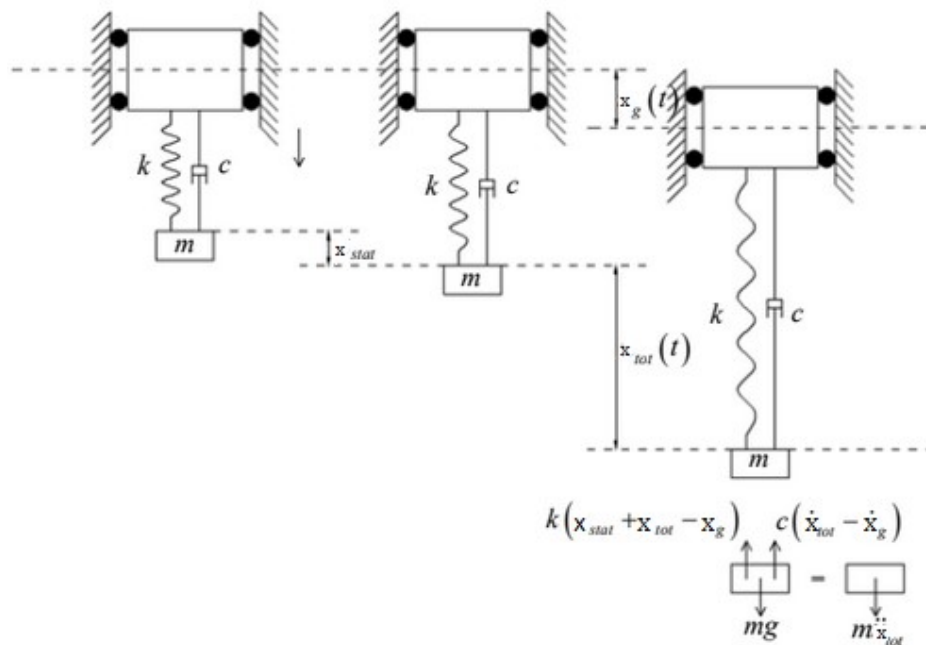
#### 3.1. FORMIRANJE JEDNADŽBE KRETANJA – 1 stupanj slobode

Jedan od bitnih problema dinamike konstrukcija je ponašanje oslonaca konstrukcije uslijed potresa.

Horizontalni pomak tla odnosno oslonca označen je kao  $x_g$ , a  $x$  relativni pomak reprezentativne mase konstrukcije u odnosu na pomak tla. U svakom vremenskom trenutku ukupni pomak mase  $x_{tot}$  definiran je izrazom [1]:

$$x_{tot}(t) = x(t) + x_g(t) \quad (3.1)$$

Dinamička ravnoteža sustava prikazana je na pojednostavljenom modelu s jednim stupnjem slobode kretanja (Slika 7.). Koncentrirana masa  $m$  oscilira translacijski u smjeru pomaka oslonca, opruga krutosti  $k$  (masa zanemarena) i prigušivač  $c$  s ulogom disipacije energije vibriranja (masa zanemarena). Na slici s lijeva na desno prikazani: nedeformirano stanje (nulti položaj), položaj statičke ravnoteže i položaj dinamičke ravnoteže. [1]



Slika 7. Prisilno prigušeno osciliranje uslijed pomaka oslonaca sustava s jednim stupnjem slobode [4]

Pod djelovanjem sile teže masa se u položaju statičke ravnoteže progiba za veličinu statičkog pomaka  $x_{stat}$ . Na masu djeluje elastična sila opruge  $kx_{stat}$  (Hookeov zakon) koja masu želi vratiti u bestežinski položaj kojoj se odupire težina mase  $mg$ . Ravnoteža navedenih sila za statički pomak glasi [4]:

$$x_{stat} = \frac{m \cdot g}{k} \quad (3.2)$$

Nanošenjem pomaka oslonca na sustav u obliku harmonijske sinusne funkcije oblika oblika[4]:

$$x_g(t) = X \cdot \sin \Omega t, \quad (3.3)$$

gdje su:

$\Omega$  - kružna frekvencija sile pobude,

$X$  - amplituda zadane pobude,

uspostavlja se dinamička ravnoteža:

$$k \cdot x_{stat} + k(x_{tot} - x_g) + c(\dot{x}_{tot} - \dot{x}_g) - m \cdot g = -m \cdot \ddot{x}_{tot} \quad (3.4)$$

Znakom  $\dot{x}$  označava se brzina (promjena položaja u vremenu), a akceleracija (promjena brzine u vremenu) s  $\ddot{x}$ . Inercijalna sila zapisana kao  $m \cdot \ddot{x}_{tot}$  daje otpor kretanju mase zajedno sa silom prigušenja  $c(\dot{x}_{tot} - \dot{x}_g)$

Objedinjavanje izraza za statičku ravnotežu  $k \cdot x_{stat} = m \cdot g$  i supstitucija  $x = x_{tot} - x_g$  u izraz 3.4, dobiva se oblik [4]:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = -m \cdot \ddot{x}_g(t) \quad (3.5)$$

Izrazom 3.5 dobivena je jednadžba kretanja sustava s jednim stupnjem slobode izloženog pobudi oslonca, gdje su [4]:

$$k \cdot x = F_s \text{ - elastična sila ,} \quad (3.6)$$

$$c \cdot \dot{x} = F_D \text{ - sila prigušenja ( ovisna o vremenu )} \quad (3.7)$$

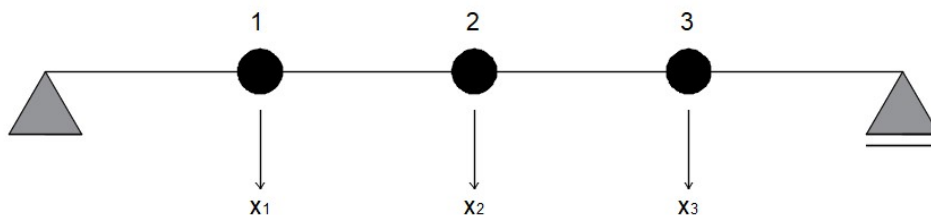
i

$$-m \cdot \ddot{x}_g(t) = p_{eff}(t) \text{ - efektivna sila potresa .} \quad (3.8)$$

Dinamička analiza konstrukcije određuje odziv konstrukcije, odnosno pomake, brzinu i ubrzanje mase te unutarnje sile i naprezanja u konstrukciji koja nastaju uslijed vanjske pobude. Kod potresnog opterećenja određuju se relativna i totalna vrijednost pomaka. Relativni pomaci  $x(t)$  značajni su zbog izravne povezanosti s unutarnjim silama preko deformacija konstrukcije, te će se iz tog razloga u eksperimentalnim rezultatima prikazati grafovi relativnih pomaka M2.rel.

### 3.3. FORMIRANJE JEDNADŽBE KRETANJA – 3 stupnja slobode

Broj stupnjeva slobode označava broj nezavisnih pomaka potrebnih za određivanje položaja masa nakon pomaka u odnosu na ravnotežni položaj. Sustav s tri stupnja slobode sastoji se od diskretnih masa i/ili momenata inercije čiji položaj određuju generalizirane koordinate koje se mogu odnositi na pomake ili kutove zaokreta, ovisno o njihovoj prirodi osciliranja. Postupak dobivanja jednadžbe kretanja za sustav s 3 stupnja slobode biti će analogan postupku za dobivanje jednadžbe kretanja za sustav s jednim stupnjem slobode. [4]



Slika 8. Sustav s 3 stupnjeva slobode kretanja

Slika 8. grafički prikazuje sustav s 3 stupnja slobode. Komponente  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$  generalizirane su koordinate koje definiraju položaj diskretnih masa u svakom vremenskom trenutku u odnosu na početni položaj. Sustav je diskretiziran pretpostavkom da je cjelokupna masa grede koncentrirana u 3 točke kao što je prikazano na Slici 8. Svaka od tri točke ima pridruženi broj stupnjeva slobode. Mase će se translacijski pomicati u smjeru djelovanja sile pobude. Kada masa grede ne bi bila koncentrirana u 3 točke pojavljivao bi se i moment inercije (rotacija). S obzirom da je predmet proučavanja ovoga rada prisilna oscilacija uslijed horizontalnog pomicanja tla prilikom potresa, pretpostavlja se oscilacija mase translacijski i zanemaruje se rotacija.

Diskretnim masama zadat će se pobuda u obliku pomaka oslonca u smjeru prikazanom na Slici 8. Odgovor na pobudu u svakoj masi biti će: *inercijalna sila*  $F_{in,i}$ , *elastična sila*  $F_{el,i}$ , *te sila prigušenja*  $F_{d,i}$  za slučaj kada se radi o prigušenom osciliranju.

*Inercijalne sile* su fiktivne sile koje svakoj masi daju ubrzanje u suprotnom smjeru od smjera ubrzanja sustava. *Elastična sila* je sila koja se odupire promjeni oblika i nastoji vratiti masu u prvotno stanje. [1]

Za svaki  $i \in \{1,2,3\}$  može se postaviti jednadžba dinamičke ravnoteže [4]:

$$m_i \cdot \ddot{x}_{tot,i} + F_{d,i} + F_{el,i} = 0, \quad (3.9)$$

gdje su:

$m_i \cdot \ddot{x}_{tot,i}$  – inercijalna sila na mjestu  $i$ ,

$F_{d,i}$  – sila prigušenja na mjestu  $i$ ,

$F_{el,i}$  – elastična sila na mjestu  $i$ .

Za svaki  $i$ ,  $x_{tot,i} = x_i + x_{s,i}$ , gdje je  $x_{s,i}$  statički pomak na mjestu  $i$  uslijed pomaka oslonca, a  $x_i$  relativni pomak na mjestu  $i$  u odnosu na statički položaj oslonaca, javljaju se pomaci  $x_{s,i} = x_{g,i}$  i  $x_i = 0$ , a  $x_{g,i}$  je zadan, te se dolazi do jednadžbe oblika [4]:

$$m_i \cdot \ddot{x}_{tot,i} + F_{d,i} + F_{el,i} = -m_i \cdot \ddot{x}_{s,i}. \quad (3.10)$$

Jednadžba (3.10) se može zapisati u matričnom obliku [4]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g, \quad (3.11)$$

gdje su:

$x$ – vektor relativnih pomaka,

$\dot{x}$ – vektor brzine,

$\ddot{x}$ – vektor akceleracije (ubrzanja),

$m$ – matrica masa,

$k$ – matrica krutosti i

$c$ – matrica prigušenja.

Analizirana konstrukcija ovoga rada je greda konstantnog presjeka aproksimirana grednim konačnim elementima. Metodom konačnih elemenata i Newmarkovom metodom integracije sustav se rješava izrazom (3.11), pri čemu je potrebno definirati matricu krutosti, matricu masa i matricu prigušenja sustava. [3]

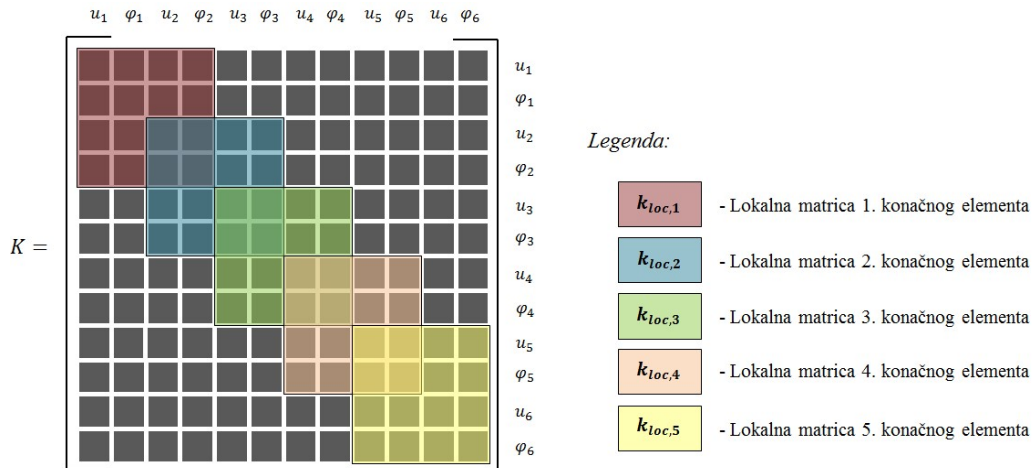
Matrica krutosti dana je izrazom [3]:

$$k_{loc} := \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Izraz (3.12) definira odnos između čvornih pomaka i čvornih opterećenja Bernoullijevih grednih elemenata konstantnog poprečnog presjeka i modula elastičnosti. [3]

Navier-Bernoulli gredna hipoteza pretpostavlja da se sve točke promatranog presjeka grede koje se nalaze ispod ili iznad srednje osi pomiču ovisno o pomaku srednje osi, a posmična naprezanja unutar grede ne izazivaju dodatne pomake točaka presjeka ispod i iznad srednje osi i ne utječu na promjenu kuta između srednje osi i poprečnog presjeka. [3]

Matrica krutosti dana izrazom (3.12) lokalna je matrica krutosti jednog konačnog elementa. Globalna matrica dobiva se slaganjem svih lokalnih matrica grednih elemenata kojima je opisana promatrana konstrukcija u veliku kvadratnu matricu kojoj su dimenzije jednake dvostrukom broju čvorova grede. Za jasniji prikaz, prikazan je primjer slaganja globalne matrice krutosti na slici 9. za gredu opisanu s pet konačnih grednih elemenata. [3]



Slika 9. Grafički prikaz slaganja globalne matrice krutosti za ravnu gredu opisanu s 5 grednih konačnih elemenata [3]

Matrica masa ovisi o stupnjevima slobode čvorova elemenata, u analiziranoj konstrukciji s obzirom da se radi o gredi, to su pomak u poprečnom smjeru odnosno translacija u smjeru y osi i rotacija oko z osi. [10]

Svedena matrica masa, koja pretpostavlja da se sva masa grednog elementa dijeli na dva dijela i pridružuje odgovarajućim translacijskim čvornim pomacima, najjednostavniji je oblik matrice masa kod grednih konačnih elemenata [11] :

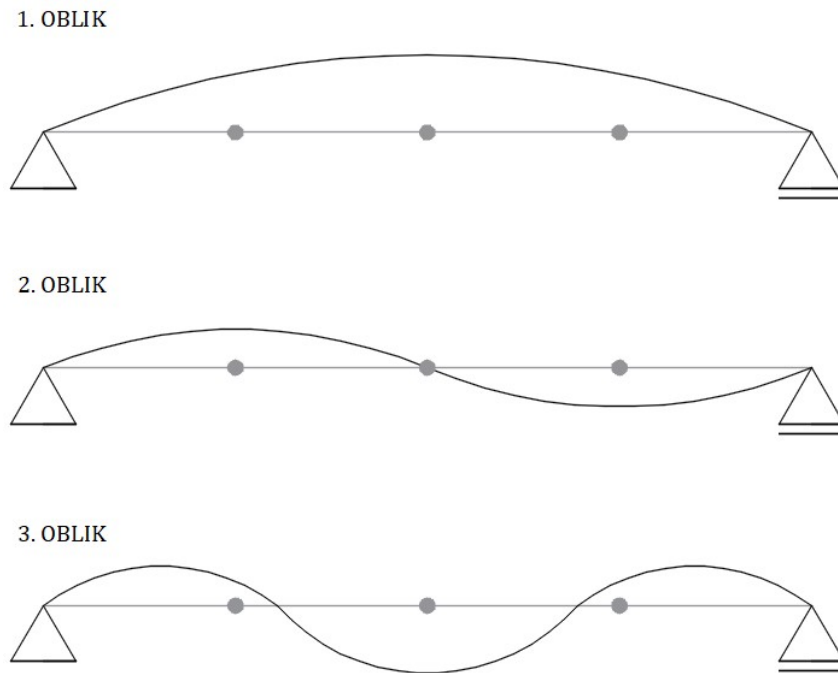
$$m_{loc} = \frac{\rho A l}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Izrazom (3.13) dana je lokalna svedena matrica masa grednog elementa konstantnog poprečnog presjeka i materijalnih karakteristika s dva stupnja slobode. Globalna matrica masa dobiva se na isti način kao i kod matrice krutosti, slaganjem lokalnih matrica masa. [11]

Matrica prigušenja u ovom radu jednaka je nuli.

### 3.4. Oblici osciliranja sustava s 3 stupnja slobode

Postoje tri osnovna oblika osciliranja sustava s 3 stupnja slobode (Slika 10.) koji će se pokušati detektirati u izvedenim eksperimentima. [7]



Slika 10. Tri osnovna oblika osciliranja sustava s 3 stupnja slobode [7]

Analizom slike 10. dolazi se do zaključka da su prvi i drugi oblik osciliranja simetrični u odnosu na sredinu raspona sustava, dok je drugi oblik asimetričan. Ukupni odgovor konstrukcije na dinamičku pobudu sastoji se od kombinacije prikazanih oblika u različitim omjerima.

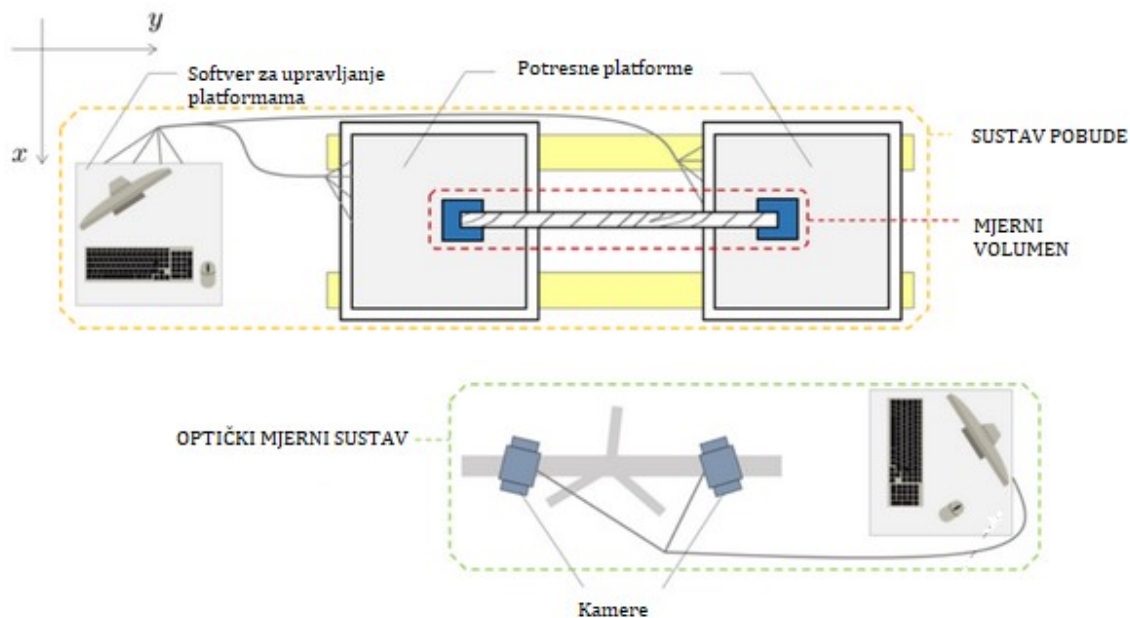


## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Laboratorijska oprema

U svrhu eksperimentalnog dijela ovoga rada korišten je sustav koji se sastoji od dvije potresne platforme Quanser STI-III pokretane elektromagnetskim motorom. Tlocrtne dimenzije potresnih platformi su  $625 \times 625 \text{ mm}^2$  dok njihove osne udaljenosti iznose od 1 m do 2,5 m. Doseg radnih frekvencija je između 0 i 20 Hz, a pomak platformi u oba smjera iznosi do 15 cm. Svaka platforma uz maksimalni teret od 130 kg dostiže ubrzanje od  $1g$  u oba smjera, a bez tereta ubrzanje od  $2,8g$  u smjeru  $x$  i  $4,5g$  u smjeru  $y$ . Platforme se mogu koristiti zasebno ili zajednički kao u opisanom eksperimentu. Pobude platformi mogu biti jednake ili različite, odnosno omogućuju sinkroni rad ili asinkroni rad. [11]

Potresnim platformama upravlja se pomoću softvera LabView kojim je moguće zadavati različite proizvoljne funkcije pobuda ili pak učitavanje potresnih zapisa kao niza podataka ubrzanja u vremenu.



Slika 11. Tlocrt korištene laboratorijske opreme [7]

Za mjerenje pomaka i deformacija sustava korišten je optički mjerni sustav *GOM mbH PONTOS 3D 4M* za 3D beskontaktno optičko mjerenje koji ne utječe na dinamički odziv. Sastoji se od dvije kamere koje omogućuju snimanje do 168 fps (slika po sekundi) rezolucijom 2400x1728 piksela te do 1300 fps rezolucijom 2400x168 piksela. Snimanje mjernih volumena od 25x18 mm<sup>2</sup> do 230x170 mm<sup>2</sup> omogućeno je setom leća žarišne duljine 50 mm, a setom žarišne duljine 20 mm snimanje mjernih volumena od 1750 x 1300 mm<sup>2</sup> do 3800 x 2800 mm<sup>2</sup>. [11]



Slika 12. Optički mjerni sustav GOM

Kamere snimaju koordinate točaka u ravnini s drugačije pozicije, a kombinacijom snimaka dobivaju se prostorne koordinate točaka. Programski paket GOM Aramis omogućuje upravljanje mjernim sustavom i obradu podataka za dobivanje deformacija i naprezanja na površini modela te Pontos, koji služi za obradu podataka mjerenja za dobivanje pomaka, brzina i ubrzanja točaka modela [11].

## 4.2. Opis modela i postupak mjerenja

Prije provedbe ispitivanja na modelu izvršena je kalibracija mjernih uređaja, odnosno podešavanje mjernog uređaja kako bi se pogreške mjerenja svele na minimum.

Kalibracijski objekt odabran je na temelju mjernog volumena modela na kojem se provodi ispitivanje. Za potrebe ovoga eksperimenta koristi se kalibracijski križ koji omogućuje snimanje mjernog volumena od  $1750 \times 1300 \text{ mm}^2$  do  $3800 \times 2800 \text{ mm}^2$ .



Slika 13. Kalibracijski križ

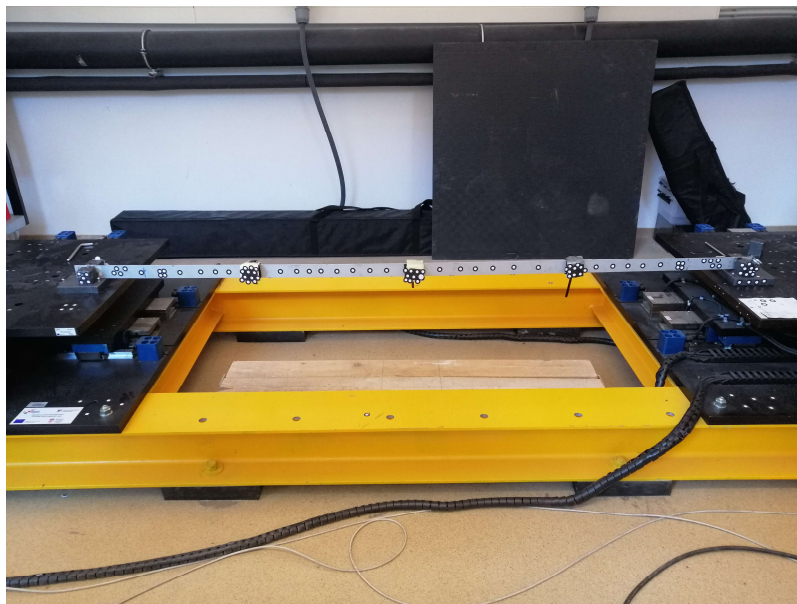
U program za kalibraciju se unose podaci o temperaturi prostora i tipu kalibracijskog objekta te udaljenosti kamera i žarišnoj duljini leća, koje se očitavaju iz tablica proizvođača. Kalibracijski križ mora biti dobro osvijetljen kako bi program prepoznao sve točke prilikom procesa kalibracije u kojem se izmjenjuju 24 različita položaja kalibracijskog objekta. Nakon uspjele kalibracije, pristupa se procesu mjerenja.

Mjerenje je provedeno na metalnoj gredi slobodno oslonjenoj na potresnim pločama pomoću zglobnih oslonaca. Na gredi su pričvršćene tri jednake koncentrirane mase, na četvrtinama raspona.

Programski paket GOM koristi stohastički uzorak koji čine zaljepljeni markeri za praćenje deformacija i pomaka modela. Točkaste naljepnice slučajnim redoslijedom zaljepljene su na one dijelove modela koji su od interesa za eksperiment, u ovom slučaju to su oslonci i koncentrirane mase. [4]

Reflektorom se postiže ravnomjerna i optimalna osvjetljenost modela kako bi sustav prepoznao sve zalijepljene točke.

Prije početka mjerenja, postavlja se sustav za optičko mjerenje s definiranim razmakom i nagibom kamera te udaljenosti od modela iz uputa koje pruža izvođač. Nakon izvršene kalibracije, stativ s kamerama treba oprezno pomicati kako se ne bi promijenio položaj kamera, u protivnom, proces kalibracije je potrebno ponoviti.



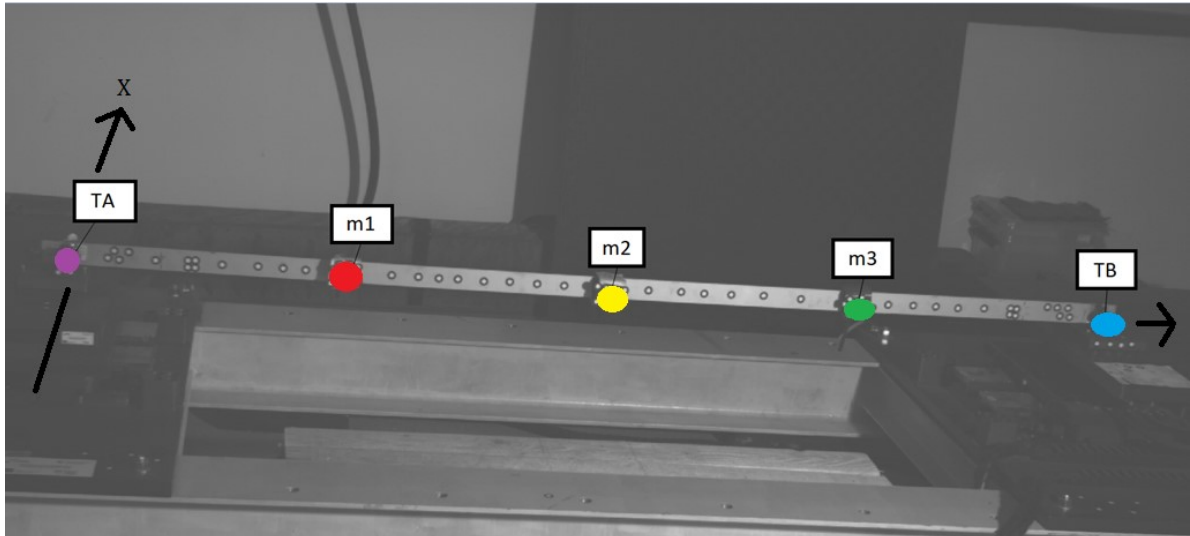
Slika 14. Model spreman za mjerenje

#### **4.3. Ispitivanje dinamičkog odziva slobodne oslonjene grede**

Provedeno je sveukupno deset eksperimenata različitih potresnih pobuda. Kao što je ranije opisano, sustav za mjerenje bilježi podatke o pomacima i deformacijama mjerenog objekta u ovom slučaju metalne dugačke slobodno oslonjene grede. Podaci se pohranjuju na računalu i obrađuju u obliku tablica i grafova.

Točke interesa su ovdje oslonci i koncentrirane mase dodane na gredu.

Za svaki eksperiment grafovima su prikazane koordinate oslonca A (  $T_A$  ), koncentrirane mase 1 (  $m_1$  ), koncentrirane mase 2 (  $m_2$  ), koncentrirane mase 3 (  $m_3$  ) i oslonca B (  $T_B$  ) u ovisnosti o vremenu.



Slika 15. Oznake promatranog sustava

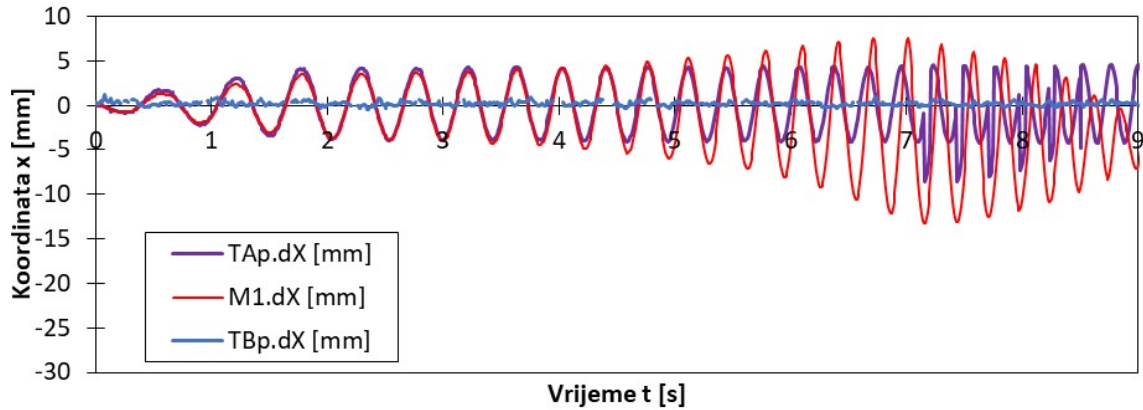
Svakoj točki dodijeljena je boja radi lakšeg snalaženja u rezultatima ( Slika 14 ).

Prva tri grafa svakog eksperimenta pokazuje položaj jedne od masa ( $M_1$ ,  $M_2$  ili  $M_3$ ) i oslonca A, sljedeći graf prikazuje relativne pomake  $M_2$  u odnosu na oslonac A. Iz grafova na kojem u prikazani položaji svih triju masa, iz njih je odabran trenutak vremena  $t$  koji se smatra zanimljivim zbog položaja točaka i na osnovu podataka o položaju u odabranom vremenu izveden je graf koji nam prikazuje deformaciju grede u vremenu  $t$ . Svaki eksperiment analiziran je s obzirom na graf odgovora grede na dinamičku pobudu.

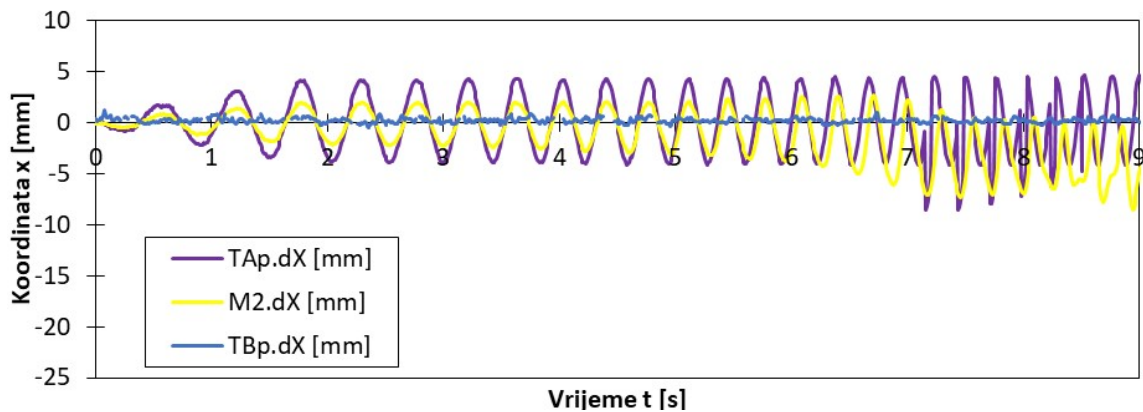


## EKSPERIMENT 1

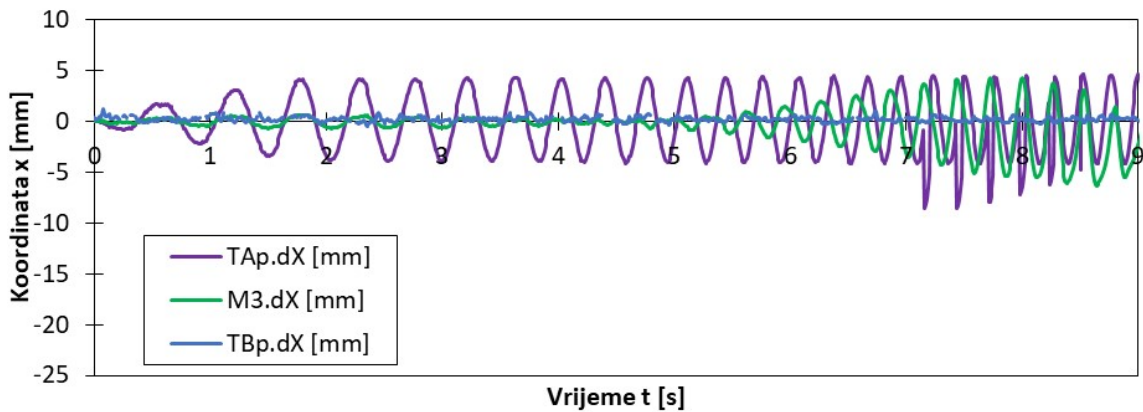
Rezultati za eksperiment 1 prikazani su na slikama 16., 17., 18., 19., 20. i 21. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao sinesweep funkcija.



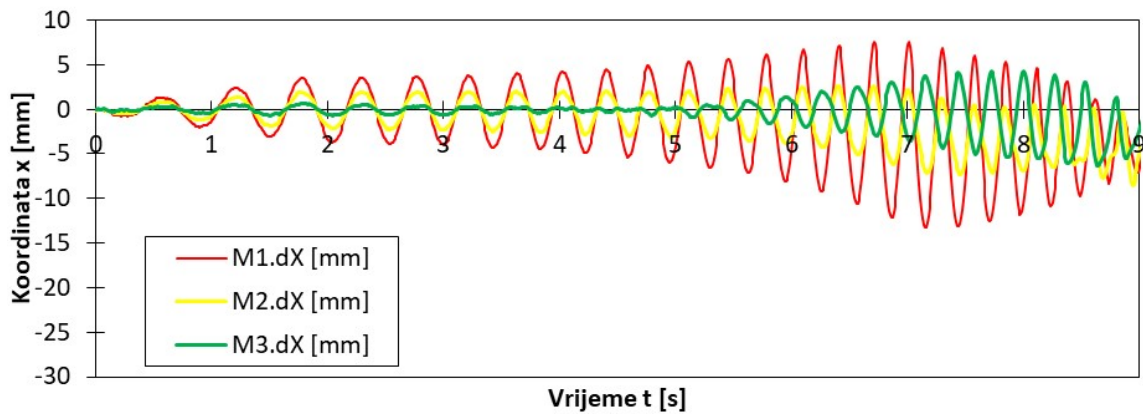
Slika 16. Graf funkcije pobude u vremenu



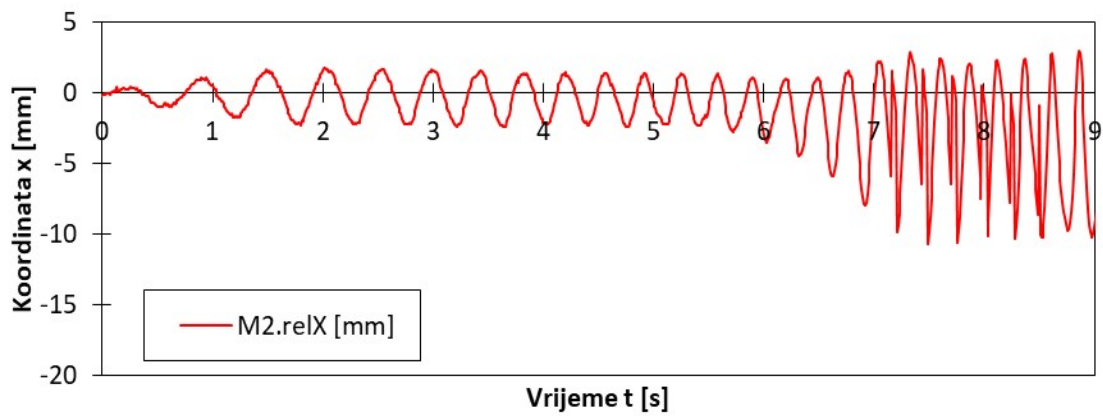
Slika 17. Graf funkcije pobude u vremenu



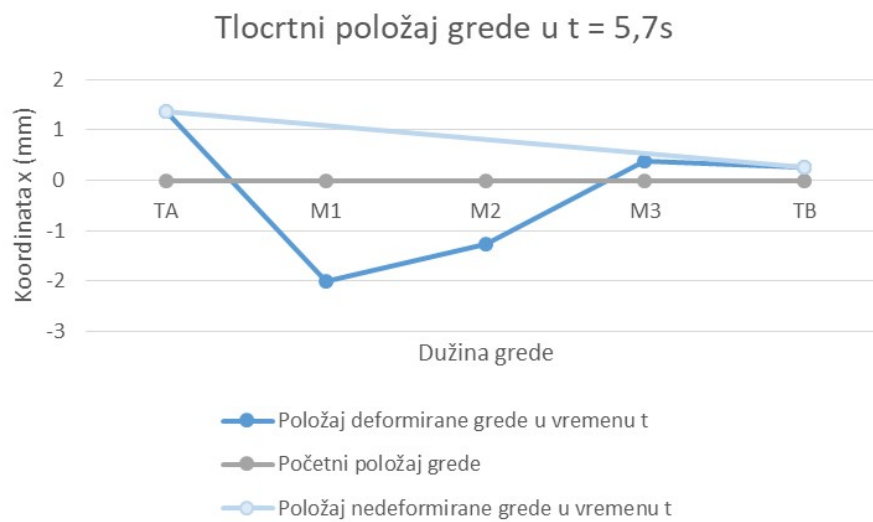
Slika 18. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 19. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 20. Graf funkcije pobude u vremenu

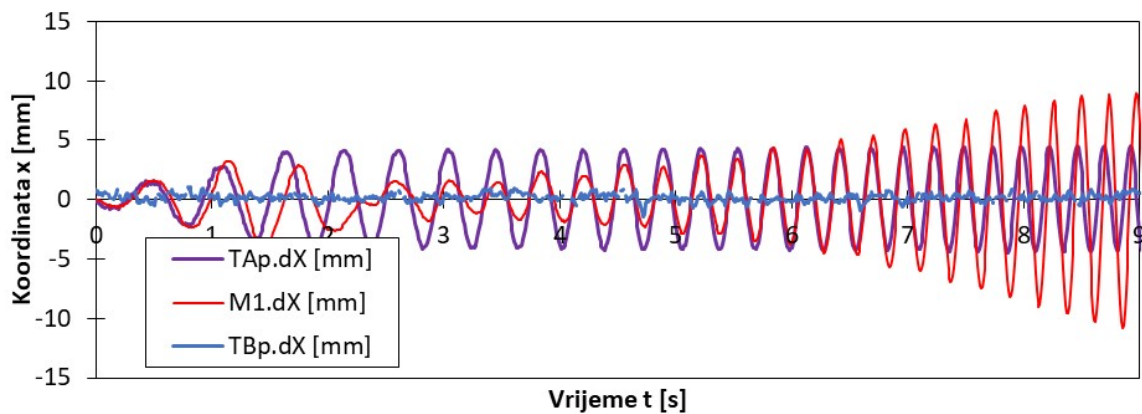


Slika 21. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

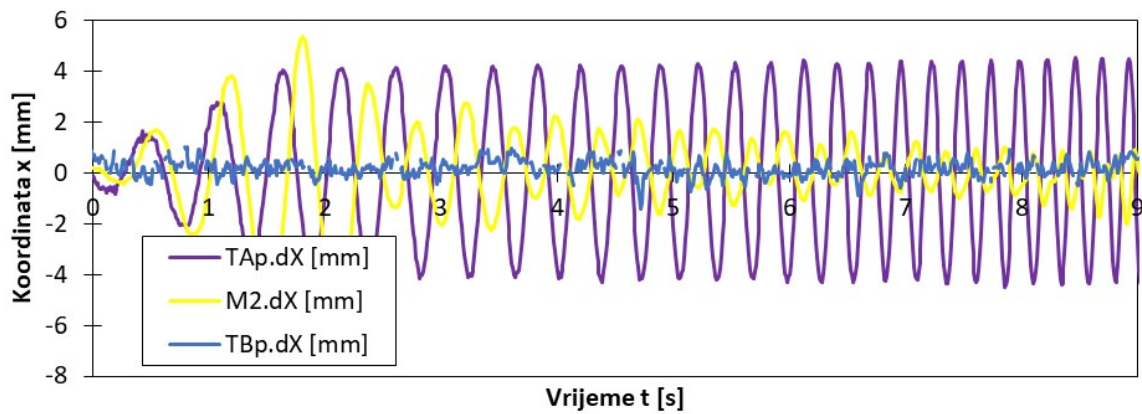
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 21.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidljiva je kombinacija 2. tona i simetričnih tonova (Slika 10.).

## EKSPERIMENT 2

Rezultati za eksperiment 2 prikazani su na slikama 22., 23., 24., 25., 26. i 27. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao sinesweep funkcija.

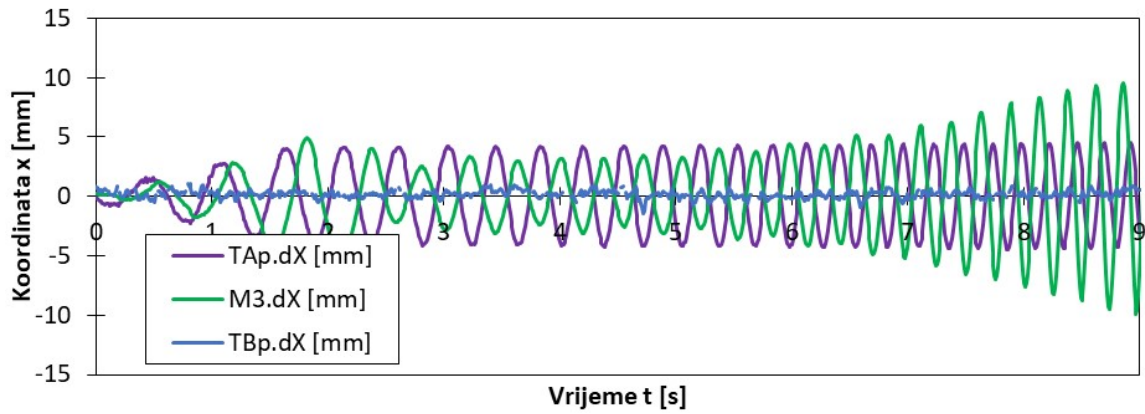


Slika 22. Graf funkcije pobude u vremenu

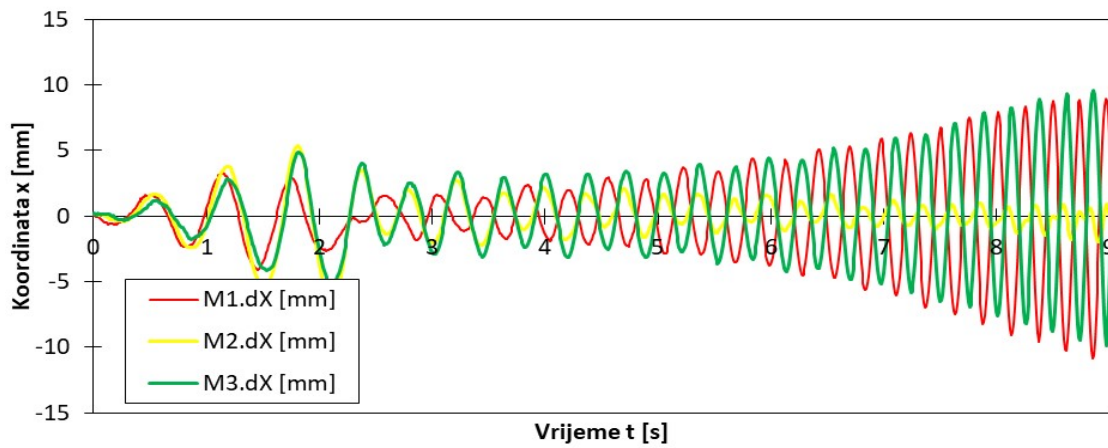


Slika 23 . Graf funkcije pobude u vremenu

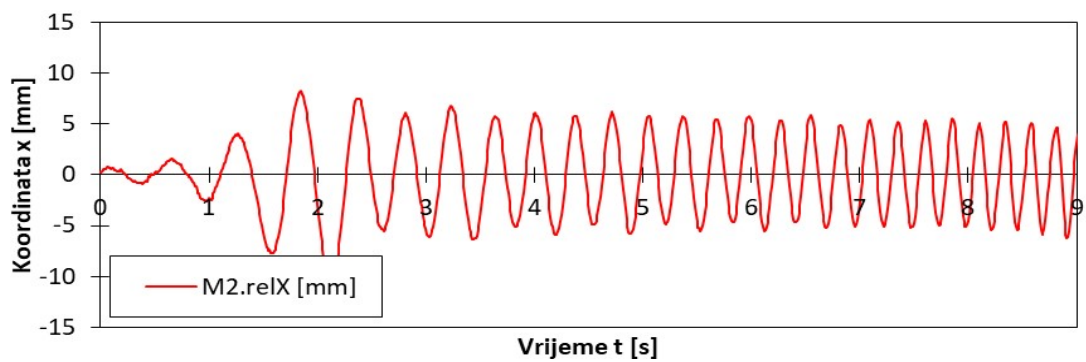




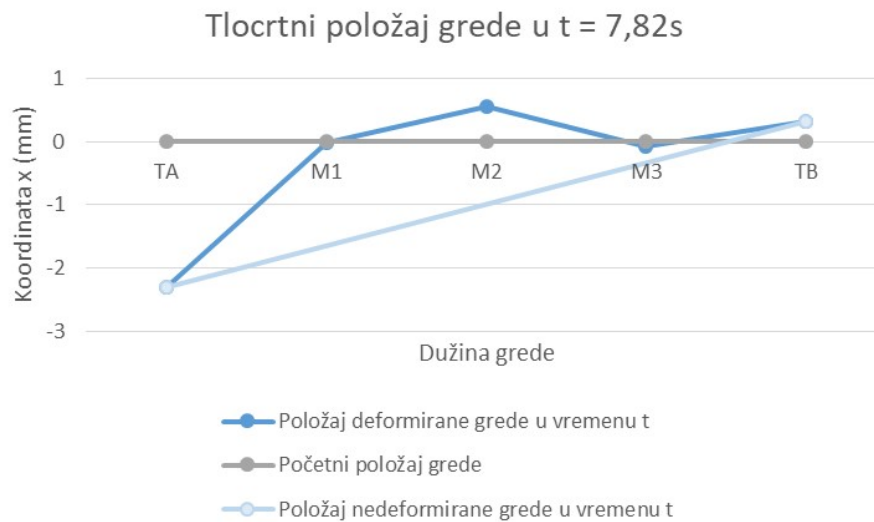
Slika 24. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 25. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 26. Graf funkcije pobude u vremenu

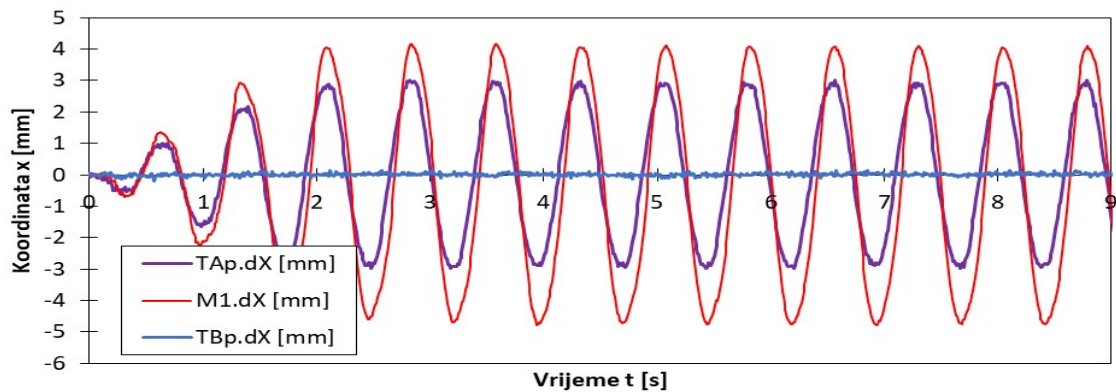


Slika 27. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

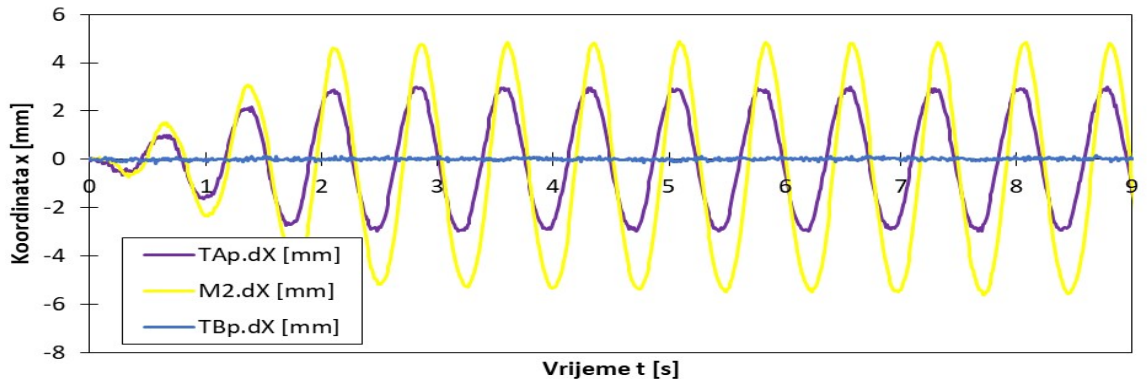
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 27.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidljiva je kombinacija simetričnih i asimetričnih tonova. (Slika 10.).

### EKSPERIMENT 3

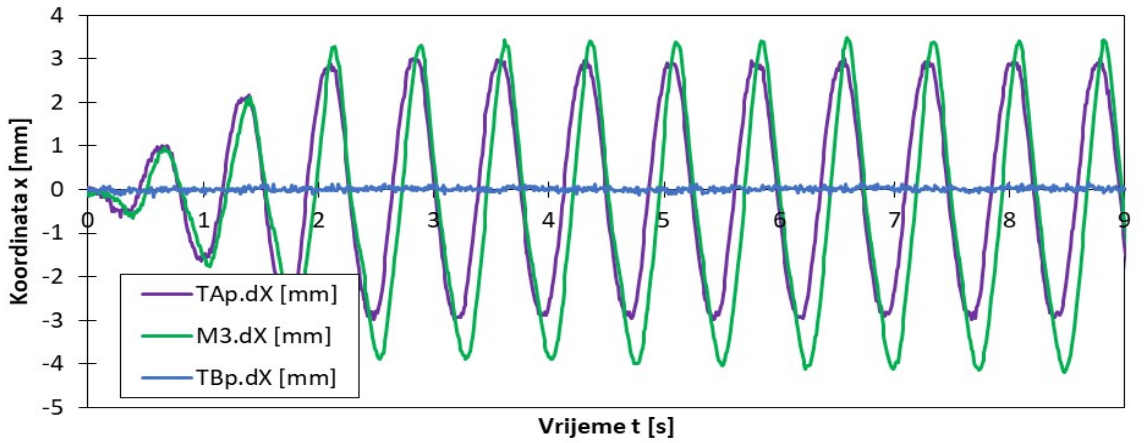
Rezultati za eksperiment 2 prikazani su na slikama 28., 29., 30., 31., 32. i 33. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao sinusoidalna funkcija.



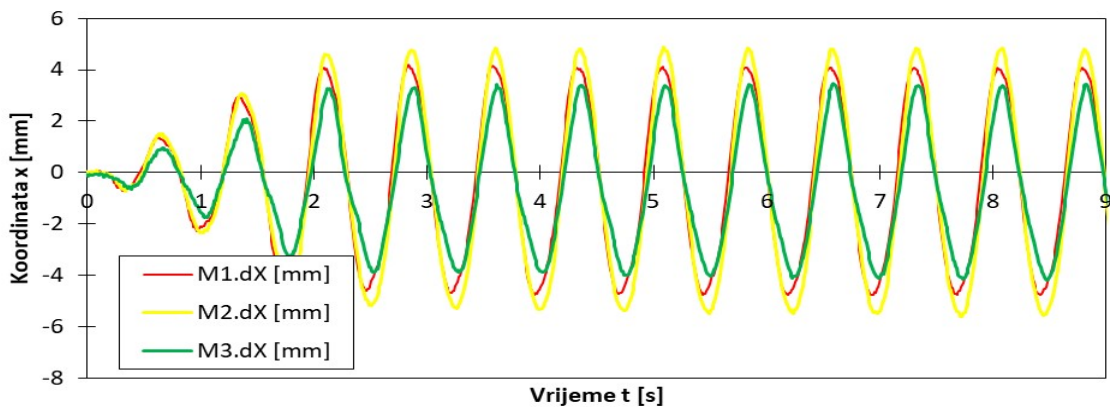
Slika 28. Graf funkcije pobude u vremenu



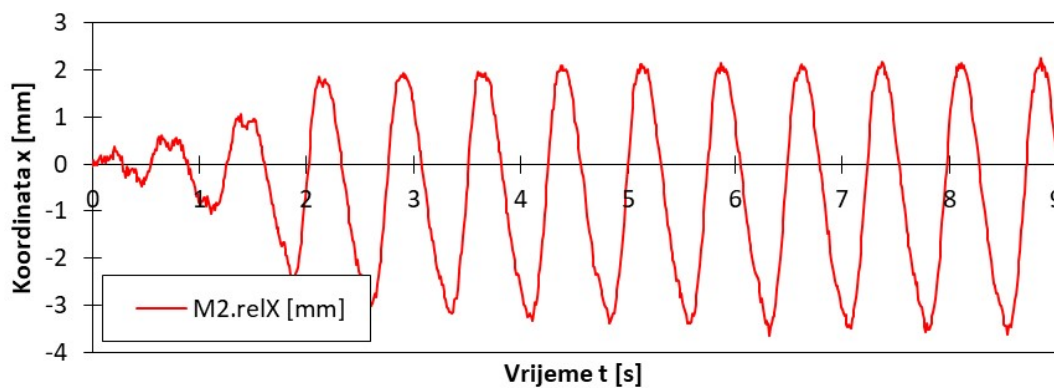
Slika 29. Graf funkcije pobude u vremenu



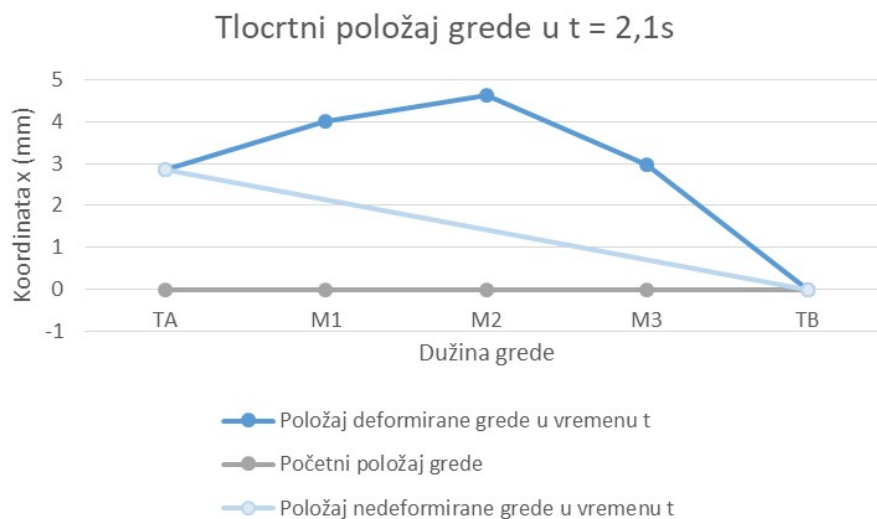
Slika30. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 31. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 32. Graf funkcije pobude u vremenu

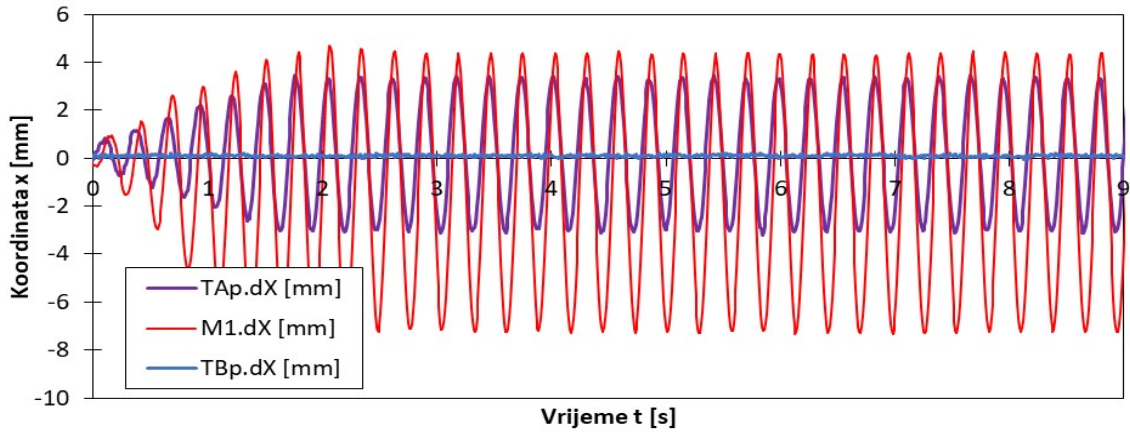


Slika 33. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

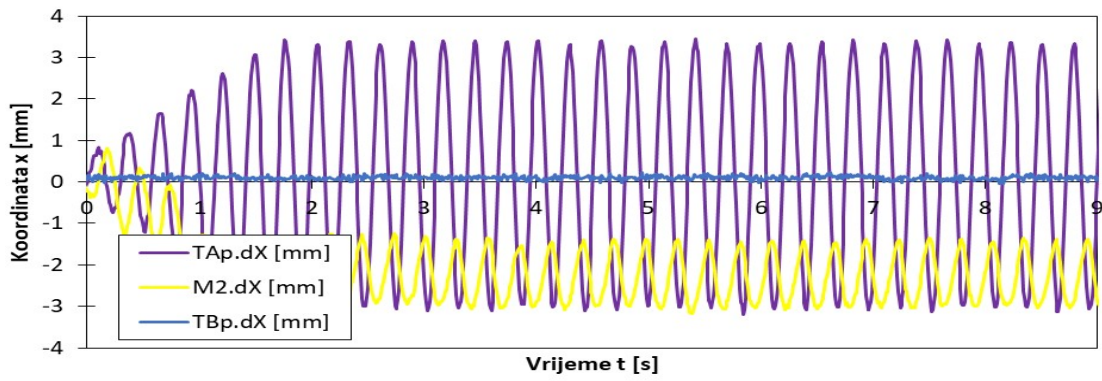
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 33.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidljiva je kombinacija, u velikom dijelu 1. tona i nešto manjem 3. tona. (Slika 10.). Također, iz grafa na Slici 33. je moguće uočiti da se greda cijelo vrijeme giba tako da joj deformirani oblik slijedi najvećim dijelom 1. oblik. Frekvencija funkcije pobude oslonca A je blizu vlastite frekvencije koja odgovara 1. obliku osciliranja.

#### EKSPERIMENT 4

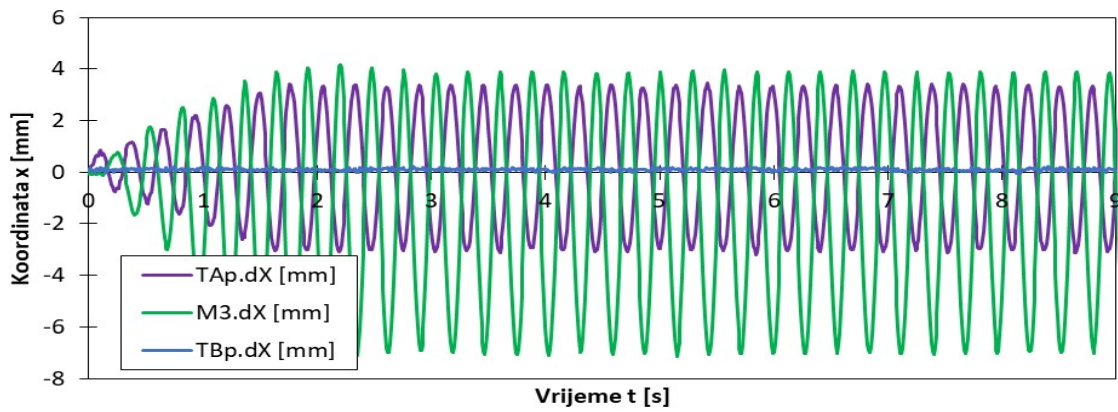
Rezultati za eksperiment 4 prikazani su na slikama 34., 35., 36., 37., 38. i 39. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao sinusoidalna funkcija.



Slika 34. Graf funkcije pobude u vremenu

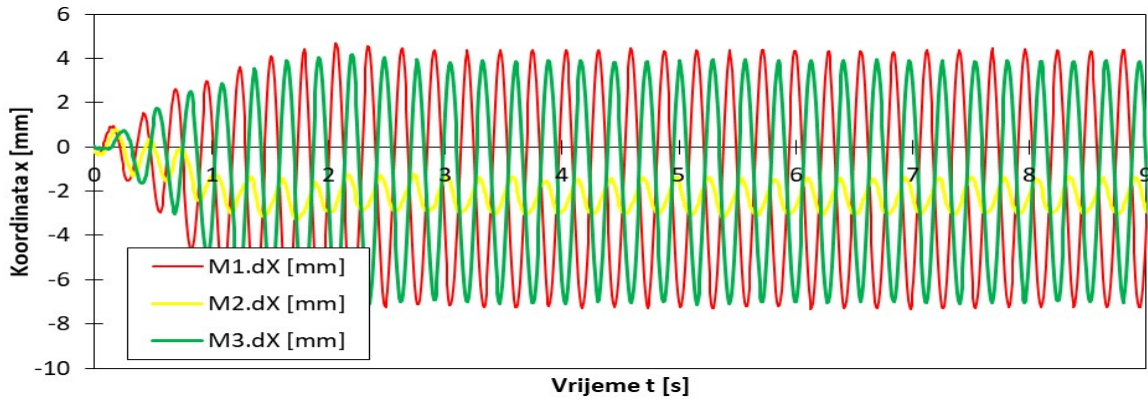


Slika 35. Graf funkcije pobude u vremenu

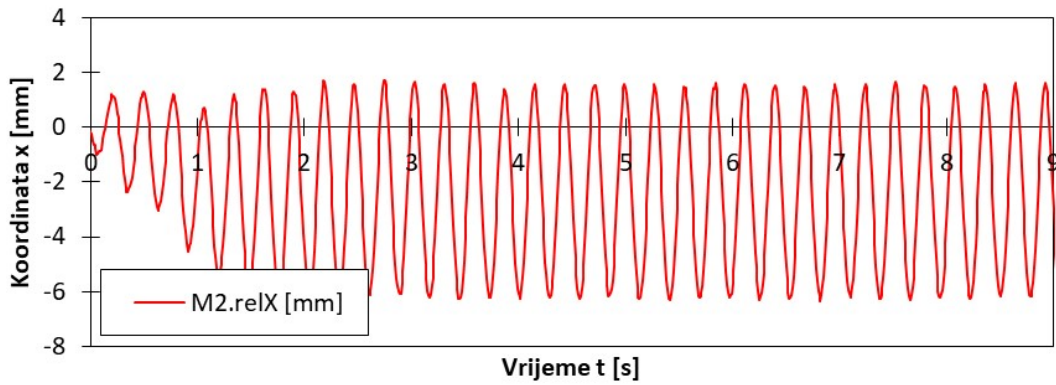


Slika 36. Graf funkcije pobude u vremenu

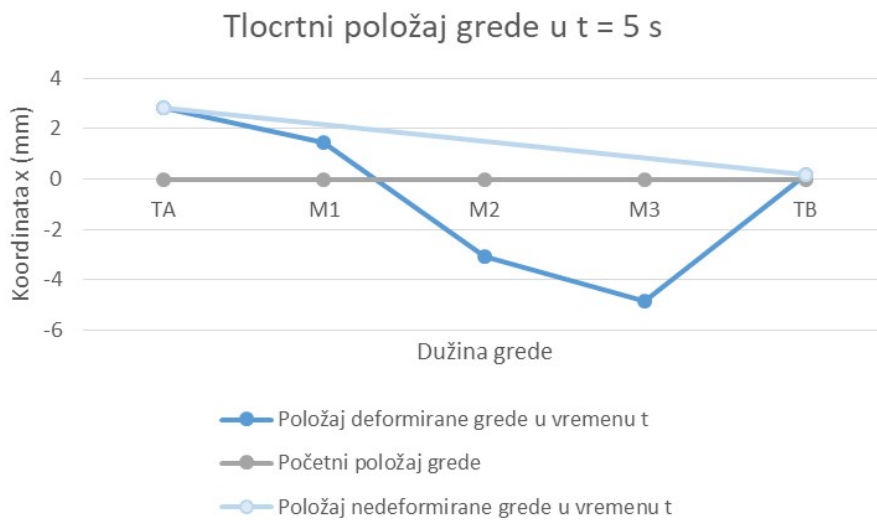




Slika 37. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 38. Graf funkcije pobude u vremenu

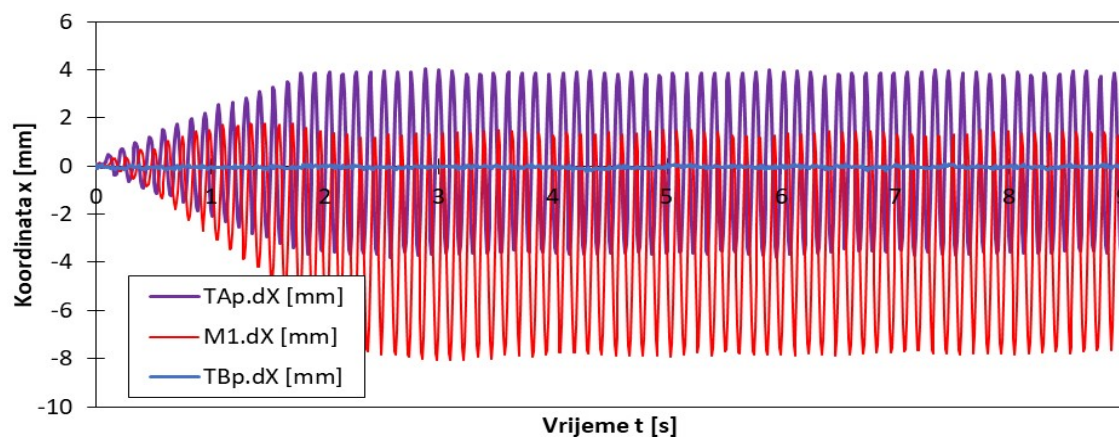


Slika 39. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

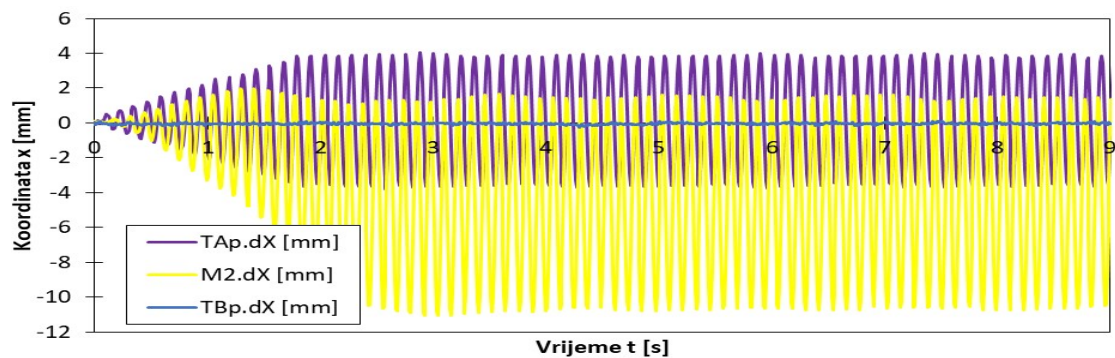
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 39.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidljiva je dominacija 2. oblika, uz prisutnost i 1. oblika osciliranja (Slika 10.). Frekvencija funkcije pobude je bliska vlastitoj frekvenciji koja odgovara 2. tonu osciliranja.

## EKSPERIMENT 5

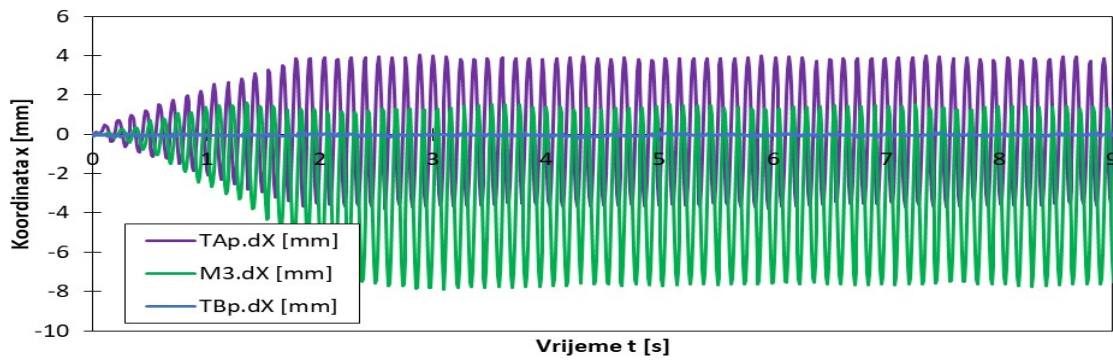
Rezultati za eksperiment 5 prikazani su na slikama 40., 41., 42., 43., 44. i 45. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao sinusoidalna funkcija.



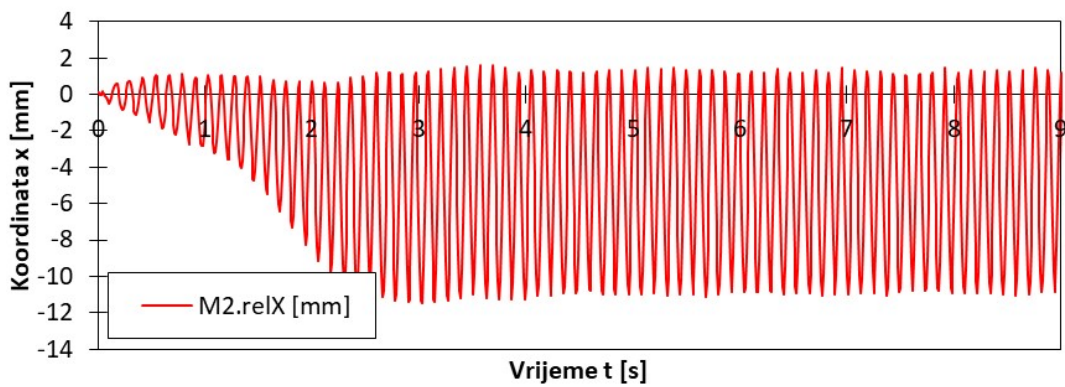
Slika 40. Graf funkcije pobude u vremenu



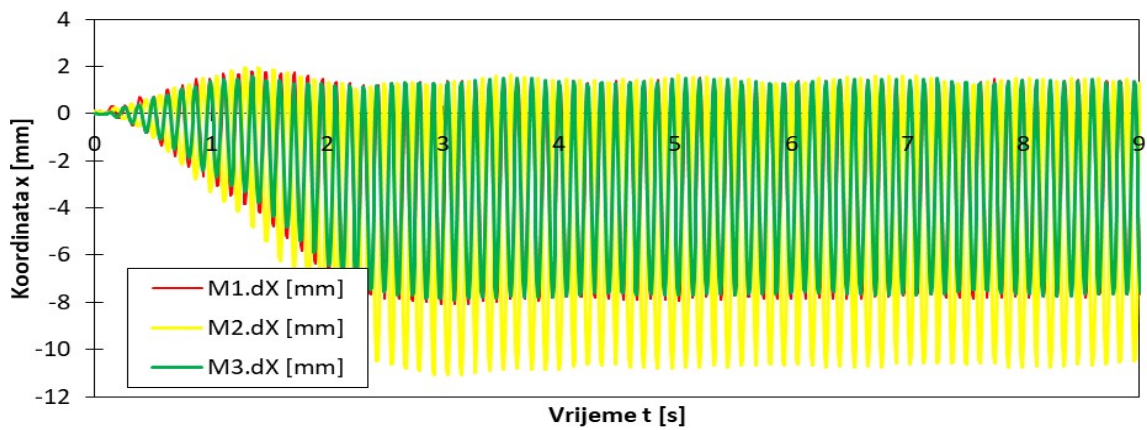
Slika41. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 42. Graf funkcije pobude u vremenu

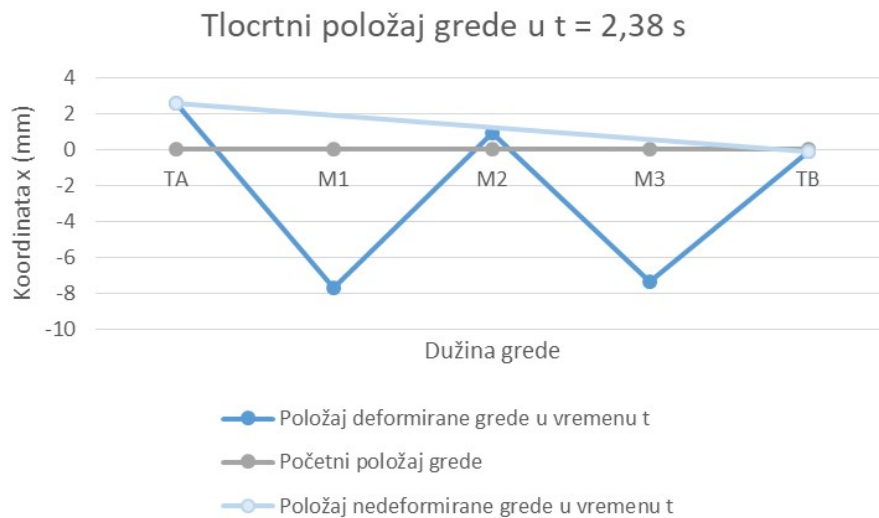


Slika 43. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 44. Graf funkcije pobude u vremenu



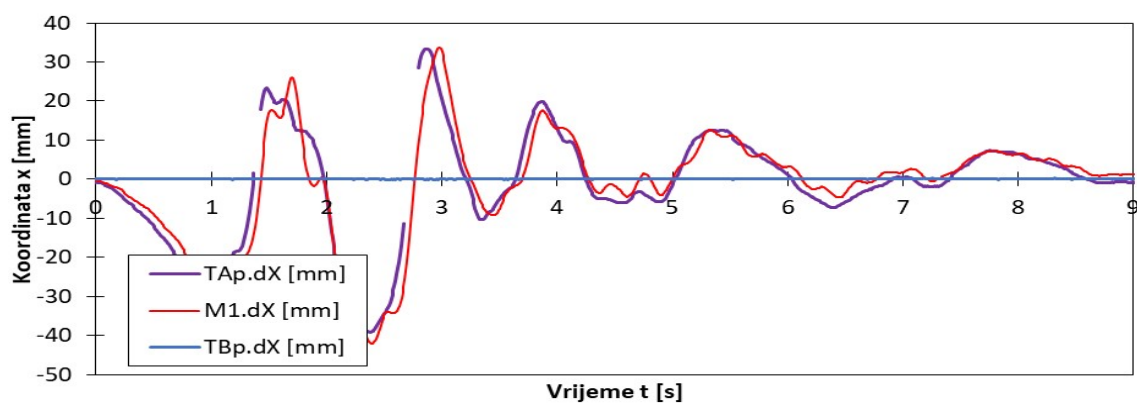


Slika 45. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

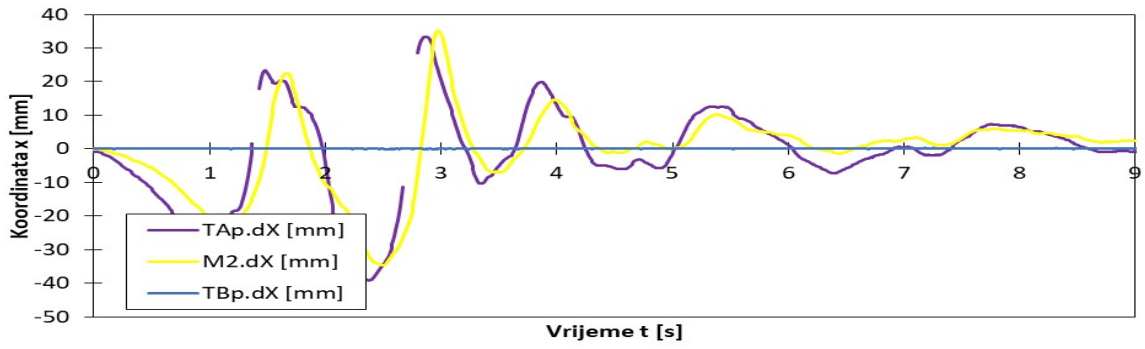
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 45.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu jasno je vidljiv oblik 3. tona (Slika 10.). Razlog tome je što je frekvencija funkcije pobude oslonca A bliska vlastitoj frekvenciji koja odgovara 3. tonu osciliranja.

## EKSPERIMENT 6

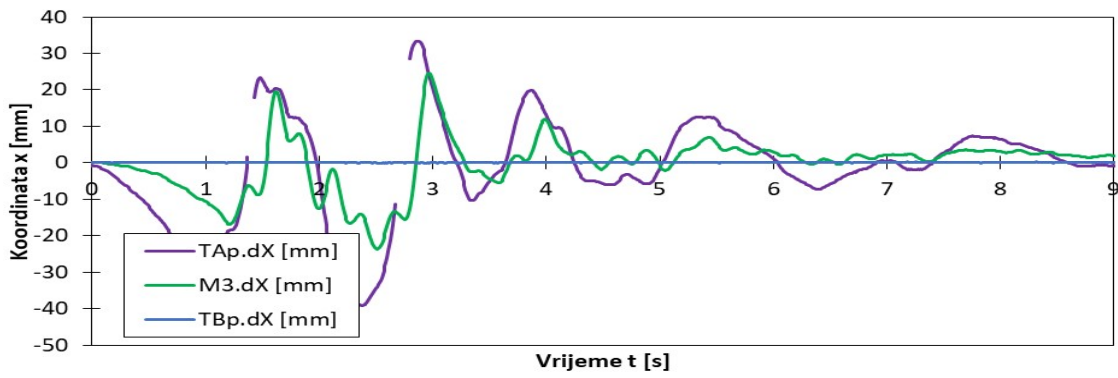
Rezultati za eksperiment 6 prikazani su na slikama 46., 47., 48., 49., 50. i 51. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao zapis izmjeren tijekom potresa u Norridgeu 1994. godine za glavni smjer.



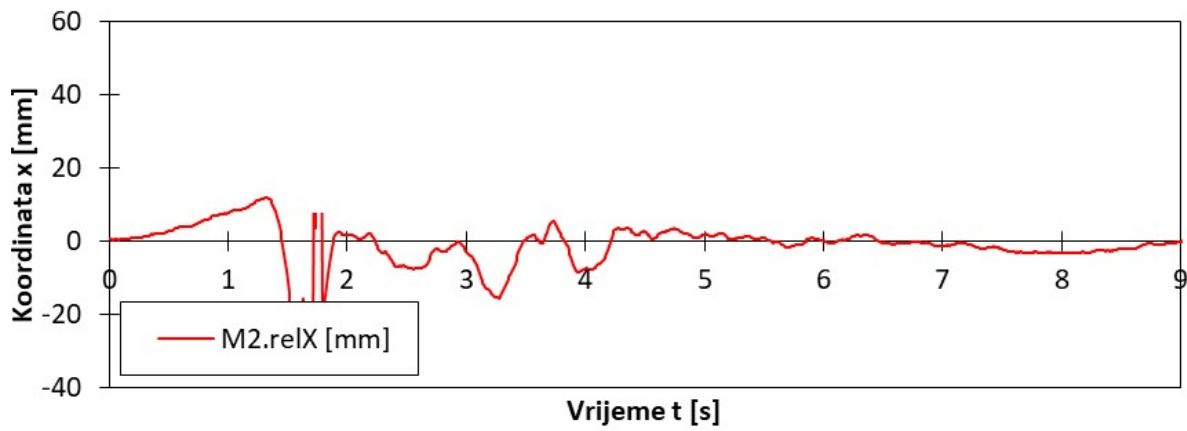
Slika 46. Graf funkcije pobude u vremenu



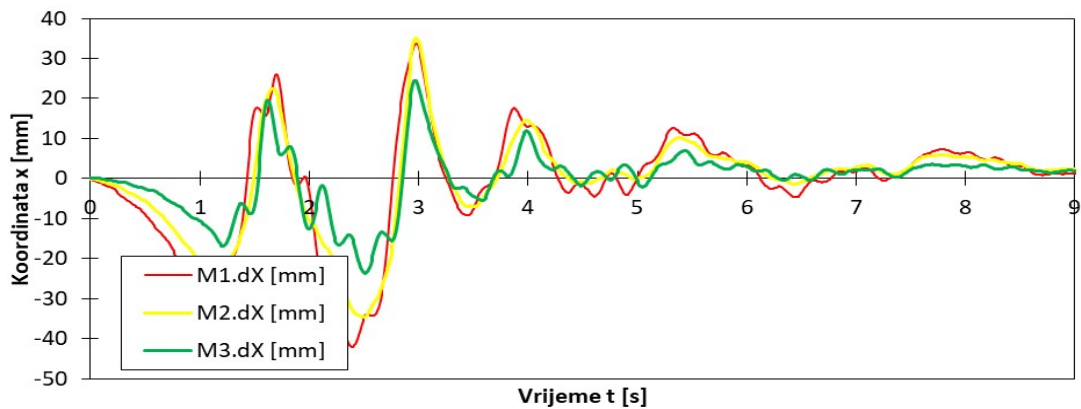
Slika 47. Graf funkcije pobude u vremenu



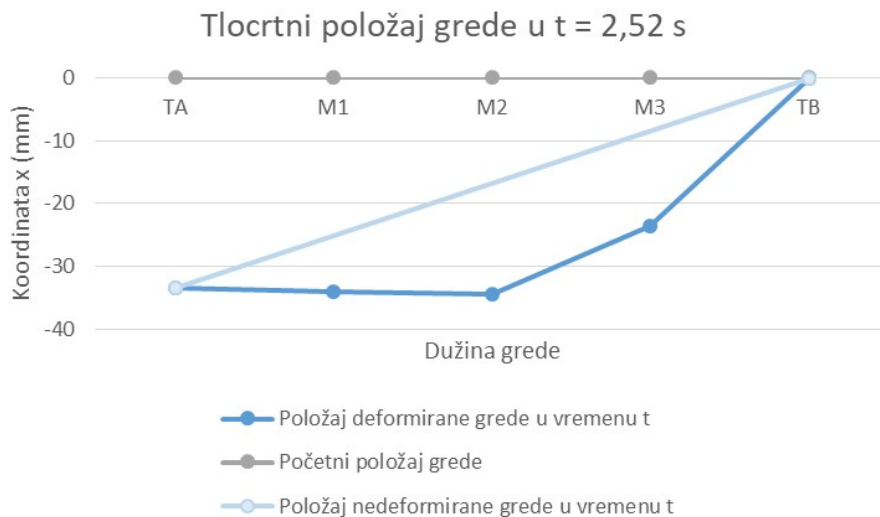
Slika 48. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 49. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 50. Graf funkcije pobude u vremenu

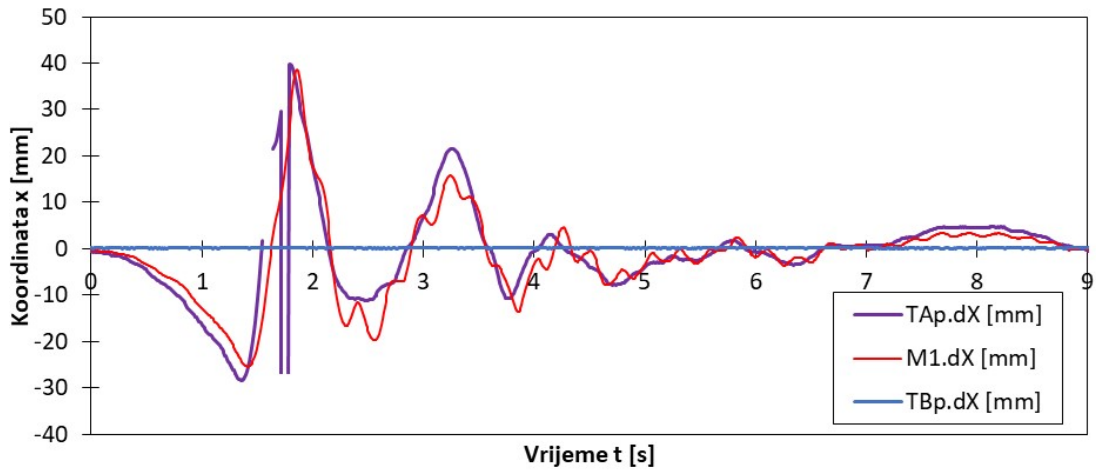


Slika 51. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

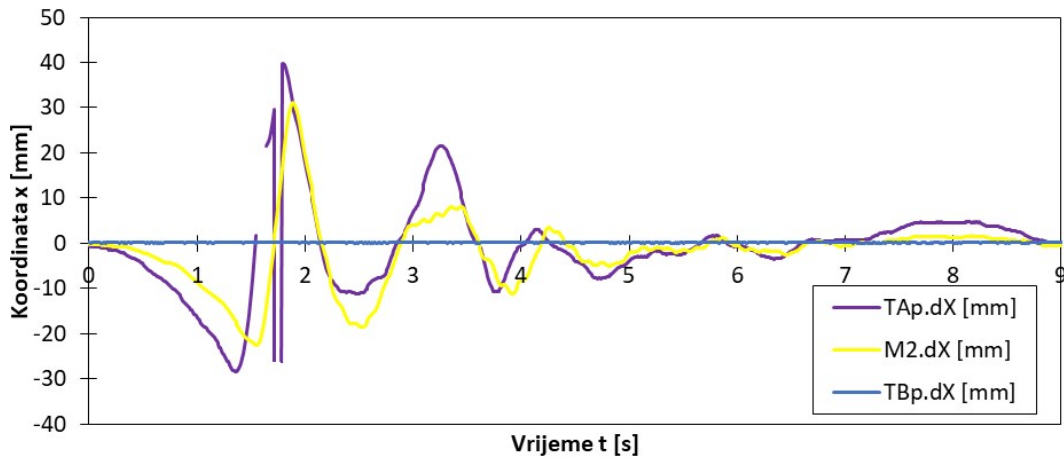
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 51.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidljiva je dominacija 1. tona (Slika 10.). Očekuje se da bi analizom deformiranog oblika grede tijekom cijelog eksperimenta bilo moguće detektirati i udio viših tonova.

## EKSPERIMENT 7

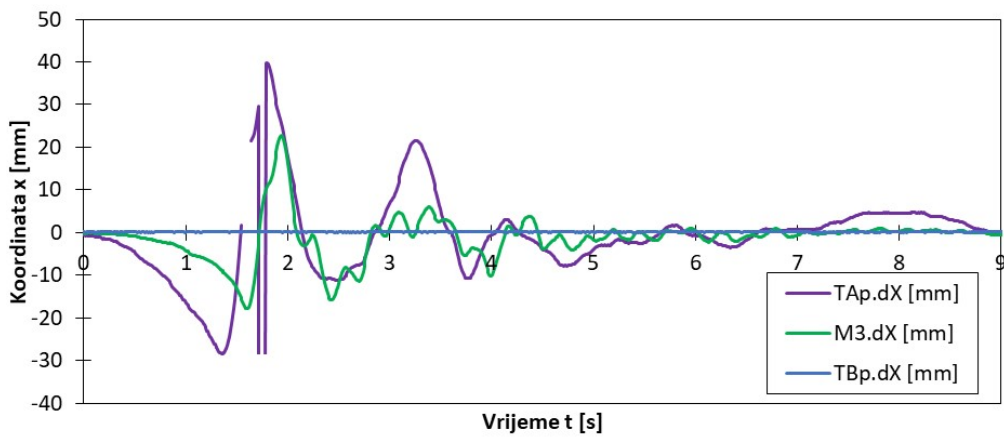
Rezultati za eksperiment 7 prikazani su na slikama 52., 53., 54., 55., 56. i 57. Pobuda je nanosena u obliku funkcije pomaka stola A odnosno oslonca A kao zapis izmjeren tijekom potresa u Norridgeu 1994. godine za sporedni smjer.



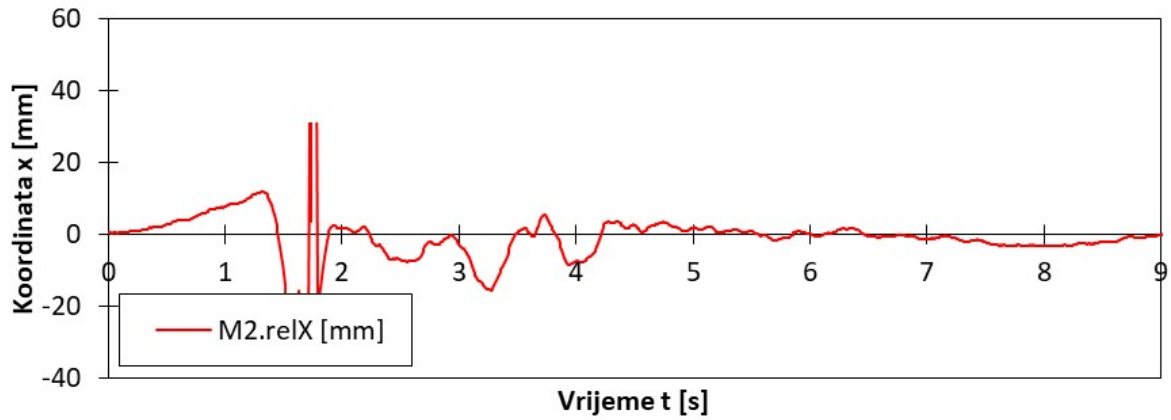
Slika 52. Graf funkcije pobude u vremenu



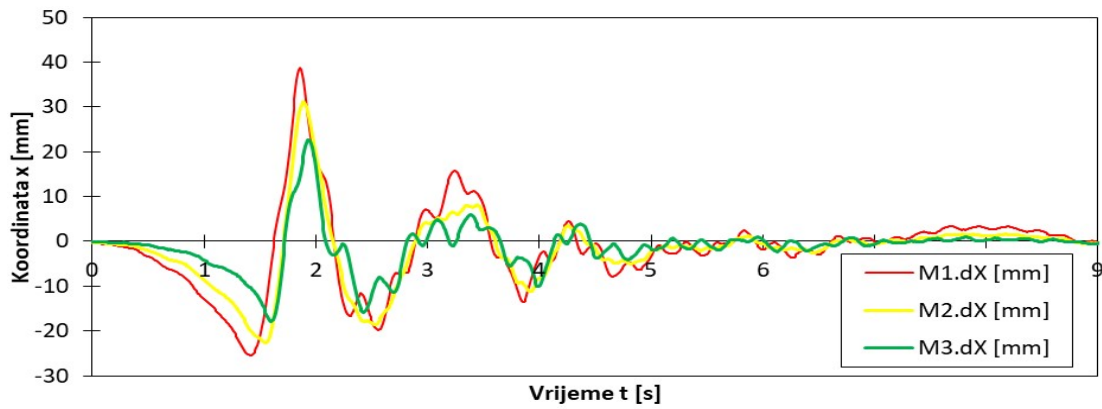
Slika 53. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 54. Graf funkcije pobude u vremenu

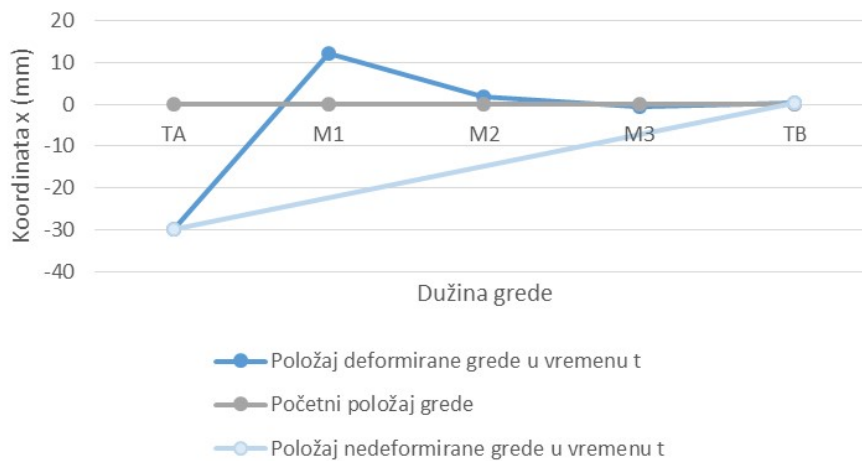


Slika 55. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 56. Graf funkcije pobude u vremenu

Tlocrtni položaj grede u  $t = 1,72$  s

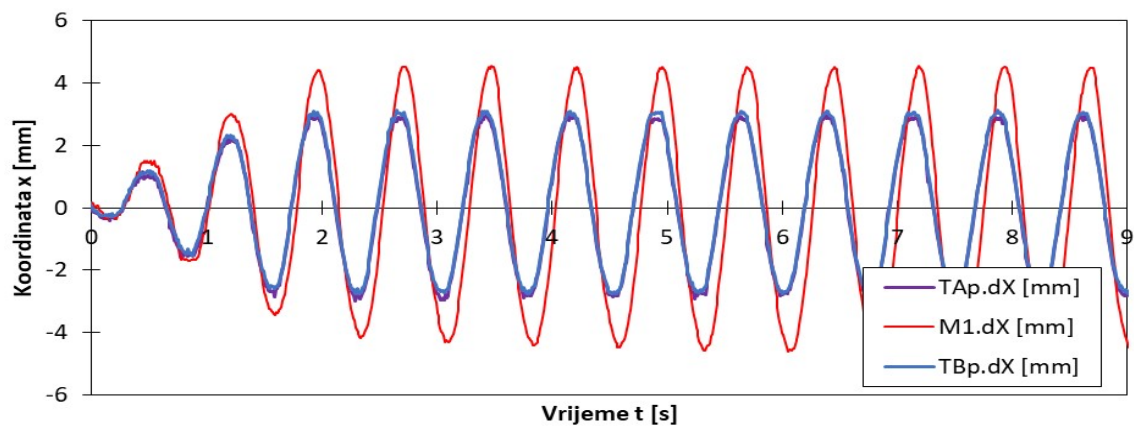


Slika 57. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

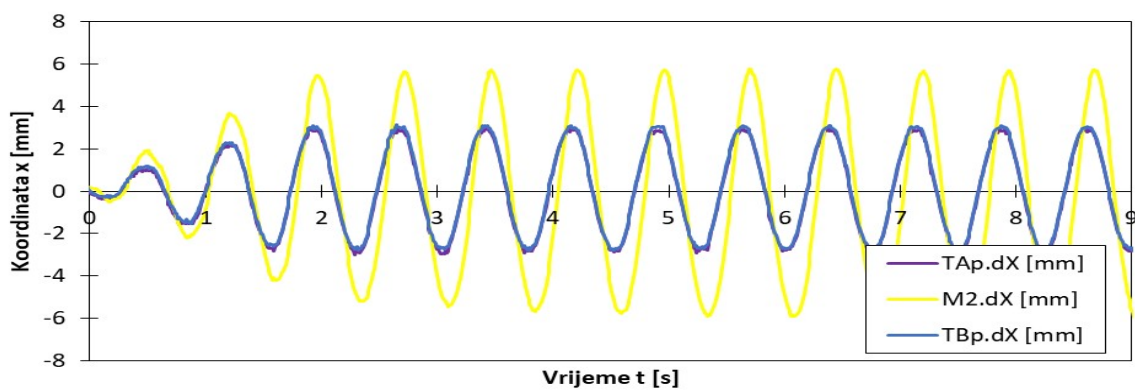
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 57.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidljiva je kombinacija simetričnih i nesimetričnih oblika (Slika 10.). Dakle, potresna pobuda u eksperimentu 7 je pobudila i više tonove osciliranja.

## EKSPERIMENT 8

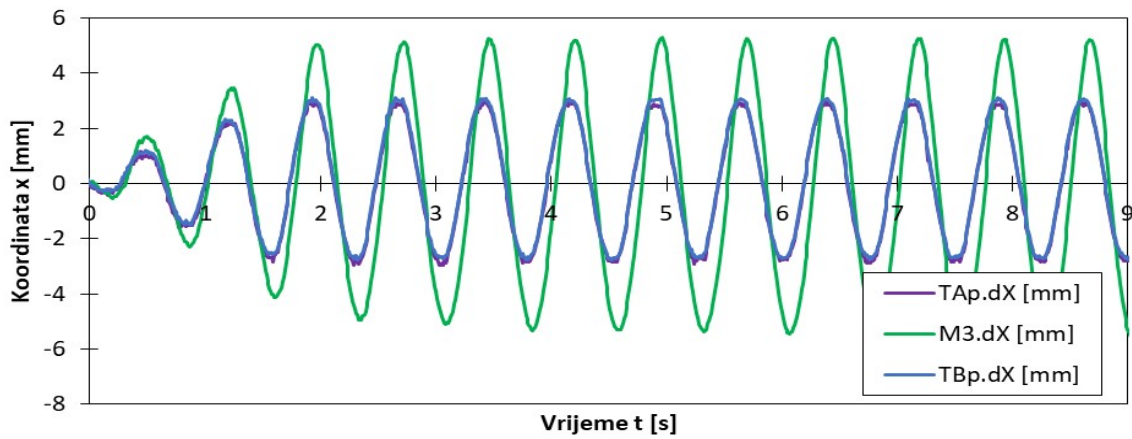
Rezultati za eksperiment 8 prikazani su na slikama 58., 59., 60., 61., 62. i 63. Z razliku od eksperimenata prikazanih do sada, u ovo slučaju je pobuda nanosena u obliku jednake funkcije pomaka oba stola odnosno oslonca A kao sinusoidalna funkcija.



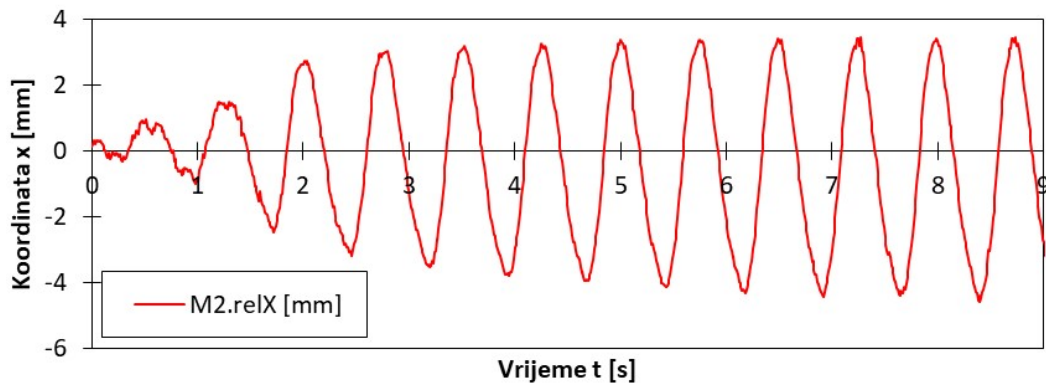
Slika 58. Graf funkcije pobude u vremenu



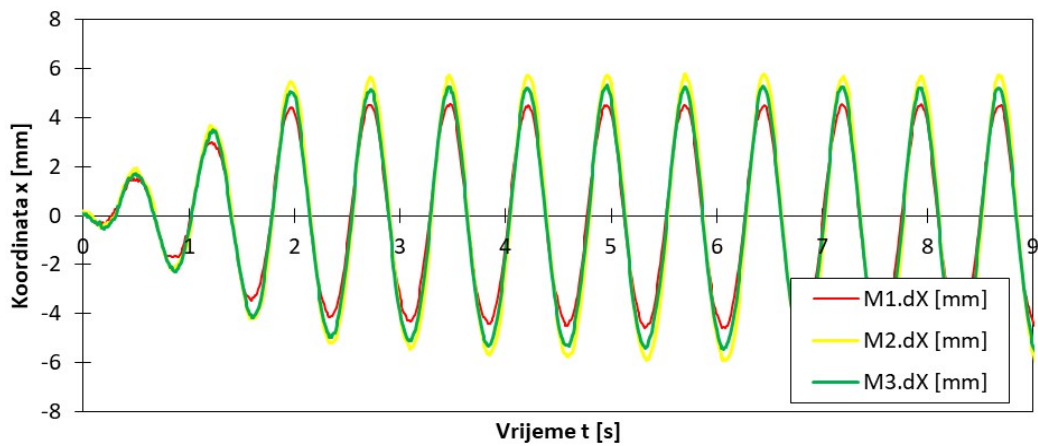
Slika 59. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 60. Graf funkcije pobude u vremenu

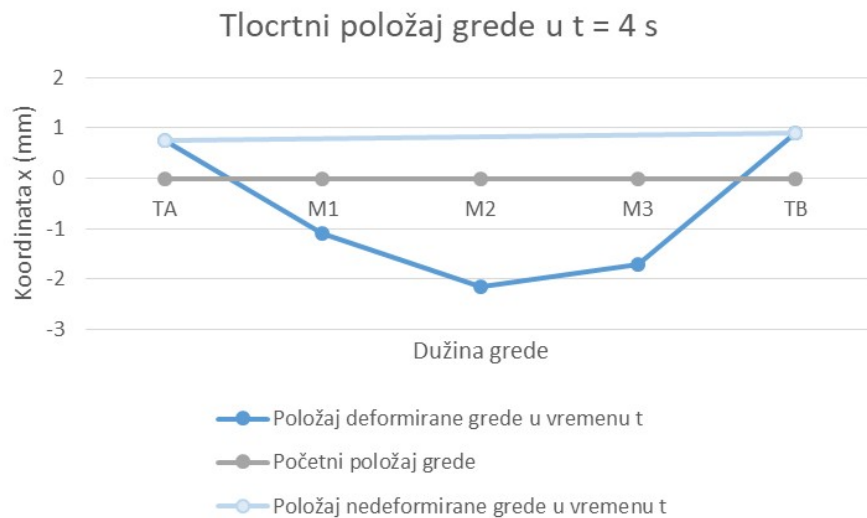


Slika 61. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 62. Graf funkcije pobude u vremenu



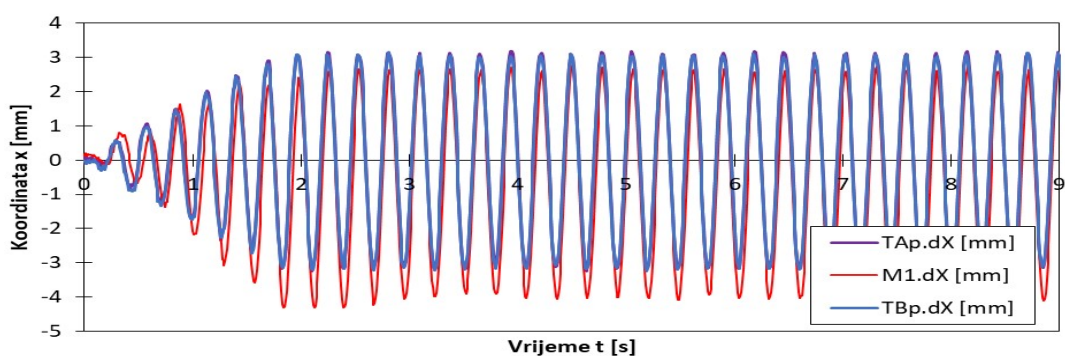


Slika 63. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 57.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidi se najslabiji oblik 1. tona (Slika 10.) i to zbog toga što je frekvencija funkcije pobude blizu 1. vlastite frekvencije sustava.

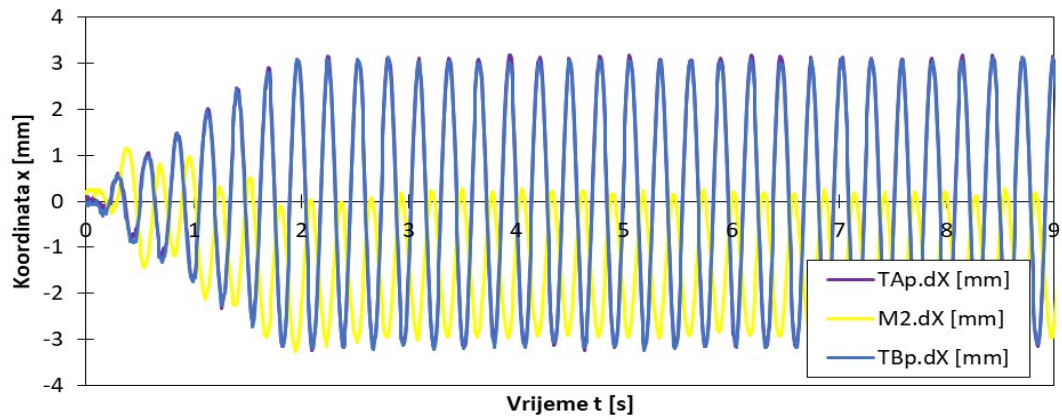
### EKSPERIMENT 9

Rezultati za eksperiment 9 prikazani su na slikama 64., 65., 66., 67., 68. i 69. Pobuda je, kao i u prethodnom eksperimentu, nanjena u obliku jednake funkcije pomaka oba stola kao sinusoidalna funkcija. U ovom eksperimentu je frekvencija funkcije pobude povećana u odnosu na prethodni eksperiment.

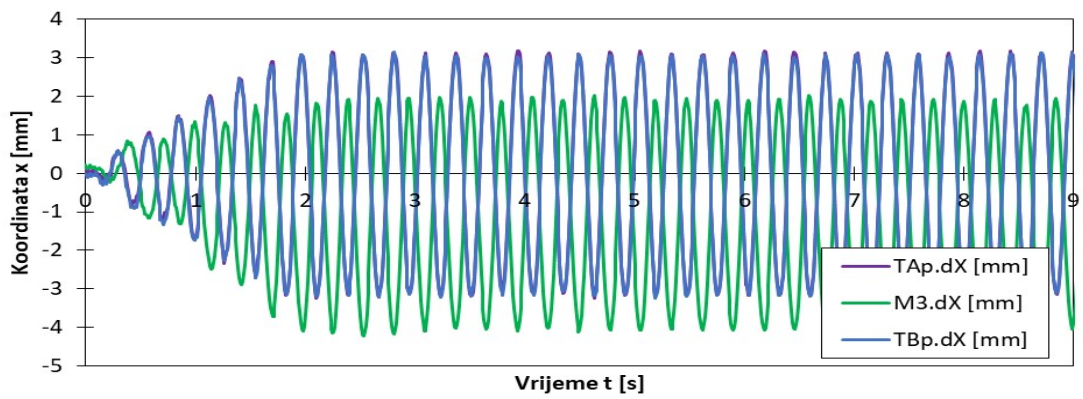


Slika 64. Graf funkcije pobude u vremenu

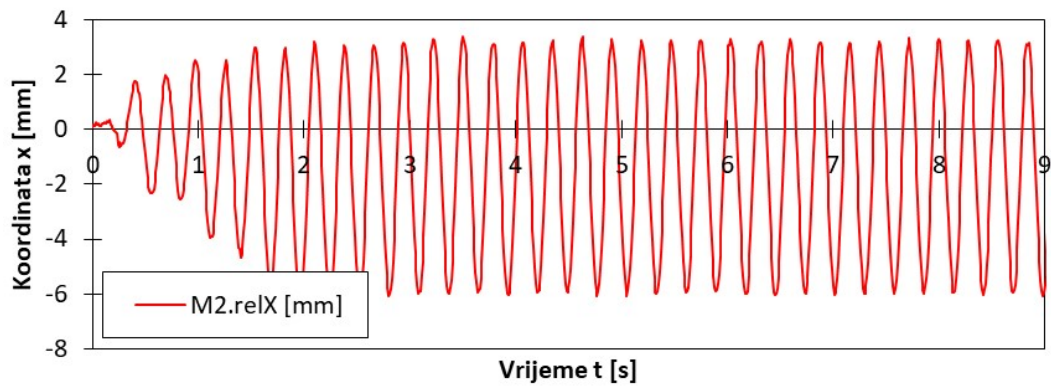




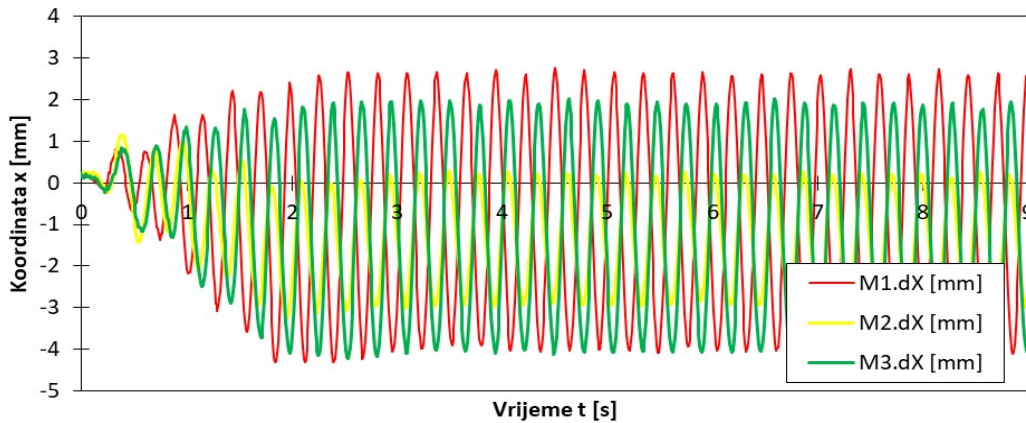
Slika 65. Graf funkcije pobude u vremenu



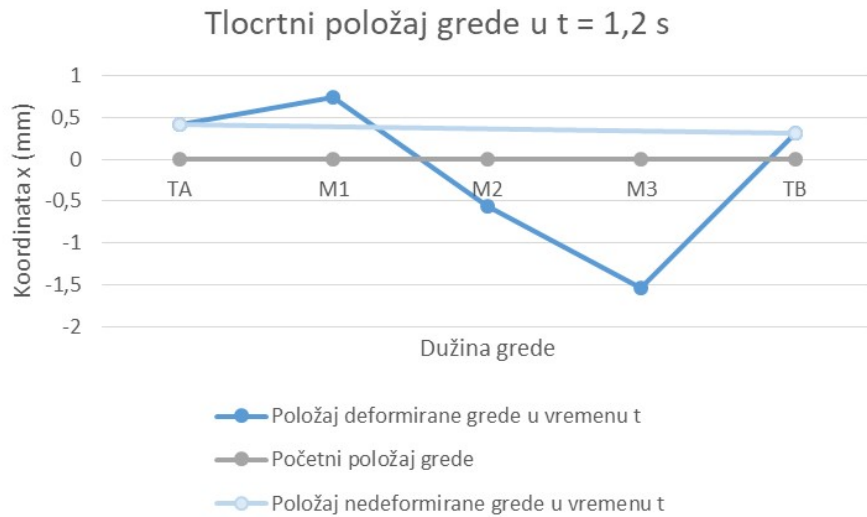
Slika 66. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 67. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 68. Graf funkcije pobude u vremenu

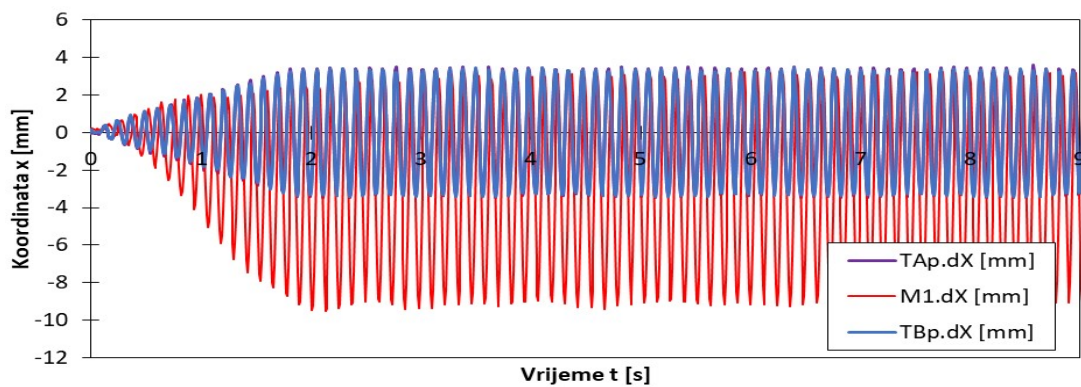


Slika 69. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

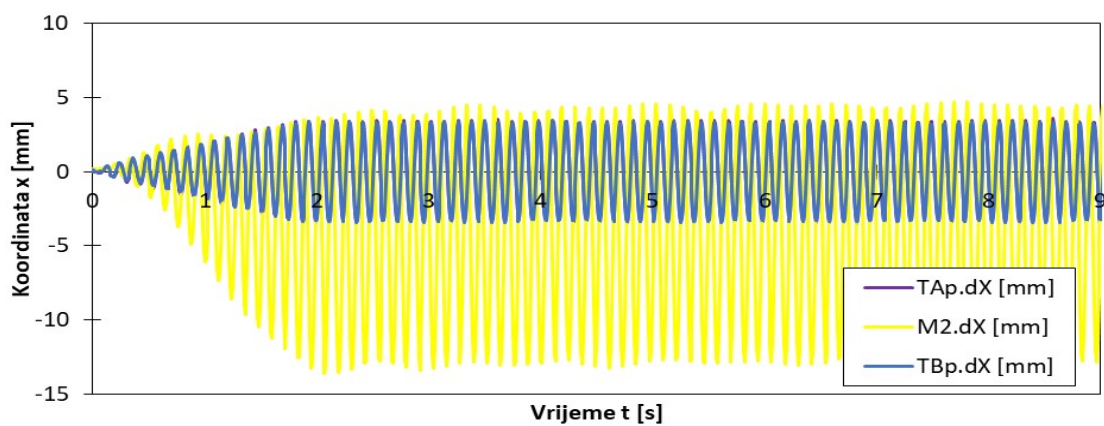
Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 69.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidi se najbliži oblik 2. tona (Slika 10.), što je i očekivano s obzirom da je frekvencija funkcije pobude blizu 2. vlastite frekvencije.

### EKSPERIMENT 10

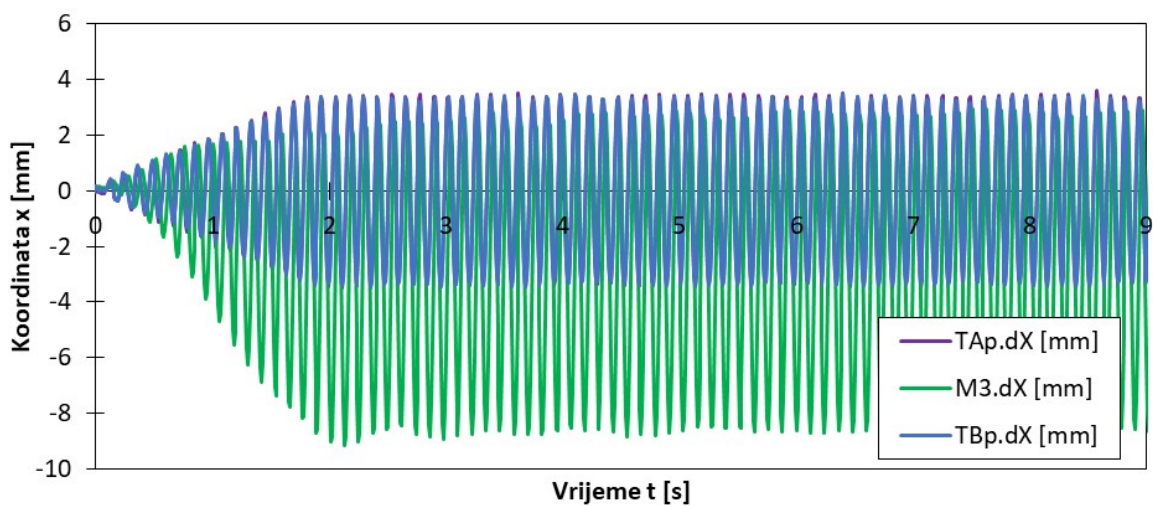
Rezultati za eksperiment 10 prikazani su na slikama 70., 71., 72., 73., 74. i 75. Pobuda je ponovno nanosena u obliku jednake funkcije pomaka oba stola, odnosno oba oslonca, kao sinusoidalna funkcija. Frekvencija funkcije pobude je još povećana u odnosu na prethodna dva eksperimenta.



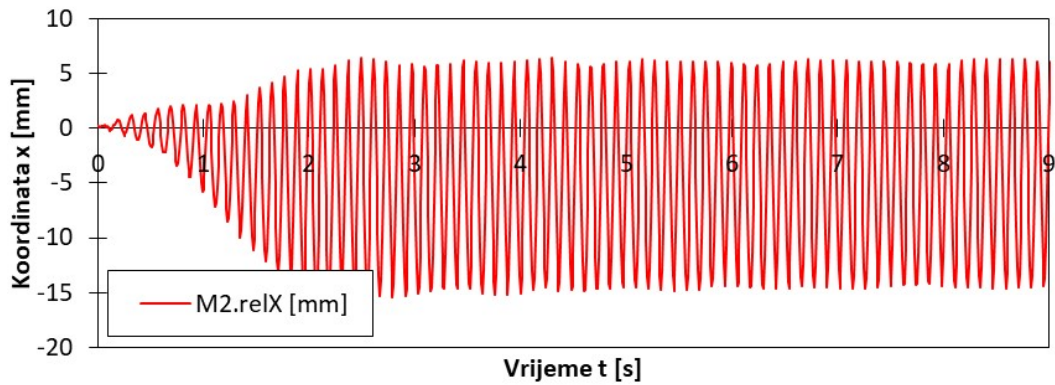
Slika 70. Graf funkcije pobude u vremenu



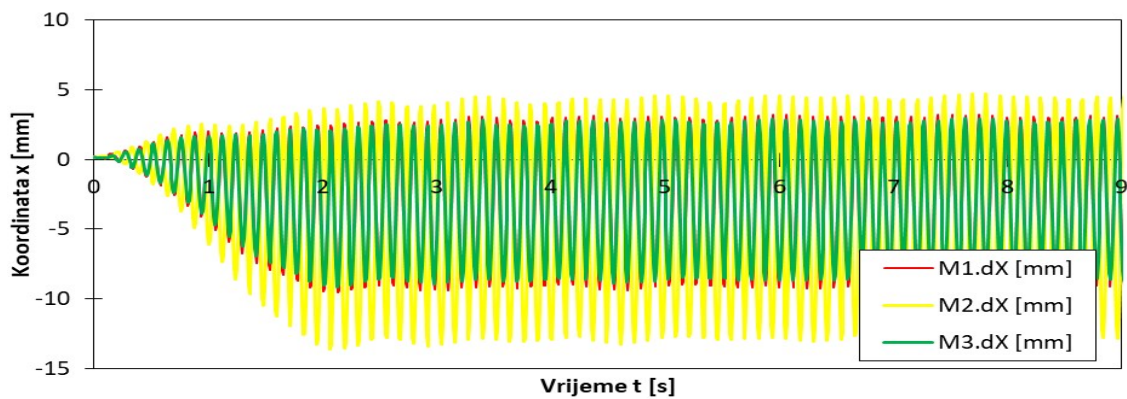
Slika 71. Graf funkcije pobude u vremenu



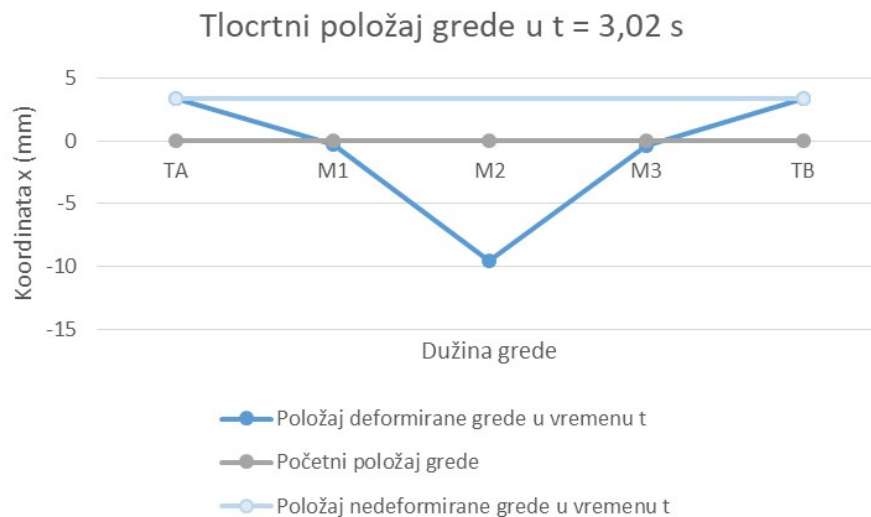
Slika 72. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 73. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 74. Graf funkcije pobude u vremenu



Slika 75. Graf položaja potresnog stola i masa na gredi

Iz grafa tlocrtnog položaja grede (Slika 75.), u odgovoru grede na zadanu dinamičku pobudu vidi se jasna kombinacija 1. i 3. tona osciliranja (Slika 10.).

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je eksperimentalno analizirati dinamički odziv dugačkih konstrukcija na potresnu pobudu, posebice uzevši u obzir razliku u pobudi susjednih oslonaca. U svrhu toga u eksperimentalnom dijelu je provedeno ispitivanje na slobodno oslonjenoj gredi s tri dodane koncentrirane mase, odnosno tri stupnja slobode. Nastojalo se eksperimentalno postići stanje rezonancije, budući da se radi o najkritičnijem slučaju pri kojem može doći do gubitka nosivosti i stabilnosti konstrukcije.

Deset eksperimenata navedene grede oslonjene na dvije potresne platforme s različitim potresnim pobudama i praćene optičkim mjernim sustavom, rezultiralo je grafovima položaja oslonaca i koncentriranih masa na gredi, te grafovima tlocrtnog položaja grede u proizvoljno izabranom trenutku  $t$ . U potonjim je bilo jasno vidljivo da se kao odgovor na dinamičku pobudu oslonaca sustava s tri nepoznanice javljaju kombinacije s različitim omjerima karakteristična tri tona odnosno tri oblika osciliranja. Kroz provedbu eksperimenata uočena su sva tri tona, negdje u kombinacijama sličnih omjera dok je kod nekih eksperimenata gdje je sustav bio blizu vlastite frekvencije nekog od tri tona uočena dominacija upravo tog oblika osciliranja.

U teorijskom dijelu izvedena je jednadžba kretanja za sustav s tri stupnja slobode kretanja i dovedena u matrični oblik koji bi, u budućnosti, prilikom nastavka istraživanja ove teme, služio za modeliranje ponašanja grede zapisanog pomoću MatLab kodova. Time bi se dobila mogućnost usporedbe numerički i eksperimentalno dobivenih podataka te eventualna validacija numeričkog modela ili ideje za njegovo unaprijeđenje.

Važnost ovoga rada je i upoznavanje s opremom za potresnu simulaciju i istraživanju njezinih mogućnosti te eventualnih slabih točaka.

Ispitivanja ovakvog tipa veoma su značajna prvenstveno za planiranje daljnjih eksperimenata na sofisticiranijim umanjenim modelima dugačkih konstrukcija, no i za planiranje budućih konstrukcijskih poduhvata te predviđanje ponašanja izgrađenih konstrukcija primjerice na našem, Riječkom, području, koje spada u seizmički aktivne regije.



## LITERATURA

- [1] Chopra, A. K. (1995). Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs (New Jersey)
- [2] Clough, R. W.; Penzien, J. (2003). Dynamics of Structures. Computers and structures, Inc., Berkeley
- [3] Čeh, Nina (2013.); Diplomski rad: Dinamički odziv plošnih konstrukcija na pobudu uzrokovanu kretanjem ljudi
- [4] Dobrilla, Simona (2017.); Diplomski rad: Modalna analiza nosača uslijed nejednolikih pomaka oslonaca i usporedba s eksperimentalno dobivenim rezultatima
- [5] Šavor Novak, M.; Lazarević, D.; Atalić, J. (2015). Utjecaj prostorne promjenjivosti potresne pobude na seizmički odziv mostova. Građevinar 67 (10): 943-957
- [6] List studenata Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, [file:///C:/Users/MAIO/AppData/Local/Temp/Seizmicka aktivnost na podrucju Republike Hrvatske-2.pdf](file:///C:/Users/MAIO/AppData/Local/Temp/Seizmicka%20aktivnost%20na%20podrucju%20Republike%20Hrvatske-2.pdf)
- [7] Simona Dobrilla, Nina Čeh, Miran Tuhtan, Gordan Jelenić; EKSPERIMENTALNA ANALIZA ODZIVA GREDNOG NOSAČA NA NEJEDNOLIKU POBUDU OSLONACA
- [8] 5. Arbanas, Ž., Mehanika tla, Interna skripta Građevinskog fakulteta u Rijeci, 2005.
- [9] Cuculić, M. et al. (2016). Potencijali istraživačkog rada na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
- [10] Logan, Daryl, L., A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition, University of Wisconsin, Plateville, Nelson, a division of Thomson Canada Limited, Toronto, 2007.
- [11] Internet stranica:  
<http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-preddiplomski/osnove-proracuna-i-djelovanja-na-konstrukcije/1-potres-predavanja>
- [12] ARAMIS; GOM GmbH (2013.) priručnik