

UTJECAJ VIŠESTRUKÉ SEIZMIČKE POBUDE OSLONACA NA VITKE DUGAČKE KONSTRUKCIJE

THE INFLUENCE OF MULTIPLE SUPPORT SEISMIC EXCITATION ON SLENDER LONG STRUCTURES

Paolo Fabijan, Nina Čeh*

Sažetak

Eksperimentalno je ispitan model gredne konstrukcije izložene višestrukoj seizmičkoj pobudi oslonaca, a paralelno s time je razvijen numerički algoritam za analizu istog problema. Cilj je na temelju analize eksperimentalnih rezultata bolje razumjeti ponašanje vitkih dugačkih konstrukcija izloženih višestrukoj pobudi oslonaca te validirati numerički model na temelju provedenih eksperimentalnih ispitivanja. U radu je pokazano kako raspodjela masa utječe na dinamički odgovor grede te kako kašnjenje pobude između oslonaca u nekim slučajevima može imati pozitivan učinak u obliku smanjenja pomaka na gredi.

Ključne riječi: potresna pobuda, višestruka pobuda oslonaca, Newmarkova metoda, metoda konačnih elemenata, vitka dugačka konstrukcija, numerički model, eksperimentalno ispitivanje

Abstract

A beam model is experimentally subjected to multiple support seismic excitation and in parallel, a numerical model for simulation of this problem is developed. The goal is to better understand the behaviour of long slender structures subjected to multiple support excitation based on analyses of experimental results, and to validate the numerical model using experimental results. In this paper the effect of the number of added masses to the dynamic response and the beneficial (in this case) effect of the time delay of excitation between the supports to the displacements of the structure are presented.

Key words: earthquake excitation, multiple support excitation, Newmark method, finite element method, slender long structure, numerical model, experimental tests

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: nina.ceh@uniri.hr, paolo.fabijan@gmail.com

1. Uvod

Dugačke konstrukcije, poput mostova, kranskih staza i cjevovoda, često zbog uvjeta na terenu, ekonomičnosti ili drugog razloga između oslonaca imaju velike razmake. Na takvim razmacima često se nailazi na različite uvjete temeljenja zbog različitih karakteristika tla ili stijenske mase. Zbog svega navedenoga, kada je vitka i dugačka konstrukcija izložena potresnoj pobudi, dolazi do pojave efekata višestruke pobude oslonaca (gdje variraju vrijeme dolaska, amplituda i frekvencijski sadržaj pobude) i snažnih vibracija uslijed toga [1]. Primjeri takvih mostova u Hrvatskoj su Dravski most (glavni raspon 220 m), Pelješki most (glavni raspon 285 m) i Krčki most (glavni raspon 390 m), dok su u svijetu izgrađeni mostovi raspona do 2023 m (most Çanakkale, Turska). Dinamički odgovor takve konstrukcije može se bitno razlikovati od ponašanja konstrukcije koja je izložena jednolikoj potresnoj pobudi te može izazvati vrlo velike pomake. Takva pobuda može značajno pobuditi asimetrične oblike osciliranja koji posljedično mogu uzrokovati povećana naprezanja i deformacije konstrukcije.

Prostorno promjenjiva gibanja koja dovode do višestruke pobude oslonaca često se dijele na tri glavna efekta: (a) efekt prolaska vala povezan s brzinom širenja vala i udaljenosti između konstrukcijskih oslonaca (stupova) na koje pobuda djeluje, (b) nekoherentnost povezana sa širenjem vala kroz heterogeni medij, i (c) tzv. odziv mjesta povezan s lokalnim uvjetima tla/stijene [2]. Brojni znanstvenici diljem svijeta numerički i analitički proučavaju efekte višestruke pobude oslonaca na konstrukcije [3], [4]. Eurokod 8, dio 2 navodi da se učinak takve pobude treba uzeti u obzir za mostove duže od 400 m ili one izgrađene na znatno različitim vrstama tla, iako se pokazalo da ona može utjecati i na kraće mostove [3]. Do sada provedene eksperimentalne studije su pokazale da pomaci uzrokovani višestrukou pobudom oslonaca mogu biti i do 36 % veći od onih bez uzimanja tog efekta u obzir [3], dok se kod sustava s malenim rasponima on može i smanjiti. Istraživanja temeljena na numeričkim simulacijama su pokazala da zanemarivanje prostorno-vremenske prirode kretanja tla često rezultira pogreškama [5], a posebice je to vidljivo na analizama sustava s konfiguracijama u kojima je prvi ton osciliranja antisimetričan [6]. Utjecaj nejednolike pobude oslonaca dugačkih konstrukcija treba uzeti u obzir kako bismo primijenili konzervativni pristup analizi dinamičkog odgovora [6], a za dobivanje sigurnog strukturalnog odgovora treba uzeti u obzir relativne pomake, izračunate korištenjem analize u vremenu (preporučeno nelinearne) [7].

Posljednjih godina mnogi preporučuju korištenje pojednostavljenog analitičkog postupka, no on mora biti u potpunosti validiran mjerenjima

na terenu ili dobro dokumentiranim laboratorijskim ispitivanjima na modelima. Međutim, vrlo je malen broj eksperimentalnih studija, vjerojatno zbog malenog broja ustanova koje takve eksperimente mogu provesti, a da je to ekonomski isplativo, te se stoga za validaciju još uvijek često koriste jednoosni eksperimenti provedeni prije više od 10 godina [8].

S obzirom da su rezultati laboratorijskih ispitivanja ključni za proces kalibracije i validacije pri razvoju točnih i pouzdanih modela za simulaciju utjecaja višestruke pobude oslonaca na dinamički odgovor dugačkih konstrukcija, osmišljena je i dizajnirana serija eksperimenata u kojoj se u laboratorijskim uvjetima može simulirati takvo ponašanje. Eksperimentalna ispitivanja su provedena na aluminijskoj gredi koja je oslonjena na dvije potresne platforme te je pobuda nanošena s određenim kašnjenjem kako bismo simulirali kretanje potresnog vala između oslonaca. Paralelno s eksperimentalnim ispitivanjima, a radi boljeg razumijevanja analize ovog problema, razvijen je i numerički model za simulaciju dinamičkog odgovora dugačke konstrukcije na višestruku pobudu oslonaca. Numerički model će se validirati na temelju rezultata tj. pomaka dobivenih iz optičkih mjerenja. Na temelju analize rezultata ispitivanja pobliže je objašnjen dinamički odgovor konstrukcija izloženih višestrukoj pobudi oslonaca.

2. Numerički model

2.1 Karakteristike modela

Dinamički odgovor elastičnog sustava na vanjsku pobudu opisan je pomoću jednadžbe kretanja [9]:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (1)$$

gdje je $f_I(t)$ sila inercije, $f_D(t)$ sila prigušenja, $f_S(t)$ elastična sila u opruzi, a $p(t)$ vanjsko opterećenje.

U većini slučajeva, dinamički odgovor stvarne konstrukcije potrebno je opisati pomoću sustava s više stupnjeva slobode (MDOF), a na Slici 1 je prikazan statički sustav grede analizirane u ovom radu.



Slika 1. Primjer sustava s više stupnjeva slobode (MDOF)[10]

Ako promotrimo jednu točku sustava koji se nalazi u 3-D prostoru, onda su u toj točki moguća tri pomaka (uzduž svake od osi) te tri rotacije (oko svake od osi) tj. sveukupno 6 stupnjeva slobode, dok u slučaju 2-D

prostora svaka točka ima 3 stupnja slobode, tj. dva pomaka i jednu rotaciju. U ovom radu promatramo ravninski problem oscilacija grednog modela (Slika 1) u kojem su uzdužni pomaci zanemareni te stoga svaka točka sustava ima dva stupnja slobode: pomak u poprečnom smjeru i kut zaokreta [9].

Jednadžba kretanja je dobivena zapisom dinamičke ravnoteže za svaku točku sustava te je u matricnom obliku [9]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (2)$$

gdje je \mathbf{M} globalna matrica masa, \mathbf{C} globalna matrica prigušenja, \mathbf{K} globalna matrica krutosti, $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ vektor ubrzanja točaka u vremenu, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ vektor brzina točaka u vremenu, $\mathbf{u}(t)$ vektor pomaka i kuteva zaokreta točaka u vremenu, a $\mathbf{p}(t)$ vektor vanjskog opterećenja. Matrica krutosti sustava se temelji na linearno-elastičnom ponašanju grede i na pretpostavci da poprečni presjeci grede ostaju okomiti na os grede i nakon njezinog deformiranja [11], [12]. Matricu masa možemo definirati kao dijagonalnu ili konzistentnu matricu masa. U ovom radu je korištena dijagonalna matrica masa kod koje su uzeti u obzir i efekti rotacijske inercije povezani s kutnim ubrzanjima. Matrica prigušenja se temelji na Rayleighevu viskoznom prigušenju i izražena je kao linearna kombinacija matrice masa i krutosti. [10], [11], [13]

2.2 Newmarkova metoda

Newmarkova skupina jednostupanjskih, implicitnih i uvjetno stabilnih integracijskih metoda je jedna od najčešće korištenih kada se radi o dinamičkoj analizi konstrukcija koje su izložene potresnim ili udarnim pobudama. Nastoji se zadovoljiti diferencijalna jednadžba u vremenskom koraku t nakon što je rješenje pronađeno za prethodni vremenski korak $t-\Delta t$. Polazna točka je pronalazak rješenja jednadžbe dinamičke ravnoteže [14]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_t = \mathbf{p}_t \quad (3)$$

Korištenjem Taylorovog reda te uvođenjem pretpostavke da je ubrzanje svake točke linearno unutar vremenskog koraka:

$$\ddot{\mathbf{u}} = \frac{(\dot{\mathbf{u}}_t - \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t})}{\Delta t} \quad (4)$$

dobivamo Newmarkove jednadžbe u standardnom obliku:

$$\mathbf{u}_t = \mathbf{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \beta \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_t = \dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} + \gamma \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t \quad (6)$$

Wilson je Newmarkovu metodu zapisao u matričnom obliku, dodao krutost i prigušenje te pojednostavio cijeli postupak proračuna uvođenjem izravnog rješenja jednadžbi za svaki vremenski korak. Jednadžbe (5) i (6) možemo zapisati i na sljedeći način:

$$\ddot{u}_t = b_1(u_t - u_{t-\Delta t}) + b_2\dot{u}_{t-\Delta t} + b_3\ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (7)$$

$$\dot{u}_t = b_4(u_t - u_{t-\Delta t}) + b_5\dot{u}_{t-\Delta t} + b_6\ddot{u}_{t-\Delta t} \quad (8)$$

gdje su b_1 do b_6 konstante [14].

Uvedemo li sada (7) i (8) u jednadžbu dinamičke ravnoteže (3) zajedno s Newmarkovim parametrima :

$$\beta = \frac{1}{4}, \gamma = \frac{1}{2}$$

dobivamo izraz za dinamičku ravnotežu sustava u vremenskom koraku t koji ovisi o nepoznatom čvornom pomaku u_t :

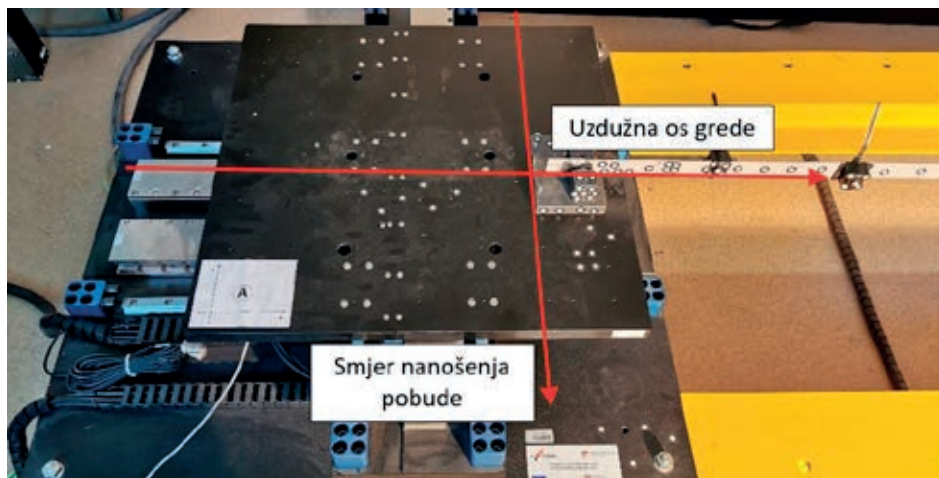
$$(b_1\mathbf{M} + b_4\mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{u}_t = \mathbf{p}_t + \mathbf{M}(b_1\mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_2\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_3\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}) \quad (9) \\ + \mathbf{C}(b_4\mathbf{u}_{t-\Delta t} - b_5\dot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t} - b_6\ddot{\mathbf{u}}_{t-\Delta t}).$$

Jednadžbom (9) moguće je odrediti pomake i kutove zaokreta čvorova sustava za svaki vremenski korak ako su poznate sve vrijednosti za prethodni vremenski korak. Brzine i ubrzanja čvorova određuju se prema izrazima (7) i (8). [9], [14]

3. Eksperimentalna ispitivanja

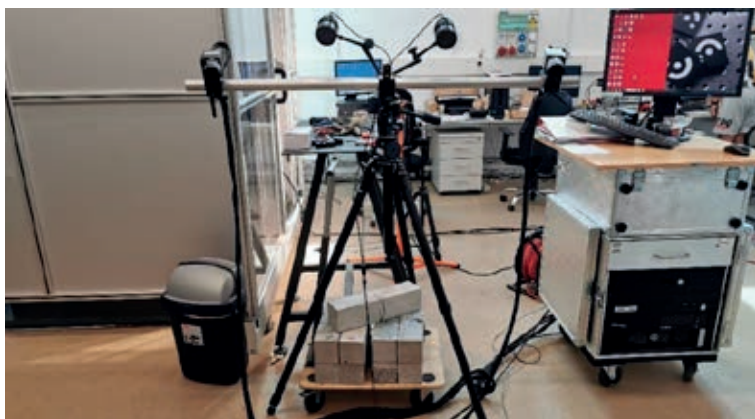
Sva eksperimentalna ispitivanja provedena su na vitkoj aluminijskoj gredi pomoću dvije potresne platforme te optičkog sustava za mjerenje pomaka. Potresna pobuda je nanošena na dva dvoosna potresna stola Quanser ST-III (Slika 2) koji imaju mogućnost simuliranja frekvencije do 20 Hz. Maksimalni mogući pomaci stolova su 15 cm u oba smjera.

Međutim, amplitude pomaka nanesenih potresnih zapisa su skalirane tako da iznose najviše 1 cm kako ne bismo nanijeli trajne deformacije na gredu. Pobudu je moguće nanijeti na samo jedan ili oba stola sa određenim zakašnjenjem između stolova ili bez njega putem programa napisanih u programskom paketu LabView.



Slika 2. Potresna platforma

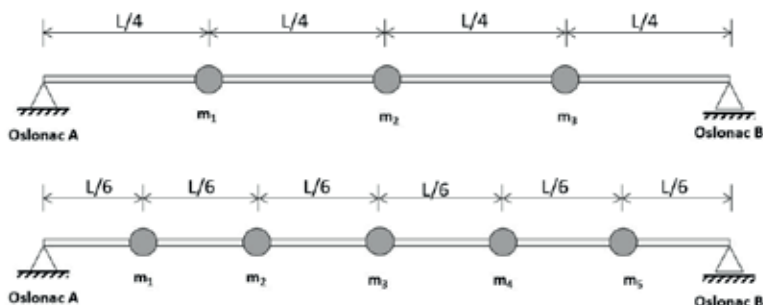
Ponašanje sustava (potresnih stolova i samog ispitnog modela) je praćeno pomoću optičkog mjernog sustava za mjerenje pomaka i deformacija GOM Aramis 4M (Slika 3). Optički mjerni sustav se sastoji od dviju kamera rezolucije 4 MPix, kalibriran je na mjerni volumen od $2305 \times 1735 \times 1735 \text{ mm}^3$, a mjerenja su provedena frekvencijom od 100 fps (slika u sekundi).



Slika 3. Optički mjerni sustav

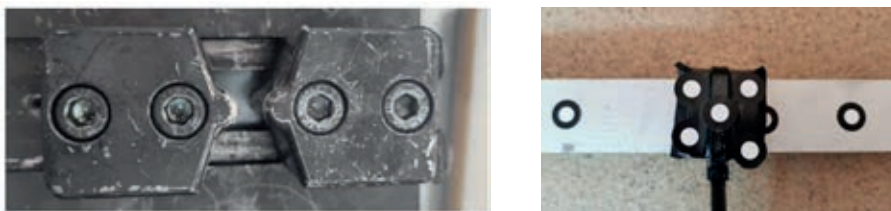
Aluminijska greda ima raspon između oslonaca 1.826 m i poprečni presjek dimenzija $3 \times 40 \text{ mm}^2$ te je njena ukupna masa 0.59 kg. Ispitivanja su provedena sa 3 i 5 dodatno pričvršćenih masa/utega na gredu (Slike 4 i 5). Utezi su na gredu pričvršćeni tako da je između njih i grede umetnut tanki sloj gume debljine približno 1 mm, nakon čega su oblijepljeni

čvrstom crnom ljepljivom trakom i pričvršćeni malenim PVC vezicama (Slika 5, desno). Ukupna dodana masa na sustavu je u oba slučaja jednaka i iznosi 1.22 kg (odnosno 12 N). U slučaju grede s 3 mase na svaku točku je pričvršćen uteg od 4 N.



Slika 4. Modeli grede korišteni u ispitivanjima [10]

Greda ima statički sustav proste grede koja oscilira u horizontalnoj ravnini i kod koje je dopušten kut zaokreta oko vertikalne osi. Krajevi grede su utaknuti u oslonce (primjer jednog je prikazan na Slici 5, lijevo), a na kontakt je umetnut tanki sloj gume debljine približno 1 mm, nakon čega su oslonci zategnuti.

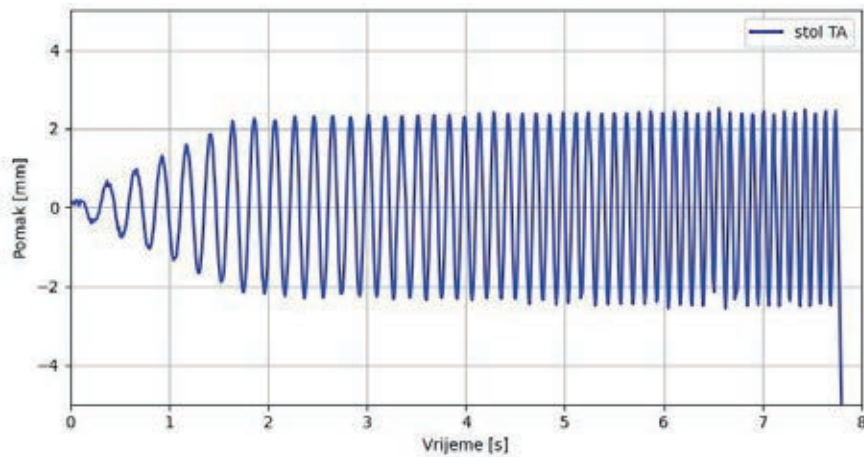


Slika 5. Tlocrtni pogled na jedan od oslonaca grednog modela (lijevo) te primjer pričvršćenog utega na gredni model (desno)

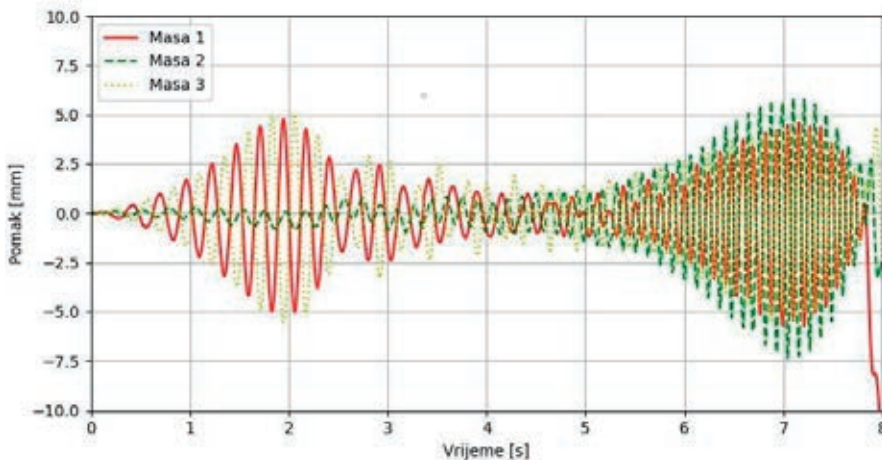
4. Eksperimentalni i numerički rezultati

4.1 Harmonijska pobuda

Harmonijska pobuda prikazana u nastavku je sinusoidna funkcija kojoj se tijekom ispitivanja frekvencija osciliranja kontinuirano povećava ali joj je amplituda konstantna - *Sinesweep* funkcija u rasponu od 3 Hz do 9 Hz (pomaci potresnog stola izmjereni optičkim mjernim sustavom su na Slici 6). Pomaci masa dobiveni ispitivanjem dinamičkog odaziva na gredi s 3 dodane mase prikazani su na Slici 7.



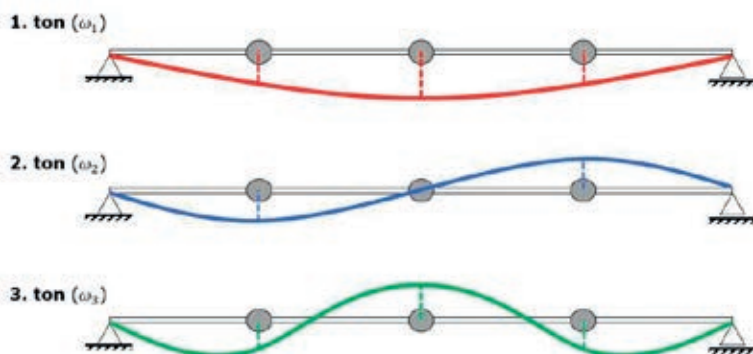
Slika 6. Dijagram pomaka potresnog stola/oslonaca (Sinesweep funkcija) [10]



Slika 7. Pomaci svih masa u vremenu (Sinwsweep pobuda) [10]

Preliminarna ispitivanja s ovom vrstom harmonijske pobude provedena su kako bismo provjerili pri kojim frekvencijama pobude će na gredi doći do rezonancije. *Sinesweep* funkcija u kratkom vremenskom periodu prođe kroz veliki raspon različitih frekvencija te stoga možemo praćenjem odgovora grede odrediti pri kojim se frekvencijama pojave određeni oblici osciliranja.

U našem slučaju, dinamički odziv grede s tri dodane mase je moguće opisati pomoću tri osnovna oblika osciliranja (Slika 8). Prema izgledu ih možemo podijeliti na simetrične i asimetrične oblike, prema čemu su prvi i treći ton simetrični, dok drugi predstavlja asimetričan oblik osciliranja.

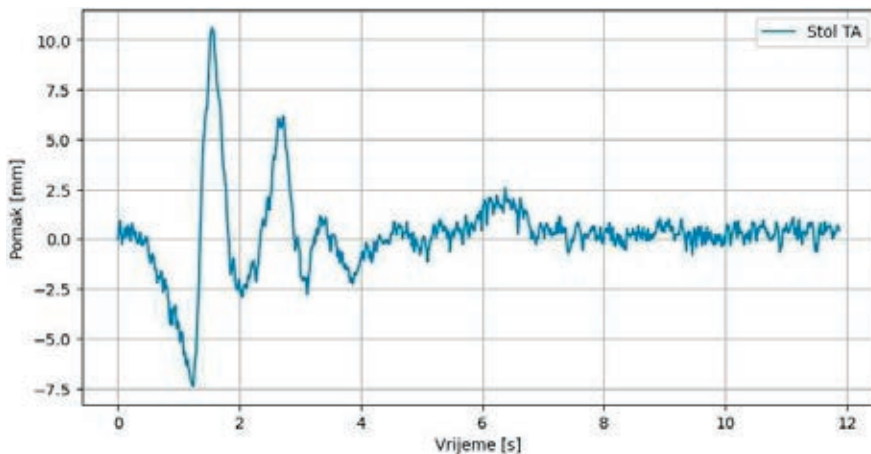


Slika 8. Oblici i tonovi osciliranja grede s 3 mase [10]

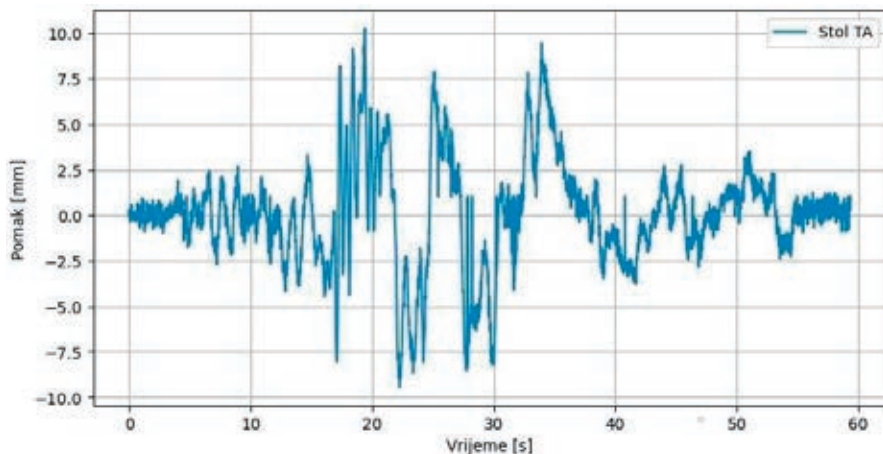
Promotrimo li početak ispitivanja, vidljivo je kako srednja masa ima vrlo male pomake u usporedbi s bočnim masama. Osim toga, bočne mase imaju suprotne smjerove kretanja. Na temelju toga možemo zaključiti da ponašanje grede na početku ispitivanja u najvećoj mjeri opisuje 2. ton te je najizraženiji u vremenu oko 2. sekunde (Slika 7). Ako pogledamo ponašanje grede u 7. sekundi, jasno se vidi kako su pomaci bočnih masa istog predznaka, dok se pomak srednje mase suprotnog predznaka, što ocrta prisutnost 3. tona. U ispitivanju 1. ton nije jasno pobuđen jer je početna frekvencija funkcije pobude veća od 1. vlastite frekvencije grednog modela.

4.2 Potresna pobuda

Ukupno je provedeno 56 laboratorijskih ispitivanja, od čega je u njih 47 greda bila izložena stvarnim potresnim zapisima sa skaliranim amplitudama. Neki od potresnih zapisa koji su korišteni su Nortridge 360 (prikazan na Slici 9) i Kobe 090 (prikazan na Slici 10).



Slika 9. Norridge 360 potresni zapis

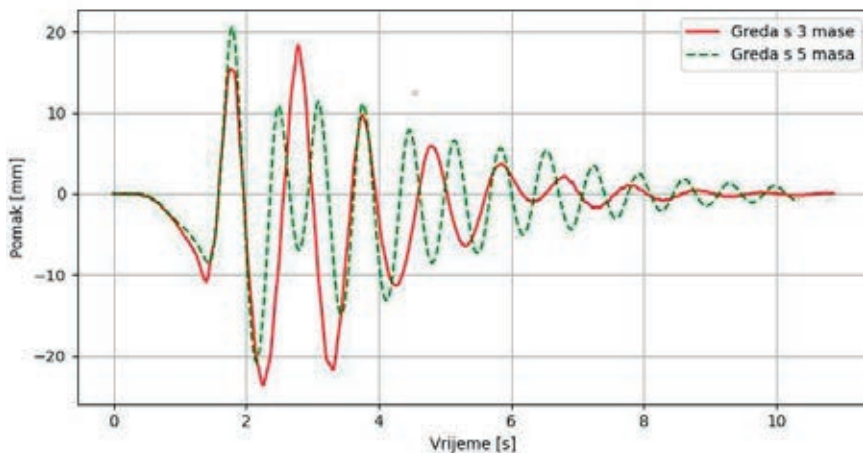


Slika 10. Kobe 090 potresni zapis

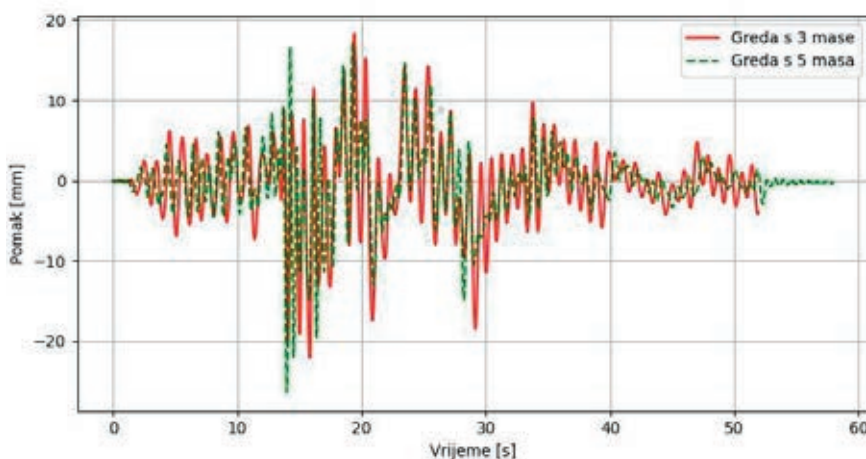
Navedeni potresi jako se razlikuju jedan od drugog. Norridge 360 je kratak potres koji ima 3 – 4 izražena skoka, dok je Kobe 090 vremenski 5 puta duži u odnosu na Norridge 360, ali je i intenzitetom daleko snažniji.

4.2.1 Utjecaj raspodjele mase na dinamički odgovor

Kako bismo utvrdili utjecaj raspodjele masa na dinamički odgovor grede, uspoređivani su pomaci u vremenu za gredu s 3 i 5 dodanih masa, koja je izložena istom potresnom zapisu (Slike 11 i 12). Korišteni potresni zapisi su ranije prikazani Norridge 360 te Kobe 090. Za oba zapisa, potresna pobuda je nanesa na oba potresna stola i bez zakašnjenja pobude između njih.



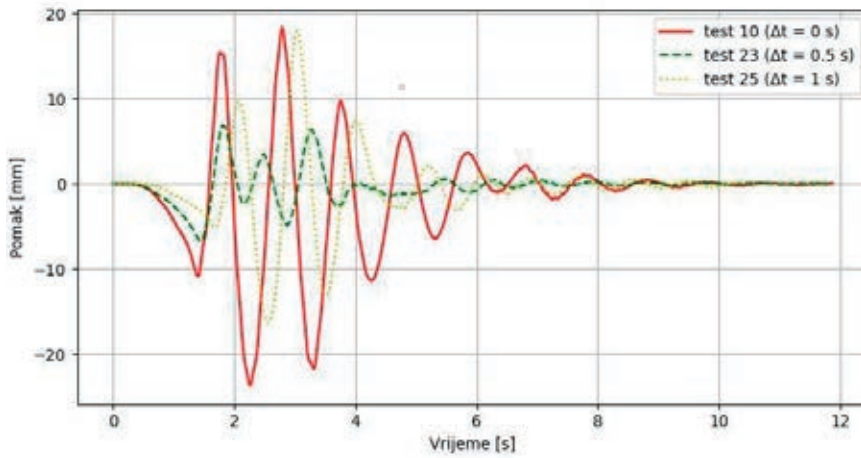
Slika 11. Pomaci srednje mase na gredi s 3 i 5 masa (Norridge 360)



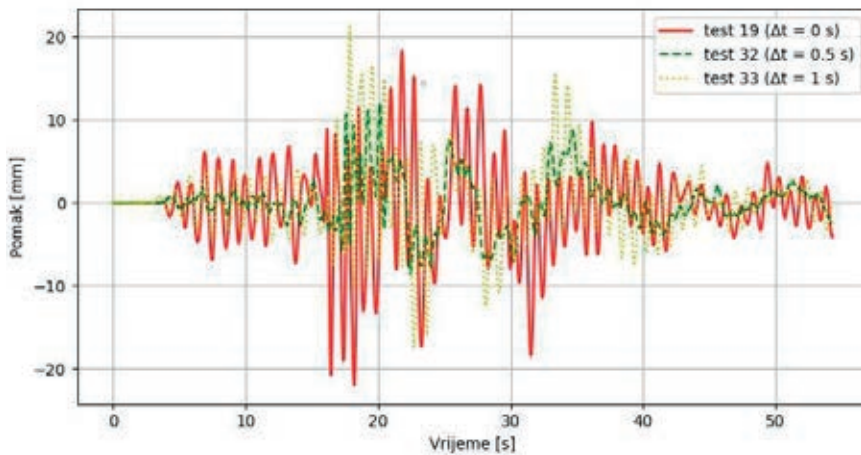
Slika 12. Pomaci srednje mase na gredi s 3 i 5 masa (Kobe 090)

4.2.2 Utjecaj kašnjenja pobude na dinamički odgovor

U nastavku su prikazani pomaci u vremenu grede s 3 i 5 masa koja je izložena istim potresnim zapisima ali s različitim zakašnjenjima pobude između oslonaca. Ovdje su također korišteni ranije prikazani Norridge 360 i Kobe 090 potresni zapisi, ali s unesenim kašnjenjem pobude na desnom osloncu od 0, 0.5 te 1 sekunde. S obzirom da je prva vlastita frekvencija konstrukcije određena numerički kao 0.93 Hz, kašnjenja približno odgovaraju polovici perioda i cijelom prvom periodu. Na Slikama 13 i 14 su prikazani rezultati ispitivanja za gredu s 3 mase.

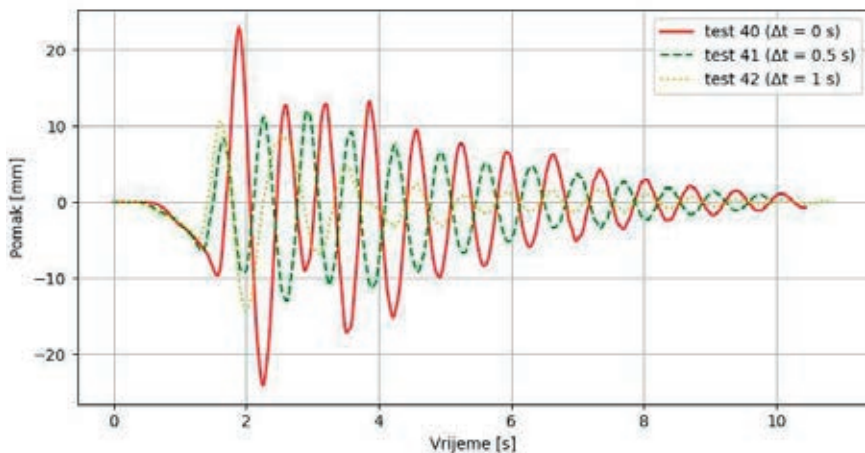


Slika 13. Pomaci srednje mase na gredi s 3 mase sa zakašnjenjem (Nortridge 360)



Slika 14. Pomaci srednje mase na gredi s 3 mase sa zakašnjenjem (Kobe 090)

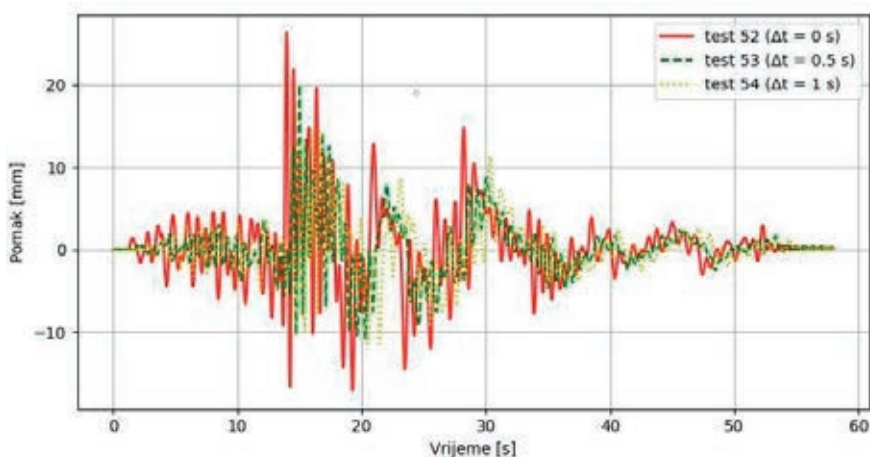
U nastavku su na Slikama 15 i 16 prikazani rezultati ispitivanja za gredu s 5 masa.



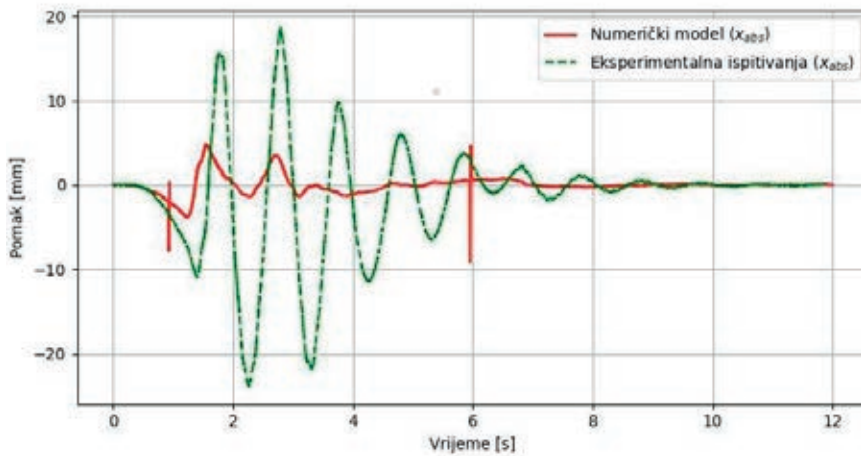
Slika 15. Pomaci srednje mase na gredi s 5 masa sa zakašnjenjem (Norridge 360)

4.3 Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Nakon provedenih ispitivanja, eksperimentalno dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima ranije opisanog numeričkog algoritma. U algoritam su unesene sve geometrijske i materijale karakteristike ispitivanog modela, dok su funkcije pobude oslonaca dobivene dvostrukom numeričkom derivacijom optički izmjerenih pomaka potresnih stolova. Pomaci srednje mase dobiveni numerički su znatno veći od eksperimentalnih za potresni zapis Norridge (Slika 17), dok se puno bolje poklapaju za potresni zapis Kobe (Slika 18).

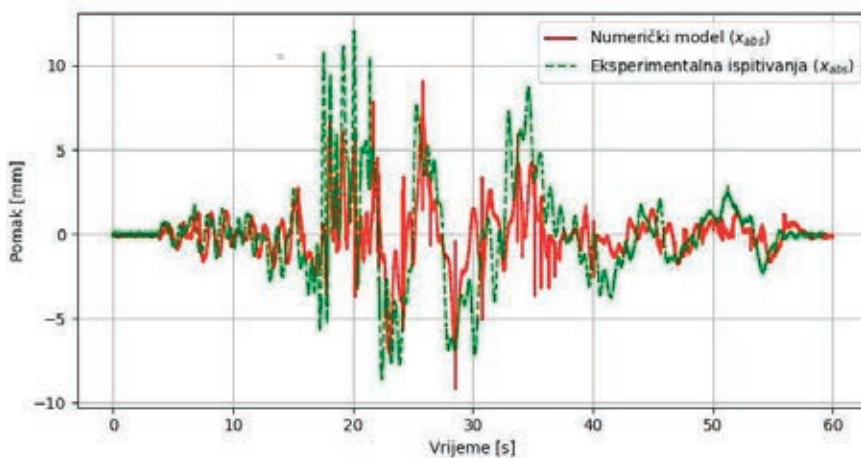


Slika 16. Pomaci srednje mase na gredi s 5 masa sa zakašnjenjem (Kobe 090)



Slika 17. Pomaci srednje mase dobiveni numeričkom simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjem (Northridge 360)

Pretpostavlja se da su veći pomaci u numeričkom modelu rezultat nedovoljno precizno određenog koeficijenta prigušenja.



Slika 18. Pomaci srednje mase dobiveni numeričkom simulacijom i eksperimentalnim ispitivanjem (Kobe 090)

5. Analiza dobivenih rezultata

Iz dijagrama gdje su uspoređivani pomaci na gredama s 3 i 5 masa (Slika 11 i Slika 12) vidljivo je kako su pomaci srednje mase na gredi većim dijelom vrlo slični. Značajnija razlika u pomacima je vidljiva kod Northridge

360 potresa (na Slici 11) nakon 6. sekunde, gdje se ostvaruju veći pomaci srednje mase na gredi s 5 masa u odnosu na srednju masu grede s 3 dodane mase. Kod Kobe 090 potresnog zapisa (na Slici 12) se vidi da se dijagrami pomaka vrlo dobro poklapaju oblikom i veličinom pomaka u svim dijelovima. Na temelju svega navedenoga, vidljivo je kako broj dodanih masa na gredi nema značajniji utjecaj na dinamički odgovor grede, s obzirom da ukupna masa na sustavu ostaje ista.

Kod analize pomaka iz ispitivanja u kojima je uneseno i kašnjenje pobude, analiziran je odziv na gredi s 3 i 5 masa. Na dijagramima pomaka u vremenu na gredi s 3 mase (Slika 13) vidljivo je kako se najmanji pomaci srednje mase pojavljuju za slučaj gdje je kašnjenje pobude 0.5 sekundi. Najveći pomaci se u ovakvom statičkom sustavu, geometrijskim i materijalnim parametrima pojavljuju u slučaju kada između oslonaca nema kašnjenja pobude. Na gredi s 5 masa se najmanji pomaci srednje mase pojavljuju pri kašnjenju od 1 sekunde, ali samo kod opterećenja pobudom Norridge 360 potresnog zapisa (Slika 15). Kod Kobe 090 zapisa (Slika 16) je vidljivo slično ponašanje kao i kod grede s 3 mase za isto kašnjenje pobude, odnosno pomaci srednje mase najmanji su za kašnjenje pobude od 0,5 sekundi. Na temelju analize prikazanih rezultata zaključeno je kako kašnjenje potresne pobude između susjednih oslonaca u nekim slučajevima (pri određenom statičkom sustavu i parametrima) može imati pozitivan učinak na dinamički odziv konstrukcije jer možemo vidjeti da se za određeno kašnjenje pobude pomaci na konstrukciji mogu smanjiti u odnosu na one gdje kašnjenja pobude nema.

6. Zaključak

Cilj provedenih ispitivanja je bio bolje razumjeti dinamički odgovor dugačkih vitkih konstrukcija izloženih višestrukoj pobudi oslonaca te dokumentirati rezultate laboratorijskih ispitivanja za korištenje s ciljem validacije numeričkih modela. Nakon analize rezultata, vidljivo je kako broj dodanih masa na gredi nema značajan utjecaj na povećanje ili smanjenje pomaka. Pomaci kod grede s manje masa su bili malo veći u odnosu na gredu s više masa, no razlog tomu je veća masa koncentrirana na jednome mjestu. Međutim, pokazalo se kako kašnjenje potresne pobude između oslonaca ima značajan utjecaj na dinamički odgovor konstrukcije. Iako višestruka pobuda oslonaca u brojnim situacijama može izazvati veće pomake, deformacije i naprezanja u samom sustavu, pokazalo se da u određenim slučajevima može doprinijeti smanjenju pomaka konstrukcije, odnosno rezultirati manjim deformacijama i naprezanjima u samoj konstrukciji.

S obzirom da kod dugačkih konstrukcija poput mostova tijekom eksploatacije može doći do kašnjenja pobude između oslonaca, potrebno je detaljnije istražiti učinke koje kašnjenje pobude može imati na konstrukciju, kako pozitivne tako i negativne. Kako bismo proveli analizu dinamičkog odgovora dugačkih konstrukcija na strani sigurnosti, još smo jednom pokazali da je za takve konstrukcije potrebno provesti i analizu koja u obzir uzima utjecaj višestruke pobude oslonaca.

Zahvala

Prikazano istraživanje je provedeno u sklopu završnog rada [10] te hrvatsko-kineskog bilateralnog projekta „Experimental Study of Bridge Structures Considering the Asymmetric Effect under Multiple Support Excitation“ između Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci i Dalian University of Technology. Dio istraživanja je sufinanciran u sklopu natječaja N-SZF 2/2021 u sklopu fonda SIZIF od strane Studentskog zbora Sveučilišta u Rijeci i Zaklade Sveučilišta u Rijeci.

Literatura

- [1] A. Zerva, *Spatial Variation of Seismic Ground Motions*. CRC Press, 2016.
- [2] F. Lo Iacono, G. Navarra, M. Oliva, and D. Cascone, “EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DYNAMIC PERFORMANCES OF THE L.E.D.A. SHAKING TABLES SYSTEM,” 2013, Accessed: Sep. 26, 2022. [Online].
- [3] S. P. Papadopoulos and A. G. Sextos, “Anti-Symmetric Mode Excitation and Seismic Response of Base-Isolated Bridges under Asynchronous Input Motion,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 113, pp. 148–161, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.06.004.
- [4] M. Yurdakul and S. Ates, “Stochastic Responses of Isolated Bridge with Triple Concave Friction Pendulum Bearing under Spatially Varying Ground Motion,” *Struct. Eng. Mech.*, vol. 65, no. 6, pp. 771–784, Mar. 2018, doi: 10.12989/sem.2018.65.6.771.
- [5] M. R. Falamarz-Sheikhabadi, A. Zerva, and M. Ghafory-Ashtiany, “Mean Absolute Input Energy for In-Plane Vibrations of Multiple-Support Structures Subjected to Non-Stationary Horizontal and Rocking Components,” *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 45, pp. 87–101, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.probenmech.2016.03.001.
- [6] C. Sun, X. Zhou, and S. Zhou, “Nonlinear Responses of Suspended Cable under Phase-Differed Multiple Support Excitations,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 104, no. 2, pp. 1097–1116, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11071-021-06354-x.
- [7] N. Alexander, J. Norman, D. Virden, A. Crewe, D. Wagg, and A. A. Chanarley,

- “Effects of Orientation to the Epicentre on the Response of Long Span Bridges Subject to Multiple Support Excitation Using SMART-1 Array Data and Corroborative Experimental Results,” Accessed: Sep. 26, 2022. [Online].
- [8] M. Savor Novak, D. Lazarevic, J. Atalic, and M. Uros, “Influence of Multiple-Support Excitation on Seismic Response of Reinforced Concrete Arch Bridges,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, p. 17, Dec. 2019, doi: 10.3390/app10010017.
- [9] Chopra K. Anil, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Fifth Edit. Pearson Education Limited, 2020.
- [10] P. Fabijan, “Utjecaj višestruke seizmičke pobude oslonaca na vitke dugačke konstrukcije,” Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet., Rijeka, 2021.
- [11] Ray W. Clough; Joseph Penzien, *Dynamics of Structures*. McGraww-Hill College, 1975.
- [12] D. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, vol. 3. CL Engineering, 2011.
- [13] S. Dobrilla, N. Čeh, M. Tuhtan, and G. Jelenić, “Eksperimentalna analiza odziva grednog nosača na nejednoliku pobudu oslonaca,” *Zb. Rad.*, vol. 20, no. 1, pp. 175–188, Jul. 2018, doi: 10.32762/zr.20.1.11.
- [14] E. L. Wilson, *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*, Third Edit. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2002.