

Analiza rezultata ispitivanja pješačko - biciklističkog čeličnog mosta

Lovrić, Ana Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2025

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:333650>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Marija Lovrić

**ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA PJEŠAČKO-
BICIKLISTIČKOG ČELIČNOG MOSTA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana Marija Lovrić

ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA PJEŠAČKO- BICIKLISTIČKOG ČELIČNOG MOSTA

DIPLOMSKI RAD

izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac

dr. sc. Janko Koščak

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ana Marija Lovrić

**Analysis of a pedestrian and cyclist steel
bridge test results**

MASTER THESIS

Assoc. Prof. Marko Bartolac

PhD Janko Koščak

Zagreb, 2025



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Ana Marija Lovrić, 0082061537

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Analiza rezultata ispitivanja pješačko-biciklističkog čeličnog mosta

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

19.02.2025

Potpis:

Lovrić



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Ana Marija Lovrić, 01664835813

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Analiza rezultata ispitivanja pješačko-biciklističkog čeličnog mosta

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Marko Bartolac

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

27.02.2025.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

19.02.2025.

Potpis:

A Lovrić

ZAHVALE

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Marku Bartolcu na mentorstvu tijekom izrade diplomskog rada i komentoru dr. sc. Janku Koščaku za pomoć sa modelom.

Zahvaljujem svojoj obitelji i dečku na bezuvjetnoj ljubavi, podršci, strpljenju i pruženim savjetima.

Zahvaljujem se svim prijateljima i kolegama koji su bili dio mojih studentskih dana i koji uljepšali ovo razdoblje.

Od srca hvala svima!

SAŽETAK

Diplomskim radom obrađen je dio segmenata u postupcima projektiranja i ispitivanja pješačko-biciklističkih mostova. Opisani su propisi i smjernice koji imaju definirane upute za ovu vrstu konstrukcija. Ističe se problematika pojave vibracija koje nastaju zbog prevelike razlike u omjeru vlastite težine i promjenjivog opterećenja. U radu je definiran čelični most sa sedam raspona namijenjen pješacima i biciklistima. Izrađen je numerički model predmetnog mosta pomoću programskog paketa *SCIA* i postavljena su opterećenja. Provedena ispitivanja na mostu su opisana i napravljena je obrada rezultata. Rezultati iz numeričkog modela su uspoređeni sa rezultatima ispitivanja.

Ključne riječi: pješačko-biciklistički most, čelik, numerički model, rezultati ispitivanja

SUMMARY

The thesis addresses key aspects of the design and testing procedures for pedestrian-cyclist bridges. Relevant regulations and guidelines, which provide specific instructions for the design of these types of structures, are described. Particular attention is given to the issue of vibrations caused by the large difference between the bridge's own weight and variable loads, which can negatively affect the stability and comfort of the bridge. The thesis defines a steel bridge with seven spans, intended for pedestrians and cyclists. A numerical model of the bridge was created using the SCIA software package, and appropriate loads were applied. Additionally, tests were conducted on the actual bridge, and the test results were compared with those from the numerical model to verify the accuracy of the calculations.

Key words: pedestrian-cyclist bridge, steel, numerical model, test results

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. METODE I TEHNIKE RADA	3
3. RAZRADA TEME	4
3.1. Problematika pješačko-biciklističkih mostova	4
3.1.1. Udobnost.....	4
3.1.2. Međunarodni standardi	5
3.1.3. Projektiranje pješačko – biciklističkih mostova	10
3.2. Tehnički opis konstrukcije mosta.....	13
3.2.1. Opis mosta.....	13
3.2.2. Gornji ustroj.....	14
3.2.3. Ležajevi i prijelazne naprave.....	15
3.2.4. Donji ustroj mosta.....	16
3.2.5. Oprema mosta	17
3.3. Numerički model	18
3.3.1. Opis numeričkog modela.....	18
3.3.2. Numeričke analize.....	28
3.4. Ispitivanje mosta	33
3.4.1. Opis ispitivanja.....	33
3.4.2. Opis provedenih mjerenja	37
3.5. Rezultati i usporedba rezultata numeričkog modela i ispitivanja.....	40
3.5.1. Rezultati numeričkog modela.....	40
3.5.2. Rezultati ispitivanja.....	51
3.5.2.1. Rezultati statičkog ispitivanja – mjerenje pomaka	51
3.5.2.2. Rezultati dinamičkih ispitivanja	52
3.5.3. Usporedba rezultata modela i rezultata ispitivanja	56
4. ZAKLJUČAK.....	60

POPIS LITERATURE	62
POPIS SLIKA.....	63
POPIS TABLICA.....	66
Prilog a	67

1. UVOD

Mostovi su važne infrastrukturne građevine kojima je ostvaren prijelaz prometnica preko zapreka. Omogućavaju povezivanje geografskih područja koja su razdvojena prirodnim ili umjetnim preprekama kao što su rijeke, doline, autoput i željeznička pruga. Važni su za ekonomski, društveni i kulturni razvoj. Infrastruktura se razvija, povećaju se prometni zahtjevi i javlja se potreba za izgradnjom naprednijih mostova. Moderni mostovi projektiraju se tako da premošćavaju sve veće raspone i omogućuju učinkovitiji protok prometa. Razvoj mostogradnje pozitivno utječe na smanjenje prometnih gužvi i unapređenju gospodarskih prilika. Oprezno se koriste novi materijali i inovativne metode kako bi osigurali stabilnost, trajnost i otpornost mostova na vremenske uvjete. Konstrukcija treba imati sposobnost preuzeti predviđena opterećenja u svim uvjetima eksploatacije.

Ispitivanje konstrukcija predstavlja skup postupaka i metoda kojima se utvrđuje ponašanje konstrukcije pri djelovanju: mehaničkih sila, utjecaja okoline, reoloških promjena u materijalu. Opseg i vrsta ispitivanja ovise o namjeni, važnosti i propisima za određenu građevinu. Provode se na značajnim infrastrukturnim građevinama, konstrukcijama koje su podložne dinamičkim utjecajima, na javnim zgradama, industrijskim objektima i slično. Najčešće se ne primjenjuju se na obiteljskim kućama i zgradama. Na mostovima se često provode, ali ne uvijek. Treba ih primjenjivati za cestovne mostove ako su rasponi veći od 15 metara i željezničke ako su rasponi veći 10 metara. Ukoliko se zahtjeva posebno ili izuzetno probno opterećenje treba ih provoditi i tada je dimenzija raspona nevažna. [1]

U ovom diplomskom radu se obrađuje problematika pješačko-biciklističkog mosta. U prvom dijelu se proučavaju mogućnosti ispitivanja takvih mostova, upućuje se na opasnost vibracija koje nastaju kod modernih mostova kao što su viseći, ovješeni i mostovi načinjeni od lakših materijala te mostovi velikih dimenzija raspona. Prikazane su metode ispitivanja iz različitih normi i smjernica organizacija koje rješavaju problematiku tih vibracija.

Nakon upoznavanja sa tematikom definiran je pješačko-biciklistički most, pretežno načinjen od čelika, dužine 127,4 m. Sastoji se od sedam raspona i izveden u strukturi kontinuirane gredne konstrukcije. Primjenom naprednih računalnih alata napravljen je numerički model. Za izradu modela korišteni su softveri: *SCIA Engineer 24.0* i *Auto CAD 2022*. Na model su postavljena opterećenja probnog statičkog ispitivanja paletama i proračunskog opterećenja od pješaka u iznosu od 5 kN/m². Probna opterećenja se koriste za ocjenu sposobnosti mosta za prijenos predviđenog opterećenja. Provjerena je efikasnost probnog opterećenja sa vrijednostima progiba od statičkog probnog tereta i projektnog pokretnog opterećenja.

Na navedenom mostu su provedena ispitivanja čiji su rezultati obrađeni i prikazani. Također su analizirani rezultati iz numeričkog modela te je izvršena usporedba rezultata numeričkih analiza i rezultata ispitivanja.

2. METODE I TEHNIKE RADA

U razradi teme je obrađena glavna problematika, a to je na koji način projektirati i ispitati pješačko-biciklistički most kako bi se zadovoljili potrebni zahtjevi udobnosti. Upućuje se na opasnost nastanka vibracija koje se ispituju dinamičkim opterećenjem mosta. Opisana su ispitivanja mosta, obrađeni su rezultati ispitivanja i izrađen je numerički model po uzoru na predmetni most. Važno je poznavanje metoda koje se koriste kako bi se na ispravan način pristupilo zadatku.

Teži se interpretaciji stvarnosti, ali se najčešće rade pojednostavljena koja će pokazati jednako dobre rezultate u programu. Glavna korištena metoda u ovom diplomskom radu je metoda simulacije, koja služi za predviđanje ponašanja i analizu nekih pojava. S njom se najbliže moguće pokušava interpretirati stvarnost. Primjenu omogućuju suvremena računala i računarski programi. [2]

Prvi korak u ostvarivanju numeričkog modela bilo je korištenje softvera *Auto CAD 2022* zbog zahtjevnog nacrtu mosta, koji je prema tlocrtnom položaju u zavoju. U njemu su crtane pomoćne linije koje su uvezene u programski paket *SCIA Engineer 24.0*, u kojem je izrađen model. Ispitivanja statičkim i dinamičkim opterećenjima potkrepljena su propisima i normama te su primijenjena na modelu. Korištena norma je HRN U.M1.046:1984: Ispitivanje mostova probnim opterećenjima.

3. RAZRADA TEME

3.1. Problematika pješačko-biciklističkih mostova

Kod izrade pješačko-biciklističkih mostova treba se obratiti pozornost na zadovoljavanje kriterija udobnosti tj. ljudske ugone tijekom prelaska mosta. Pri dinamičkim opterećenjima hodanja ili trčanja pješaka dolazi do vibracija mosta koje stvaraju nelagodu. Nisu svi mostovi jednako osjetljivi na vibracije i potrebno je procijeniti vertikalne vibracije uzrokovane ljudskom silom. Pri izradi treba biti uspostavljen preliminarni dinamički model. [3]

3.1.1. Udobnost

U prošlosti se za projektiranje pješačkih mostova nije toliko obraćala pozornost na udobnost mosta za vrijeme njegovog korištenja. Proračuni su bili vrlo jednostavni i najčešće nisu bili dovoljni za postizanje udobnosti. Danas se sve više grade moderni mostovi kao što su viseći mostovi, mostovi sa kosim zategama, konzolni mostovi, lukovi mostovi i kombiniraju se različite tehnologije za postizanje optimalne funkcionalnosti. Moderni mostovi mogu biti lakši od klasičnih zbog korištenih materijala. Često se koristi čelik visoke čvrstoće i potrebna je manja masa čelika u odnosu na masivni beton za istu nosivost mosta. Stoga je vlastita težina sve manja što dovodi do rizika za nastanak neprihvatljive razine vibracija. Osim vlastite težine mosta dimenzije raspona također utječu na vibracije gdje dolazi do veće osjetljivosti pri većoj dimenziji raspona. [3]

Osjećaj za vibracije je subjektivan i može se razlikovati od čovjeka do čovjeka. Ovisi o ljudskim stavovima i strahovima, prelazak preko mosta može biti ugodan ili može izazvati nelagodu. No ipak postoje kriteriji za procjenu vertikalnih vibracija na pješačkim mostovima uzrokovane ljudskim kretanjem koji su dani u međunarodnim standardima.

Za nastanak vibracija odgovorna su dinamička opterećenja, u koja ubrajamo vjetar i silu koja nastaje ljudskim utjecajem. U ovom diplomskom radu ćemo obrađivati dinamička opterećenja koja nastaju ljudskom silom; hodanje i trčanje pješaka. Ako je frekvencija koraka pješaka jednaka prirodnoj frekvenciji konstrukcije, može doći do pojave rezonancije, što može uzrokovati pojačane vibracije i potencijalno ugroziti stabilnost konstrukcije. Prirodna frekvencija je osnovna frekvencija pri kojoj sustav oscilira kada nije pod utjecajem vanjskih sila. Rezonancija je pojava kada vanjska periodična sila djeluje na sustav s frekvencijom koja se podudara s njegovom prirodnom frekvencijom, što dovodi do naglog povećanja

amplitude oscilacija. Želja je ispitati granice vibracija i postaviti kriterije ljudske udobnosti izračunom dinamičkog odziva od sile hodanja pješaka.

3.1.2. Međunarodni standardi

Mostovi načinjeni od visokoučinkovitih materijala i laganih materijala podložni su nastanku vibracija, a rješenje ovog problema realizira se na dva načina. Prvi način je izbjegavanje prirodnih frekvencija mosta, koje odgovaraju frekvencijama ljudskog hoda. Tako da se izbjegne podudaranje frekvencija mosta i ljudskog koraka i time se onemogući nastanak vibracija. Drugi način je procjena dinamičkog odziva mosta odnosno ubrzanja kako bi se utvrdilo zadovoljava li granice udobnosti.

Postoje različiti svjetski standardi i smjernice organizacija u kojima su opisane metode za rješavanje problema vibracija:

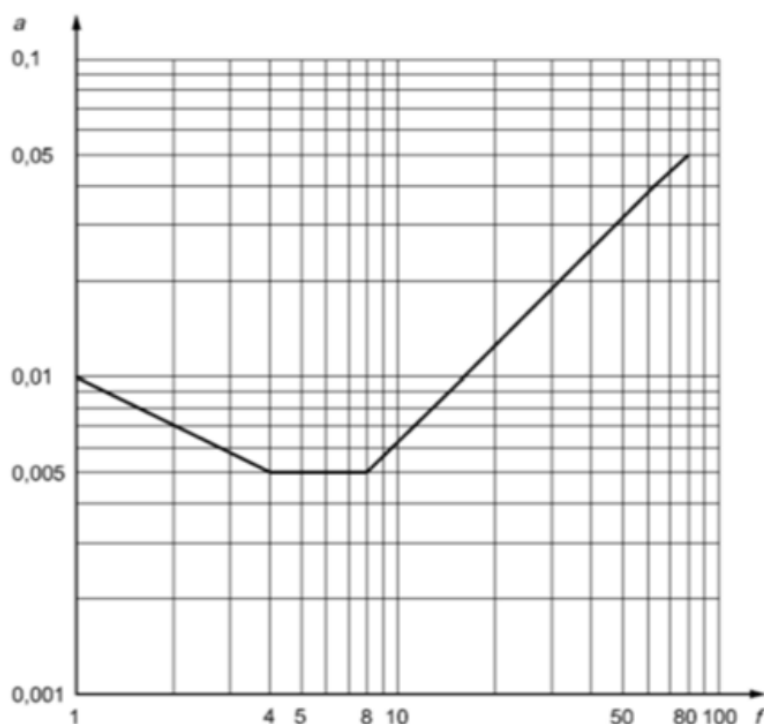
- *BS 5400-2:2006 Steel, concrete and composite bridges. Specification for loads*
- *ISO 1013 Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*
- *BS EN 1990:2002+A1:2005 Eurocode - Basis of structural design*
- *AASHTO LRFD guide specifications for the design of pedestrian bridges, (Dec. 2009)* (Organizacija za normizaciju - Američka asocijacija državnih cesta i prometa)
- *AISC steel design guide no. 11- Floor vibration due to human activity (Oct. 2003)*
- *UK national annex for BS EN 1991-2:2003 - BS NA EN 1991-2: UK National Annex to Eurocode 1. Actions on structures. Traffic loads on bridges*
- *JRC report - Design of lightweight footbridges for human induced vibrations - EUR 23984 EN*
- *Design guide for footfall induced vibration of structures CCIP-016, (December 2006)*
- *Loading Tests on Road Bridges and Footbridges – Practical Guides. Sétra (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes),(October 2006). [3]*

Standardi definiraju maksimalno prihvatljiva ubrzanja i opisuju izračunavanje vertikalnih ubrzanja.

BS 5400-2 ograničava granicu ubrzanja od $0,5 \text{ m/s}^2$, ako je osnovna prirodna frekvencija jednaka ili manja od 5 Hz za neopterećeni most u vertikalnom smjeru. Metoda za izračun maksimalnog ubrzanja vrijedi za mostove do tri kontinuirana raspona. [3]

ISO 1013 definira smjernice za vibracije u okomitom smjeru odnosno z-osi. Ne smije se prijeći faktor množenja od 60 u odnosu na osnovnu RMS krivulju (Slika 1.). U slučaju kad jedna osoba prelazi most dok druga osoba stoji na sredini mosta preporučuje se faktor množenja od 30. RMS krivulja je grafički prikaz srednje kvadratne vrijednosti signala kroz vrijeme, frekvenciju ili neku drugu varijablu. Koristi se za analizu promjena intenziteta signala, vibracija, ubrzanja ili drugih dinamičkih parametara u različitim sustavima, uključujući mostove, strojeve i električne signale. Njome se mogu pratiti promjene vibracija tijekom vremena pa je primjenjiva u analizi vibracija mostova pri utjecaju dinamičkih opterećenja. [3]

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$



Slika 1.: Osnovna krivulja vibracija duž Z-osi (okomiti smjer) za RMS ubrzanje. (Izvor: [3])

Kriterij udobnosti po standardu **BS EN 1990** definira se kao maksimalno prihvatljivo ubrzanje, s preporučenom granicom od $0,7 \text{ m/s}^2$ za vertikalne vibracije. Ne definira se,

odnosi li se ova vrijednost za bilo koji pješački promet ili samo jednu osobu. Preporučuje se provjera kriterija ako osnovna frekvencija mosta padne ispod 5 Hz, ali se ne navode smjernice za takvu provjeru. Ako kriteriji udobnosti nisu zadovoljeni, može se izvesti ugradnja prigušivača vibracija.[3]

AASHTO LRFD vodič za projektiranje pješačkih mostova (prosinac 2009) preporučuje da temeljna frekvencija pješačkog mosta bez živog opterećenja bude veća od 3 Hz kako bi se izbjegla rezonancija uzrokovana prvom harmonijom. Ako ta frekvencija ne može ispuniti ovo ograničenje ili ako je zbog druge harmonije nastaju problemi, potrebno je izvršiti procjenu dinamičkog ponašanja. [3]

AISC vodič za projektiranje čelika br. 11 "Vibracije poda uslijed ljudske aktivnosti" (listopad 2003): temelji se na procjeni problema vibracija pojedinca i preporučuje izbjegavanje sustava s prirodnim frekvencijama manjim od 3 Hz. Navodi graničnu vrijednost ubrzanja za unutarne pješačke mostove u iznosu od $0,15 \text{ m/s}^2$, dok je za vanjske pješačke mostove $0,5 \text{ m/s}^2$ te postavlja formulu kojom se ti kriteriji se uspoređuju s vršnim ubrzanjem. [3]

Po UK nacionalnom dodatku za **BS EN 1991-2:2003**: maksimalno vertikalno ubrzanje mosta mora biti unutar granica ubrzanja i računa se formulom:

$$a_{\text{limit}} = 1.0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \text{ m/s}^2$$

k_1 je faktor korištenja lokacije (1,6 do 0,6), ovisno o tome je li most na osjetljivoj ili ruralnoj lokaciji.

k_2 je faktor redundancije rute (1,3 do 0,7), ovisno o tome postoji li alternativna ruta.

k_3 je faktor visine konstrukcije (1,1 do 0,7), ovisno o visini mosta.

k_4 je faktor izloženosti (standardno 1,0), koji može varirati između 0.8 i 1.2 ovisno o projektnoj specifičnosti i uvjetima poput dizajna ograde ili kvalitete hodne površine.

Ovi faktori prilagođavaju odgovor strukture na vibracije, osiguravajući udobnost i sigurnost korisnika.[3]

Za mostove u urbanim područjima ili s gustim prometom, potrebno je koristiti metode koje procjenjuju vibracije uzrokovane većim brojem pješaka.

Metoda *JRC - EUR 23984 EN* uzima u obzir gustoću pješačkog prometa (npr. 0,5, 1,0 i 1,5 pješaka/m²) za provjeru razine udobnosti. Daje detaljniju analizu u odnosu na jednostavne metode procjene, međutim regulirajuća ubrzanja su obično veća u usporedbi s metodama koje obrađuju pojedinačne pješake. Kriteriji se dijele na 4 razine udobnosti, od maksimalne udobnosti do nelagode. Maksimalna razina udobnosti je definirana s ubrzanjem od 0.5 m/s², dok nelagoda počinje iznad ubrzanja od 2,5 m/s². [3]

'CCIP-016' (prosinac 2006) - Smjernice za vibracije uzrokovane hodađanjem detaljno opisuju metodu analize vibracija uzrokovanih hodom pojedinca, poznatu kao „footfall analysis” odnosno analiza koraka, za ovu metodu je potrebno izračunati dva različita tipa odgovora na vertikalne sile: impulsni i rezonantni odgovor. Rezonantni odziv vrijedi za građevine s prirodnim vertikalnim frekvencijama manjim od 4,2 puta najbrže frekvencije hoda, dok se impulsni odgovor koristi za frekvencije veće od tog omjera. [3]

Ukupni faktor odziva (R) izračunava se kao množitelj osnovne krivulje za RMS ubrzanje prema standardu BS 6472:1992. Vrijednost faktora R od 1 predstavlja razinu vibracije koju prosječan čovjek tek primjećuje.

Kriteriji izvedbe su:

R treba biti manji od 64 za vanjske mostove

R ne smije premašiti 32 za tipične unutarnje mostove

R treba biti manji od 24 za mostove s velikim pješačkim prometom,

Zajednička stavka metodama AISC, CCIP-016 i BS 5400-2 u procjeni problema vibracija što ih uzrokuje pojedinac. Za mostove s rijetkim prometom, metode poput AISC i BS 5400-2 su prikladne, no za mostove s većom gustoćom pješačkog prometa potrebno je koristiti metode koje uzimaju u obzir protok pješaka, poput JRC - EUR 23984 EN. [3]

U slučajevima kada most ne zadovoljava kriterije udobnosti, preporučuje se razmotriti mogućnosti poboljšanja. Poboljšanje udobnosti mostova s većim rasponima može se postići povećanjem ukupne težine završnih slojeva. Drugi prijedlog je ugradnja prigušivača vibracija, stoga bi dizajn mostova svakako trebao uzeti u obzir mogućnost instalacije prigušivača. Za projekte koji uključuju pješačke mostove u gustim urbanim područjima ili na mjestima visokog prometa, preporučuje se provesti detaljne dinamičke analize koje uzimaju u obzir promjenjive uvjete pješačkog prometa kako bi se osigurala dugoročna udobnost korisnika. [3]

Ispitivanja opterećenja na cestovnim mostovima i pješačkim mostovima

Sétra izdaje tehnički vodič : *Loading tests on road bridges and footbridges* u kojem su opisana statička i dinamička ispitivanja za mostove koji su namijenjeni isključivo pješacima i biciklistima. Statička ispitivanja se provode kako bi se procijenila otpornost mosta na trajna ili dugotrajna opterećenja. Testovi uključuju postavljanje opterećenja od utega koji su ravnomjerno raspoređeni, a ako je moguće mogu se koristiti vozila odgovarajućih težina. Cilj je stvoriti naprezanja i provjeriti može li most izdržati očekivana opterećenja u skladu s *Eurocode*-ovima (EN 1991-2). Tijekom ispitivanja mora se provjeriti dobra izvedba i ponašanje mosta u smislu njihanja, savijanja i uvijanja. [4]

Kod dinamičkog ispitivanja analizira se kako most reagira na pokretne sile, poput prolaska pješaka i biciklista. Definirane su specifične frekvencije za savijanje i njihanje mosta koje treba pratiti. Prolaskom pješaka nastaju pobude u rasponu frekvencije između 1,6 Hz i 2,4 Hz za savijanje i između 0,5 i 1,5 Hz za njihanje. Cilj je osigurati da nema prekomjernih vibracija koje bi mogle ugroziti sigurnost i udobnost korisnika. Posebno osjetljivi mostovi na dinamičko opterećenje zahtijevaju mjerenje maksimalnog ubrzanja glavnih modova prilikom prolaska pješaka. Nakon mjerenja maksimalnih ubrzanja, vrijednosti se uspoređuju s kriterijima uporabivosti navedenima u *Eurocode*-ovima. Ovo ispitivanje osigurava da konstrukcija zadovoljava zahtjeve udobnosti i prije svega sigurnosti pod realističnim uvjetima opterećenja. [4]

3.1.3. Projektiranje pješačko – biciklističkih mostova

Za dizajniranje pješačkih mostova povećava se fokus na vibracije uzrokovane ljudskim djelovanjem zbog projektiranja inovativnih i dizajnerskih zanimljivih konstrukcija kojima je mrtvi teret sve manji u odnosu na promjenjivi teret. Dizajnerskom slobodom nastaju moderne građevine kod kojih vibracije postaju sve važniji aspekt dizajna zbog sve lakših konstrukcija što ih čini osjetljivijima na dinamičke sile poput hodanja ili trčanja. Gradnjom mostova moraju se ispuniti prometni, estetski, tehnički, gospodarski i izvedbeni zahtjevi jer mostovi trebaju biti funkcionalni, postojani, trajni, stabilni, lijepi i ekonomični. [5]

Na slici 2. prikazan je pješački most lagane konstrukcije i velikog raspona koji se nalazi u Hrvatskoj.



Slika 2.: Pješački most u Osijeku (Izvor: [6])

Projektiranje mostova ne bi se smjelo bazirati samo na statičkim opterećenjima, već i na dinamičkom ponašanju, most bi trebao zadovoljavati kriterije udobnosti uzimajući u obzir vibracije. Provedbom dinamičke analize uzimaju se u obzir prirodne frekvencije mosta, prometne klase i razina udobnosti kako bi se osiguralo da most zadovoljava kriterije udobnosti.

Provjera udobnosti pješačko-biciklističkog mosta zahtijeva sustavan pristup koji započinje izradom preliminarnog modela za zadani most i uspostavljanjem dinamičke stabilnosti. Potrebno je izračunati prirodne frekvencije, provjeriti kritični raspon frekvencije i ubrzanja. Rade se različiti dizajni i za svaki se radi ista usporedba prirodnih frekvencija i ubrzanja radi definiranja udobnosti. Ako je model ispunio pripadajući kriterij udobnosti dizajn je gotov. Ako kriterij nije zadovoljen vrši se poboljšanje modela povećanjem mase (modifikacija konstrukcije), povećanjem prirodnih frekvencija ili ugradnjom prigušivača. [5]

Tehnologije projektiranja značajno su napredovale, ipak numerički modeli pješačkih mostova često nose sa sobom znatnu razinu nesigurnosti. Te nesigurnosti proizlaze iz složenih interakcija između konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata, kompozitnog djelovanja, učinaka raspodjele opterećenja, također nastaju pogreške u modelima i metodama. Mogu nastati fizičke i geometrijske nelinearnosti, a često može doći do odstupanja u definiranim materijalnim parametrima. Kako bi se ove nesigurnosti što preciznije definirale, provode se terenska ispitivanja mostova. Takvi testovi su pouzdani za procjenu tehničkog stanja mosta jer njihovi rezultati prikazuju stvarno ponašanje kad je konstrukcija opterećena statičkim ili dinamičkim opterećenjem. [7]

Za više stupanjski sustav, prirodne frekvencije su frekvencije modalnih oblika vibracija. Svaka konstrukcija ima onoliko prirodnih frekvencija i pridruženih modalnih oblika koliko ima stupnjeva slobode. Obično se sortiraju prema količini energije aktivirane oscilacijom. Prva prirodna frekvencija je najniža frekvencija na kojoj struktura može slobodno oscilirati i najvjerojatnije će biti aktivirana.

Izračun prirodne frekvencije može se dobiti računalno pomoću metode konačnih elemenata (FE metoda) ili se može napraviti ručno po poznatim formulama za ploče, grede, kabele, itd. [5]

Ovisno o složenosti konstrukcije mosta, vrste materijala te rubnim uvjetima može doći do odstupanja u proračunu prirodnih frekvencija.

Kritične frekvencije za mostove su:

- Vertikalne: 1,25 Hz do 2,3 Hz (prva harmonija)
- Vertikalne: 2,5 Hz do 4,6 Hz (druga harmonija)
- Bočne: 0,5 Hz do 1,2 Hz [5]

Nadalje određivanje klase udobnosti započinje definiranjem ključnih projektnih situacija koje predstavljaju stvarne uvjete na mostu.

Postavljaju se različite prometne klase, koje uključuju očekivani tip i gustoću pješačkog prometa te odabrani nivo udobnosti. Ovi faktori znatnoj mjeri utječu na dinamičko ponašanje mosta. Neke posebne situacije, poput inauguracije mosta, događaju se samo jednom, dok se druge, poput dnevnog prometa, događaju redovito. Dinamičko ponašanje mosta uvelike ovisi o tim faktorima.

Tablica 1.: Definiranje klase udobnosti prema rasponima ubrzanja (Izvor: [5])

Klasa udobnosti	Stupanj udobnosti	Vertikalno a_{limit}	Bočno a_{limit}
CL 1	Maksimalno	$< 0,50 \text{ m/s}^2$	$< 0,10 \text{ m/s}^2$
CL 2	Srednje	$0,50 - 1,00 \text{ m/s}^2$	$0,10 - 0,30 \text{ m/s}^2$
CL 3	Minimalno	$1,00 - 2,50 \text{ m/s}^2$	$0,30 - 0,80 \text{ m/s}^2$
CL 4	Neprihvatljiva nelagoda	$> 2,50 \text{ m/s}^2$	$> 0,80 \text{ m/s}^2$

Kriteriji udobnosti definirani su kroz četiri klase, pri čemu je maksimalno ubrzanje od $0,5 \text{ m/s}^2$ klasificirano kao najviša razina udobnosti, dok nelagoda nastupa iznad $2,5 \text{ m/s}^2$.

Ključ za smanjenje vibracija je prigušenje, njegovo određivanje ovisi o materijalu mosta. Povećanje se može postići dodatnim uređajima ili promjenom konstrukcijskih elemenata. [5]

3.2. Tehnički opis konstrukcije mosta

3.2.1. Opis mosta

Biciklistički most se spaja na postojeću prometnu infrastrukturu cesta s uređenim pješačkim stazama. U budućnosti će se na krajeve mosta nastaviti prometne površine rezervirane za biciklistički promet. Most prelazi postojeću željezničku prugu. Ukupna duljina od osi upornjaka U1 do osi upornjaka U8 je 127,4 m. Zadaje se da slobodni profil iznad kolosijeka bude 6,80 m. Ostali elementi moraju se uskladiti s ovim zahtjevom i postojećim visinskim i tlocrtnim elementima.

Rasponski sklop je kontinuirani gredni nosač, a stupovi su raspoređeni prema uvjetima najbolje iskoristivosti prostora ispod mosta. Greda je na upornjake oslonjena preko sustava elastomernih ležajeva. Središnji raspon je 28,7 m i s njim se premošćuje cjelokupni željeznički pojas (stupovi se ne izvode u prostoru pruge).

Tablica 2: Duljine raspona

1.raspon	2.raspon	3.raspon	4.raspon	5.raspon	6.raspon	7.raspon
15,4 m	15,4 m	15,4 m	16,8 m	28,7 m	19,6 m	16,1 m

Materijal

Materijal za rasponski sklop je čelik. Primjenjuje se čelik najmanje kvalitete S355J2. Hladno oblikovani elementi (poprečna rebra) se izrađuju od materijala S355K2C, a stupovi su od čeličnih cijevi $\varnothing 610 \times 12,5$, odnosno $\varnothing 711 \times 16$ od čelika S355J2H.

Tablica 3. Elementi sa pripadajućim materijalima

Elementi konstrukcije	Materijal
Donji pojas sanduka	S355 J2
Hrbat sanduka - Bočno	S355 J2
Rebro	S355 K2C
Lim	S355 J2
Dijafragma	S355 J2
Stupovi	C35/45 / S355J2H

Prometno rješenje

Razradom prometne plohe i nosive konstrukcije utvrđeno je da širina između ograda bude 4,0 m. Ograde su visine 1,30 m, a dimenzioniraju se na horizontalno opterećenje od 1,0 kN/m' (pješački i biciklistički mostovi).

U središnjem dijelu, iznad pruge, niveleta se izvodi u radijusu $R=150,0$ m. S južne strane je nagib nivelete 9,0 %, uz završni dio duljine 5,0 m, (izvan upornjaka) koji se izvodi u nagibu od 4,0%. Sa sjeverne strane nagib nivelete je 6,7%, a završni dio je u nagibu od 2,50 % (u duljini od 5,0 m).

U tlocrtu se most vodi u sustavu kontroliranih horizontalnih krivina, preko pruge most se tlocrtno vodi u pravcu. Najmanji radijus je na početku mosta (južna strana, upornjak U1) i iznosi $R=14,8$ m. Na ovaj radijus nižu se krivine slijedećih radijusa: 19,0 m, 30,0 m i 25,0 m, a završetak na sjevernom upornjaku (U8) je u radijusu 30,0 m.

U sredini mosta izvodi se uzdužni sabirni (odvodni) kanal u obliku kružnog segmenta, dubine 3,2 cm i širine 30,0 cm. Ovaj prostor koristi se za iscrtavanje razdjelne trake za odvajanje prometnih smjerova. Iznad svakog stupa (najveći razmak je 28,7 m, u tom rasponu je tjeme vertikalne krivine) ugrađuje se slivnik. Poprečni nagib je dvostrešan, 1,5% prema središnjem sabirnom kanalu.

Na početku i na kraju dionice F predviđeno je postavljanje uspornika za bicikliste (mimoilazne ograde) koji ujedno predstavljaju i barijeru za vozila, tako da nije moguć pristup vozila na most.

3.2.2. Gornji ustroj

Ukupna duljina grede (od osi upornjaka U1 do osi upornjaka U8) je: $L=3*15,4+16,8+28,7+19,6+16,1 = 127,4$ m. Visina grede je 0,75 m, a širina sanduka je promjenjiva – donji pojas je širine 0,64 m.

Sanduk

Konstrukcija rasponskog sklopa je kontinuirani čelični jednočelijasti sanduk sa dva hrpta i obostranim konzolama. Rasponski sklop je u poprečnom presjeku simetričan, s dvostrešnim padom od 1,50 % prema unutra.

Sandučastom nosaču su hrptovi visine 0,73 m, nagnuti u nagibu 5:1. Hrptovi su od lima debljine 12 mm, zakrivljeni su u radijusu kružnice koja je paralelna s osi mosta. Hrptovi se na donji pojas i na kolnički lim zavaruju sučeljenim zavarom za punu debljinu hrpta (12 mm). Donji pojas je lim širine 0,64 m i debljine 20 mm.

Lim

Kolnički lim je debljine 12 mm na cijeloj duljini mosta, osim u najvećem rasponu, gdje je na duljini od 17,5 m debljine 16 mm.

Dijafragma

U sandučasti glavni nosač ugrađuju se poprečne dijafragme za ostvarenje torzijske krutosti, prema rasporedu: rasponi U1-S2, S2-S3, S3-S4, S4-S5 i S7-U8 po dvije dijafragme u rasponu na udaljenosti 5,6 m od osi stupova; raspon S6-S7 dvije dijafragme u rasponu na udaljenosti 6,3 m od osi stupova; raspon S5-S6 četiri dijafragme raspoređene na razmacima 5,6m-5,6m-6,3m-5,6m-5,6m (prva i zadnja udaljenost su do osi stupa).

Iznad stupova ugrađuju se po dvije dijafragme, u nastavku hrpta poprečnog rebra.

Rebro

Nosači kolnika su poprečna sandučasta rebra izvedena hladnim oblikovanjem od lima debljine 6 mm. Rebra su raspoređena na podužnom razmaku od 0,7 m. Sanduci su promjenjive visine: na spoju na hrbat glavnog nosača visina je 250 mm, a na spoju na vijenac visina rebra je 100 mm. Donji pojas je konstantne širine od 238 mm, a hrptovi su u jednolikom nagibu. Širina sanduka u spoju na kolničkim limom je promjenjiva: u spoju na hrbat glavnog nosača širina je 400 mm, a u spoju na vijenac širina je 303 mm.

Cijeli most je u podužnom smjeru podijeljen na transportne segmente, koji se podižu na prethodno ugrađene stupove, pridržavaju i zavaruju na stupove i međusobno. Najveća duljina montažnog segmenta je 32,0 m, a težina mu je ~32,0 tone.

3.2.3. Ležajevi i prijelazne naprave

Ležajevi

Spoj rasponskog sklopa na stupove S2-S7 ostvaruje se izravnim zavarivanjem na čelične cijevi $\varnothing 610 \times 12,5$ / $\varnothing 711 \times 16$. Zavarivanjem se ostvaruje spoj za prijenos pune upetosti.

Spoj rasponskog sklopa na upornjake U1 i U8 ostvaruje se preko dodatnih HEM profila i neoprenskih ležajeva. Sustav je složen tako da se mogu preuzeti i odizne reakcije. Na svakom upornjaku postavljaju se po četiri armirano elestomerna ležaja (AEL) 200*250 mm, visine 115 mm, sa sidrenim pločama.

Prijelazne naprave

Na upornjacima se ugrađuju prijelazne naprave za ukupne pomake 80 mm.

3.2.4. Donji ustroj mosta

Donji ustroj čine upornjaci U1 i U8, te stupovi S2 do S7.

Stupovi

Konstrukcija sadrži 6 stupova od S2 do S7. Stupovi S2 – S4 i S7 izvode od čelične cijevi $\varnothing 610 \times 12,5$, S355J2H. Stupovi S5 i S6 izvode od čelične cijevi $\varnothing 711 \times 16$, S355J2H.

Stupovi se na rasponski sklop zavaruju sučeljenim zavarom za punu nosivost spoja i sidre se u temelje izravnim betoniranjem čašica. Temeljenje je plitko, na dubini od 1,5 m, ukoliko bude potrebno izvest će se zamjena temeljnog tla.

Temelji stupova su dvodijelni: bazni temelj je pravokutni: za stup S2 – S5: 5,0 m (poprijeko na os mosta) * 3,5 m (uzduž mosta); za stupove S3 – S5: 5,0 m (poprijeko na os mosta) * 3,0 m (uzduž mosta); za stup S6: 5,5 m (poprijeko na os mosta) * 3,5 m (uzduž mosta); za stup S7 5,0 m (poprijeko na os mosta) * 4,0 m (uzduž mosta) .

Visina baznog temelja je 70 cm Na bazni se temelj izvodi sidreni betonski blok. Blok je okrugli, promjera 1,0 m (za stupove $\varnothing 610$), odnosno 1,1 m (za stupove $\varnothing 711$), a visine 1,10 m. Izvode se moždanici na čeličnim stupovima i sidrena armatura u betonskim temeljima.

Stupovi se po cijeloj visini popunjavaju betonom. Kroz stupove se provode cijevi odvodnog sustava i cijevi za rasvjetu – cijevi moraju biti krute, da se ne oštete pri ispunjavanju stupa betonom. Beton je razreda C35/45, a armatura je kvalitete B500B.

Upornjaci

Izvode se masivni upornjaci, plitko temeljeni: U1 i U8.

Upornjak U1 je duljine $L_0=13,0$ m i širina upornjaka je 5,5 m, na upornjak se nastavlja potporni zid kako bi se oslobodio prostor oko upornjaka. Ispred upornjaka je rampa duljine 5,0 m, s redukcijom nagiba nivelete na 4,0%. Upornjak U8 je duljine $L_8=6,0$ m, a širina je 5,5 m. Iza upornjaka je rampa duljine 28,3 m, s redukcijom nagiba nivelete na 2,5% na zadnjih 5,0 m. Ukupna duljina mosta i pristupnih rampi je 195,645 m.

Napomena: Iskazani rasponi su mjereni duž kružnice/pravca koji opisuju os mosta.

Beton upornjaka i potpornog zida je razreda C35/45, a armatura je kvalitete B500B. Izvedba je predviđena u klasičnoj oplati po cijeloj visini.

3.2.5. Oprema mosta

Ograda

Ograda se sastoji od rukohvata i vertikalne ispune. Rukohvati su eliptični profili 120*60*4 mm (inox, A4). Razmak između rukohvata je 4,0 m. Rukohvati služe za instalaciju linijske rasvjete kolnika, te će se prilagoditi rasvjetnim tijelima, prema elektro projektu. Ispuna (stupci) ograde su koso položeni, u nagibu od 4°, prema unutra. Ispuna je od limova #40*10, a raspoređeni su na osnovnom razmaku od 130 mm, tako da je svjetli razmak između stupaca 120 mm.

Odvodnja

Na mostu je projektiran sustav odvodnje. Odvodnja mosta ostvaruje se ugradnjom slivnika u sredini stupova. U osi stupova postavljaju se odvodne cijevi koje na vrhu stupa, na spoju sa kolničkim limom završavaju sa „lijevkom“ u koji se, kroz slivničku rešetku skuplja voda. Voda se kroz cijev položenu u tijelo stupa odvodi do podnožja i ispušta u okolni teren. Na samom ispustu u površini cca 0,8*0,8 m, dubine 30-tak cm potrebno je postaviti šljunak.

Svi elementi odvodnje: cijevi, spojna sredstva, slivnička rešetka, spojnice i sve ostalo, moraju biti od inoxa A4.

Zastor i izolacija mosta

Na kolnički lim se aplicira RHD zastor na bazi poliuretana i kvarcnog pijeska. Srednja debljina zastora je 6 mm. Zastor se izvodi u svemu prema pravilima struke, tako da se osigura prionjivost (trenje) za korisnike i potpuna antikorozivna zaštita kolnika.

Hidroizolacija ukopanih dijelova upornjaka

Sve betonske plohe koje su u kontaktu s tlom potrebno je zaštititi. Hidroizolacija se izvodi sa hladnim bitumenskim prednamazom i dva sloja vrućeg bitumenskog premaza, a u skladu sa uputama proizvođača.

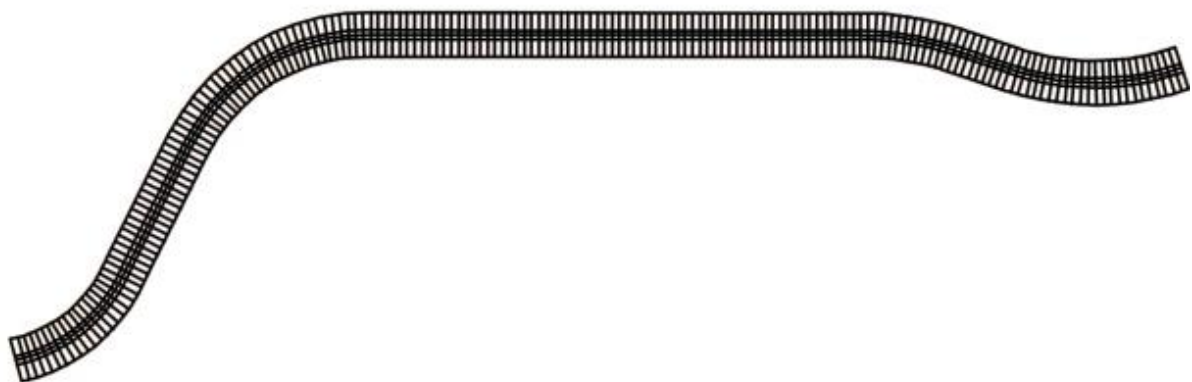
3.3. Numerički model

3.3.1. Opis numeričkog modela

Numerički model je napravljen prema dostupnom glavnom projektu. Svi podatci iz projekta korišteni su kako bi novonastali model bio što vjerodostojniji. Slijedi opis izrade numeričkog modela od početka do kraja. Zbog zahtjevnosti konstrukcije u modeliranju su korištena pojednostavljenja. Neki detalji nisu bili nužni za crtati, a neki nisu mogli biti izvedeni u programskom paketu *SCIA Engineering*.

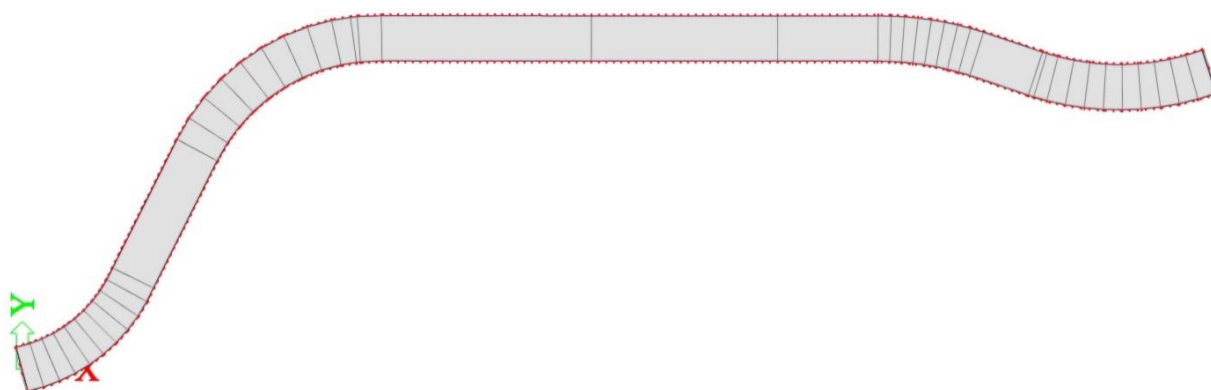
Za izradu tlocrtnih linija korišten je programski paket *AutoCAD*. Pravci i zavoji mosta su povezani kako je zadano projektom. Zavoji su nacrtani zadanim kružnicama: 14,8 m, 19,0 m, 30,0 m, 25,0 m i 30,0 m. Potom su kružnice prenamijenjene u *polyline*. Svaka *polyline* je napravljena od 10 dijelova po kružnici. Pojednostavljenje u kojem se zakrivljeni elementi zamjenjuju nizom ravnih segmenata naziva se linearizacija krivulje. Prva nastala bila je os mosta koja je kopirana lijevo i desno na udaljenostima dva metra od osi te je tako dobivena širina mosta.

AutoCAD je korišten za izradu svih pomoćnih linija za crtanje rasponskog sklopa, crtanje rebara i ploče. Za iscrtavanje osi rebara prvo je bilo potrebno povezati sve pravce i linije od kružnica. Novonastala linija podijeljena je na zahtijevani broj kako bi se dobio zadani razmak rebara u iznosu od 0,7 m. Iscrtavanje osi rebara je bio zahtjevan zadatak zbog neobičnog tlocrta mosta sa 5 zavoja. Ti zavoji su zadavali probleme u postavljanju rebra okomito na os, a riješeno je pažljivim iscrtavanjem jednog po jednog rebra (Slika 3.). Iscrtavana su od ruba do ruba duž cijele širine mosta.

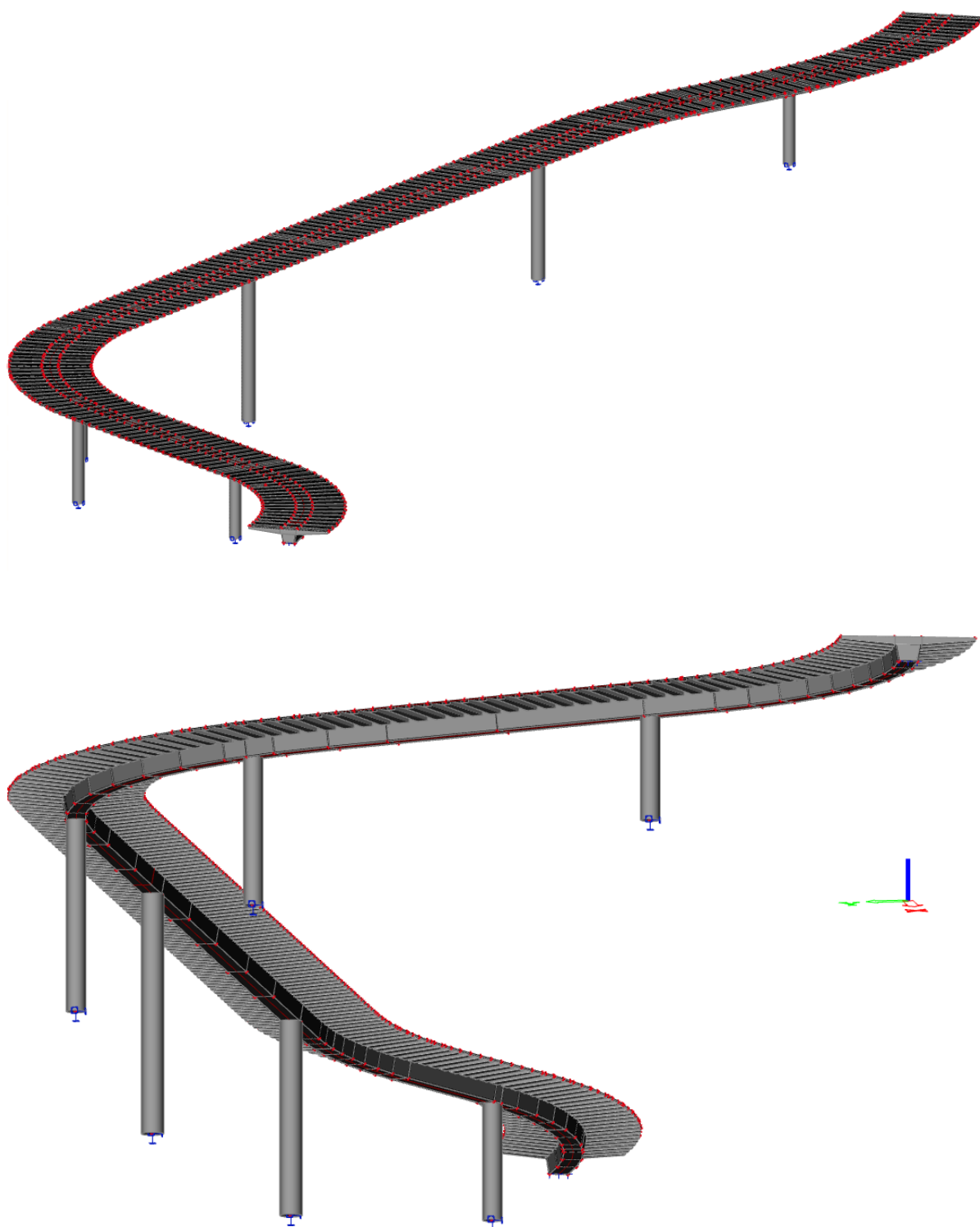


Slika 3. Prikaz tlocrta mosta iz *AutoCAD*-a

Sve linije iz *AutoCAD*-a su uvezene u programski paket *SCIA Engineering* gdje su korištene kao osi za crtanje svih elementa mosta. Zbog tlocrtnih „krivina“ (*polyline* kružnice) rasponski sklop bilo je potrebno izvesti plošno (*shell*) u više dijelova (Slika 4.), ploče su također plošni elementi kao i dijafragme, dok su rebra i stupovi modelirani kao štapni elementi (*1D member*). Aproksimacija upornjaka provedena je postavljenjem upetih ležajeva na krajevima mosta. Na dnu stupova isto su postavljeni upeti ležajevi. Most je modeliran kao spregnuta konstrukcija – rebra su spregnuta sa pločom (limom). Lim je debljine 12 mm u svim rasponima osim u petom rasponu (28,7 m), gdje na duljini od 17,5 m u sredini raspona iznosi 16 mm. Ploča se povezuje na rebra i omogućuje prijenos vertikalnih i horizontalnih sila rasponskog sklopa na stupove i ležajeve. Sustav je postavljen u statičku ravnotežu i na konstrukciju je zadano dodatno stalno opterećenje, probno opterećenje paletama i opterećenje od prolaza pješaka, a vlastita težina elemenata uzeta je u obzir u samom *software*-u. Materijalne karakteristike definirane su prema podacima iz tehničkog opisa.

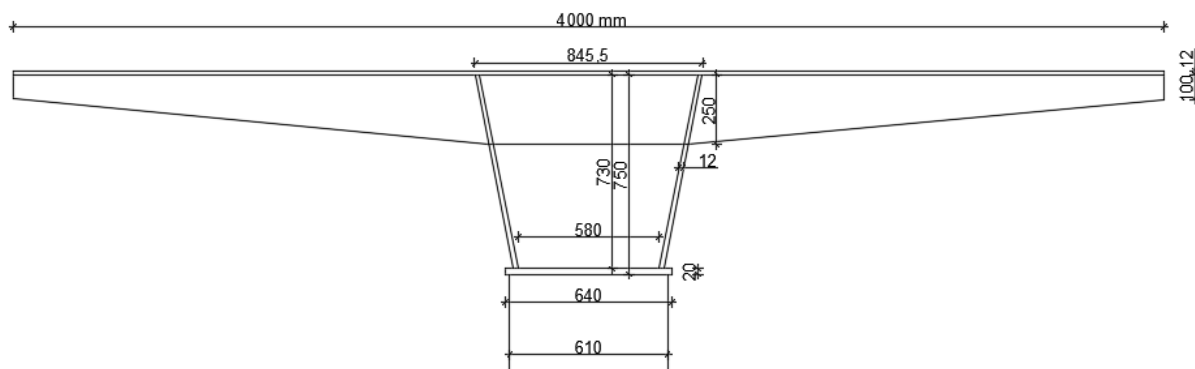


Slika 4.: Tlocrt mosta, prikaz ploča



Slika 5.: 3D prikaz

Na sljedećoj slici je prikazan poprečni presjek rasponskog sklopa na kojoj se detaljno vide karakteristične dimenzije (Slika 6.) Tip nosive strukture je sandučasti.



Slika 6.: Karakteristični poprečni presjek rasponskog sklopa

Rebra su raspoređena po dužini na razmaku od 0,7 m i promjenjive su visine. Na spoju glavnog nosača visina je 250 mm, a na spoju na vijenac visina rebra je 100 mm.

Tablica 4.: Prikaz dimenzija mosta

Širina mosta	4,0 m
Duljina mosta	127,4 m
Razmak rebra	0,7 m
Stup	Ø610*12,5

Tablica 5.: Prikaz dimenzija hrpta

Visina grede	750 mm
Visina hrpta	730 mm
Širina donjeg pojasa hrpta	580 mm
Širina gornjeg pojasa hrpta	640 mm
Debljina donjeg pojasa	20 mm
Debljina lima	12 mm

Svi elementi konstrukcije sa pripadajućim materijalom, podmodelom u SCI-i i debljinama elemenata prikazani su u tablici 6.

Tablica 6.: Podatci o elementima konstrukcije

Elementi konstrukcije	Materijal	Podmodel u SCI-i	debljina
Donji pojas sanduka	Čelik S355 J2	<i>Shell</i> (2D member)	20 mm
Hrbat sanduka - Bočno	Čelik S355 J2	<i>Shell</i> (2D member)	12 mm
Rebro	Čelik S355K2C	<i>Beam</i> (1D member)	6 mm
Ploča	Čelik S355 J2	<i>Shell</i> (2D member)	12 mm 1., 2., 3., 4., 6. i 7. raspon
Ploča	Čelik S355 J2	<i>Shell</i> (2D member)	16 mm 5.raspon na duljini od 17,5 m
Dijafragma	Čelik S355 J2	<i>Shell</i> (2D member)	14 mm
Stupovi S2 – S4 i S7	Beton/čelik C35/45 / S355J2H	<i>Column</i> (1D member)	Ø610*12,5
Stupovi S5 i S6	Beton/čelik C35/45 / S355J2H	<i>Column</i> (1D member)	Ø711*16

Čelik S355 je definiran oznakom S koja predstavlja konstrukcijski čelik (eng. *Structural steel*) i oznakom 355 koja označava minimalnu granicu razvlačenja od 355 MPa za standardne debljine.

Čelik **S355 J2**. Oznaka J2 definira sposobnost čelika da izdrži udarce na niskim temperaturama odnosno ta sposobnost je udarna žilavost materijala. Čelik je ispitan pri temperaturi od -20 °C na udarnu žilavost s minimalnom vrijednošću udarne energije od 27 J prema *Charpy*testu. Materijal je opće primjene, primijenjen je za lim, sanduk i dijafragmu.

Čelik **S355 J2H**. Prethodno su definirane sve stavke osim oznake H koja označava šuplji profil (*Hollow section*). Oblikovan je kao cijev, može biti: okrugla, kvadratna ili pravokutna. Najčešća primjena je za nosače i stupove kod zgrada i mostova, U modelu je konstruiran stup kao okrugla čelična cijev koja je potom popunjena betonom.

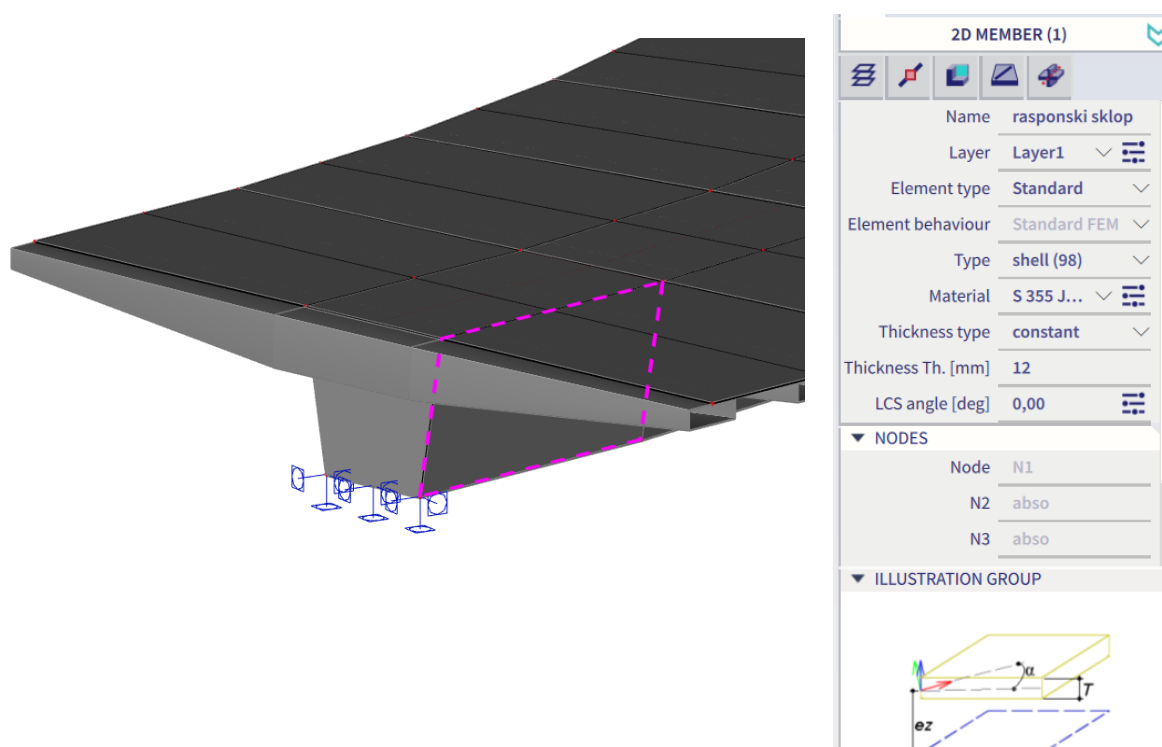
Čelik **S355 K2C**. Oznaka K2 je klasa udarne žilavosti također ispitana pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ kao prethodna dva definirana materijala, ali sada s minimalnom vrijednošću energije od 40 J, što je viša otpornost na udarce od čelika sa oznakom J2. Dodatak C označava čelik s poboljšanim svojstvima zavarljivosti. Materijal visoke čvrstoće, sa strožim zahtjevima kvalitete, korišten je za izradu rebara mosta.

Sva tri čelika primjenjuju se na konstrukcijama koje su izložene niskim temperaturama jer su ispitana pri $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čelik S355 K2C ima višu žilavost od S355 J2 i S355 J2H.

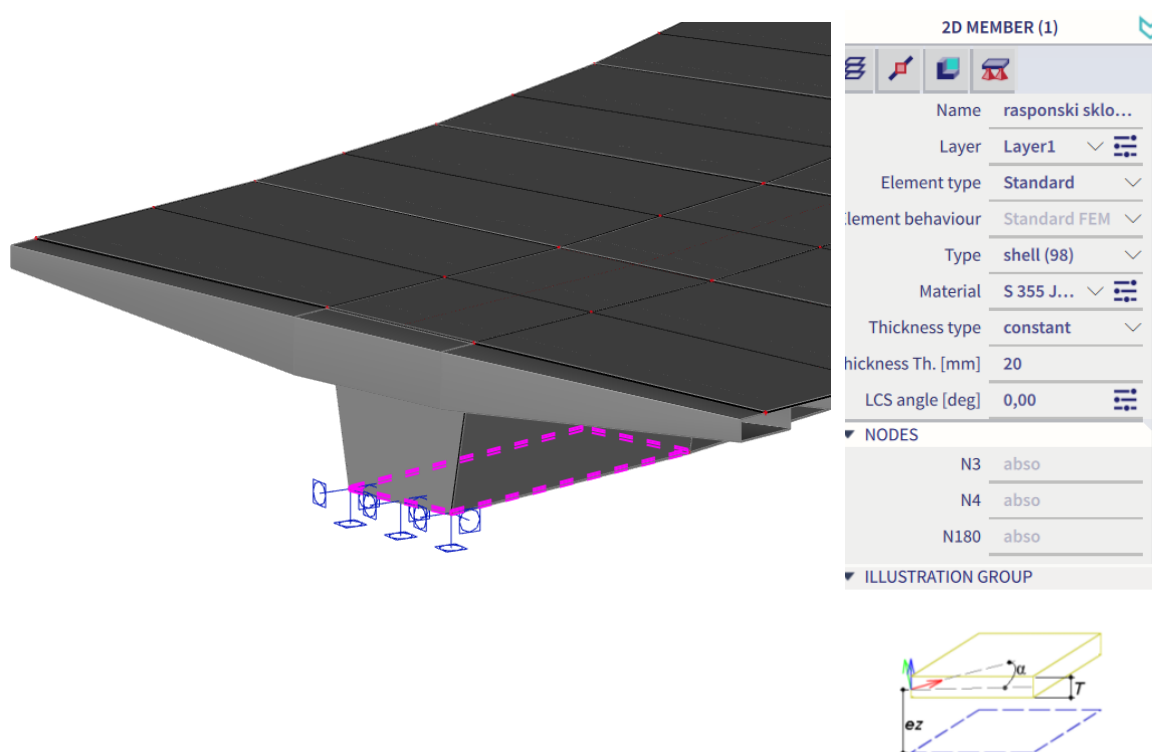
Beton **C35/45** je visoke čvrstoće: oznaka 35 je karakteristična tlačna čvrstoća na cilindričnim uzorcima ($\varnothing 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$) u MPa, a oznaka 45 je karakteristična tlačna čvrstoća na kockastim uzorcima ($150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$) u MPa.

Podmodeli su izabrani na načini da elementi zadanim projektom budu što točnije prikazani u programu.

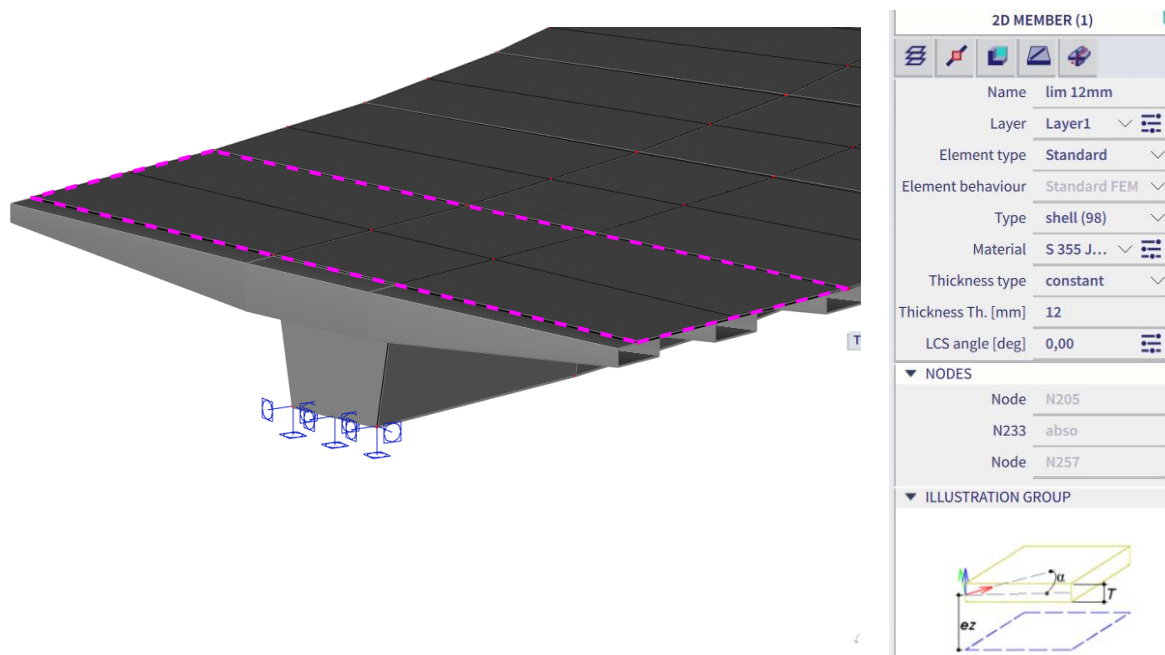
U nastavku, ljubičastom bojom bit će istaknuti navedeni konstrukcijski elementi iz Tablice 6.



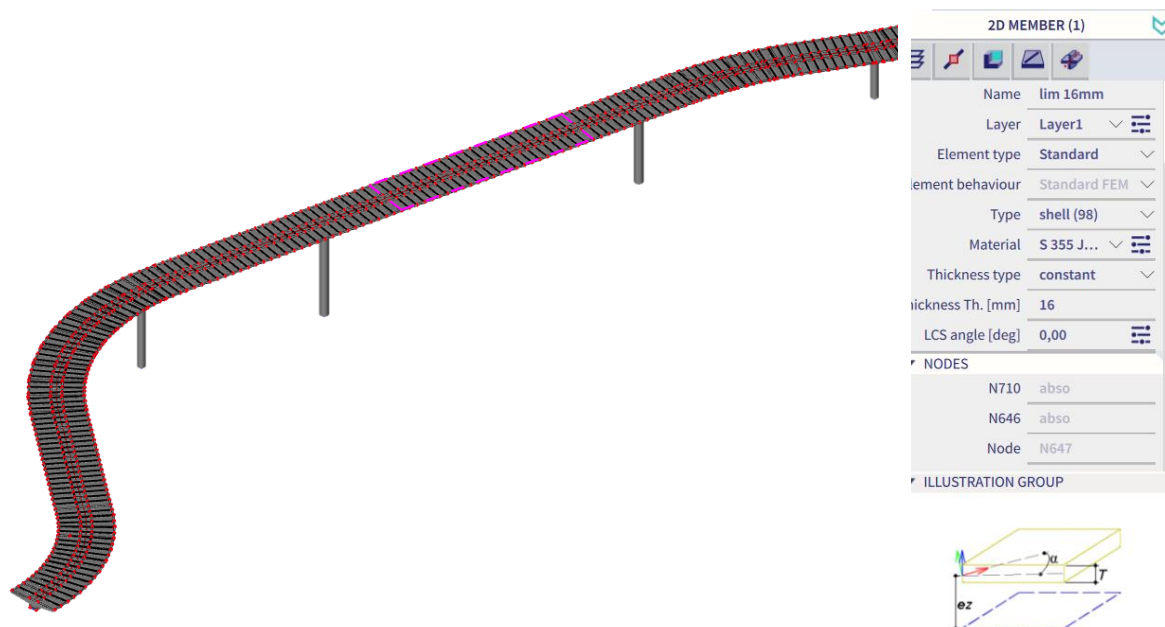
Slika 7.: Prikaz karakterističnog hrpta sanduka



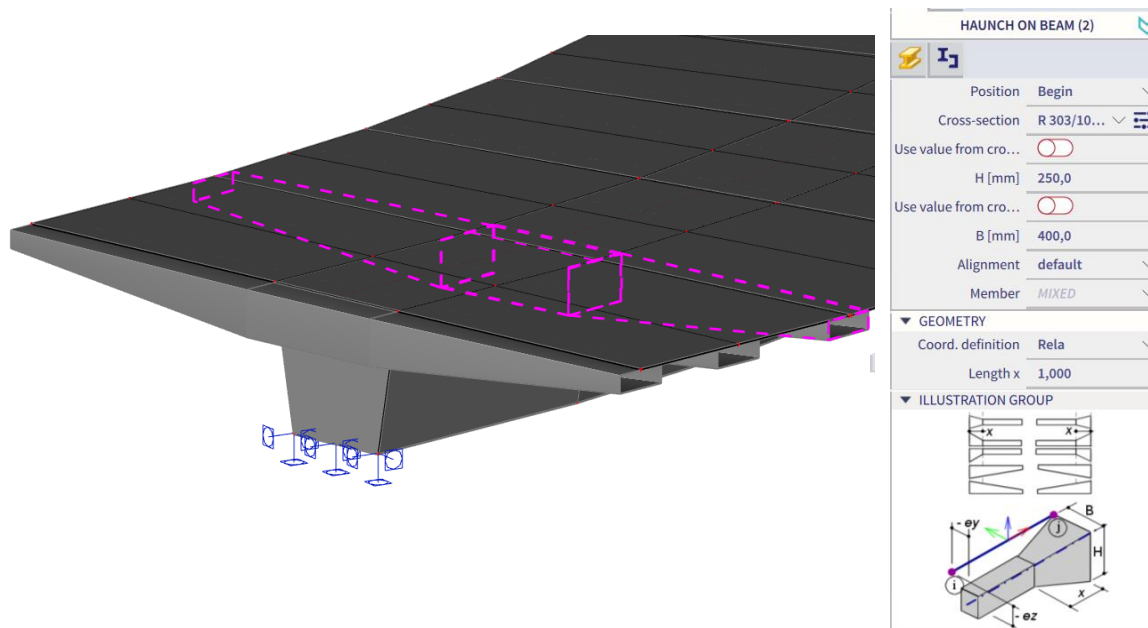
Slika 8.: Prikaz karakterističnog donjeg pojasa sanduka



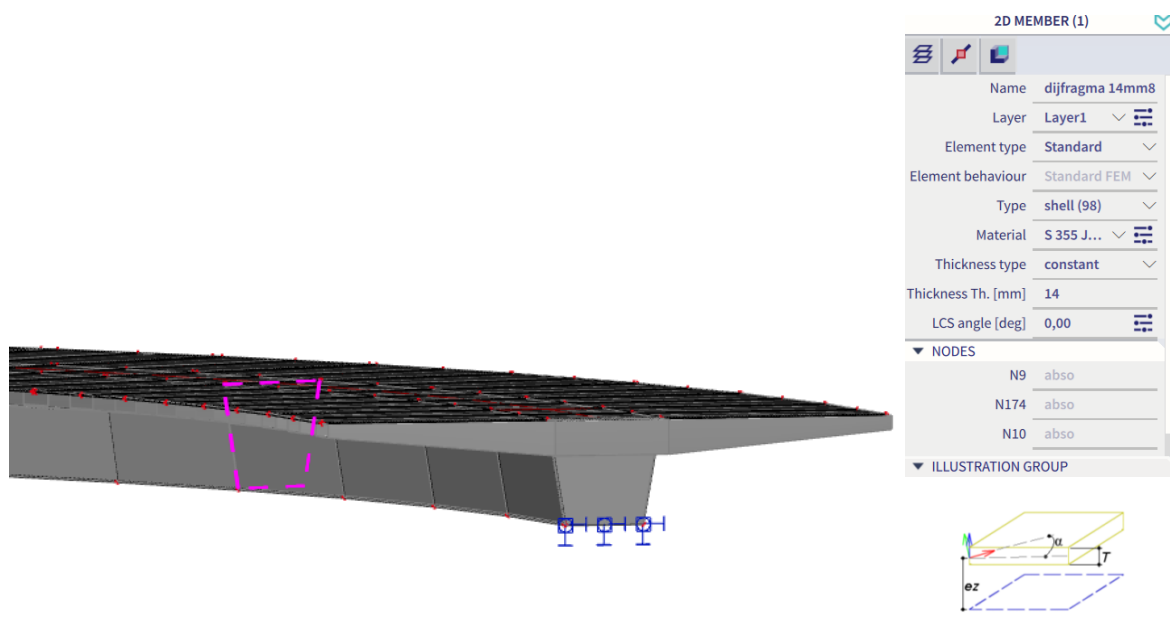
Slika 9.: Prikaz karakteristične ploče debljine 12 mm



Slika 10.: Prikaz ploče debljine 16 mm, samo u najvećem rasponu u sredini na duljini od 17,5m

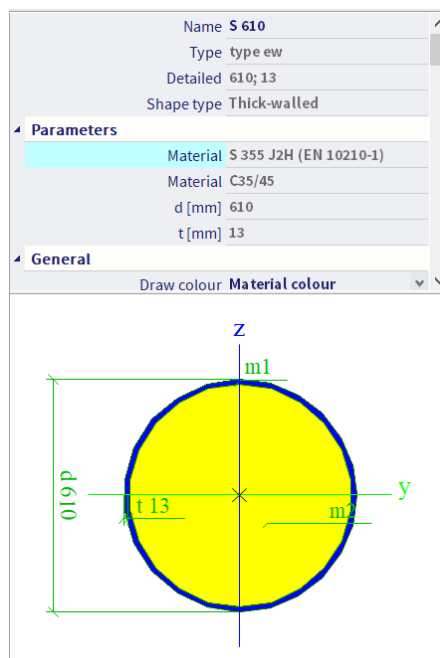


Slika 11.: Prikaz karakterističnog rebra

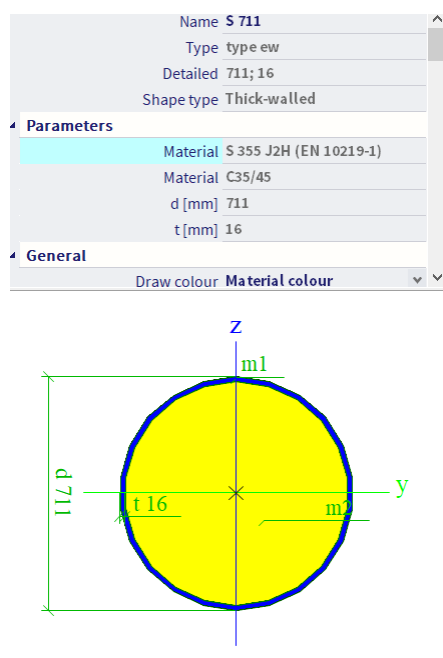


Slika 12.: Prikaz karakteristične dijafragme

Konstrukcija se sastoji od 6 stupova: S2 - S7. Stupovi S2 – S4 i S7 izvede od čelične cijevi $\varnothing 610 \times 12,5$, materijal S355J2H (Slika 13.). Stupovi S5 i S6 izvede od čelične cijevi $\varnothing 711 \times 16$, materijal S355J2H (Slika 14.).



Slika 13.: Poprečni presjek stupova S2-S4 i S7.

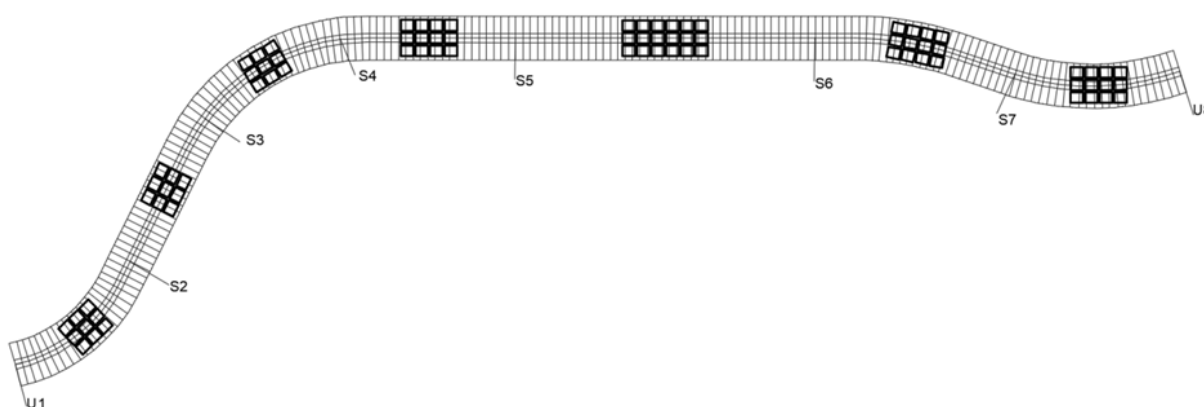


Slika 14.: Poprečni presjek stupova S5 i S6.

3.3.2. Numeričke analize

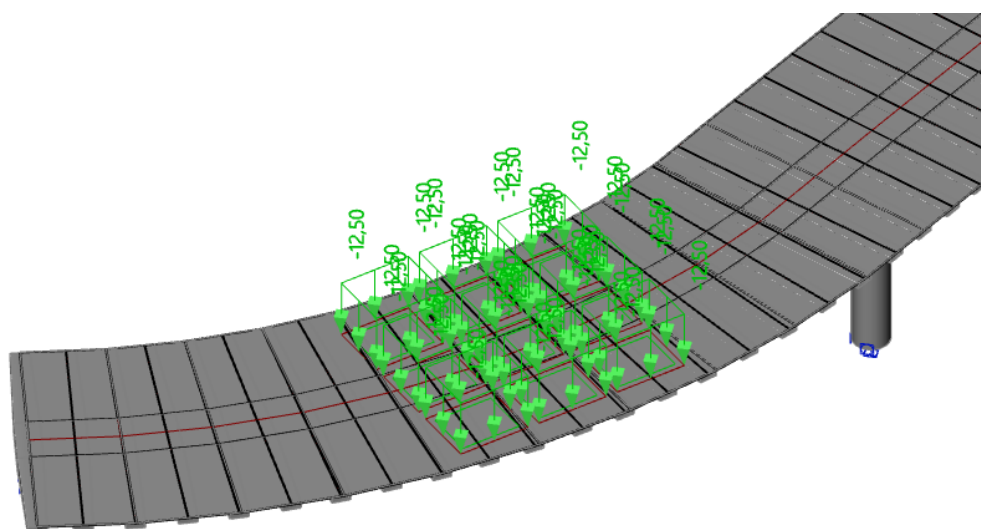
Statička i dinamička računaska analiza konstrukcije provedena je programskim paketom *SCIA*. Izrađen je model konačnih elemenata konstrukcije u kojem su ulazni podaci uzeti iz projekta konstrukcije. Statičko probno opterećenje mosta definirano je fazama za koje su korištene palete s rubnjacima mase 92 kg/kom i ukupne mase 1500 kg.

Masa rubnjaka izražena je preko težine od 15 kN, koja je pomnožena sa površinom paleta 1,2 m². Dobiveno je površinsko opterećenje u iznosu od 12,5 kN/m² koje se postavlja po shemi opterećenja (Slika 15.).

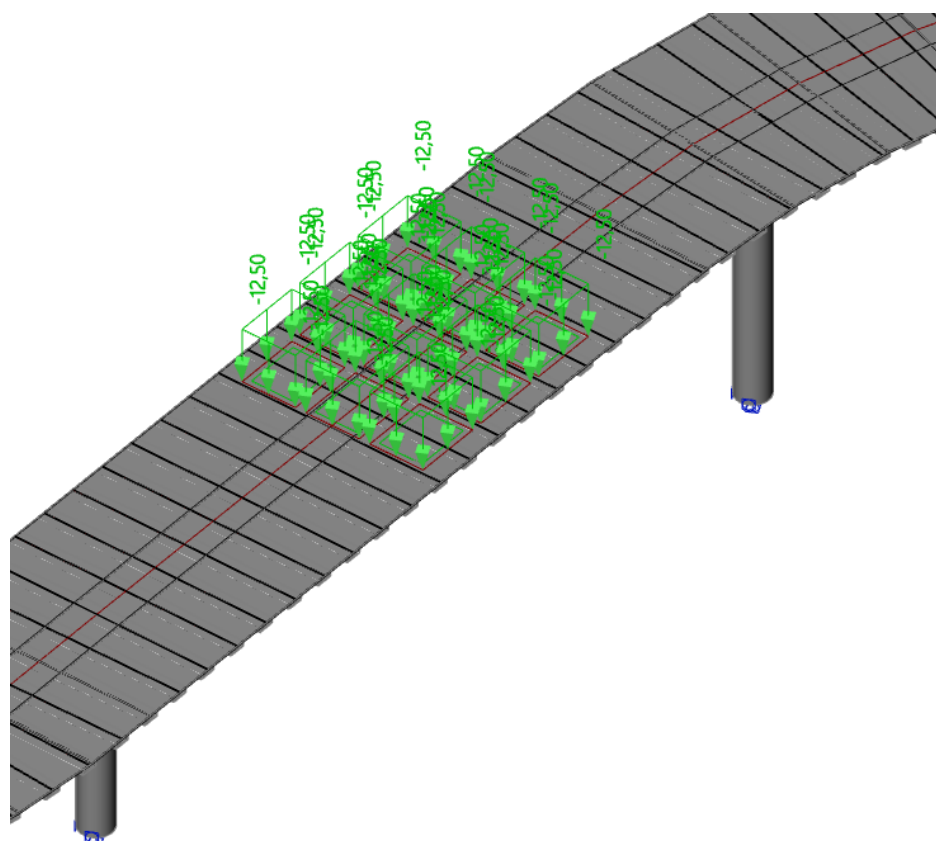


Slika 15.: Raspored paleta za probno opterećenje mosta

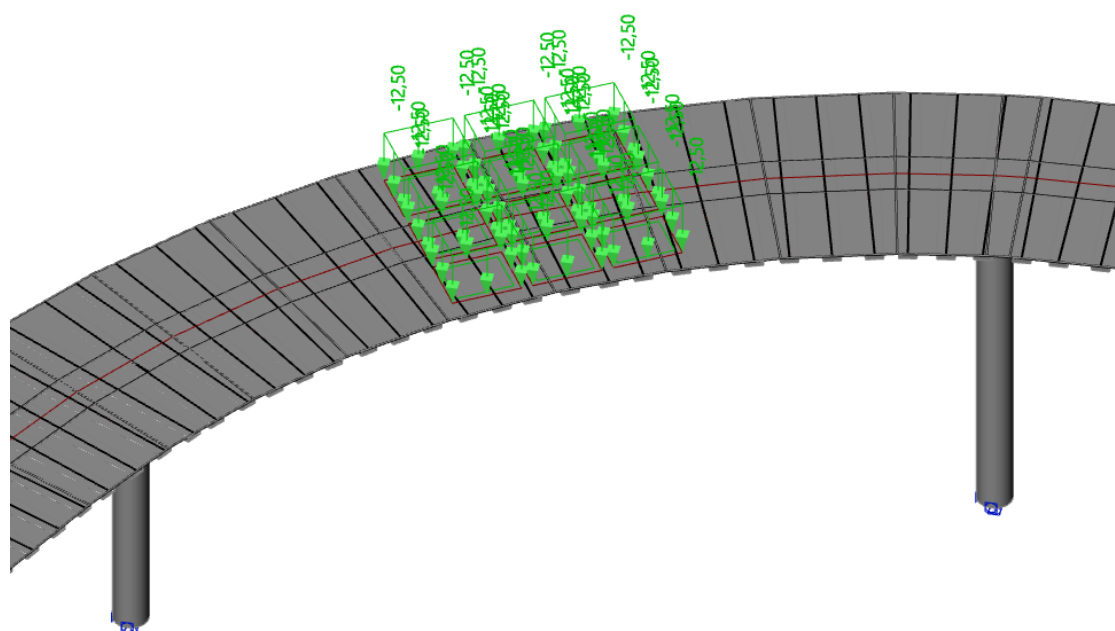
U nastavku su prikazane sheme statičkog probnog opterećenja pojedinog raspona za faze 100% opterećenosti.



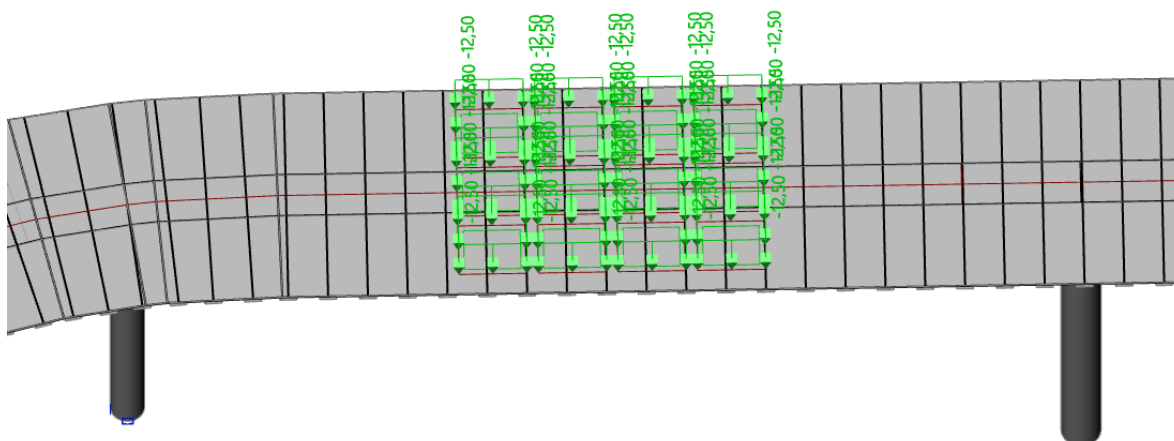
Slika 16.: Probno opterećenje raspona R1 sa 9 paleta – faza 4



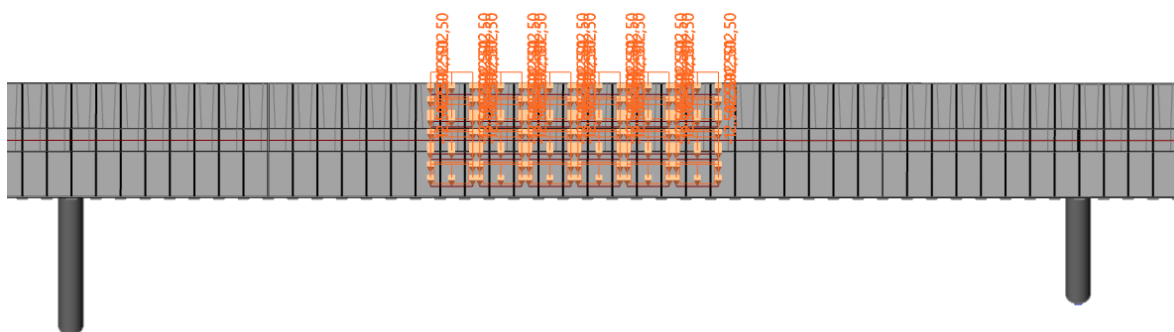
Slika 17.: Probno opterećenje raspona R2 sa 9 paleta – faza 8



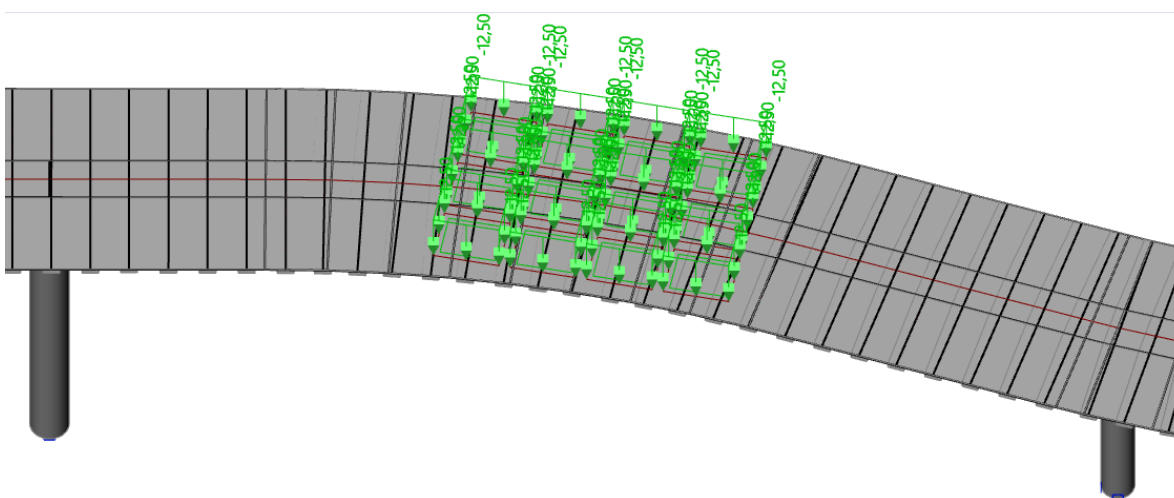
Slika 18.: Probno opterećenje raspona R3 sa 9 paleta – faza 7



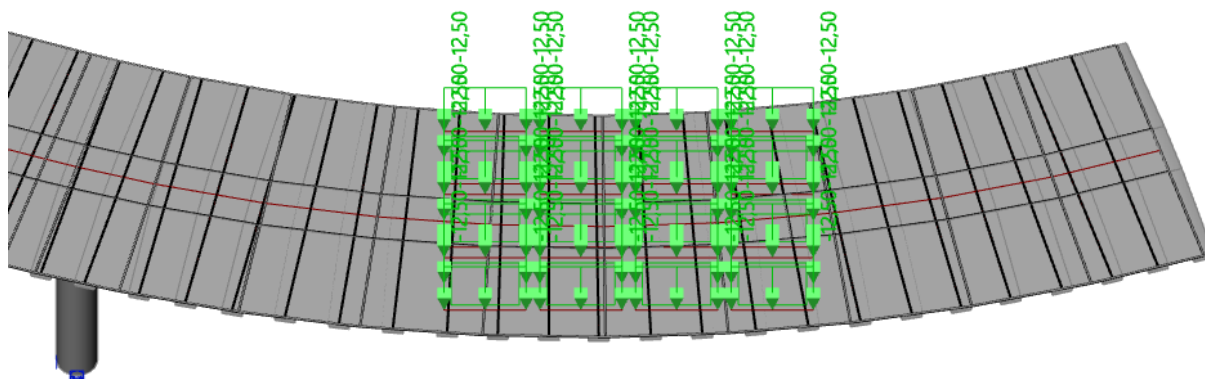
Slika 19.: Probno opterećenje raspona R4 sa 12 paleta – faza 13



Slika 20.: Probno opterećenje raspona R5 sa 18 paleta – faza 15



Slika 21.: Probno opterećenje raspona R6 sa 12 paleta – faza 18



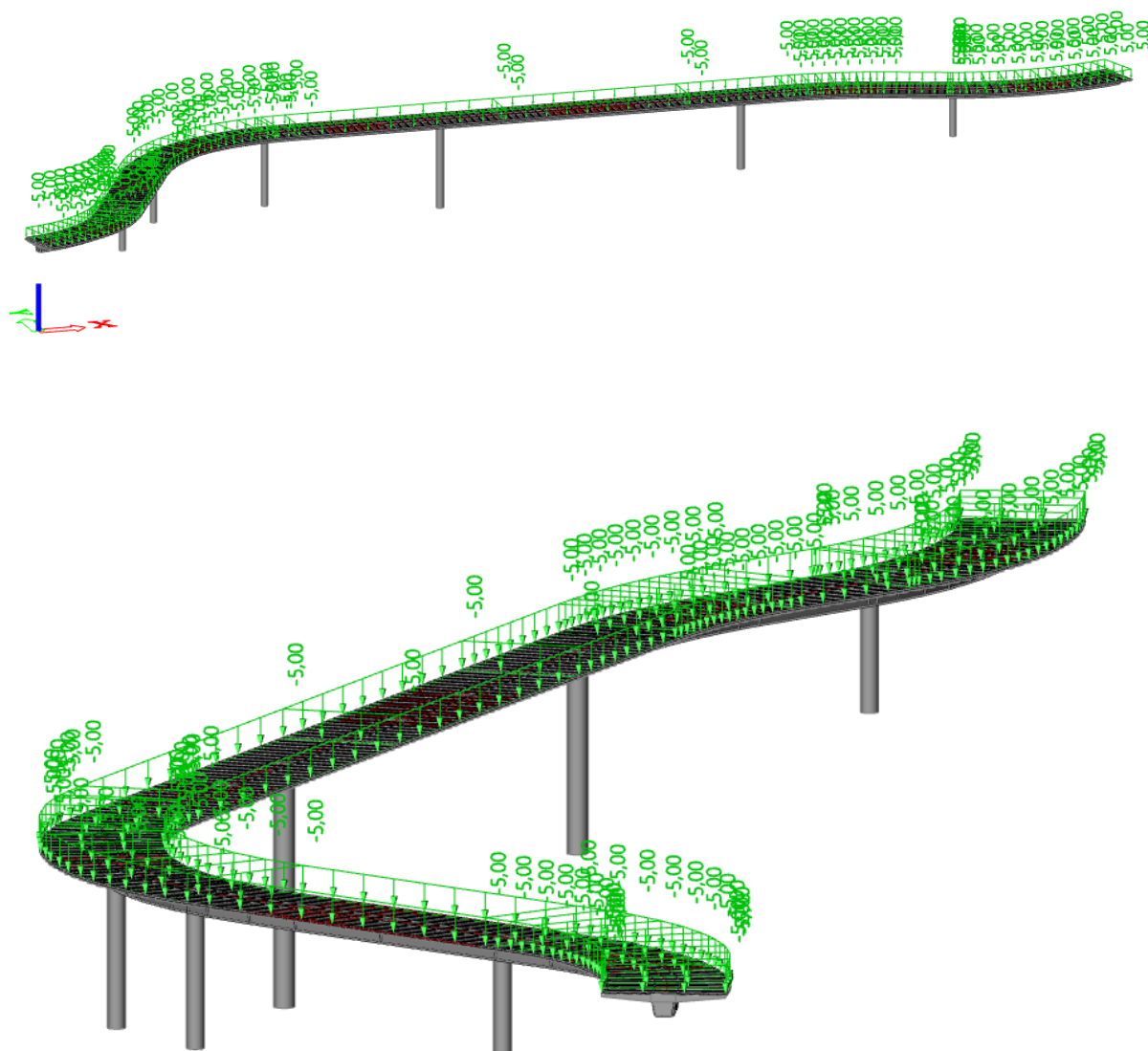
Slika 22.: Probno opterećenje raspona R7 sa 12 paleta – faza 19

Po hrvatskim propisima mora se onemogućiti prijelaz cestovnih vozila preko pješačkih mostova sa odgovarajućim konstrukcijskim detaljima jer su pješački mostovi namijenjeni isključivo pješacima. Definirano korisno opterećenje za pješačke mostove je kontinuirano opterećenje $p=5 \text{ kN/m}^2$ između ograda i ne množi se dinamičkim koeficijentom. Za raspone nosivih elemenata veće od 10,0 m dopušteno je smanjenje korisnog opterećenja na vrijednost koja se dobiva izrazom: $p = 5,5 - 0,05 L \geq 4,0 \text{ kN/m}^2$. [8]

Europske norme definiraju da se kontinuirano opterećenje pješačkog mosta uzima se u iznosu $p=5 \text{ kN/m}^2$. Treba se smanjiti za mostove pojedinačnog raspona većeg od 10,0 m prema zakonitosti: $2,5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} = 2,0 + 120 / (L_{sj} + 30) \leq 5,0 \text{ kN/m}^2 = 5 \text{ kNm}^2$.

gdje je L_{sj} pojedinačni raspon u metrima. Osim toga, treba izvršiti provjere na pojedinačna opterećenja koncentriranom silom $Q_{f_{wk}}$ veličine 10 kN, koja ima kvadratičnu plohu nalijeganja sa stranicom veličine 10 cm. Prema zahtjevu investitora pješački se mostovi moraju provjeriti interventnim vozilom koje može djelovati na pješački most (npr. vatrogasno vozilo, vozilo hitne pomoći). [8]

Na model postavljeno je jednoliko raspodijeljeno opterećenje: $p = 5,00 \text{ kN/m}^2$.



Slika 23.: Prikaz pješačkog opterećenja 5 kN/m²

3.4. Ispitivanje mosta

3.4.1. Opis ispitivanja

Podaci o probnom opterećenju

Osnovni podaci o vrsti i tipu statičkog i dinamičkog probnog opterećenja dani su u sljedećoj tablici (Tablica 7.). Za statičko probno opterećenje mosta korištene su palete s rubnjacima mase 92 kg/kom ukupne mase 1500 kg.

Tablica 7.: Osnovni podaci o probnom opterećenju

Vremenske prilike:	17°C, oblačno
Vrsta opterećenja:	Prema točki 2. HRN U.M1.046:1984 provedeno probno opterećenje je: redovno prema učestalosti ispitivanja, normalno prema veličini tereta, statičko i dinamičko prema prirodi opterećenja, kratkotrajno prema trajanju opterećenja.
Statičko opterećenje:	18 paleta s rubnjacima ukupne mase cca 1500 kg
Dinamičko opterećenje:	2 osobe mase cca 90 kg

Prikazan je shematski prikaz rasporeda paleta korištenih za probno opterećene mosta. Podaci o masi statičkog opterećenja korišteni su za numerički proračun (izračun efikasnosti probnog opterećenja i usporedbu računskih i izmjerenih rezultata).

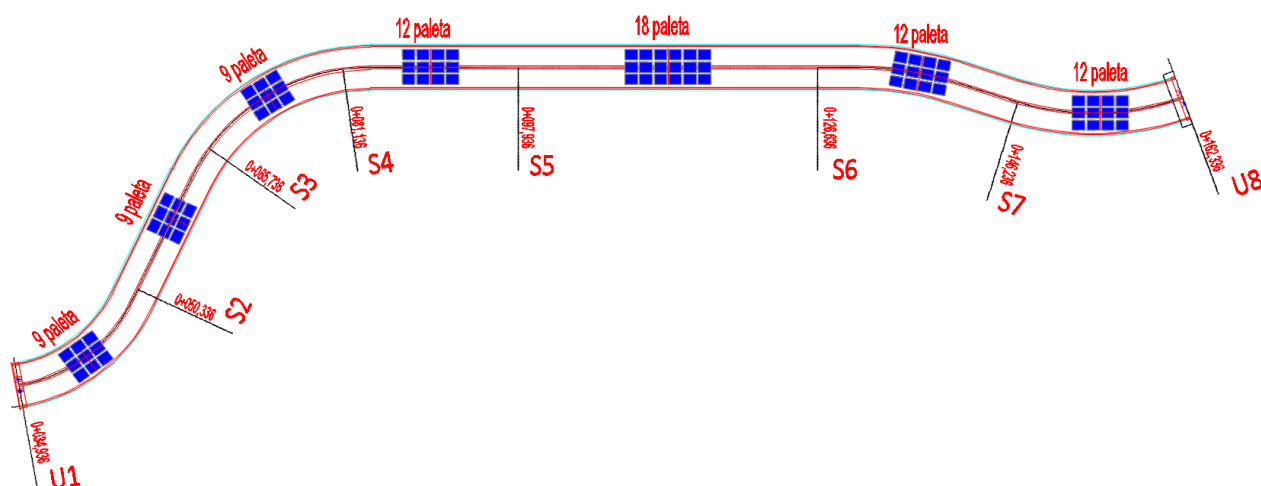
Faze ispitivanja i efikasnost probnog opterećenja

Statičko i dinamičko ispitivanje mosta probnim opterećenjem provedeno je u više faza ispitivanja mosta. Raspored paleta u poprečnom i uzdužnom smjeru mosta prilikom faza statičkog ispitivanja mosta prikazani su u prilogu A. Faze statičkog i dinamičkog ispitivanja mosta prikazane su u tablicama i na slikama u nastavku (Tablica 8. i Slika 24. – statičko ispitivanje, Tablica 9. – dinamičko ispitivanje).

Tablica 8.: Osnovni podaci o probnom opterećenju

Redni broj	Skraćeni opis	Opis faze ispitivanja
FAZA 1	0	Most rasterećen
FAZA 2	33,3 % u 2	33,3 % opterećenja u RASPONU 1 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 2)
FAZA 3	66,7 % u 2	66,7 % opterećenja u RASPONU 1 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 2)
FAZA 4	100 % u 2	100 % opterećenja u RASPONU 1 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 2)
FAZA 5	33,3 % u 6	33,3 % opterećenja u RASPONU 3 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 6)
FAZA 6	66,7 % u 6	66,7 % opterećenja u RASPONU 3 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 6)
FAZA 7	100 % u 6	100 % opterećenja u RASPONU 3 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 6)
FAZA 8	100 % u 4	100 % opterećenja u RASPONU 2 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 4)
FAZA 9	0	Most rasterećen
FAZA 10	25 % u 8	25 % opterećenja u RASPONU 4 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 8)
FAZA 11	50 % u 8	50 % opterećenja u RASPONU 4 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 8)
FAZA 12	75 % u 8	75 % opterećenja u RASPONU 4 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 8)
FAZA 13	100 % u 8	100 % opterećenja u RASPONU 4 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 8)
FAZA 14	50 % u 10	50 % opterećenja u RASPONU 5 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 10)
FAZA 15	100 % u 10	100 % opterećenja u RASPONU 5 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 10)
FAZA 16	6P u 10B	6 paleta u RASPONU 5 – nesimetrično opterećenje (mjerno mjesto 10B)
FAZA 17	50 % u 12	50 % opterećenja u RASPONU 6 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 12)

FAZA 18	100 % u 12	100 % opterećenja u RASPONU 6 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 12)
FAZA 19	100 % u 14	100 % opterećenja u RASPONU 7 – simetrično opterećenje (mjerno mjesto 14)
FAZA 20	0	Most rasterećen



Slika 24.: Shematski prikaz faza ispitivanja probnog opterećenja paletama (faze 100% opterećenja za svaki od raspona R1-R4, R6-R7)

Tablica 9.: Faze dinamičkog ispitivanja mosta

Naziv faze	Opis faze
DIN 2,5-U ₁ → U ₈	Trčanje pješaka mase cca 90 kg preko rasponske konstrukcije frekvencijom 2,5 Hz smjer: U ₁ --> U ₈
DIN 2,5-U ₈ → U ₁	Trčanje pješaka mase cca 90 kg preko rasponske konstrukcije frekvencijom 2,5 Hz smjer: U ₈ --> U ₁
DIN 3,725 U ₁ → U ₈	Trčanje pješaka mase cca 90 kg preko rasponske konstrukcije frekvencijom 3,725 Hz smjer: U ₁ --> U ₈
DIN 3,725 U ₈ → U ₁	Trčanje pješaka mase cca 90 kg preko rasponske konstrukcije frekvencijom 2,5 Hz smjer: U ₈ --> U ₁
DIN 2,5	Skakanje dviju osoba mase cca 90 kg frekvencijom 2,5 Hz
DIN 3,725	Skakanje dviju osoba mase cca 90 kg frekvencijom 3,725 Hz

Teret je postavljan tako da se učinak probnog opterećenja što je moguće više približi učinku pokretnog opterećenja primijenjenog u statičkom proračunu objekta.

Efikasnost probnog opterećenja se prema HRN U.M1.046:1984 određuje prema izrazu:

$$U = \frac{V_{stat}}{V_n \cdot \varphi}$$

gdje je:

V_{stat} - teoretska vrijednost u promatranom presjeku uslijed statičkog probnog tereta.

V_n - teoretska vrijednost u istom promatranom presjeku uslijed projektnog pokretnog opterećenja bez dinamičkog koeficijenta.

φ - dinamički koeficijent prema projektu.

Efikasnost probnog opterećenja U treba biti bliska jedinici (1,0). Statičkim se ispitivanjem u konstrukciji proizvode maksimalni statički utjecaji predviđeni projektom. [9]

Dijagrami unutarnjih sila za probno opterećenje prikazani su u prilogu A, a efikasnosti probnog opterećenja za rasponsku konstrukciju po rasponima prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 10.).

Postignuta efikasnost iskazuje se preko najvećeg progiba na sredini raspona pri simetričnim fazama opterećenja i iznosi:

-za prvi raspon:
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{6,7 \text{ mm}}{10,1 \text{ mm}} = 66,3 \%$$

-za drugi raspon: :
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{4,6 \text{ mm}}{6,5 \text{ mm}} = 70,8 \%$$

-za treći raspon:
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{4,8 \text{ mm}}{7,2 \text{ mm}} = 66,7 \%$$

-za četvrti raspon: :
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{7,4 \text{ mm}}{9,2 \text{ mm}} = 80,4 \%$$

-za peti raspon:
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{38,0 \text{ mm}}{52,0 \text{ mm}} = 73,1 \%$$

-za šesti raspon: :
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{14,4 \text{ mm}}{20,5 \text{ mm}} = 70,0 \%$$

-za sedmi raspon: :
$$U = \frac{V_{stat}}{V_n} = \frac{8,2 \text{ mm}}{10,0 \text{ mm}} = 82,0 \%$$

Postignuta efikasnost za normalno probno opterećenje iznosi između $0,5 \leq U \leq 1,0$ što je u skladu s točkom 3.3. u HRN U.M1.046:1984. [9]

Tablica 10.:Efikasnost probnog opterećenja za rasponsku konstrukciju

Maksimalni progibi u polju			
Raspon	^a Probno opterećenje [mm]	^b Proračunsko opterećenje za 5 kN/m ² [mm]	^c Efikasnost probnog opterećenja, U [%]
R1	6,7	10,1	66,3
R2	4,6	6,5	70,8
R3	4,8	7,2	66,7
R4	7,4	9,2	80,4
R5	38,0	52,0	73,1
R6	14,4	20,5	70,2
R7	8,2	10,0	82,0

Napomena

^a – vrijednost progiba u elementu od faze 100 % opterećenja unutar pojedinog raspona

^b – vrijednosti progiba u elementu od proračunskog kontinuiranog opterećenja prema Eurokodu unutar pojedinog raspona

^c - efikasnost probnog opterećenja pješačkog mosta iznosi 66,3 – 82 % prema točki 3.3. norme HRN U.M1.046. za normalno probno opterećenje, preporučena vrijednost efikasnost probnog opterećenja iznosi 50 do 100 %

3.4.2. Opis provedenih mjerenja

Tijekom probnog opterećenja mjereni su vertikalni pomaci u 34 točke u liniji A i B (Slika 46.) u sredini svakog raspona (2x7=14 točaka), na mjestu oslanjanja raspona na stupove i upornjake (2x8=16 točaka), te u četvrtinama raspona R5 (između stupa S5 i S6 – 4 točke). Nakon rasterećenja konstrukcije mjereni su eventualni trajni (zaostali) pomaci. Vertikalni pomaci pri statičkom ispitivanju određivani su modificiranom metodom geometrijskog nivelmana. Uvjeti za optička opažanja bili su povoljni te je ocijenjeno da su vrijednosti pomaka određeni standardnim odstupanjem od 0,2 do 0,3 mm. Mjerna mjesta prikazana su na shemi mjernih mjesta koja se nalaze u prilogu A.

Nakon obavljenog statičkog ispitivanja izvršeno je dinamičko ispitivanje. Dinamičko ispitivanje omogućuje određivanje modalnih parametara konstrukcije, uključujući vlastite frekvencije, koeficijente prigušenja i oblike titranja. Ovi parametri pružaju uvid u stvarno dinamičko ponašanje mosta, predstavljajući linearnu kombinaciju više rezonantnih modova.

Svaka značajnija promjena na konstrukciji odražava se na vrijednosti modalnih parametara, čime se omogućuje otkrivanje potencijalnih oštećenja ili degradacija.

Svaka vlastita frekvencija povezana je s odgovarajućim oblikom gibanja, a kada frekvencija pobude postane bliska vlastitoj frekvenciji mosta, može doći do pojave rezonancije. U takvoj situaciji, utjecaj mase i krutosti međusobno se neutraliziraju, a dinamika odgovora postaje u potpunosti određena prigušenjem.

Dinamičko ispitivanje obavljeno je pri kretanju jednog pješaka preko rasponske konstrukcije objekta različitom frekvencijom. Odabrane su frekvencije kretanje 2,5 Hz i 3,725 Hz jer su to izmjerene vlastite frekvencije titranja mosta. Testiranjem mosta s ovim frekvencijama procijeniti će se osjetljivost konstrukcije na vibracije, rizik od rezonancije te utvrditi eventualne potrebne mjere za poboljšanje sigurnosti i udobnosti korisnika.

Za vrijeme dinamičkog ispitivanja mjereni su inkrementi dinamičkih pomaka u polovici raspona R5 (mjerna mjesta DPZ1, DPY2, DPZ3, DPY4 – Slika 46.).

U svrhu određivanja osnovnih dinamičkih parametara konstrukcije (vlastitih frekvencija, koeficijenata prigušenja i oblika titranja) mjerene su akceleracije u 14 (raspon R5), odnosno 16 (cijela konstrukcija) (Slika 46., Prilog A). Dinamička ispitivanja provedena su koristeći opremu PCB Piezotronics 393B31 za mjerenje akceleracije i B&K 3560C s odgovarajućim računalnim programom za prikupljanje podataka.

Skice mjernih mjesta na kojima su mjereni dinamički pomaci i akceleracije prikazane su u prilogu A (Slika 46.).

Iz vremenskog zapisa određuje se frekvencija, logaritamski dekrement prigušenja i koeficijent prigušenja:

Vlastite frekvencije najčešće se određuju iz spektralnih funkcija kao rezonantni vrhovi.

Prva vlastita frekvencija:
$$f = \frac{1}{T} = \frac{n-1}{t_n - t_1}$$

Logaritamski dekrement (δ) je mjera kojom se opisuje brzina prigušenja oscilacija u dinamičkom sustavu. Ključan je parametar u eksperimentalnoj dinamici konstrukcija jer omogućuje procjenu razine prigušenja i stabilnosti mosta. Veće vrijednosti dekrementa ukazuju na efikasnije prigušenje vibracija, dok niske vrijednosti mogu značiti da je most sklon dugotrajnim oscilacijama, što može utjecati na njegovu dugoročnu sigurnost i uporabljivost.

Logaritamski dekrement prigušenja:
$$\delta = \ln \frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{n-1} \ln \frac{v_1}{v_n}$$

v_1 – amplituda prve oscilacije,

v_n – amplituda oscilacije nakon n perioda,

n – broj uzastopnih oscilacija,

\ln – prirodni logaritam.

Prigušenje, koje se eksperimentalno određuje, predstavlja sposobnost konstrukcije da rasprši energiju oscilacija. Ono se izražava koeficijentom prigušenja u odnosu na kritično prigušenje, pružajući ključan uvid u otpornost mosta na dinamičke utjecaje.

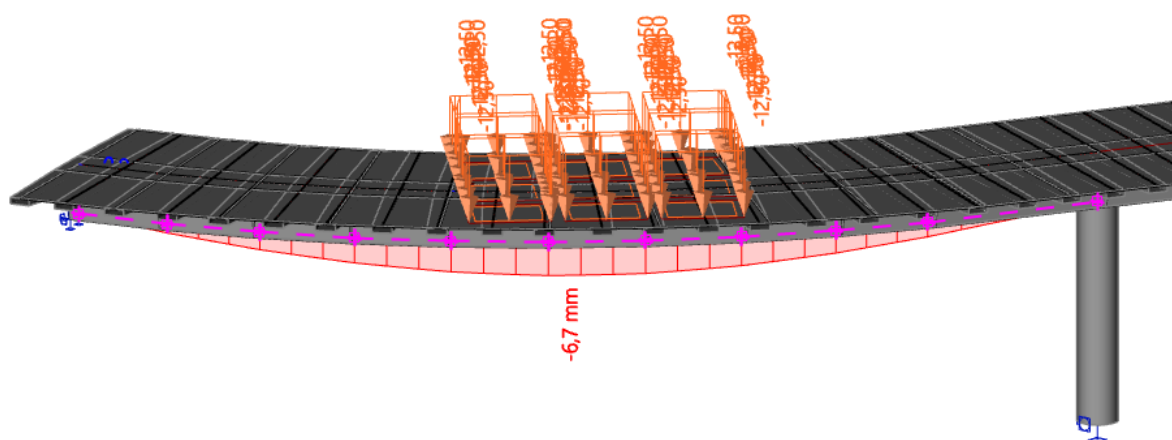
Koeficijent prigušenja: $\xi = \frac{\delta}{2\pi}$

3.5. Rezultati i usporedba rezultata numeričkog modela i ispitivanja

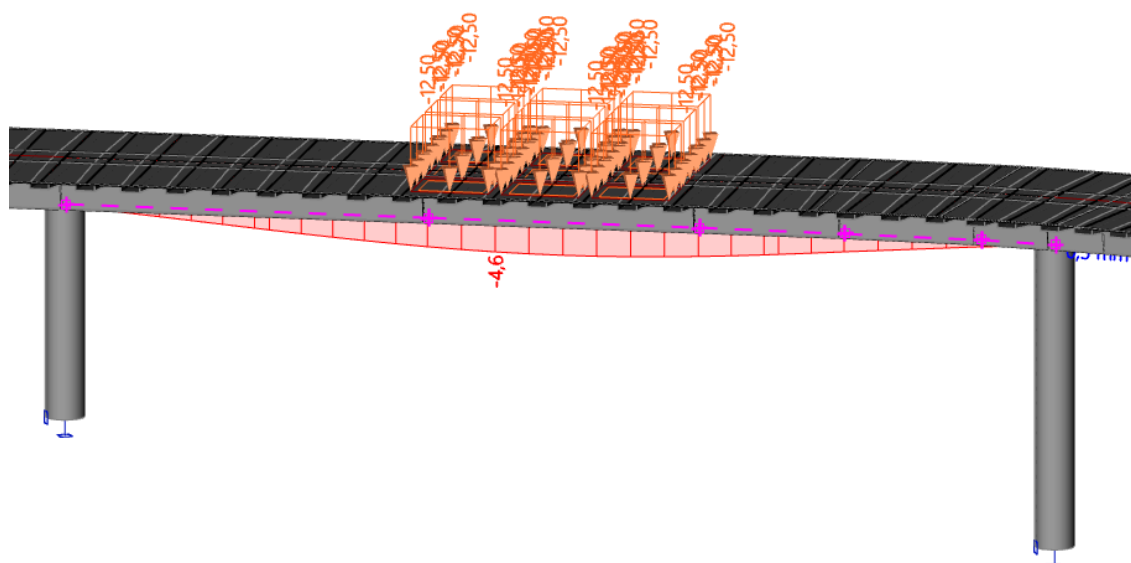
3.5.1. Rezultati numeričkog modela

Određeni su progibi za odgovarajuće faze statičkog probnog opterećenja koja su definirana shemom opterećenja i progibi od proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 što je prikazano u poglavlju: Numeričke analize. Određene su i vlastite frekvencije titranja s pripadajućim oblicima titranja. Navedeni rezultati prikazani su u nastavku.

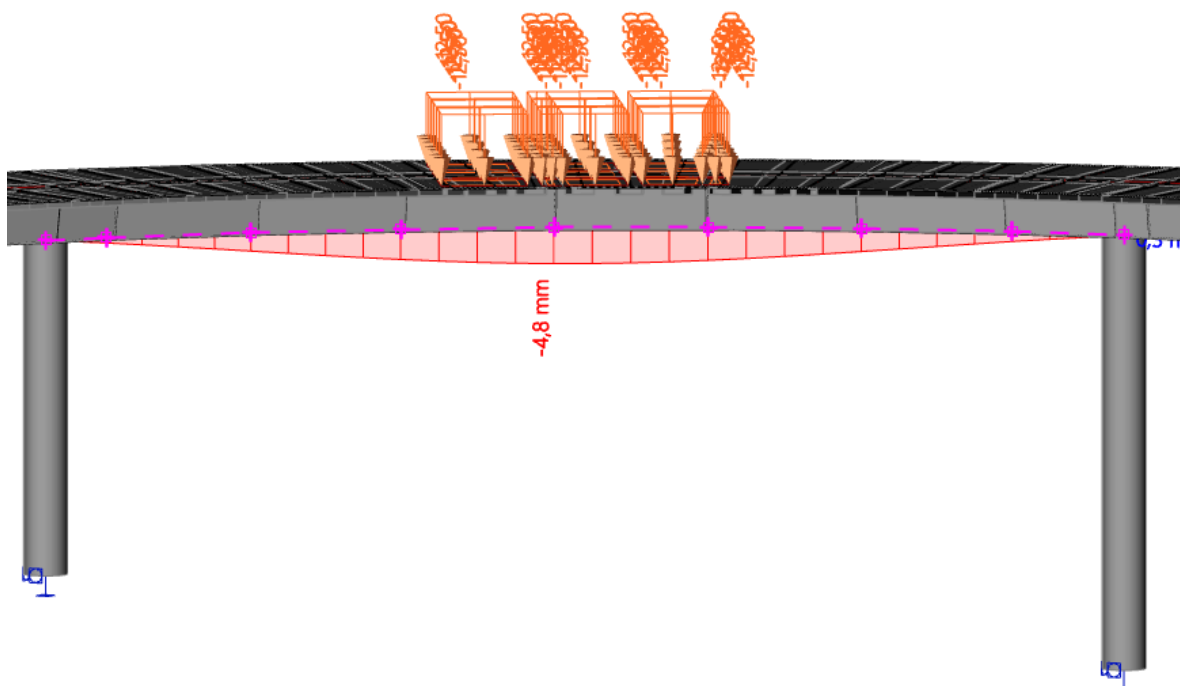
Progibi od statičkog probnog opterećenja



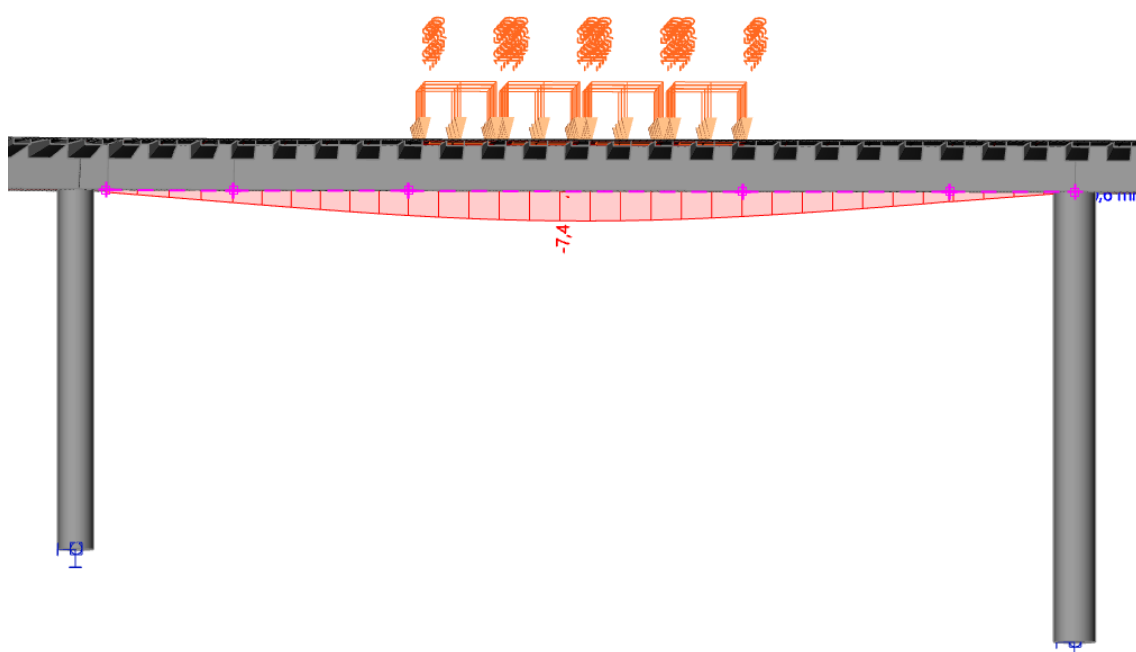
Slika 25.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R1 sa 9 paleta



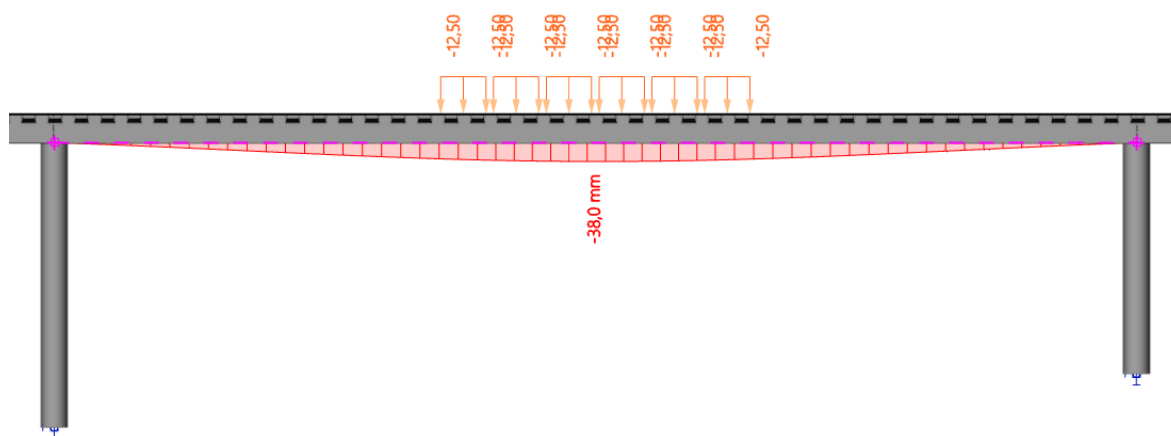
Slika 26.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R2 sa 9 paleta



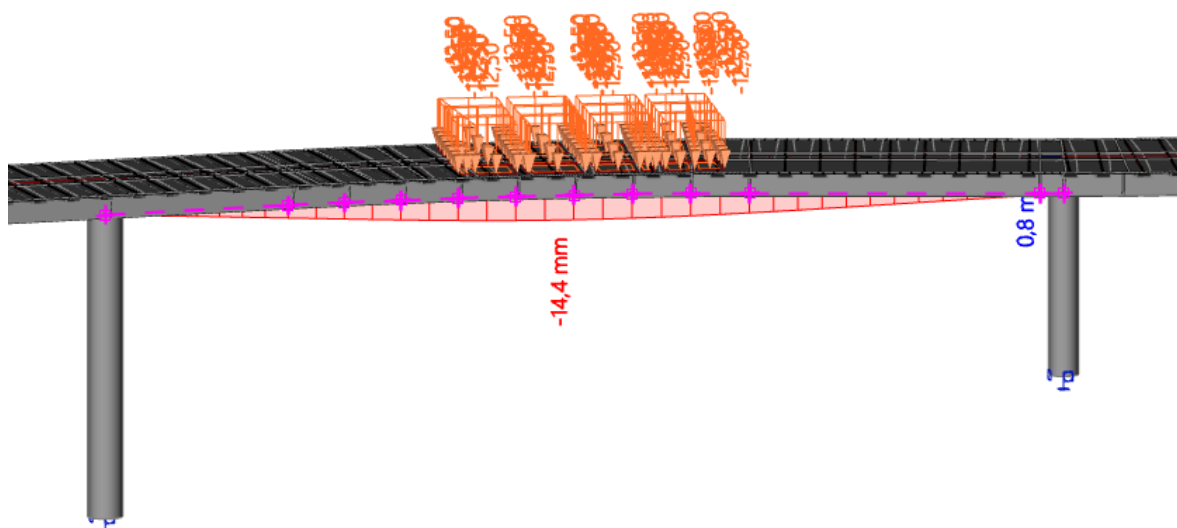
Slika 27.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R3 sa 9 paleta



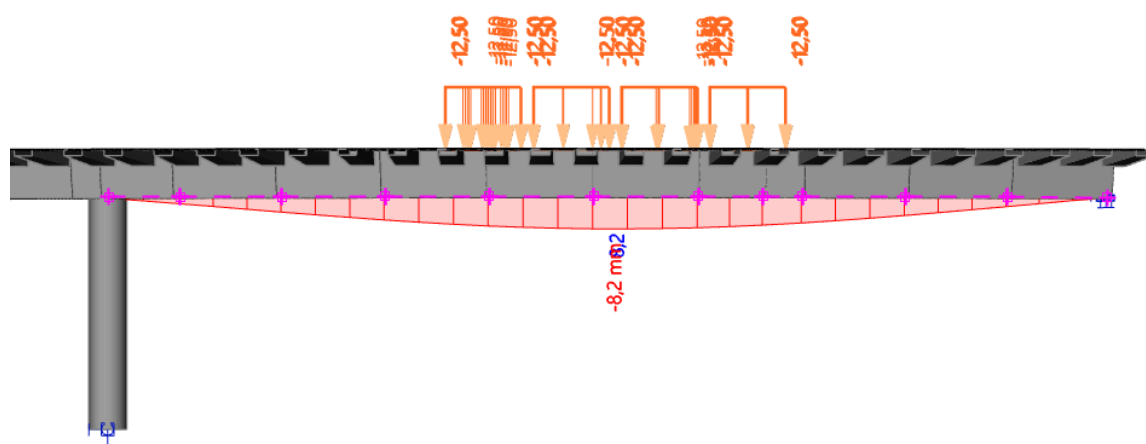
Slika 28.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R4 sa 12 paleta



Slika 29.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R5 sa 18 paleta



Slika 30.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R6 sa 12 paleta

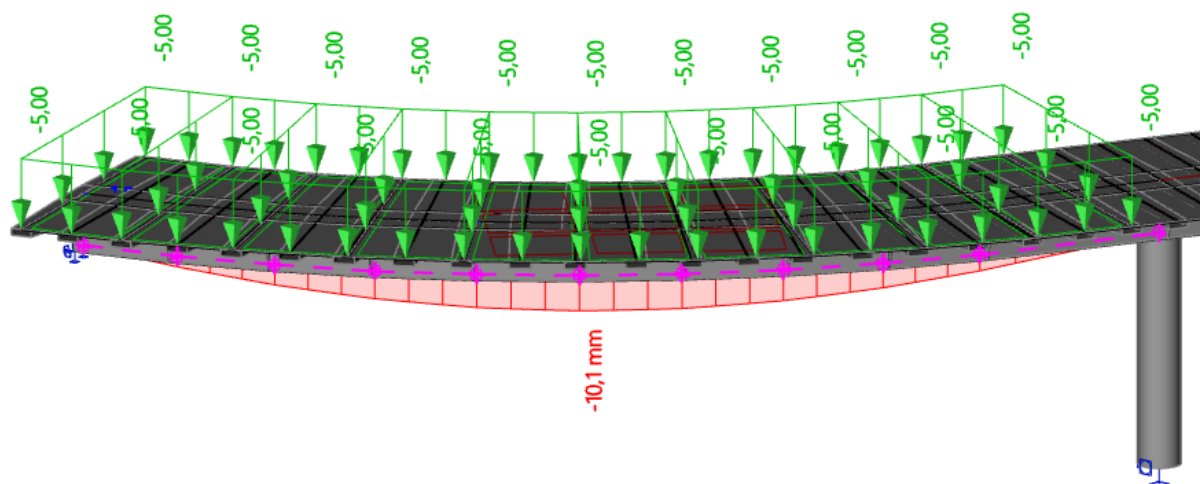
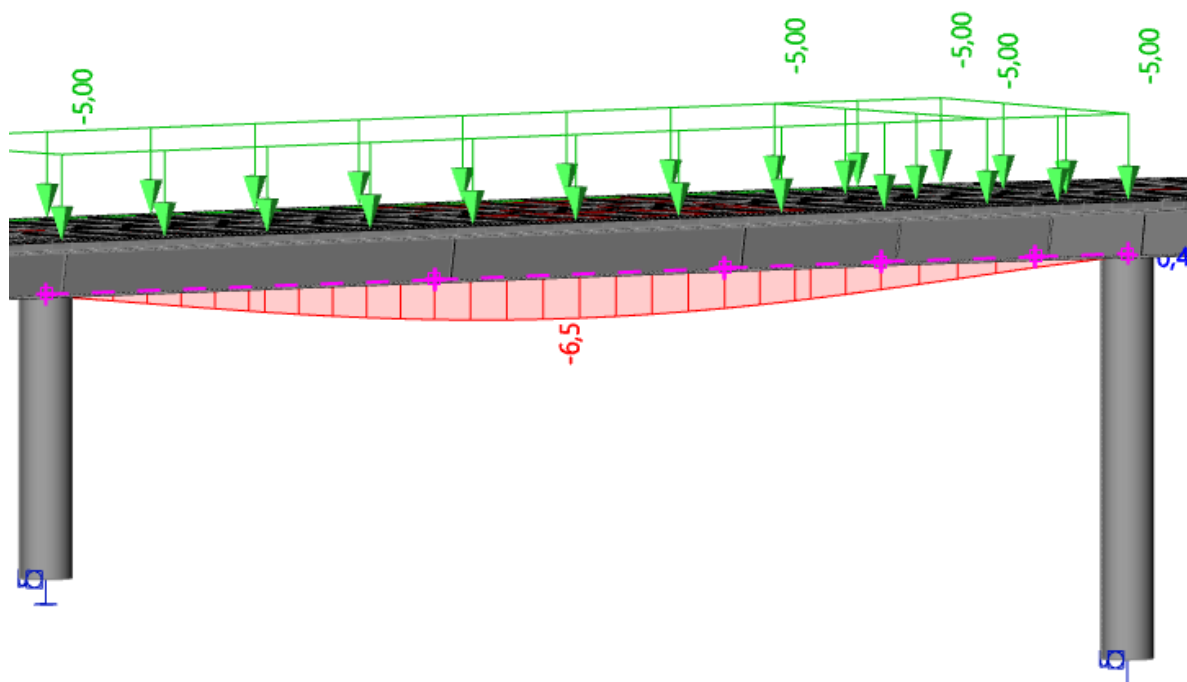


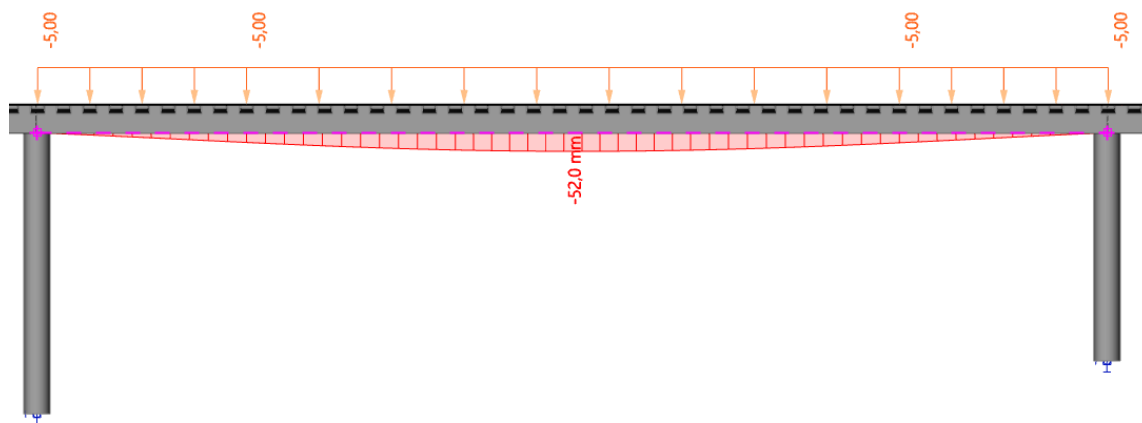
Slika 31.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R7 sa 12 paleta

U nastavku je tablični prikaz rezultata od statičkog ispitivanja paletama. Rezultati progiba su izraženi u milimetrima (Tablica 11.).

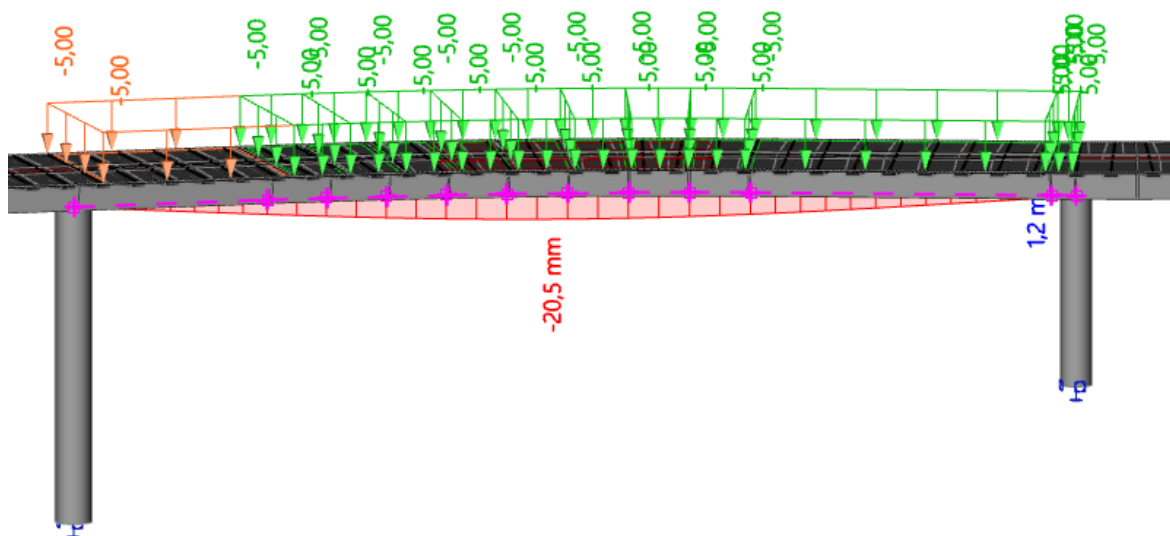
Tablica 11.: Iznosi progiba od probnog opterećenja paletama

Raspon	Progibi od probnog opterećenja paletama [mm]
R1	6,7
R2	4,6
R3	4,8
R4	7,4
R5	38,0
R6	14,4
R7	8,2

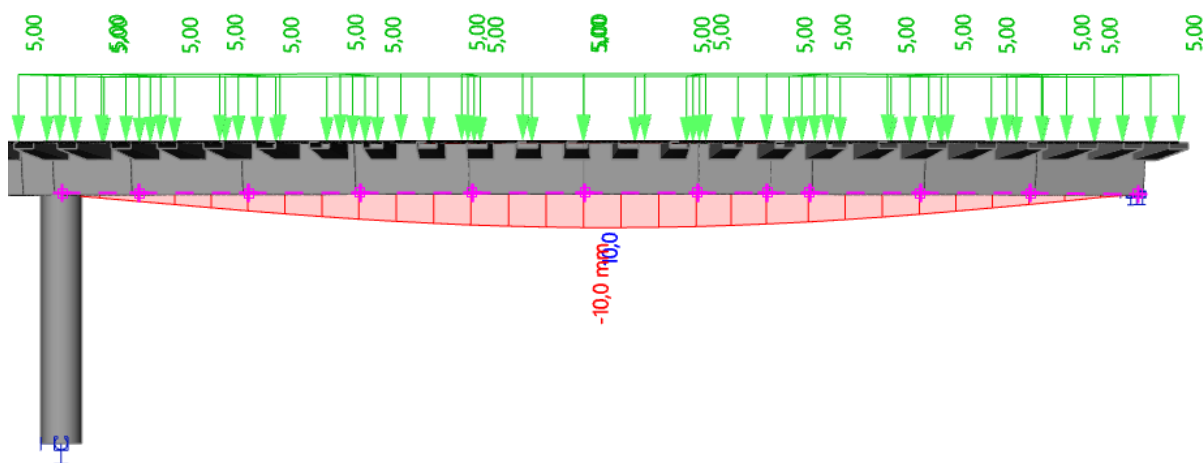
Progibi od proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 Slika 32.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 u rasponu 1Slika 33.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 u rasponu 2



Slika 36.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 u rasponu 5



Slika 37.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 u rasponu 6



Slika 38.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 u rasponu 7

U nastavku je tablični prikaz rezultata od probnog proračunskog opterećenja. Rezultati progiba su izraženi u milimetrima (Tablica 12.).

Tablica 12.: Iznosi progiba od proračunskog opterećenja 5 kN/m^2

Raspon	Progibi od proračunskog opterećenja 5 kN/m^2 [mm]
R1	10,1
R2	6,5
R3	7,2
R4	9,2
R5	52,0
R6	20,5
R7	10,0

Vlastite frekvencije titranja s pripadajućim oblicima titranja

Slijedi prikaz prvih pet oblika osciliranja mosta:

3D displacement

Values: U_{total}

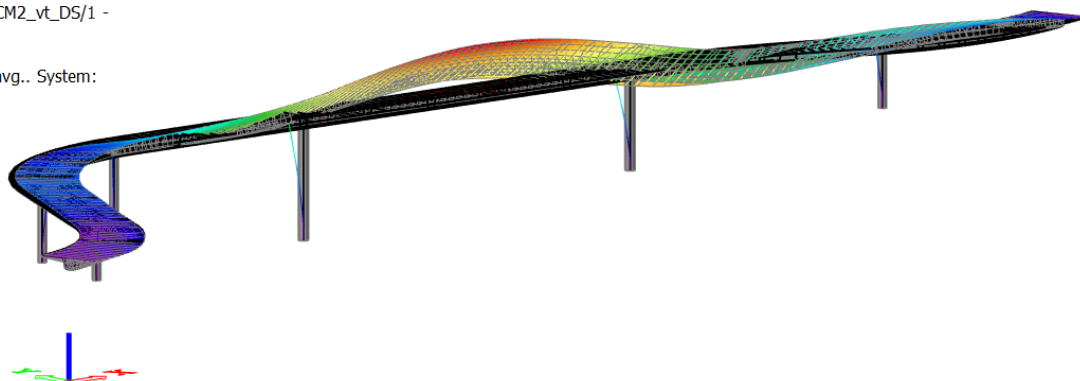
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM2_vt_DS/1 - 2,88

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

Global



Slika 39.: Prvi oblik osciliranja mosta

3D displacement

Values: U_{total}

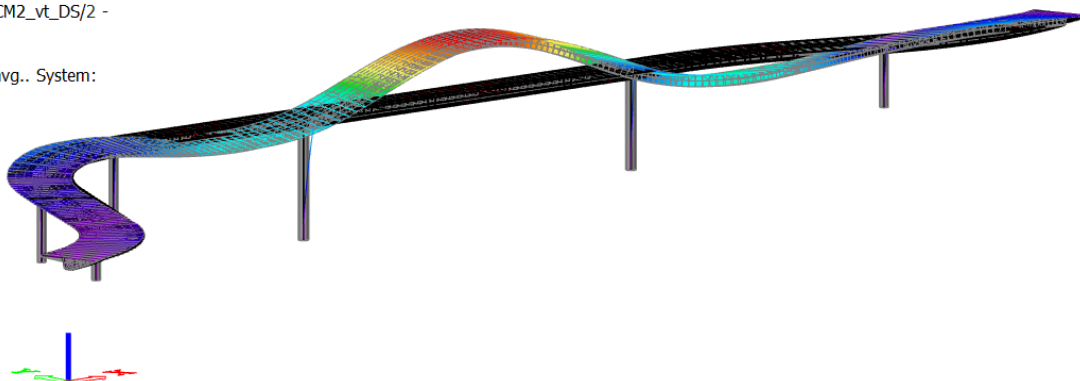
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM2_vt_DS/2 - 3,28

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

Global



Slika 40.: Drugi oblik osciliranja mosta

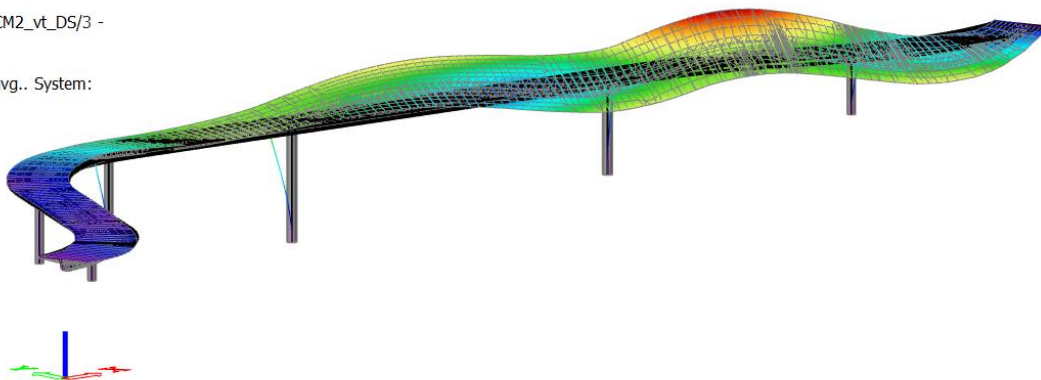
3D displacementValues: U_{total}

Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM2_vt_DS/3 - 4,71

Selection: All

Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 41.: Treći oblik osciliranja mosta

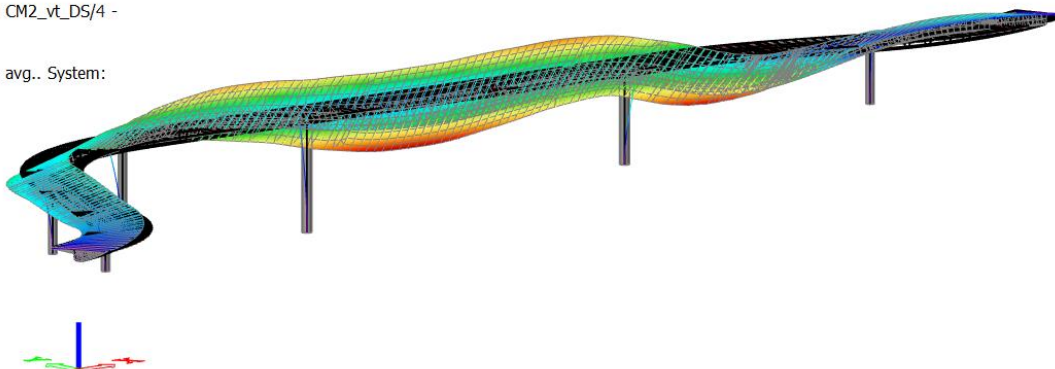
3D displacementValues: U_{total}

Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM2_vt_DS/4 - 5,40

Selection: All

Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 42.: Četvrti oblik osciliranja mosta

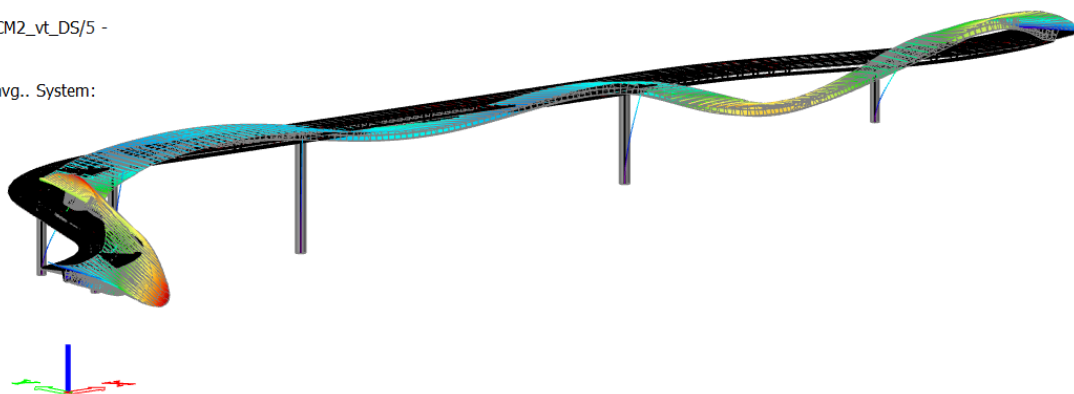
3D displacementValues: U_{total}

Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM2_vt_DS/5 - 6,05

Selection: All

Location: In nodes avg.. System: Global



Slika 43.: Peti oblik osciliranja mosta

Tablica 13.: Iznosi računskih frekvencija za pripadajuće oblike osciliranja

Pripadajući oblik osciliranja	Računska frekvencija [Hz]
1.	2,88
2.	3,28
3.	4,71
4.	5,40
5.	6,05

3.5.2. Rezultati ispitivanja

3.5.2.1. Rezultati statičkog ispitivanja – mjerenje pomaka

Maksimalni određeni progibi pri svim fazama opterećenja u polovici raspona prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 14.). Prikazani su rezultati progiba za središnju liniju te su proračunati kao srednja vrijednost pomaka iz mjerenih linija A i B uzimajući u obzir mjerene pomake na osloncima. U modelu se ta vrijednost uzela za središnju liniju – os mosta na donjem pojasu sanduka.

Tablica 14.: Izmjereni progibi

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Izmjereni progib w_e [mm]	Zaostali progib w_t [mm]	Odnos w_t/w_e [%]
Faza 4 – 100% u 2 Raspon 1	2	7,1	-	-
Faza 7 – 100% u 6 Raspon 3	6	4,1	-	-
Faza 8 – 100% u 4 Raspon 2	4	3,3	0,25	6,9
Faza 13 – 100% u 8 Raspon 4	8	5,8	-	-
Faza 15 – 100% u 10 Raspon 5	10	29,35	0,05	0,2
Faza 18 – 100% u 12 Raspon 6	12	9,75	-	-
Faza 19 – 100% u 14 Raspon 7	14	8,9	-	-

Maksimalne vrijednosti progiba u odnosu na raspone mosta iznose: za raspon 1 ($w_{e,max}/L = 1/3479$), za raspon 2 ($w_{e,max}/L = 1/4278$), za raspon 3 ($w_{e,max}/L = 1/3500$), za raspon 4 ($w_{e,max}/L = 1/4667$), za raspon 5 ($w_{e,max}/L = 1/975$), za raspon 6 ($w_{e,max}/L = 1/1970$), za raspon 7 ($w_{e,max}/L = 1/1829$). Najveći izmjereni zaostali progib mosta iznosi 6,9 % (2,5 mm) od najvećeg izmjerenog progiba na istom mjestu. Dakle, zaostali (trajni) pomaci nakon rasterećenja ispod su dopuštenih vrijednosti za čelične i

spregnute mostove (15 % od maksimalnih izmjerenih vrijednosti prema točki 4.1. u HRN U.M1.046).

3.5.2.2. Rezultati dinamičkih ispitivanja

Rezultati ambijentalnih mjerenja za određivanje osnovnih dinamičkih parametara

Osnovni dinamički parametri konstrukcije određeni su primjenom operacionalne modalne analizi pri ambijentalnim uvjetima. Mjerenja dinamičkih parametara u prvom modelu obuhvatila su mjerenja u polovici raspona i na osloncima za cijeli most, a u drugom modelu detaljno je provedeno mjerenje najvećeg raspona R5. Analizom zapisa singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća izdvojene su osnovne vlastite frekvencije titranja i koeficijenti prigušenja konstrukcije. U sljedećoj tablici (Tablica 15.) prikazane su eksperimentalno određene vlastite frekvencije rasponskog sklopa, te su prikazani eksperimentalno određeni koeficijenti prigušenja. Za svaku prikazanu vlastitu frekvenciju u tablici, primjenom operacionalne modalne analize određen je pripadajući oblik osciliranja konstrukcije.

Tablica 15.: Izmjerene vlastite frekvencije, izmjereni koeficijenti prigušenja te pripadajući oblici osciliranja konstrukcije

Izmjerena frekvencija [Hz]	Izmjereni koeficijent prigušenja [%]	Pripadajući oblik osciliranja
$2,520 \pm 0,02$	$2,08 \pm 0,51$	Slika 58.
$3,725 \pm 0,02$	$1,26 \pm 0,37$	Slika 59.
$4,143 \pm 0,16$	$1,52 \pm 0,28$	Slika 60.

Od interesa za detaljniju analizu dinamičkih svojstava (dinamički pomak i ubrzanje) odabrana su prva dva modalna oblika. Prvi oblik 2,5 Hz što odgovara oscilacijama rasponske konstrukcije u poprečnom smjeru, a drugi oblik 3,7 Hz odgovara dominantom pomaku u vertikalnom smjeru najvećeg raspona R5.

Dinamički odgovor rasponskog sklopa je realan i očekivan, a u spektralnim funkcijama odgovora konstrukcije jasno su izražene osnovne vlastite frekvencije titranja sklopa. Prikazani dinamički parametri su od velikog značaja za buduću dijagnostiku objekta u eksploataciji.

Rezultati mjerenja dinamičkih pomaka i ubrzanja pri pobudi pješaka

Dinamičko ispitivanje provedeno je radi određivanja koeficijenta prigušenja i određivanja dinamičkih pomaka i ubrzanja pri rezonantnoj pobudi konstrukcije. U prilogu A prikazani su vremenski zapisi mjerenja vertikalnih i horizontalnih dinamičkih pomaka i ubrzanja u sredini raspona R5 pri pobudi pješaka (pojedinačne mase cca 90 kg) različitim frekvencijama (2,5 Hz i 3,7 Hz). Provedena su sljedeća dinamička ispitivanja:

- dinamička pobuda jednog pješaka hodanjem/trčanjem s jedne strane mosta na drugu (U1-U8) pri rezonantnoj frekvenciji,
- dinamička pobuda vršena je sinkroniziranim skakanjem rezonantnom frekvencijom dviju osoba u polovici raspona R5 pri rubu u odnosu na poprečni presjek mosta.

Izdvojeni rezultati u sljedećoj tablici dani su kao vršne vrijednosti pri rezonantnom stanju i slobodnom istrčavanju konstrukcije (raspona R5). Skice mjernih mjesta na kojima su mjereni dinamički pomaci i ubrzanja prikazane su u prilogu A. (Slika 46.).

Tablica 16.: Koeficijenti prigušenja određeni pri pobudi dva pješaka različitim frekvencijama za raspon 5, maksimalna amplituda određena pri dinamičkoj pobudi jednog pješaka pri rezonantnoj frekvenciji pri hodanju/trčanju s jedne strane mosta na drugu.

Faza ispitivanja	Frekvencija pobude [Hz]	Mjerno mjesto (Raspon)	Koeficijent prigušenja [%]	Maksimalna amplituda
DIN 2,5	2,5	DPZ 1	10,12	0,52 mm
		DPY 2	8,84	0,85 mm
DIN 3,7	3,7	DPZ 1	6,98	1,92 mm
		DPY 2	9,46	0,13 mm
DPZ 1 – mjerenje pomaka u vertikalnom smjeru (Z)				
DPY 2 – mjerenje pomaka u poprečnom smjeru (Y) u odnosu na uzdužnu os mosta				

Tablica 17.: Koeficijenti prigušenja određeni pri pobudi dva pješaka različitim frekvencijama za raspon 5, maksimalna amplituda ubrzanja i RMS određen pri dinamičkoj pobudi jednog pješaka pri rezonantnoj frekvenciji pri hodanju/trčanju s jedne strane mosta na drugu

Faza ispitivanja	Frekvencija pobude [Hz]	Mjerno mjesto (Raspon)	Koeficijent prigušenja [%]	Maksimalna amplituda	*RMS
DIN 2,5	2,5	DPZ 3	8,01	0,66 mm/s ²	0,27 mm/s ²
		DPY 4	8,78	0,22 mm/s ²	0,16 mm/s ²
DIN 3,7	3,7	DPZ 3	8,87	1,75 mm/s ²	0,99 mm/s ²
		DPY 4	9,43	0,10 mm/s ²	0,06 mm/s ²

*RMS – korijen srednjeg kvadrata ubrzanja izračunat na duljini intervala 0,1 % od ukupne duljine zapisa prema izrazu : $RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt}$

*graf RMS krivulje prikazan je u poglavlju: Međunarodni standardi (Slika 1.)

DPZ 3 – mjerenje akceleracije u vertikalnom smjeru (Z)

DPY 4 – mjerenje akceleracije u poprečnom smjeru (Y) u odnosu na uzdužnu os mosta

Za analizu vibracija važno je ispravno tumačenje signala s nekog sredstva i mogućnost djelovanja na temelju tih signala. Analiza vibracija ključna je za prediktivno održavanje, a signali se analiziraju u vremenskoj domeni, prikaz na t-osi. Tri ključne metrike u tumačenju vibracija su vršna vrijednost (*peak*), vršna do vršne vrijednosti (*peak to peak*) i RMS.

Vršna vrijednost označava najveću amplitudu u signalu i još se naziva "stvarna vršna vrijednost" (*True peak value*) te može ukazivati na pojavu udara. Predstavlja točkastu vrijednost i ne odražava ukupnu energiju signala.

Vršna do vršne vrijednosti mjeri udaljenost od minimalnog do maksimalnog vrha signala, također njen porast može ukazivati na udar, ali ne pruža informacije o ukupnoj energiji vibracija već samo najveće i najmanje vrijednosti. Korisna je za praćenje opreme s niskom rotacijom.

Prethodna dva metrika temelje se na maksimalnim vrijednostima i dobro predstavljaju udare. Analizu je potrebno proširiti promatranjem metrike koja bolje predstavlja ukupnu energiju, tj. cjelokupni sadržaj signala.

RMS (*Root Mean Square*) je efektivna vrijednost signala i izračunava se na temelju cijelog uzorka pomoću formule:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Predstavlja ukupnu energiju signala za razliku od vršne i vršna do vršne vrijednosti. Korisna je za praćenje progresije kvarova, RMS pokazuje manje promjene u ranim fazama kvarova, ali značajno raste s pogoršanjem stanja opreme. To se događa jer se povećava broj vrhova, čime se povećava ukupna energija signala.

Prema Joelu Nunesu, jedna od prednosti korištenja RMS vrijednosti jest njezina "stabilnost" i "predvidljivost". Vibracijski standardi često koriste RMS, jer je manje podložan odstupanjima. Pravilno prilagođeni grafovi RMS-a pomažu u praćenju razvoja kvarova i donošenju odluka o održavanju. [10]

Na temelju rezultata mjerenja pri pobudi dva pješaka pojedinačne mase od 90 kg pri frekvenciji 2,5 Hz može se potvrditi da je veći dinamički odgovor konstrukcije poprečnom smjeru u odnosu na vertikalni smjer. Jednaka analogija vrijedi i za vlastitu frekvenciju pri 3,7 Hz, gdje je odgovor u vertikalnom smjeru veći od poprečnog smjera. Nadalje, veći odgovor konstrukcije je pri frekvenciji od 3,7 Hz u odnosu na 2,5 Hz.

3.5.3. Usporedba rezultata modela i rezultata ispitivanja

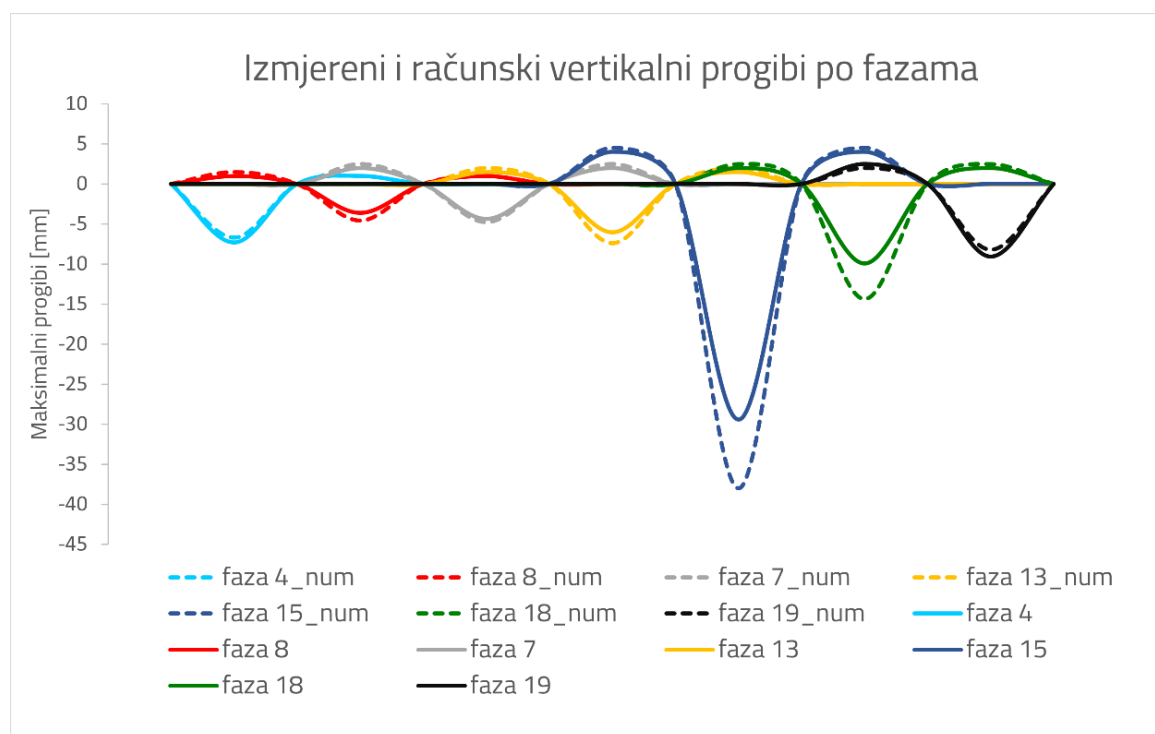
Usporedba statičkog ispitivanja

U tablici 18. prikazana je usporedba maksimalnih izmjerenih progiba u svim fazama opterećenja na polovici raspona s odgovarajućim računskim vrijednostima progiba.

Tablica 18.: Usporedba maksimalnih izmjerenih i računskih vertikalnih progiba

Faza opterećenja	Mjerno mjesto	Izmjereni progib w_e [mm]	Računski progib w_r [mm]	Odnos w_e/w_r [%]	Zaostali progib w_t [mm]	Odnos w_t/w_e [%]
Faza 4 – 100% u 2 Raspon 1	2	7,1	6,7	106	-	-
Faza 7 – 100% u 6 Raspon 3	6	4,1	4,8	85,4	-	-
Faza 8 – 100% u 4 Raspon 2	4	3,3	4,6	71,7	0,25	6,9
Faza 13 – 100% u 8 Raspon 4	8	5,8	7,4	78,3	-	-
Faza 15 – 100% u 10 Raspon 5	10	29,35	38,0	77,2	0,05	0,2
Faza 18 – 100% u 12 Raspon 6	12	9,75	14,4	67,7	-	-
Faza 19 – 100% u 14 Raspon 7	14	8,9	8,2	108,5	-	-

Na sljedećem grafičkom prikazu dana je „anvelopa“ progiba pri maksimalnom opterećenju za svaki raspon. Izmjereni rezultati progiba (puna linija) uspoređeni su numeričkim rezultatima (isprekidana linija) za jednako opterećenje



Slika 44.: Grafički prikaz izmjerenih vertikalnih progiba rasponske konstrukcije mosta (punim linijama prikazani su eksperimentalni rezultati progiba dok su crtanim linijama prikazani rezultati iz proračunskog modela)

Statičko ispitivanje mosta provedeno je mjerenjem pomaka, pri čemu su određeni maksimalni progibi u svim zadanim fazama potpunog opterećenja. Rezultati ispitivanja mosta uspoređeni su sa računskim vrijednostima i njihov odnos je prikazan u postotcima (Tablica 18.) i grafički (Slika 44.).

Rezultati pokazuju da se omjer izmjerenih i računskih progiba kreće između 67,7% i 108,5%. Veličine izmjerenih progiba u skladu su s računskim za odgovarajuće opterećenje, dok se razlike u rezultatima mogu pripisati pojednostavljenjima korištenim u modeliranju konstrukcije. Idealizacija materijala je pojednostavljenje u kojem model pretpostavlja homogeno i linearno elastično ponašanje materijala, dok u stvarnosti mogu postojati nehomogenosti, pukotine ili degradacija materijala. Modeliranje spojeva i oslonaca - proračun se temelji na idealiziranim zglobnim ili krutim spojevima, dok u stvarnim uvjetima može doći do pomaka ili deformacija spojeva. Upornjak je zadan upetim ležajem posljedično tomu vidimo vrlo dobre rezultate u prvom i posljednjem rasponu u kojima su računski progibi manji od izmjerenih. Također je korišteno pojednostavljenje diskretizacijom krivulje ili segmentacija *polyline*. U ovom slučaju, zakrivljena geometrija je približena s ravnim segmentima (poligonizacija), što je uobičajena metoda u numeričkim proračunima i računalnom modeliranju za olakšavanje analize i smanjenje složenosti modela. Primijenjena

je linearizacija krivulje, gdje su zakrivljeni elementi zamijenjeni nizom ravnih segmenata i time se mogu uočiti razlike u rezultatima za treći i šesti raspon koji su u zavoju u odnosu na drugi i četvrti koji su u pravcu. Odnos izmjerenih i računskih iznosi 71,7% za treći raspon i 67,7% za šesti raspon, što su lošiji rezultati u odnosu na drugi raspon (85,4%) i četvrti (78,3%).

Najniži postotak omjera izmjerenih i računskih vrijednosti zabilježen je za raspon 6, koji je duljine 19,6 m. Za ovaj raspon izmjereni progib iznosio je 9,75 mm, dok je računski progib bio 14,4 mm, što predstavlja najveće odstupanje u rezultatima. No raspon 5 je najveći sa duljinom od 28,7 m i predstavlja potencijalnu opasnost pri opterećenjima konstrukcije. Njegov izmjereni progib iznosi 29,35 mm, a računski 38,0 mm. Odnos izmjerenog i računskog u postotku iznosi 77,2% i obzirom na dimenziju raspona dobiveni postotak je u redu. Osim toga, raspon 5 pokazuje najveće oscilacije, što ga čini ključnim segmentom za daljnja ispitivanja, što je prikazano u dijelu dinamičkih ispitivanja.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da su izmjereni progibi uglavnom u skladu s teorijskim proračunima, uz određena odstupanja koja proizlaze iz pojednostavljenja u modeliranju. Daljnja istraživanja i analize mogu pridonijeti boljem razumijevanju dinamičkog ponašanja mosta i osigurati njegovu dugoročnu sigurnost i stabilnost.

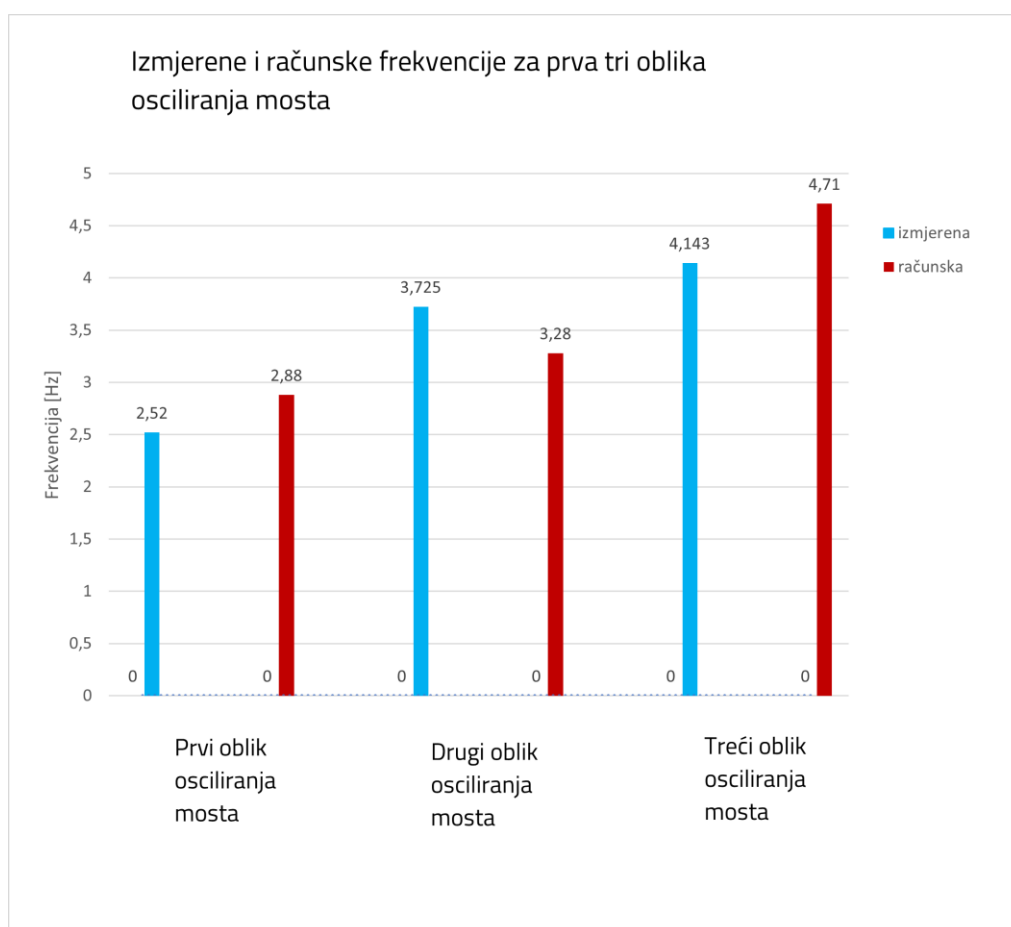
Usporedba dinamičkog ispitivanja

U sljedećoj tablici (Tablica 19.) uspoređene su osnovne eksperimentalno i numerički određene vlastite frekvencije rasponskog sklopa, te su prikazani eksperimentalno određeni koeficijenti prigušenja. Za svaku prikazanu izmjerenu vlastitu frekvenciju u tablici, primjenom operacionalne modalne analize prikazan je pripadajući oblik osciliranja konstrukcije, a za svaku računsku frekvenciju prikazan je oblik titranja.

Tablica 19.: Izmjerene i računске vlastite frekvencije i pripadajući oblici osciliranja konstrukcije

Izmjerena frekvencija [Hz]	Računska frekvencija [Hz]	Pripadajući oblik osciliranja	
		Eksperimentalni	Računski
2,520	2,88	Slika 58.	Slika 39.
3,725	3,28	Slika 59.	Slika 40.
4,143	4,71	Slika 60.	Slika 41

Na slici 45. je grafički prikaz radi lakše usporedbe dinamičkih rezultata.



Slika 45.: Grafički prikaz usporedbe izmjerenih i računskih frekvencija mosta

Dinamički rezultati ispitivanja su sažeti u Tablici 19. i prikazuju dobre rezultate. Izmjerene prve tri frekvencije su: 2,5 Hz, 3,7 Hz i 4,1 Hz (Slika 58.-60.). Računske prve tri frekvencije su: 2,88 Hz, 3,28 Hz i 4,71 Hz. (Slika 39.-41.) Prvi oblik u iznosu od 2,5 Hz prikazuje oscilacije rasponske konstrukcije u poprečnom smjeru, a drugi oblik od 3,7 Hz pokazuje najveći pomak u vertikalnom smjeru najvećeg raspona R5. Treća frekvencija pokazuje mješoviti oblik titranja rasponske konstrukcije mosta (vertikalni i poprečni) i pomak je dominantan u rasponima 5 i 6. Ta dva raspona su najveća i očekivano je da će u njima biti najveći pomaci i titranje. Računske vlastite frekvencije modela su u skladu sa izmjerenim vlastitim frekvencija. Odgovor konstrukcije je realan i ukazuje da je konstrukcija dobro izvedena i da se ponaša kako je predviđeno u projektu. Odstupanja u vrijednostima frekvencija su zbog pojedinih pojednostavljenja na modelu.

4. ZAKLJUČAK

Mostovi su ključne infrastrukturne građevine koje omogućuju povezivanje razdvojenih geografskih područja, što doprinosi razvoju prometa, gospodarstva i društva. Njihovim projektiranjem mora se osigurati sigurnost, stabilnost i dugotrajnost konstrukcije, što je osobito važno kod modernih laganih mostova podložnih vibracijama.

Ispitivanja mostova obuhvaćaju niz metoda kojima se utvrđuje ponašanje konstrukcije pod različitim uvjetima opterećenja. Statička ispitivanja provode se radi provjere progiba konstrukcije, dok su dinamička ispitivanja ključna za analizu vibracija i procjenu udobnosti korisnika. Standardi i smjernice, kao što su Eurokodovi i AASHTO specifikacije definiraju postupke ispitivanja i kriterije za ocjenu mostova.

Propisi definiraju kriterije udobnosti i sigurnosti mostova. Prema BS 5400-2, maksimalno ubrzanje ne smije prelaziti $0,5 \text{ m/s}^2$ ako je osnovna prirodna frekvencija mosta jednaka ili manja od 5 Hz u vertikalnom smjeru. ISO 1013 postavlja smjernice za vibracije u okomitom smjeru, definirajući ograničenja kroz faktor množenja osnovne RMS krivulje. BS EN 1990 preporučuje maksimalno prihvatljivo ubrzanje od $0,7 \text{ m/s}^2$ za vertikalne vibracije. AASHTO LRFD preporučuje da temeljna frekvencija mosta bez živog opterećenja bude veća od 3 Hz kako bi se izbjegla rezonanca. UK nacionalni dodatak za BS EN 1991-2:2003 definira metode za račun vertikalnog ubrzanja mosta uz korištenje korektivnih faktora za lokaciju, rutu, visinu konstrukcije i izloženost. Za mostove u urbanim područjima s gustim prometom, potrebno je primijeniti metode koje procjenjuju vibracije uzrokovane većim brojem pješaka, poput JRC - EUR 23984 EN, koja uzima u obzir gustoću pješačkog prometa i podjelu na razine udobnosti. Smjernica CCIP-016 analizira vibracije uzrokovane koracima pojedinca putem „*footfall analysis*“ uz definirane kriterije izvedbe.

U okviru ovog diplomskog rada definiran je most čije su tehničke karakteristike prikazane u Tehničkom opisu. Most je pješačko-biciklistički, glavni materijal je čelik, sastoji se od 7 raspona, tlocrtnim položajem je u zavoju, a rasponski sklop je kontinuirani gredni nosač. Izrađen je numerički model predmetnog mosta pomoću programskih paketa *SCIA Engineer* i *AutoCAD*. Provedena su statička ispitivanja postavljanjem probnog statičkog opterećenja paletama i proračunskog opterećenja od pješaka. Izračunata je efikasnost probnog opterećenja usporedbom progiba od statičkog probnog tereta i projektnog pokretnog opterećenja. Postignuta efikasnost za normalno probno opterećenje je unutar intervala $0,5 \leq U \leq 1,0$ što je u skladu s točkom 3.3. u HRN U.M1.046:1984. Na definiranom mostu opisana su provedena statička i dinamička ispitivanja. Prije i nakon završetka statičkog i

dinamičkog ispitivanja izvršen je vizualni pregled konstrukcije pri kojem nisu nađena nikakva oštećenja na konstrukciji. Rezultati statičkih i dinamičkih ispitivanja uspoređena su sa računskim vrijednostima.

Usporedba statičkih ispitivanja pokazuje da omjer izmjerenih i računskih progiba varira između 67,7% i 108,5%, pri čemu je na temelju dobivenih rezultata zaključeno je da su izmjerene progibi uglavnom u skladu sa računskim, ta da su odstupanja rezultat idealizacija korištenih u modeliranju konstrukcije. Idealizacija materijala, modeliranje oslonaca te diskretizacija geometrije utječu na odstupanja, osobito u zavojitim rasponima. Najveće odstupanje zabilježeno je za raspon 6 (9,75 mm naspram 14,4 mm), dok raspon 5, kao najveći (28,7 m), postaje ključan je za daljnja ispitivanja posebno dinamička. Općenito, izmjerene progibi su u skladu s računskim, a daljnje analize mogu doprinijeti boljem razumijevanju dinamičkog ponašanja mosta i njegovoj dugoročnoj stabilnosti.

Dinamička ispitivanja pokazala su da su prve tri izmjerene frekvencije mosta 2,5 Hz, 3,7 Hz i 4,1 Hz, dok su računске vrijednosti bile 2,88 Hz, 3,28 Hz i 4,71 Hz. Prva frekvencija (2,5 Hz) označava oscilacije u poprečnom smjeru, druga (3,7 Hz) najveći vertikalni pomak u rasponu R5, dok treća pokazuje mješoviti oblik titranja u rasponima 5 i 6. Računske i izmjerene vrijednosti su u skladu, a manja odstupanja rezultat su pojednostavljenja modela. Ukupni rezultati ukazuju na dobro ponašanje konstrukcije u skladu s projektnim očekivanjima.

Zaključno, analizom statike i dinamike mosta potvrđena je njegova stabilnost i funkcionalnost. Unatoč određenim razlikama u rezultatima, odstupanja su unutar prihvatljivih granica te most zadovoljava sigurnosne i uporabne zahtjeve. Daljnja istraživanja mogu doprinijeti još preciznijem modeliranju i optimizaciji ovih konstrukcija u svrhu poboljšanja njihove trajnosti i sigurnosti.

POPIS LITERATURE

- [1] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanje konstrukcija – Predavanja. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; [2024].
- [2] Cerić, A., Ivić, I: Metodologija i znanstvene metode, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [3] Ahmed S. El-Robaa, Sherif M. Ibrahim, Sameh M. Gaawan and Charles I. Malek Human Comfort Acceptance Criteria of Pedestrian Bridges
- [4] Loading Tests on Road Bridges and Footbridges – Practical Guides. Sétra (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes), October 2006.
- [5] Butz C, Heinemeyer C, Keil A, Schlaich M, Goldack A, Trometer S, Lukić M, Chabrolin B, Lemaire A, Martin P-O, Cunha Á, Caetano E. Design of Footbridges – Guidelines. RFS2-CT-2007-00033. Human induced Vibrations of Steel Structures. 08 September 2008 - HIVOSS
- [6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Pje%C5%A1a%C4%8Dki_most_u_Osijeku
- [7] Bačinskas D, Jakubovskis R, Kilikevičius A. Chapter 12: Field Testing of Pedestrian Bridges. U: Al-Mahaidi R, Caprani C, urednici. Load Testing of Bridges: Current Practice and Diagnostic Load Testing. Boca Raton: CRC Press; 2020. str. 249–272.
- [8] Mandić A, Radić J, Puž G. Konstruiranje mostova. Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada; Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet; Jadring; 2005.
- [9] HRN U.M1.046:1984 Ispitivanje mostova probnim opterećenjima
- [10] <https://dynamox.net/en/blog/the-peak-peak-to-peak-and-rms-values-in-vibration-analysis>

POPIS SLIKA

Slika 1.: Osnovna krivulja vibracija duž Z-osi (okomiti smjer) za RMS ubrzanje. (Izvor: [3])..	6
Slika 2.: Pješački most u Osijeku (Izvor: [6])	10
Slika 3. Prikaz tlocrta mosta iz <i>AutoCAD</i> -a.....	18
Slika 4.: Tlocrt mosta, prikaz ploča	19
Slika 5.: 3D prikaz	20
Slika 6.: Karakteristični poprečni presjek rasponskog sklopa.....	21
Slika 7.: Prikaz karakterističnog hrpta sanduka	24
Slika 8.: Prikaz karakterističnog donjeg pojasa sanduka.....	24
Slika 9.: Prikaz karakteristične ploče debljine 12 mm	25
Slika 10.: Prikaz ploče debljine 16 mm, samo u najvećem rasponu u sredini na duljini od 17,5m.....	25
Slika 11.: Prikaz karakterističnog rebra.....	26
Slika 12.: Prikaz karakteristične dijafragme	26
Slika 13.: Poprečni presjek stupova S2-S4 i S7.....	27
Slika 14.: Poprečni presjek stupova S5 i S6.....	27
Slika 15.: Raspored paleta za probno opterećenje mosta.....	28
Slika 16.: Probno opterećenje raspona R1 sa 9 paleta – faza 4	28
Slika 17.: Probno opterećenje raspona R2 sa 9 paleta – faza 8	29
Slika 18.: Probno opterećenje raspona R3 sa 9 paleta – faza 7	29
Slika 19.: Probno opterećenje raspona R4 sa 12 paleta – faza 13.....	30
Slika 20.: Probno opterećenje raspona R5 sa 18 paleta – faza 15.....	30
Slika 21.: Probno opterećenje raspona R6 sa 12 paleta – faza 18.....	30
Slika 22.: Probno opterećenje raspona R7 sa 12 paleta – faza 19.....	31
Slika 23.: Prikaz pješačkog opterećenja 5 kN/m ²	32
Slika 24.: Shematski prikaz faza ispitivanja probnog opterećenja paletama (faze 100% opterećenja za svaki od raspona R1-R4, R6-R7).....	35
Slika 25.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R1 sa 9 paleta.....	40
Slika 26.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R2 sa 9 paleta.....	40
Slika 27.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R3 sa 9 paleta.....	41
Slika 28.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R4 sa 12 paleta.....	41
Slika 29.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R5 sa 18 paleta.....	42
Slika 30.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R6 sa 12 paleta.....	42
Slika 31.: Progib uslijed probnog opterećenja raspona R7 sa 12 paleta.....	43
Slika 32.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 1.....	44

Slika 33.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 2.....	44
Slika 34.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 3.....	45
Slika 35.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 4.....	45
Slika 36.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 5.....	46
Slika 37.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 6.....	46
Slika 38.: Progib uslijed proračunskog opterećenja 5 kN/m ² u rasponu 7.....	47
Slika 39.: Prvi oblik osciliranja mosta.....	48
Slika 40.: Drugi oblik osciliranja mosta.....	48
Slika 41.: Treći oblik osciliranja mosta.....	49
Slika 42.: Četvrti oblik osciliranja mosta.....	49
Slika 43.: Peti oblik osciliranja mosta.....	50
Slika 44.: Grafički prikaz izmjerenih vertikalnih progiba rasponske konstrukcije mosta (punim linijama prikazani su eksperimentalni rezultati progiba dok su crtkanim linijama prikazani rezultati iz proračunskog modela)	57
Slika 45.: Grafički prikaz usporedbe izmjerenih i računskih frekvencija mosta.....	59
Slika 46.: Shema mjernih mjesta za mjerenje: A) vertikalnih pomaka kod statičkog ispitivanja mosta – CRVENO, B) dinamičkih pomaka – PLAVO i C) vlastitih oblika titranja i koeficijenata prigušenja konstrukcije – ZELENO	68
Slika 47.: Karakteristični razmještaj tereta pri probnom opterećenju - primjer sa šest paleta	68
Slika 48.: Shematski prikaz faza ispitivanja probnog opterećenja paletama.....	69
Slika 49.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog i horizontalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja pri dinamičkoj pobudi dva pješaka skakanjem pri frekvenciji od 2,5 Hz za određivanje koeficijenta prigušenja. Mjerna mjesta su u sredini raspona 5 (Slika 46.) (DPZ1 DPY2 DPZ3 DPY4).....	70
Slika 50.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi dva pješaka skakanjem pri frekvenciji 3,725 Hz za određivanje koeficijenta prigušenja (DPZ1 DPY2 DPZ3 DPY4).....	71
Slika 51.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 2,5 Hz pješaka trčanjem u smjeru U1 -> U8 (DPZ1 DPY2 DPZ3 DPY4)	72
Slika 52.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 2,5 Hz pješaka trčanjem u smjeru U8 -> U1 (DPZ1 DPY2 DPZ3 DPY4)	72
Slika 53.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 3,725 Hz pješaka trčanjem u smjeru U1 -> U8 (DPZ1 DPY2 DPZ3 DPY4).....	73

Slika 54.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 3,725 Hz pješaka trčanjem u smjeru U8 -> U1 (DPZ1 DPY2 DPZ3 DPY4).....	74
Slika 55.: Vremenski zapisi RMS (korijena srednjeg kvadrata ubrzanja) izračunat na duljini intervala 0,1 % od ukupne duljine zapisa ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 2,5 Hz pješaka trčanjem u smjeru U1 -> U8 (DPZ3 DPY4).....	74
Slika 56.: Vremenski zapisi RMS (korijena srednjeg kvadrata ubrzanja) izračunat na duljini intervala 0,1 % od ukupne duljine zapisa ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 3,725 Hz pješaka trčanjem u smjeru U8 -> U1 (DPZ3 DPY4)	74
Slika 57.: Zapis singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća (frekventni spektar) s istaknutim vlastitim frekvencijama osciliranja.....	75
Slika 58.: Prvi eksperimentalno određeni (2,513 Hz) oblik titranja rasponske konstrukcije mosta, poprečna translacija.....	75
Slika 59.: Drugi eksperimentalno određeni (3,725 Hz) oblik titranja rasponske konstrukcije mosta, vertikalni oblik s dominantnim pomakom u rasponu R5.....	75
Slika 60.: Treći eksperimentalno određeni (4,213 Hz) oblik titranja rasponske konstrukcije mosta, mješoviti oblik (vertikalni i poprečni).....	76
Slika 61.: Zapis singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća (frekventni spektar) s istaknutim vlastitim frekvencijama osciliranja.....	76
Slika 62.: Prvi eksperimentalno određeni (2,5 Hz) oblik titranja raspona R5.....	76
Slika 63.: Drugi eksperimentalno određeni (3,75 Hz) oblik titranja raspona R5.....	77
Slika 64.: Treći eksperimentalno određeni (4,219 Hz) oblik titranja raspona R5.....	77
Slika 65.: Četvrti eksperimentalno određeni (7,75 Hz) oblik titranja raspona R5	77
Slika 66.: Peti eksperimentalno određeni (10,441Hz) oblik titranja raspona R5	78
Slika 67.: Šesti eksperimentalno određeni (14,44 Hz) oblik titranja raspona R5.....	78
Slika 68.: Sedmi eksperimentalno određeni (24,75 Hz) oblik titranja raspona R5.....	78
Slika 69.: Nesimetrično opterećenje u petom rasponu, FAZA 16.....	79
Slika 70.: Maksimalno opterećenje u šestom rasponu, FAZA 18	79
Slika 71.: Položaj opterećenja u tlocrtu	80
Slika 72.: Mjerna oprema za dinamička mjerenja	80

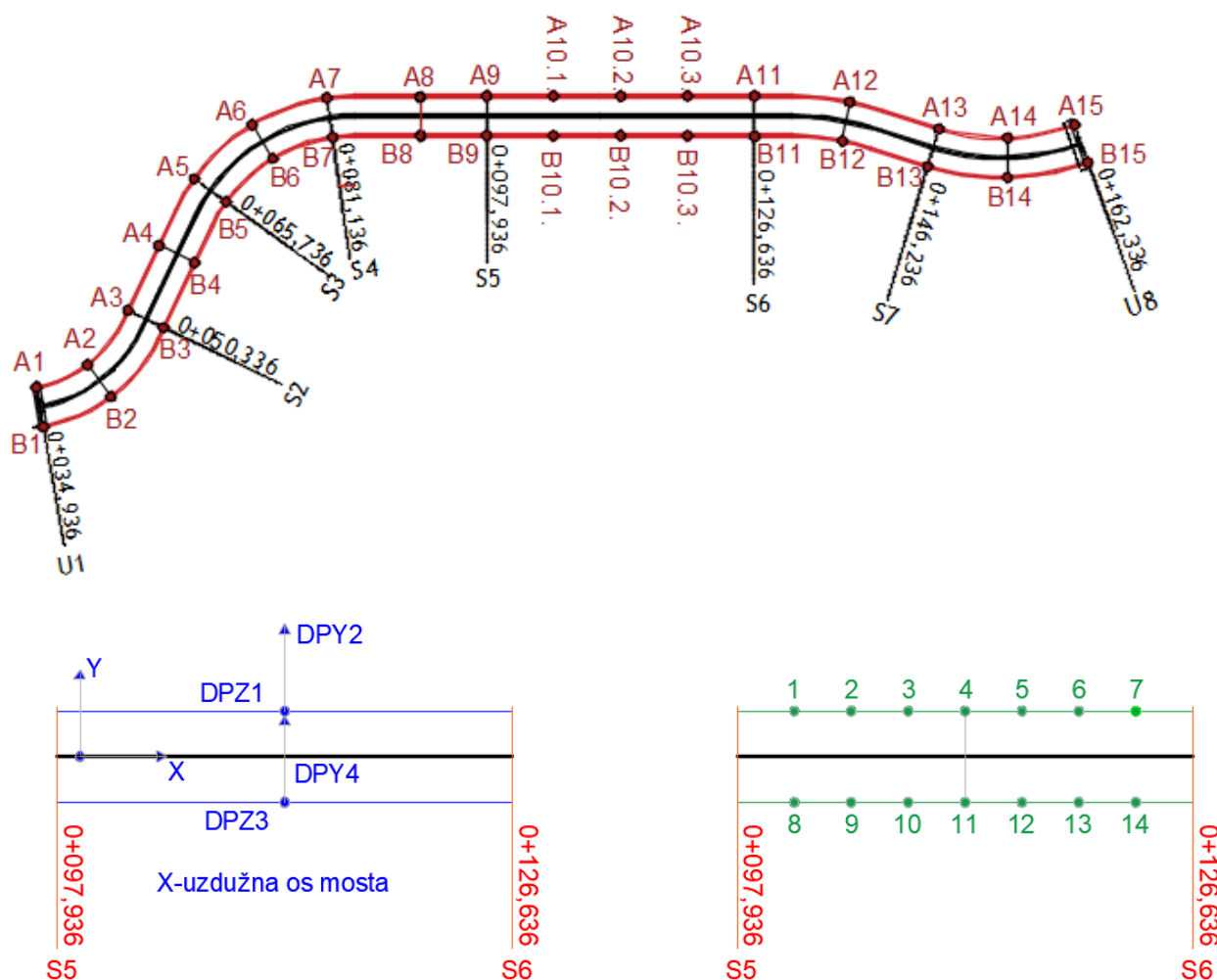
POPIS TABLICA

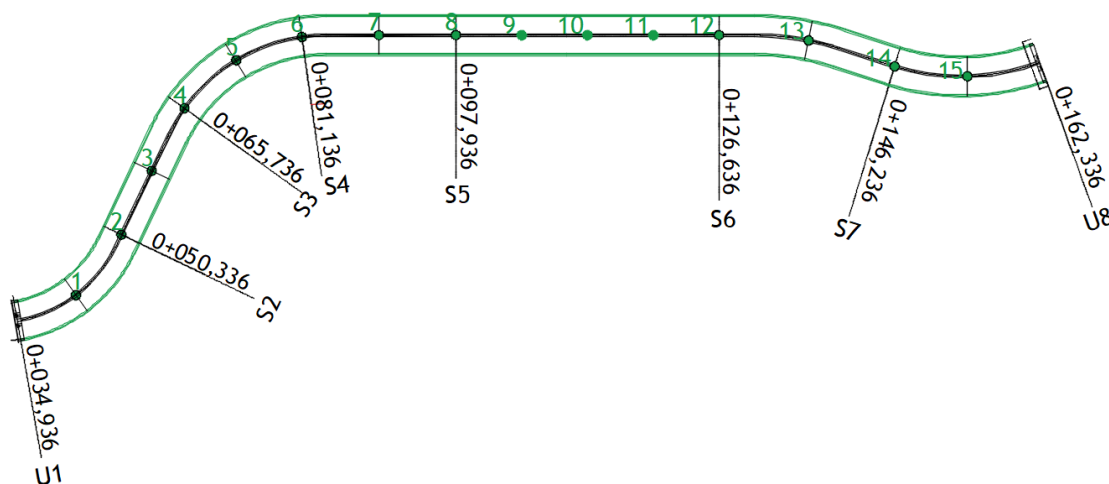
Tablica 1.: Definiranje klase udobnosti prema rasponima ubrzanja (Izvor: [5])	12
Tablica 2: Duljine raspona.....	13
Tablica 3. Elementi sa pripadajućim materijalima	13
Tablica 4.: Prikaz dimenzija mosta.....	21
Tablica 5.: Prikaz dimenzija hrpta.....	21
Tablica 6.: Podatci o elementima konstrukcije.....	22
Tablica 7.: Osnovni podaci o probnom opterećenju.....	33
Tablica 8.: Osnovni podaci o probnom opterećenju.....	34
Tablica 9.: Faze dinamičkog ispitivanja mosta	35
Tablica 10.:Efikasnost probnog opterećenja za rasponsku konstrukciju.....	37
Tablica 11.: Iznosi progiba od probnog opterećenja paletama	43
Tablica 12.: Iznosi progiba od proračunskog opterećenja 5 kN/m^2	47
Tablica 13.: Iznosi računskih frekvencija za pripadajuće oblike osciliranja.....	50
Tablica 14.: Izmjereni progibi	51
Tablica 15.: Izmjerene vlastite frekvencije, izmjereni koeficijenti prigušenja te pripadajući oblici osciliranja konstrukcije.....	52
Tablica 16.: Koeficijenti prigušenja određeni pri pobudi dva pješaka različitim frekvencijama za raspon 5, maksimalna amplituda određena pri dinamičkoj pobudi jednog pješaka pri rezonantnoj frekvenciji pri hodanju/trčanju s jedne strane mosta na drugu.	53
Tablica 17.: Koeficijenti prigušenja određeni pri pobudi dva pješaka različitim frekvencijama za raspon 5, maksimalna amplituda ubrzanja i RMS određen pri dinamičkoj pobudi jednog pješaka pri rezonantnoj frekvenciji pri hodanju/trčanju s jedne strane mosta na drugu.....	54
Tablica 18.: Usporedba maksimalnih izmjerenih i računskih vertikalnih progiba.....	56
Tablica 19.: Izmjerene i računске vlastite frekvencije i pripadajući oblici osciliranja konstrukcije.....	58

PRILOG A

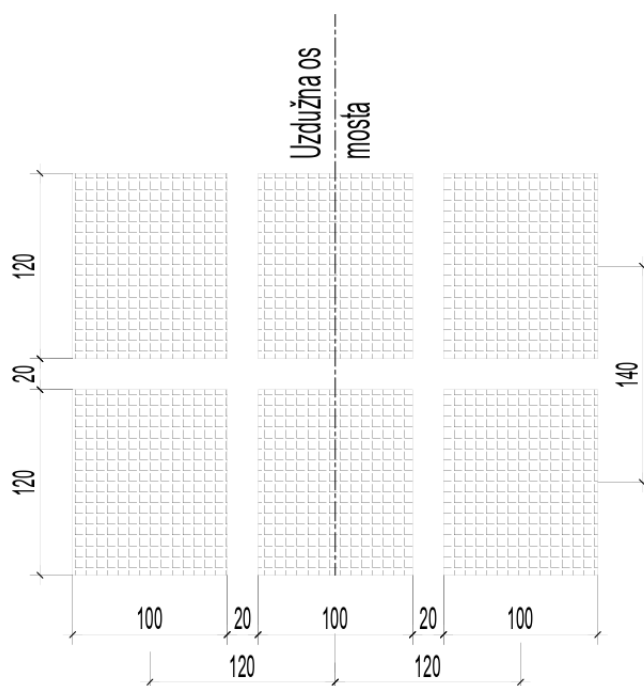
1. Raspored mjernih mjesta i sheme opterećenja
2. Zapisi dinamičkih ispitivanja
3. Fotodokumentacija ispitivanja
4. Geodetsko izvješće

1. Raspored mjernih mjesta i sheme opterećenja



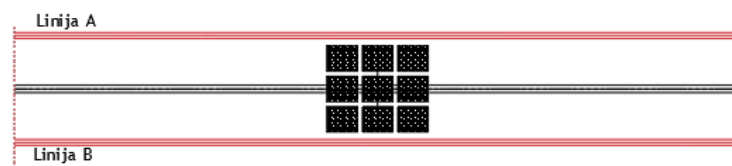


Slika 46.: Shema mjernih mjesta za mjerenje: A) vertikalnih pomaka kod statičkog ispitivanja mosta – CRVENO, B) dinamičkih pomaka – PLAVO i C) vlastitih oblika titranja i koeficijenta prigušenja konstrukcije – ZELENO

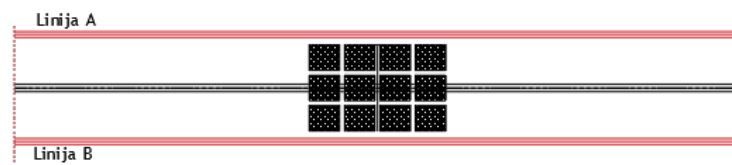


Slika 47.: Karakteristični razmještaj tereta pri probnom opterećenju - primjer sa šest paleta

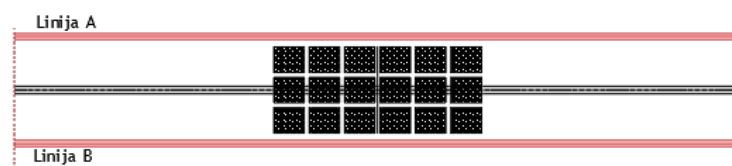
9 Paleta -simetrično



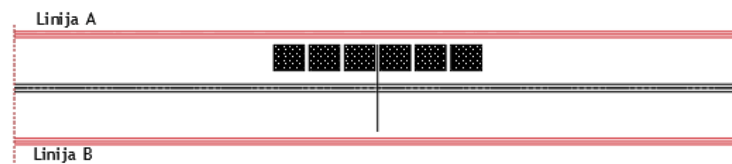
12 Paleta -simetrično



18 Paleta -simetrično



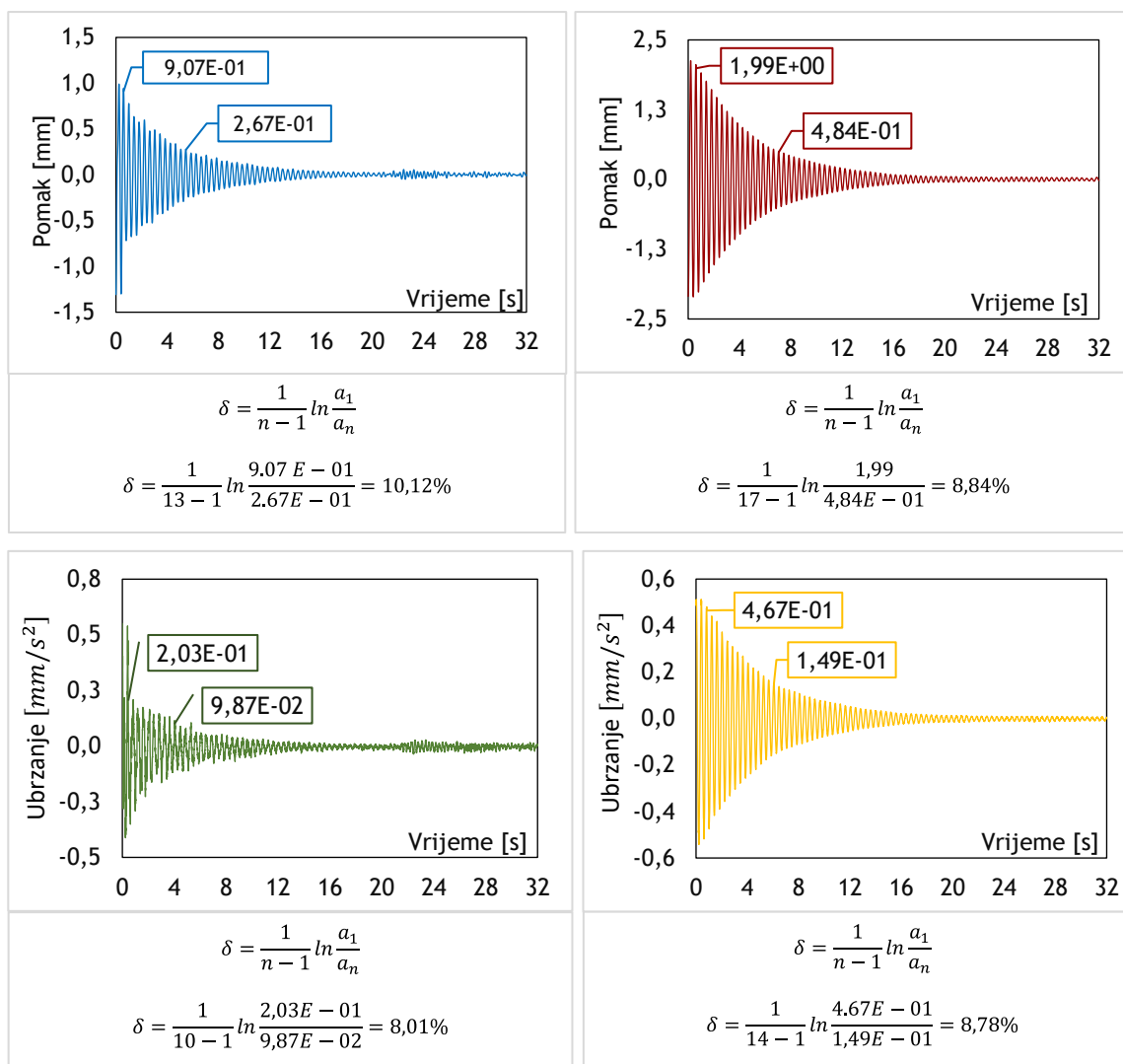
6 Paleta -nesimetrično



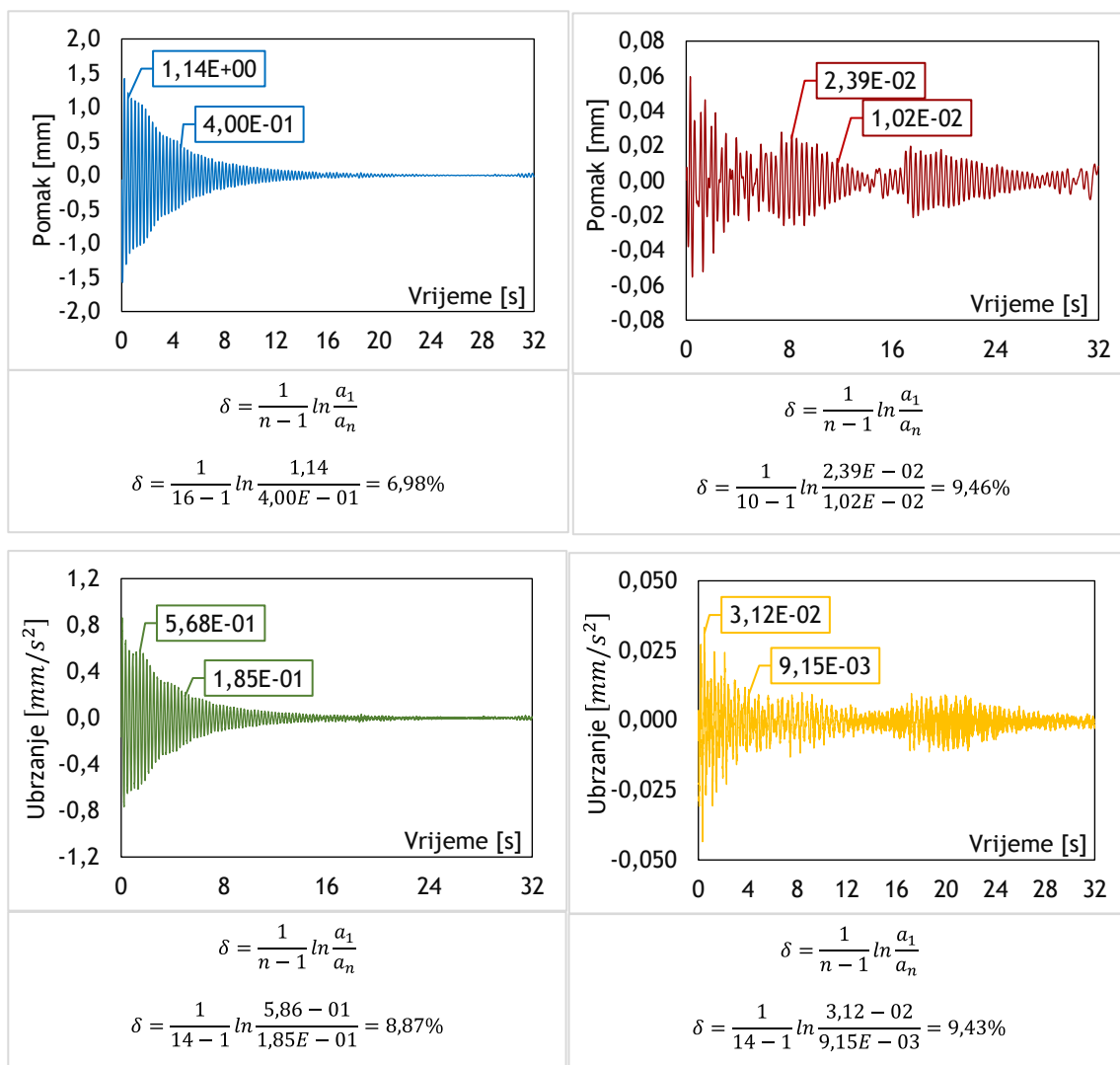
Slika 48.: Shematski prikaza faza ispitivanja probnog opterećenja paletama

2. Zapisi dinamičkih ispitivanja

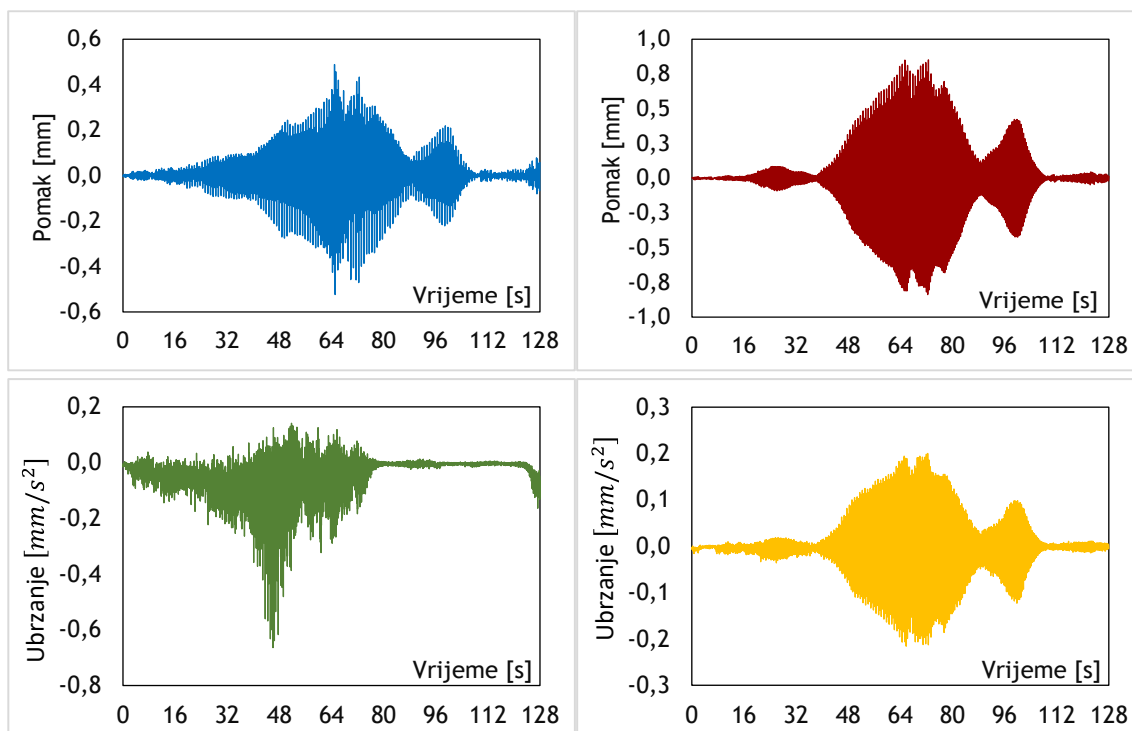
2.1. Dinamički odgovor konstrukcije pri pobudi dva pješaka rezonantnim frekvencijama



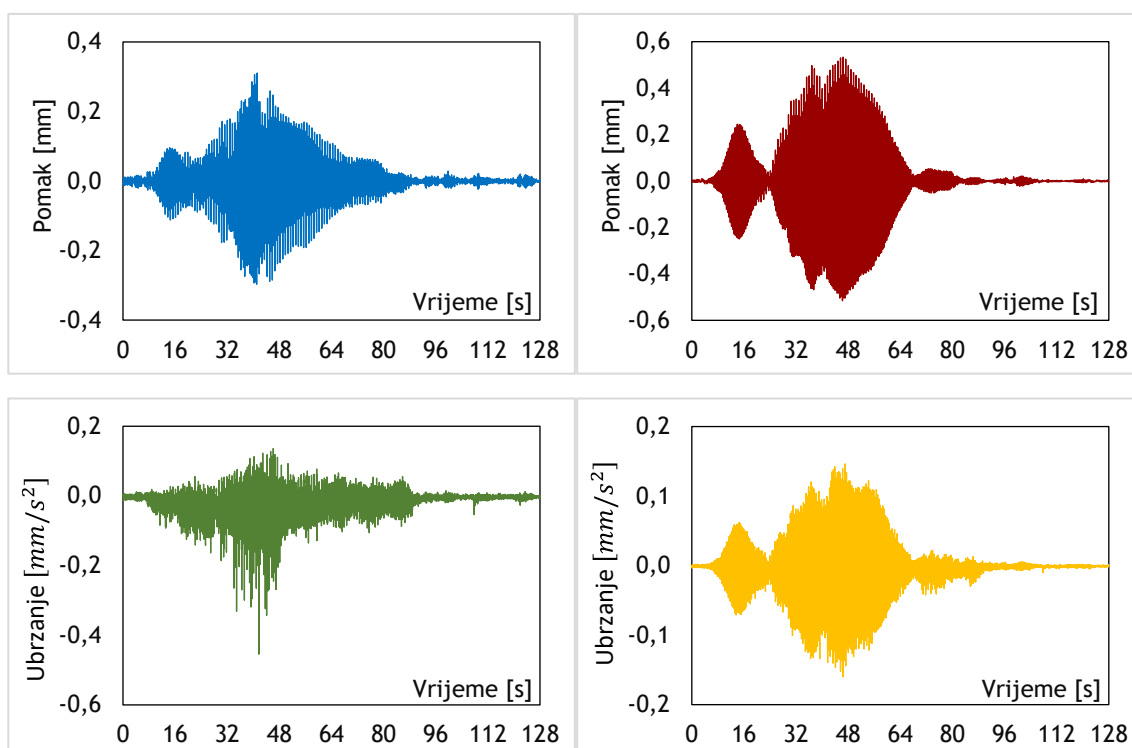
Slika 49.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog i horizontalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja pri dinamičkoj pobudi dva pješaka skakanjem pri frekvenciji od 2,5 Hz za određivanje koeficijenta prigušenja. Mjerna mjesta su u sredini raspona 5 (Slika 46.) (DPZ1 | DPY2 | DPZ3 | DPY4)



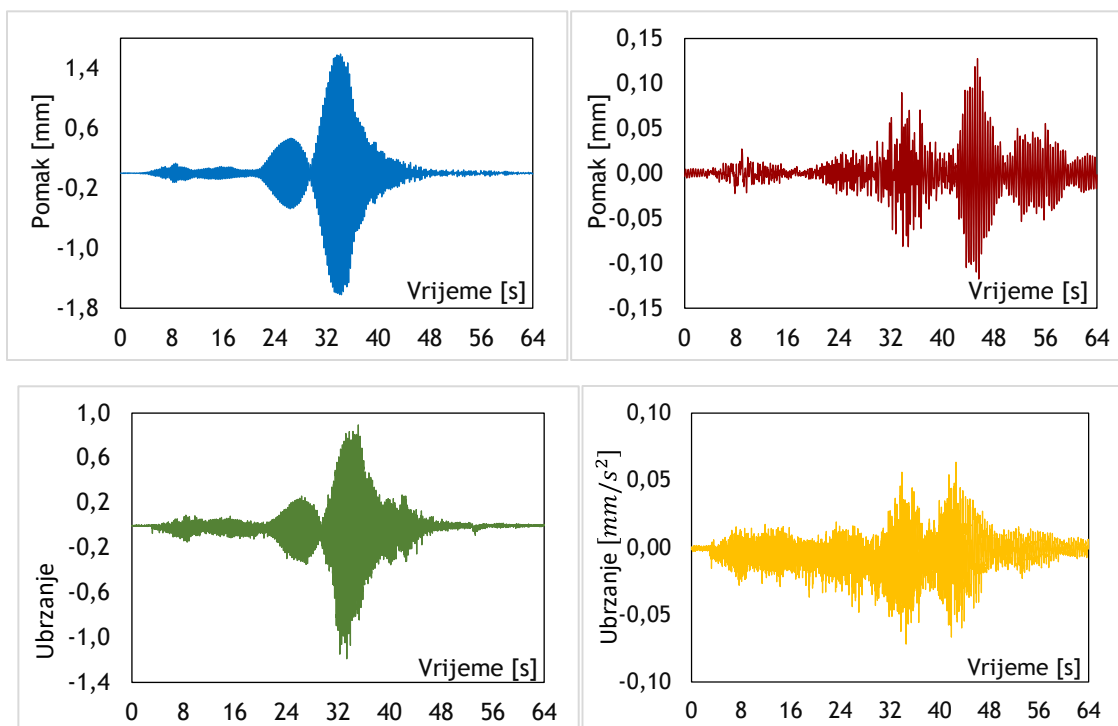
Slika 50.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi dva pješaka skakanjem pri frekvenciji 3,725 Hz za određivanje koeficijenta prigušenja (DPZ1 | DPY2 | DPZ3 | DPY4)



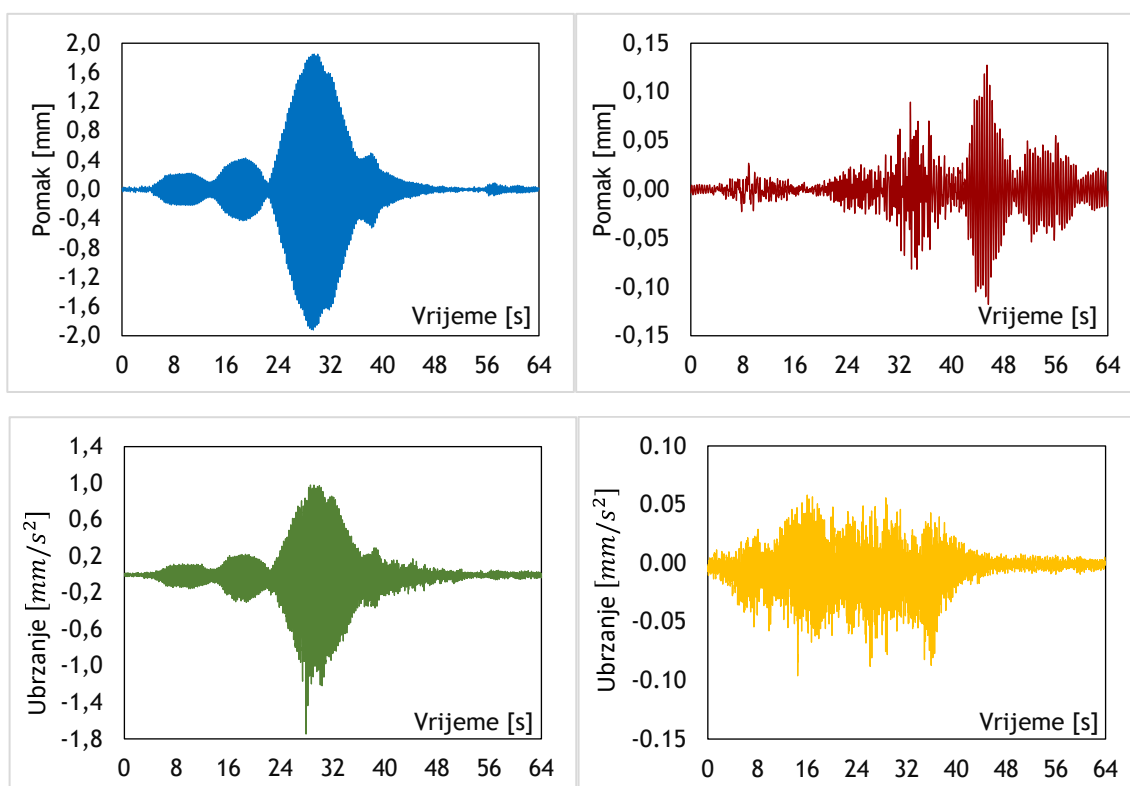
Slika 51.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 2,5 Hz pješaka trčanjem u smjeru U1 -> U8 (DPZ1 | DPY2 | DPZ3 | DPY4)



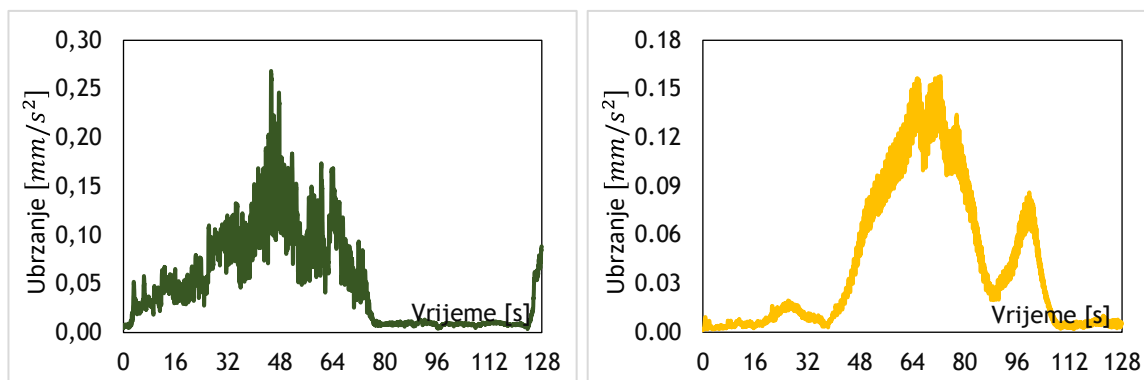
Slika 52.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 2,5 Hz pješaka trčanjem u smjeru U8 -> U1 (DPZ1 | DPY2 | DPZ3 | DPY4)



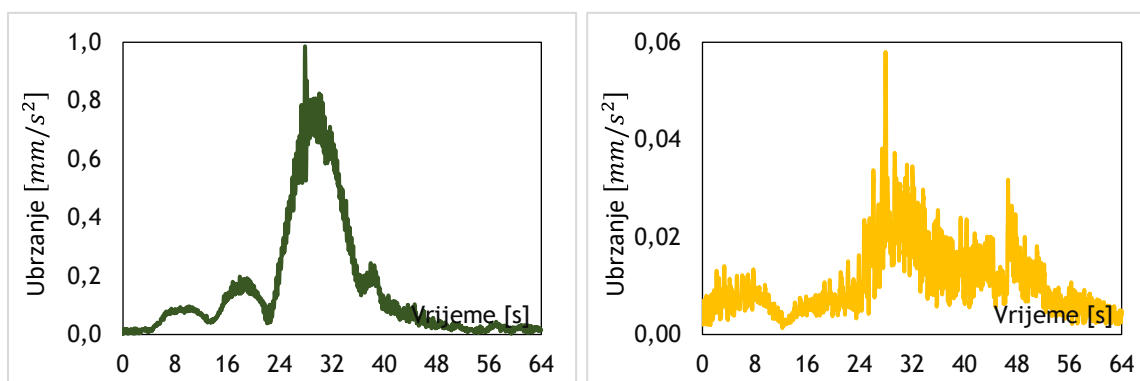
Slika 53.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 3,725 Hz pješaka trčanjem u smjeru U1 -> U8 (DPZ1 | DPY2 | DPZ3 | DPY4)



Slika 54.: Vremenski zapisi mjerenja vertikalnog dinamičkog pomaka i ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 3,725 Hz pješaka trčanjem u smjeru U8 -> U1 (DPZ1 | DPY2 | DPZ3 | DPY4)

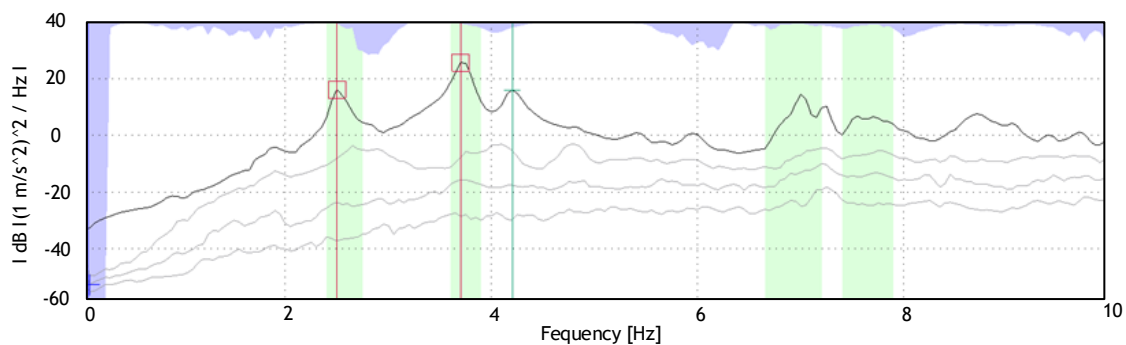


Slika 55.: Vremenski zapisi RMS (korijena srednjeg kvadrata ubrzanja) izračunat na duljini intervala 0,1 % od ukupne duljine zapisa ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 2,5 Hz pješaka trčanjem u smjeru U1 -> U8 (DPZ3 | DPY4)

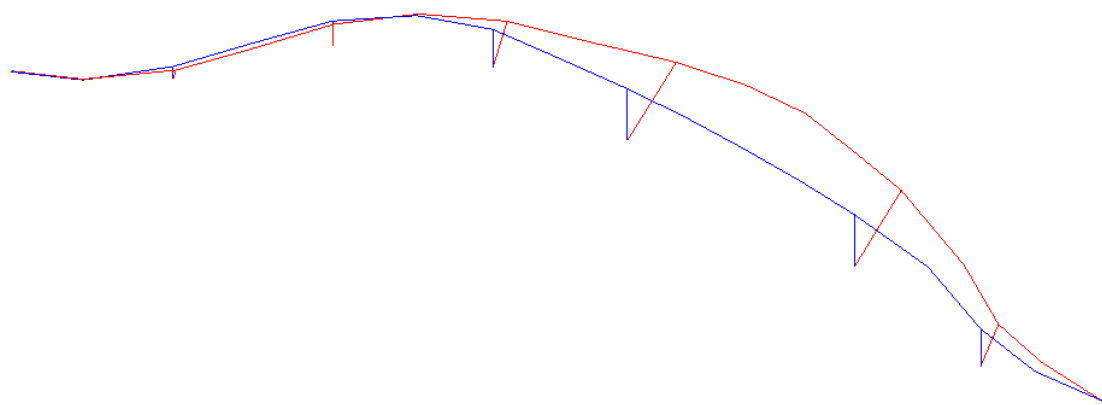


Slika 56.: Vremenski zapisi RMS (korijena srednjeg kvadrata ubrzanja) izračunat na duljini intervala 0,1 % od ukupne duljine zapisa ubrzanja u sredini raspona 5 pri dinamičkoj pobudi od 3,725 Hz pješaka trčanjem u smjeru U8 -> U1 (DPZ3 | DPY4)

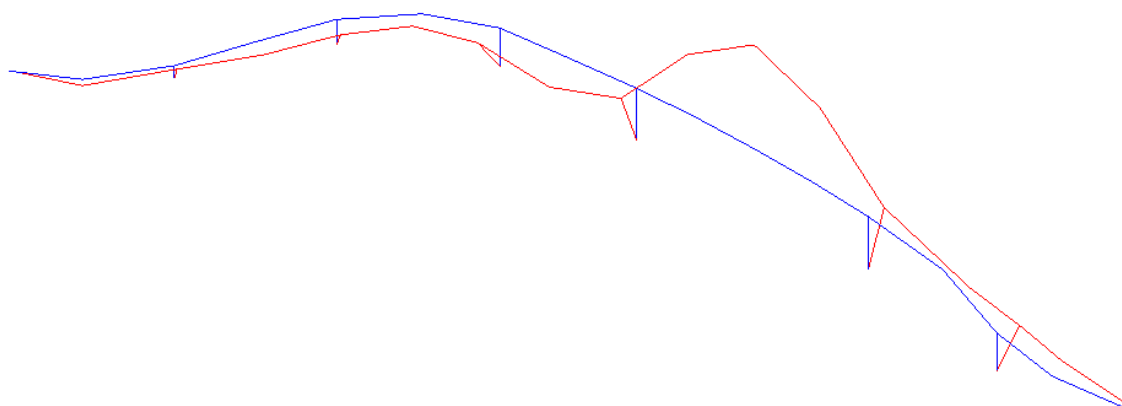
2.2. Eksperimentalno određeni vlastiti oblici titranja konstrukcije



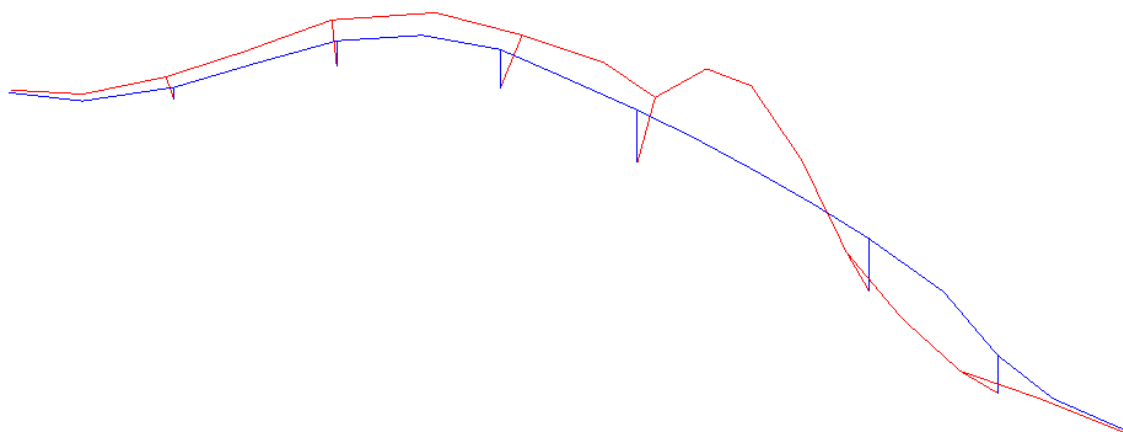
Slika 57.: Zapis singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća (frekventni spektar) s istaknutim vlastitim frekvencijama osciliranja



Slika 58.: Prvi eksperimentalno određeni (2,513 Hz) oblik titranja rasponske konstrukcije mosta, poprečna translacija

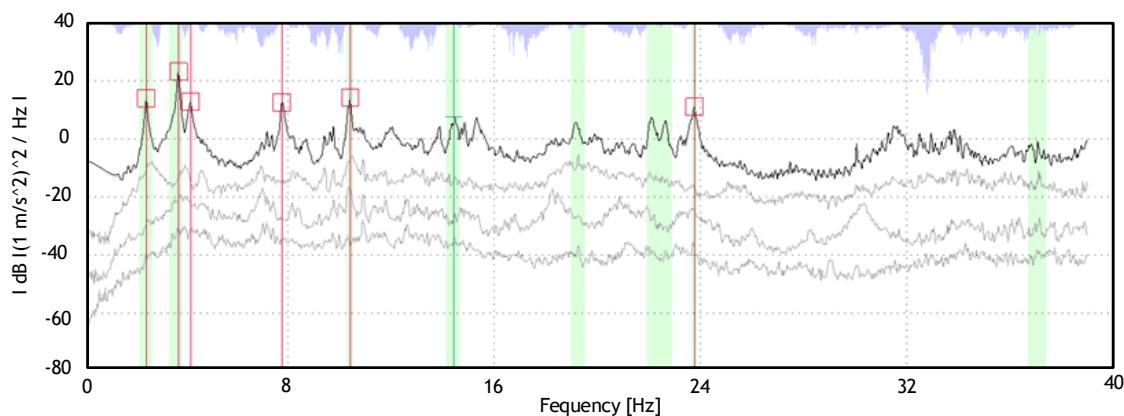


Slika 59.: Drugi eksperimentalno određeni (3,725 Hz) oblik titranja rasponske konstrukcije mosta, vertikalni oblik s dominantnim pomakom u rasponu R5

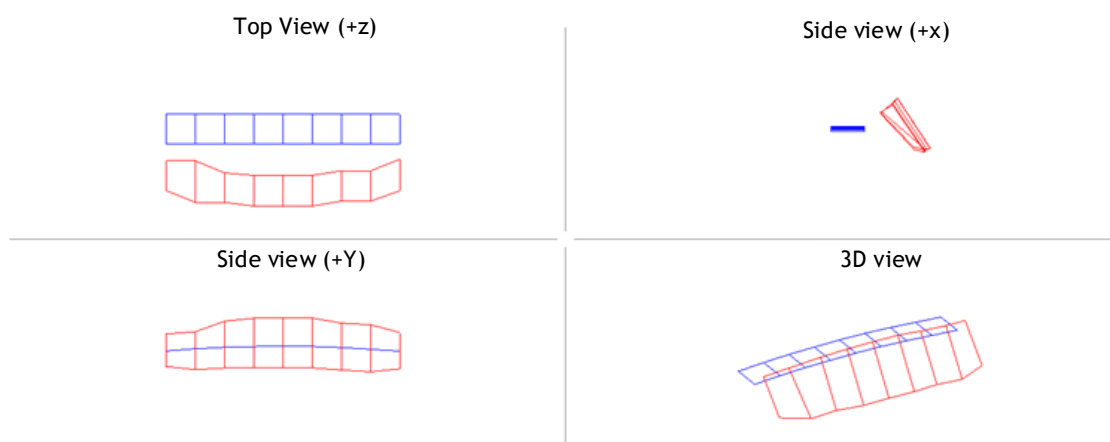


Slika 60.: Treći eksperimentalno određeni (4,213 Hz) oblik titranja rasponske konstrukcije mosta, mješoviti oblik (vertikalni i poprečni)

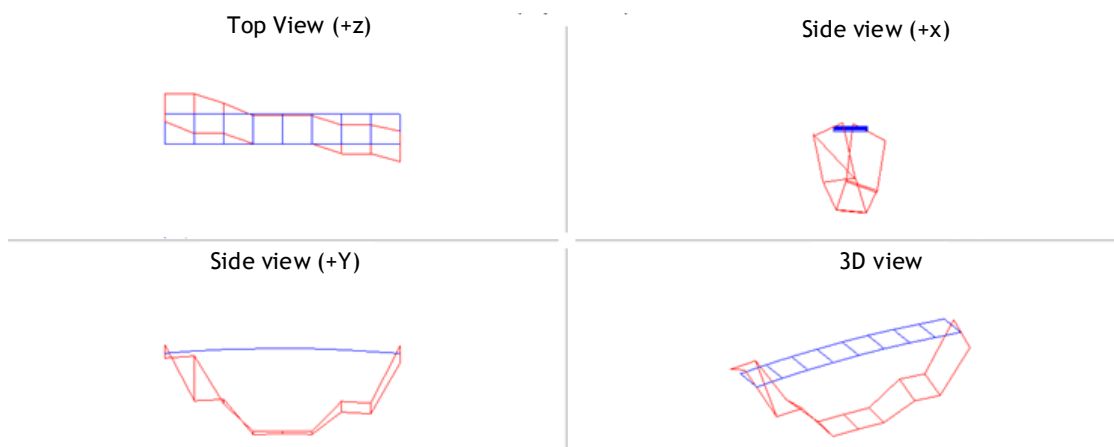
2.3. Eksperimentalno određeni vlastiti oblici titranja raspona R5



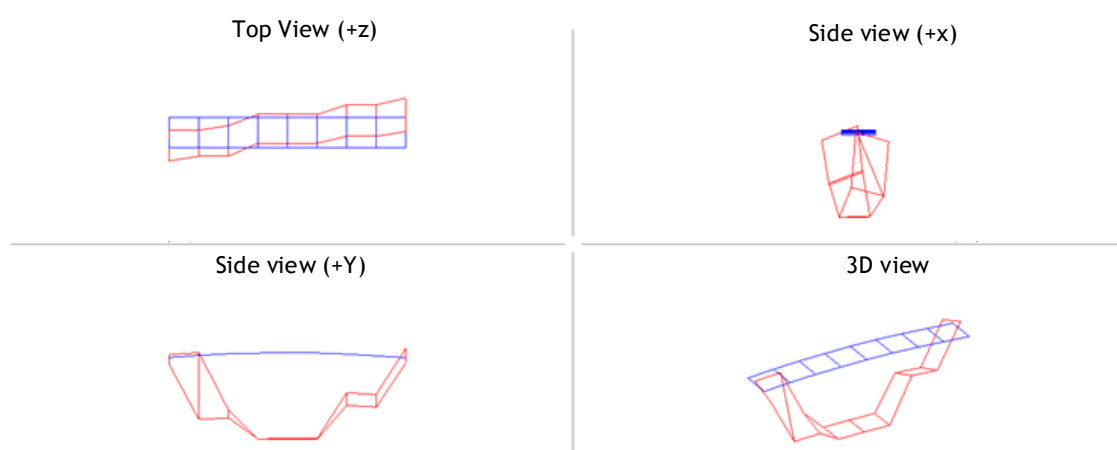
Slika 61.: Zapis singularnih vrijednosti matrica autospektralnih gustoća (frekventni spektar) s istaknutim vlastitim frekvencijama osciliranja



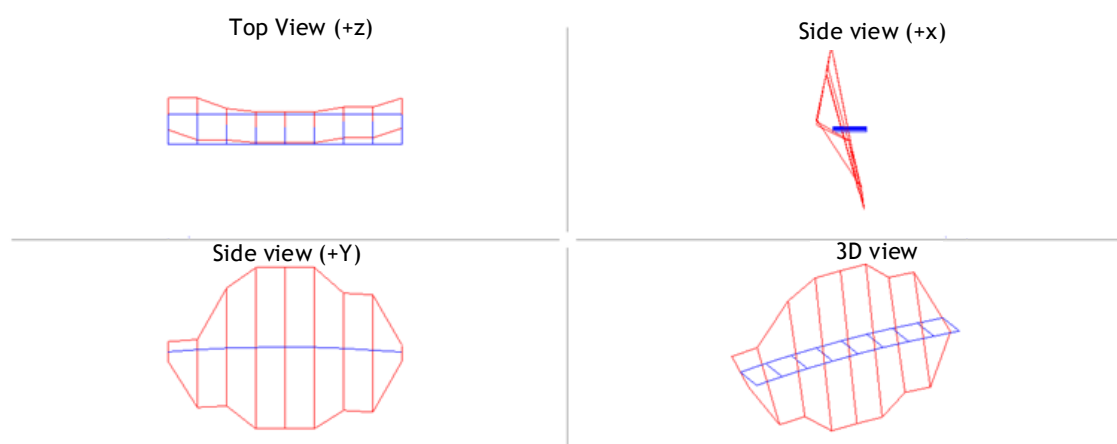
Slika 62.: Prvi eksperimentalno određeni (2,5 Hz) oblik titranja raspona R5



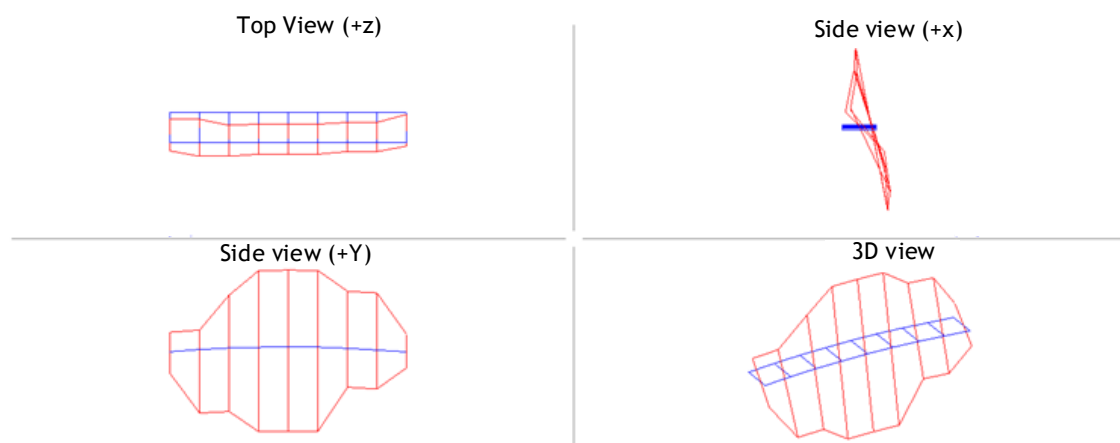
Slika 63.: Drugi eksperimentalno određeni (3,75 Hz) oblik titranja raspona R5



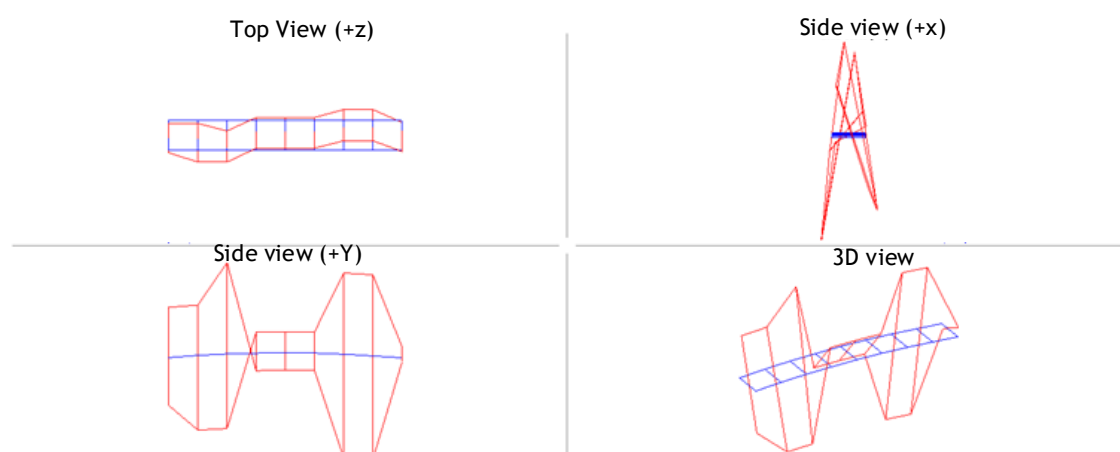
Slika 64.: Treći eksperimentalno određeni (4,219 Hz) oblik titranja raspona R5



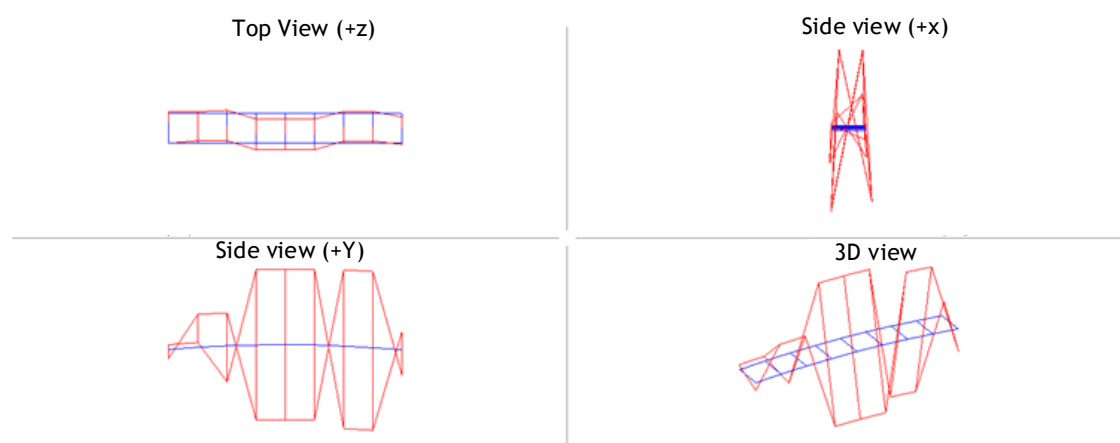
Slika 65.: Četvrti eksperimentalno određeni (7,75 Hz) oblik titranja raspona R5



Slika 66.: Peti eksperimentalno određeni (10,441 Hz) oblik titranja raspona R5



Slika 67.: Šesti eksperimentalno određeni (14,44 Hz) oblik titranja raspona R5



Slika 68.: Sedmi eksperimentalno određeni (24,75 Hz) oblik titranja raspona R5

3. Fotodokumentacija



Slika 69.: Nesimetrično opterećenje u petom rasponu, FAZA 16



Slika 70.: Maksimalno opterećenje u šestom rasponu, FAZA 18



Slika 71.: Položaj opterećenja u tlocrtu



Slika 72.: Mjerna oprema za dinamička mjerenja

4. Geodetsko izvješće

IZVJEŠĆE

Geodetski radovi na mostu sastojali su se u određivanju vertikalnih pomaka na značajnim mjestima pri različitim shemama opterećenja konstrukcije. Vertikalni pomaci pri statičkom opterećenju određivani su kombinacijom modificirane metode geometrijskog nivelmana. Za određivanje vertikalnih pomaka upotrebljavani su precizni digitalni niveliri Leica DNA03 (slika 1).

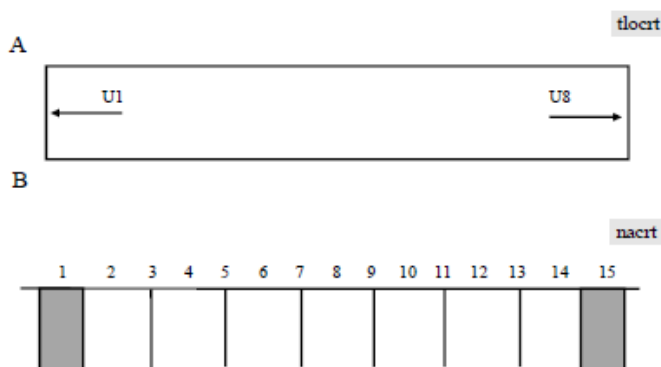


Slika 1. Leica DNA03

Tehničke karakteristike:

- povećanje durbina 24x,
- preciznost mjerenja visina 0,3 mm / km (ISO 17123-2),
- točnost automatskog postava kompenzatora odgovara srednjoj pogrešci od $\pm 0,3''$,

U pripremnim radovima na karakterističnim mjestima konstrukcije mosta obilježena su, duž dvije linije (A i B), mjerna mjesta na kojima su određivani vertikalni pomaci (slika 2). Na mjerna mjesta postavlja se nivelmanska letva i očitava visinska razlika razmatrane točke od ravnine horizonta vizure. Iz razlike očitavanja neopterećenog i opterećenog mosta dobivaju se vrijednosti vertikalnih pomaka uslijed opterećenja, a iz razlike prije i poslije opterećenja, vrijednosti zaostalih deformacija. Kao opterećenje korištene su AB blokovi.



Slika 2. Shematski prikaz mosta

U priloženim tablicama (PRILOG A) dati su konačni rezultati izmjerenih pomaka. Pomaci prema dolje (slijeganje) označeni su pozitivnim predznakom, a prema gore (izdizanje) negativnim. Iskazani pomaci računati su kao razlike visina razmatranih točaka između dviju faza: faze koja odgovara neopterećenoj konstrukciji (broj u zagradi) i naznačene faze kod stanovitog opterećenja, odnosno rasterećenja. Tako reducirani pomaci jesu stvarni pomaci, a u tablici su označeni kao faze 2(1), 3(1), itd.

Uvjeti za optička opažanja bili su povoljni pa se ocjenjuje da su iskazane vrijednosti određene sa standardnim odstupanjem 0,2-0,3 mm.

Mjerno mjesto	F2 (F1)		F3 (F1)		F4 (F1)	
	1/3 u 2		2/3 u 2		3/3 u 2	
	A	B	A	B	A	B
1	0,0	0,7	-0,1	0,9	-0,4	1,0
2	1,9	4,2	3,2	7,4	4,4	10,6
3	-0,1	0,5	-0,4	0,9	-0,7	0,9
4					-1,7	-1,3

Mjerno mjesto	F5 (F1)		F6 (F1)		F7 (F1)		F8 (F1)		F9 (F1)	
	1/3 u 6		2/3 u 6		3/3 u 6		3/3 u 4		0	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1									0,1	0,1
2							-0,6	-1,2	0,3	0,4
3							0,6	-0,2	0,3	-0,1
4					0,0	-1,8	4,5	3,3	0,5	-0,6
5	0,8	-0,1	1,2	-0,5	1,9	-1,2	1,1	-0,3	1,1	-0,5
6	2,5	1,2	4,7	1,9	7,3	2,1	-0,1	-1,4	1,3	-1,0
7	0,6	-0,2	0,9	-0,7	2,0	-1,5			1,2	-0,7
8					0,1	-2,4			1,1	-0,6

Mjerno mjesto	F10 (F9)		F11 (F9)		F12 (F9)		F13 (F9)	
	1/4 u 8		2/4 u 8		3/4 u 8		4/4 u 8	
	A	B	A	B	A	B	A	B
6							-1,5	-0,3
7	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,0	0,4
8	1,6	1,8	3,1	3,2	4,8	5,0	6,2	6,4
9	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3
10.2							-1,9	-2,1

Mjerno mjesto	F14 (F9)		F15 (F9)		F16 (F9)		F17 (F9)	
	1/2 u 10		2/2 u 10		1/3 u 10B		1/2 u 12	
	A	B	A	B	A	B	A	B
8	-2,0	-1,2	-4,1	-2,6	-2,2	0,1		
9	-0,2	0,2	-0,4	0,5	-0,9	1,9		
10.1	7,9	8,1	17,6	18,5	4,7	10,2		
10.2	14,3	14,0	29,2	29,9	7,5	15,1		
10.3	9,2	9,5	17,1	18,2	4,2	9,5		
11	-0,6	0,2	-0,8	1,1	-1,4	1,3	0,5	-0,5
12	-3,3	-2,1	-6,1	-3,5	-3,4	-1,3	6,4	3,6
13							1,0	-0,9

Mjerno mjesto	F18 (F9)		F19 (F9)		F20 (F9)	
	2/2 u 12		2/2 u 14		0	
	A	B	A	B	A	B
6					0,3	0,2
7					0,6	0,1
8					0,4	0,1
9					0,5	0,2
10.1					-0,2	0,2
10.2	-0,9	-3,1			-0,1	1,0
10.3					-0,3	0,5
11	1,2	-0,8			-0,8	0,1
12	12,3	8,0	-3,3	-2,1	-0,9	-0,3
13	1,8	-1,4	-0,7	1,1	-0,3	-0,1
14	-1,7	-4,6	6,5	12,0	-0,1	-0,1
15	0,5	-0,6	-0,9	1,2	0,1	0,0