

Nina Kumer, mag. inž. stroj.

nina.kumer@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno
inženirstvo in računalništvo,
Jamova c. 2, 1000 Ljubljana



dr. Maja Kreslin, univ. dipl. inž. grad.

maja.kreslin@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva ul. 12, 1000 Ljubljana



dr. Uroš Bohinc, univ. dipl. inž. fiz.

uros.bohinc@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva ul. 12, 1000 Ljubljana



prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.

bostjan.branc@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno
inženirstvo in računalništvo,
Jamova c. 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK 624.04:624.21.037(497.4Ravbarkomanda)



50 LET
INŠTITUT ZA KONSTRUKCIJE,
POTRESNO INŽENIRSTVO
IN RAČUNALNIŠTVO

NUMERIČNA OCENA DINAMIČNIH KARAKTERISTIK VIADUKTA RAVBARKOMANDA

NUMERICAL EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE RAVBARKOMANDA VIADUCT

Povzetek

Podajamo numerično oceno vibracijskih oblik desnega objekta viadukta Ravbarkomanda. V ta namen je bil narejen detajlen numerični model konstrukcije po metodi končnih elementov. Togost prekladne konstrukcije je bila kalibrirana glede na izmerjene specifične deformacije nosilcev med testnimi prehodi težkih vozil. Prikazani rezultati bodo v pomoč pri načrtovanju vibracijskih testov na tem pomembnem avtocestnem objektu.

Ključne besede: viadukt Ravbarkomanda, končni elementi, kalibracija togosti, lastne frekvence, nihajne oblike

Summary

A numerical estimation of the vibration modes of the right part of the Ravbarkomanda viaduct is presented. To this end, a detailed finite element model of the structure was prepared. The stiffness of the deck was calibrated according to the strains in the beams, measured during the test passages of heavy vehicles. The presented results will be used for the design of vibration tests on this important Slovenian motorway facility.

Key words: Ravbarkomanda viaduct, finite elements, stiffness calibration, eigenfrequencies, eigenmodes

1 UVOD

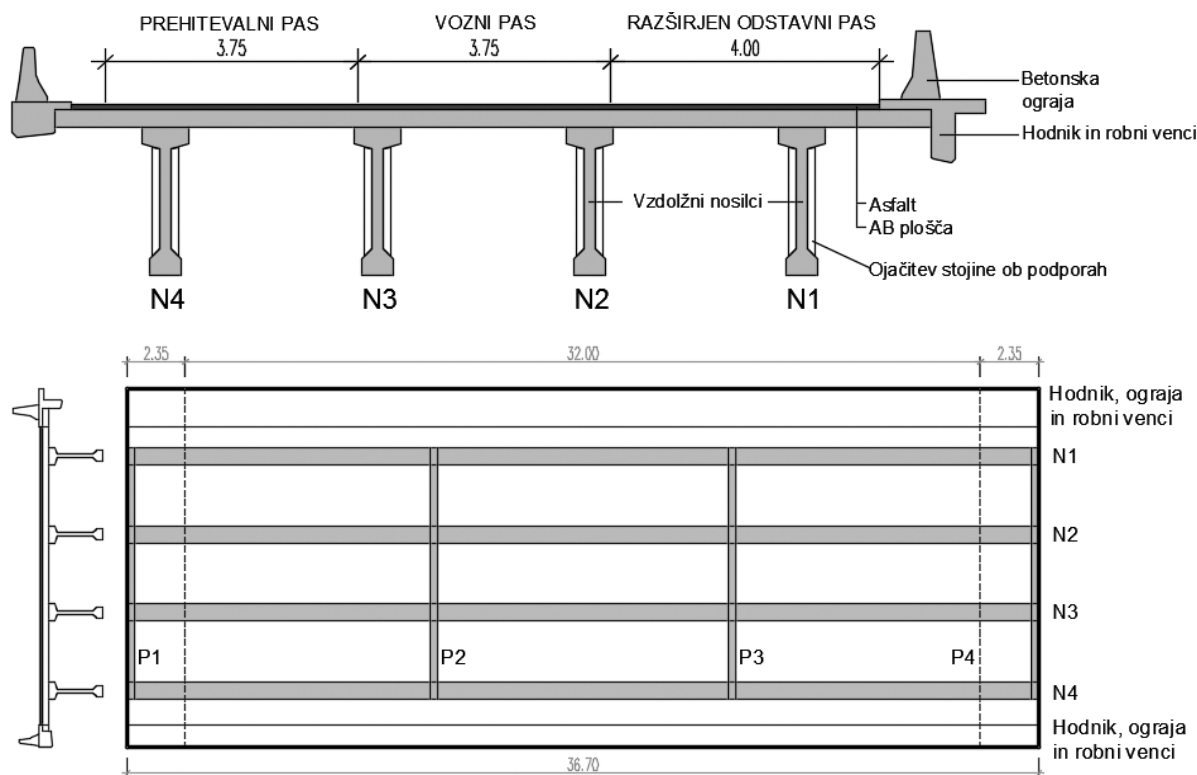
Viadukt Ravbarkomanda, ki je umeščen na avtocestni odsek Vrhnika–Postojna, je bil odprt leta 1972 [Cafnik, 1971]. Detajlna pregleda, opravljena leta 1991 in 1993, sta razkrila številne poškodbe na viaduktu, predvsem zaradi soli, slabe izolacije in neustreznega odvodnjavanja [Čabrilo, 1997]. Med letoma 1996 in 1998 je bila zato izvedena obnova prekladne konstrukcije, ki je obsegala sanacijo robnih nosilcev z namestitvijo zunanjih kablov, obnovo voziščne plošče, podaljšanje konzol na vrhu



Slika 1. Viadukt Ravbarkomanda (Foto: Andrej Anžlin, slika je uporabljena z dovoljenjem avtorja).

stebrov ter zamenjavo celotne opreme objekta [Turk, 2019]. Leta 2008 so obnovili in ojačali še stebre. Po zadnji celoviti sanaciji, ki je potekala med letoma 2017 in 2019 in je opisana v [Turk, 2019] in [Škafar, 2018], je bil vzpostavljen sistem stalnega opazovanja (monitoringa) [Žnidarič, 2018]. Na viaduktu je nameščenih več kot 200 senzorjev (gre za merilnike specifičnih deformacij, temperaturne senzorje in pospeškomere), s katerimi se spremlja stanje pomembnejših konstrukcijskih elementov [Anžlin, 2021], [Žnidarič, 2019b].

Zanimivo je, da dinamične karakteristike viadukta, torej lastne frekvence, nihajne oblike in dušenje, niso bile nikoli izmerjene, čeprav gre za podatke, ki so pomembni pri oceni mejnega stanja uporabnosti in nosilnosti. Ponekod se takšne meritve opravljajo daljše časovno obdobje za namene opazovanja stanja viadukta. V tem članku podajamo numerično oceno dinamičnih karakteristik desnega (daljšega) objekta viadukta, dobljeno na podlagi detajlnega numeričnega modela. Uporabljeni model upošteva stanje po zadnji sanaciji in vključuje detajle, kot so dilatacije in ležišča. Da bi modelsko togost prekladne konstrukcije čim bolj približali dejanski, smo jo kalibrirali glede na rezultate meritev specifičnih deformacij nosilcev pri prehodih težkih testnih vozil, ki so bile izvedene v času vzpostavitve monitoringa [Žnidarič, 2019a]. Izračunane dinamične karakteristike desnega viadukta veljajo za stanje v času obratovanja, ko so vibracijske amplitude majhne, objekt pa nima konstrukcijskih poškodb, ki bi nastale v primeru izjemnega dogodka. Kot take so lahko uporaben podatek pri pripravi eksperimentalnih testov (načrtovano je, da se bodo takšni testi vendarle izvedli), lahko pa so uporabni tudi pri oceni mejnih stanj tega pomembnega objekta na primorski avtocesti.



Slika 2. Shematski prikaz prečnega prereza in tlorisa enega polja viadukta.

2 OPIS VIADUKTA

Viadukt Ravbarkomanda (slika 1) sestavljata dva ločena objekta. Desni ima 17 polj skupne dolžine približno 595 m, levi pa 15 polj skupne dolžine približno 556 m. Horizontalna os avtoceste poteka po viaduktu po krožnici z radijem 2000 m. Prekladno konstrukcijo obeh objektov sestavljajo amiranobetonska voziščna plošča, štirje vzdolžni (odsekoma prostoležeči) prednapeti montažni I-nosilci ter prednapeti prečniki, po štirje na polje, slika 2. Prekladna konstrukcija je razdeljena na štiri t. i. zavorne enote (včasih poimenovane tudi dilatacijske enote), ki so med seboj ločene z dilatacijami. Vgrajene so kovinske lamelne dilatacije hoda do 80 mm (nad krajnimi oporniki) in kovinske glavnikaste dilatacije hoda do 160 mm (nad vmesnimi stebri) [Promico, d. o. o., 2016c]. Dilatacije potekajo preko celotne širine viadukta, torej čez voziščno ploščo, hodnik in robni venec. Po zadnji rekonstrukciji so na viaduktu tudi betonske varnostne ograje, ki se (vsaj deloma) obnašajo kot nosilni del prekladne konstrukcije. Prečni naklon viadukta je enostranski in znaša 2,5 %.

Podporno konstrukcijo sestavljajo stebri z osemkotnim votlim prerezo, ki so vpeti v plitve temelje, zgoraj pa se razširijo v konzole (imenovane tudi konzolne glave) [Turk, 2019]. Desni viadukt ima 16 stebrov višine med 5 in 32 m ter dva masivna krajna opornika. Vzdolžni I-nosilci nalegajo na konzole preko elastomernih ležišč. Na viaduktu so nameščena armirana elastomerna ležišča štirih različnih dimenzij ([Promico, d. o. o., 2016b], [Mageba, 2021]), ob katerih so v prečni smeri protipotresni bloki, ki pa ne omejujejo strižnih pomikov ležišča med obratovanjem viadukta, kar je razvidno s slike 3.

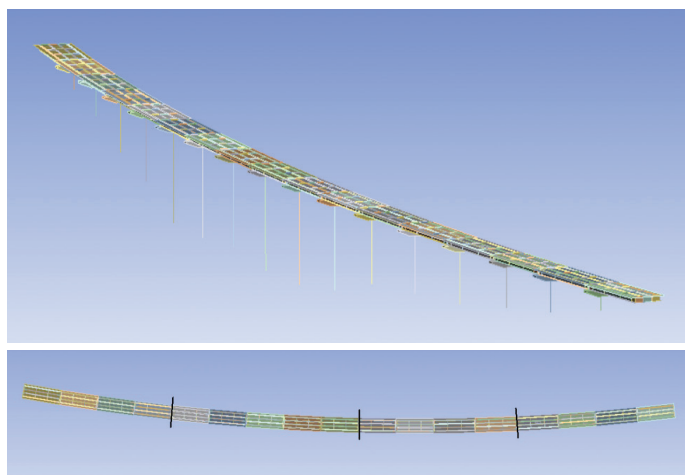


Slika 3. Elastomerno ležišče med stebrom in nosilcem s protipotresnima blokoma na obeh straneh.

3 NUMERIČNI MODEL

Za numerično modeliranje smo uporabili komercialni računalniški program Ansys [Ansys, 2020]. Kot že omenjeno, smo se omejili na daljši, desni objekt. Dimenzije konstrukcijskih elementov smo privzeli iz projektne dokumentacije [Promico, d. o. o., 2016a]. V modelu je upoštevana vzdolžna ukrivljenost objekta, prečni naklon pa je zanemarjen.

Numerični model viadukta, ki je nastal po optimizaciji modeliranja prekladne in podporne konstrukcije, je kompromis med natančnostjo in velikostjo. Kar se tiče prekladne konstrukcije, smo najprej pripravili referenčni model enega polja z zelo gosto mrežo prostorskih (tj. »3D solid«) končnih elementov. Nato smo izdelali model istega polja z lupinastimi in linijskimi končnimi elementi (torej z mnogo manj prostostnimi stopnjami) ter primerjali vrednosti največjih pomikov pri nekaj statičnih obtežbah (zaradi lastne teže in teže vozil) ter vrednosti osnovnih lastnih frekvenc. Pripravili smo tak hitrejši model, da so se rezultati dovolj dobro (na nekaj odstotkov) ujemali z referenčnim modelom. Podobno smo naredili za steber: pripravili smo hitrejši model iz linijskih in prostorskih končnih elementov, katerega rezultati so se dovolj dobro ujemali z referenčnim modelom z zelo gosto mrežo prostorskih končnih elementov. Šlo je za največje pomike pri statični obtežbi lastne teže in za osnovne lastne frekvence.



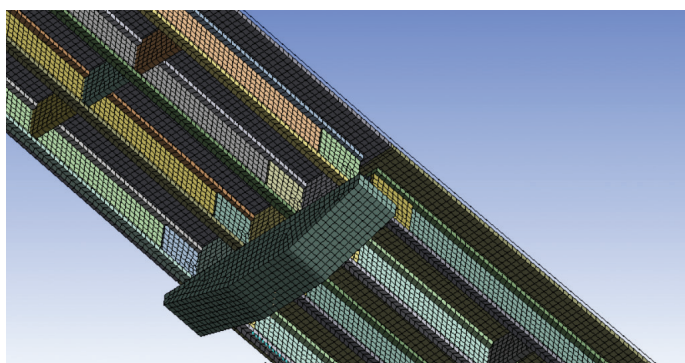
Slika 4. Numerični model desnega viadukta, izdelan v programu Ansys [Ansys, 2021]. Prostorski prikaz (zgoraj) in tlorski z označenimi mejami med zavnimi enotami (spodaj).

Model desnega viadukta je bil narejen na naslednji način (slika 4):

- Podporni stebri so modelirani z linijskim končnim elementom (BEAM188), ki temelji na Timošenkovski teoriji nosilcev. Ima dve vozlišči, uporablja linearno interpolacijo za pomike in zasuke ter ima eno integracijsko točko, ker so notranje sile konstantne po elementu.
- Konzole na vrhu stebrov so modelirane s prostorskim končnim elementom (SOLID186), pri čemer smo v ravnini stika linijskega in prostorskih končnih elementov namestili tog prerez. Ta element je 20-voziščni 3D-element s kvadratično interpolacijo pomikov ter reducirano integracijo z 8 integracijskimi točkami.
- Voziščna plošča, vzdolžni I-nosilci in prečniki so modelirani s ploskovnim končnim elementom (SHELL181). Gre za 4-voziščni element z nekompatibilnimi membranskimi pomiki in 4-točkovno numerično integracijo.
- Robni venci (skupaj s hodnikom in betonsko varnostno ograjo) so modelirani z linijskimi elementi (BEAM188) primerne prereza.
- Ploskovne in linijske končne elemente, uporabljene za modeliranje voziščne plošče, (pasnic in stojin) vzdolžnih I-nosilcev, prečnikov ter robnega venca (s hodnikom in ograjo),

smo povezali v celoto z upoštevanjem ekscentričnosti težiščnih ravnin in osi.

- Togost elastomernega ležišča med konzolo in spodnjo pasnico I-nosilca smo modelirali z vzmetnim končnim elementom (»Bushing Joint«). Uporabili smo tri translacijske vzmeti, eno osno in dve strižni, hkrati pa smo (skladno z dokumentacijo proizvajalca [Mageba, 2021]) preprečili rotacije ležišča. Na viaduktu so nameščeni štirje tipi ležišč, njihove togosti smo povzeli po proizvajalčevem katalogu. Za tip A (dimenzij 250 x 400 x 41 mm) je npr. osna togost 10757,7 kN/mm, strižna pa 3,10 kN/mm.
- Stebre smo na dnu modelirali kot vpete.
- Model prekladne konstrukcije nima stika med zavornimi enotami (dilatacije niso bile modelirane, ker le malenkostno prispevajo k togosti).
- Prednapetje vzdolžnih nosilcev in prečnikov ni bilo modelirano. Prednapetje vpliva na togost konstrukcije, vendar se ta vpliv le malo izrazi pri rezultatih modalne analize. To se vidi na primer v [Pepi, 2019], kjer so obravnavali most s poševnimi zategami. Enkrat so naredili navadno modalno analizo, drugič pa modalno analizo z upoštevanjem sil zaradi lastne teže in prednapetja v zategah, razlika pa je bila med 0,06 % in 2,49 % za prvih 8 lastnih frekvenc.
- Uporabljene materialne karakteristike elementov so opisane v poglavju 4.
- Karakteristična dolžina uporabljenih končnih elementov znaša približno 0,4 m, v modelu je okoli 126.000 elementov in 195.000 vozlišč (sliki 4 in 5), kar omogoča obvladljive računске čase pri kalibraciji.



Slika 5. Mreža končnih elementov za vzdolžne I-nosilce, prečnike, ploščo in konzolno glavo stebra (opomba: tudi ploskovni in linijski končni elementi so prikazani kot 3D-telesa).

4 KALIBRACIJA TOGOSTI PREKLADNE KONSTRUKCIJE

	1. os [kN]	medosna razdalja [m]	2. os [kN]	medosna razdalja [m]	3. os [kN]	medosna razdalja [m]	4. os [kN]	medosna razdalja [m]	5. os [kN]
3-osno vozilo	68	3,3	76	1,3	76	/	/	/	/
5-osno vozilo 113	71	3,6	90	5,6	77	1,3	77	1,3	77
5-osno vozilo 122	68	3,3	88	1,35	88	5,17	76	1,33	76

Tabela 1. Porazdelitev teže po oseh in medosne razdalje testnih vozil [Žnidarič, 2019a].

Za kalibracijo togosti prekladne konstrukcije smo uporabili izmerjene specifične deformacije vzdolžnih nosilcev pri prehodu treh težkih testnih vozil (z znano razporeditvijo teže po oseh) čez viadukt po voznem pasu (slika 6). Vsa vozila so bila pred začetkom meritev stehtana, njihovo porazdelitev teže po oseh in medosne razdalje pa prikazuje tabela 1 [Žnidarič, 2019a]. 5-osni vozili 113 in 122 se razlikujeta glede na medosne razdalje in obremenitve po oseh. Posamezno vozilo je prečkalo objekt 20-krat, in sicer 14-krat pri hitrosti 80 km/h in 6-krat pri hitrosti 70 km/h. Skupaj je bilo izvedenih 60 kalibracijskih voženj.

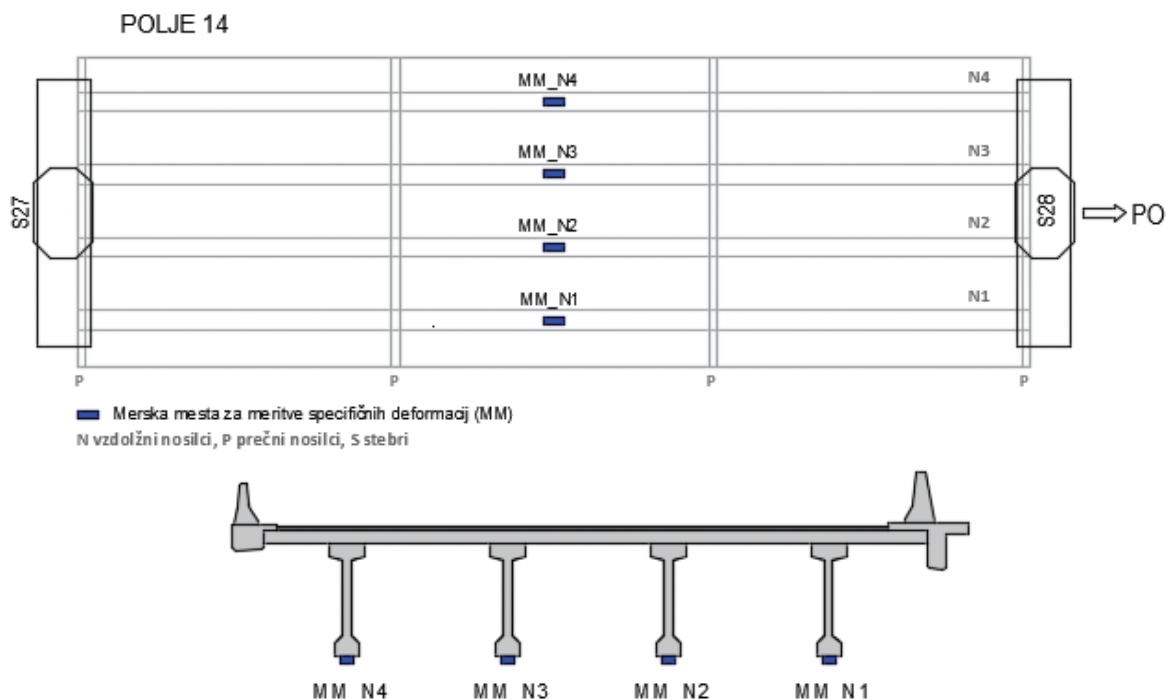


Slika 6. Kalibracijski vozili: levo, 3-osno vozilo; desno, 5-osno vozilo 113 [Žnidarič, 2018].

Kot primerne vrednosti za kalibracijo smo vzeli povprečje največjih izmerjenih specifičnih deformacij, ki so bile odčitane iz časovno zglajenih grafov, z namenom, da se izničijo dinamični vplivi zaradi gibanja vozila [Žnidarič, 2019b]. Te vrednosti, skupaj s standardnimi deviacijami in številom voženj, so podane v tabeli 2. Časovno zglajeni signali, ki naj bi predstavljali približek statičnemu odzivu, so bili določeni s filtriranjem z nizkopasovnim filtrom pri 2,42 Hz, ki je bil določen s postopkom DAF (dynamic application factor), opisanim v [Kalin, 2021].

Meritve specifičnih deformacij pri prečkanju vozil čez objekt so bile izvedene v 14. polju desnega viadukta na sredini razpetine na spodnjem delu vzdolžnih I-nosilcev. Lokacije merskih mest so shematsko prikazane na sliki 7. Posamezno mersko mesto je vsebovalo 2 oziroma 3 merilne lističe, zato je bila povprečna vrednost specifične deformacije na nosilcu N1 izračunana iz 40 meritev, na ostalih nosilcih (N2, N3 in N4) pa iz 60 meritev.

Pri kalibraciji smo predpostavili, da so bile največje specifične deformacije izmerjene, ko je bilo vozilo na sredini razpona polja. Iz opisanega se vidi, da imajo rezultati meritev precejšnjo negotovost, vendar smo jih kljub temu uporabili za kalibracijo togosti voziščne plošče, I-nosilcev, prečnikov ter robnega venca s hodnikom in varnostno ograjo.



Slika 7. Shematski prikaz merilnih mest specifičnih deformacij na nosilcih v 14. polju.

Specifične deformacije $\cdot 10^{-6}$		MM_N1	MM_N2	MM_N3	MM_N4
3-osno vozilo	povprečje	20,0	28,2	29,3	20,2
	standardna deviacija	0,8	1,7	2,7	4,3
	število meritev	40	60	60	60
5-osno vozilo 113	povprečje	30,0	35,5	35,7	27,6
	standardna deviacija	1,0	1,3	1,3	1,3
	število meritev	40	60	60	60
5-osno vozilo 122	povprečje	32,5	38,5	37,3	28,2
	standardna deviacija	1,7	1,6	1,8	1,7
	število meritev	40	60	60	60

Tabela 2. Izmerjene specifične deformacije.

Kalibracijo smo izvedli z linearno statično analizo in genetskim optimizacijskim algoritmom, vgrajenim v program Ansys. Orientacijske vrednosti elastičnih modulov elementov konstrukcije smo povzeli po projektu zadnje rekonstrukcije (ki ga je pripravil Promico, d. o. o.), in sicer: voziščna plošča 33 GPa (C30/37), I-nosilci 35 GPa (C40/50), prečniki 37 GPa (C50/60), konzolne glave 33 GPa (C30/37) in stebri 34 GPa (C35/45) (za robni venec, hodnik in zaščitno betonsko ograjo ni podatkov). Za Poissonov količnik smo izbrali vrednost 0,2. Omenimo naj, da so v projektu navedeni tudi podatki za in-situ izmerjen modul elastičnosti betona za voziščno ploščo in nosilce, in sicer 35 GPa in 37 GPa.

Za optimiziranje smo izbrali 4 parametre, in sicer elastične module voziščne plošče, I-nosilcev, prečnikov in robnega

venca (s hodnikom in ograjo). Namenska funkcija je bila vsota razlike kvadratov (dvanajstih) eksperimentalnih specifičnih deformacij na sredini spodnjih pasnic I-nosilcev iz tabele 2 in pripadajočih numerično izračunanih vrednosti za tri linearne statične obtežne primere (torej za vsa tri vozila iz tabele 1). Območja, kjer je genetski algoritem iskal optimalne vrednosti izbranih parametrov, so predstavljena v tabeli 3. Uporabili smo model celotnega viadukta, mrežo v 14. polju pa smo zgostili, tako da je karakteristična dimenzija elementov v tem polju znašala 0,15 m. Teže vozil smo podali s točkovnimi silami, ki ustrezajo težam osi iz tabele 1. Algoritem za genetsko optimizacijo je generiral 259 vzorcev za različne vrednosti parametrov in se postopoma približal tistemu, pri katerem se numerični in eksperimentalni rezultati najbolje ujemajo.

	spodnja meja [GPa]	zgornja meja [GPa]	kalibrirana vrednost [GPa]
plošča	28	38	33,3
nosilci	30	40	36,3
prečniki	30	40	37,0
robni venec (s hodnikom in ograjo)	27	37	30,6

Tabela 3. Območja vrednosti parametrov (elastičnih modulov) za izvajanje optimizacije in kalibrirane vrednosti.

vrednosti približajo dejanskim (povprečnim) materialnim vrednostim.

V tabeli 4 so prikazane specifične deformacije posameznih nosilcev, izračunane s kalibriranim modelom, in relativna odstopanja med numeričnimi in eksperimentalnimi vrednostmi. Numerični rezultati se zadovoljivo ujemajo z eksperimentalnimi. Odstopanja so pri obeh 5-osnih vozilih manjša kot pri 3-osnem vozilu. V splošnem je boljše ujemanje rezultatov pri notranjem paru nosilcev N2 in N3 kot pri zunanjem paru N1 in N4. Morda zato, ker so bili N1 in N4 sanirani. Odstopanja pri obeh 5-osnih vozilih na notranjih nosilcih znašajo do 2,2 %, pri zunanjih nosilcih pa do 8 %. Pri 3-osnem vozilu so te vrednosti višje – na notranjih nosilcih do 11,9 %, na zunanjih pa do 12,4 %. Na sliki 8 je podana grafična primerjava izmerjenih

	3-osno vozilo				5-osno vozilo 113				5-osno vozilo 122			
	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
eksperiment (povprečje) $\cdot 10^{-6}$	20,0	28,2	29,3	20,2	30,0	35,5	35,7	27,6	32,5	38,5	37,3	28,2
numerične vrednosti $\cdot 10^{-6}$	17,5	26,7	25,8	18,2	29,1	35,9	34,9	28,9	29,9	39,1	37,1	29,3
odstopanje [%]	12,4	5,5	11,9	9,8	3,1	-1,0	2,2	-4,6	8,0	-1,5	0,5	-4,0

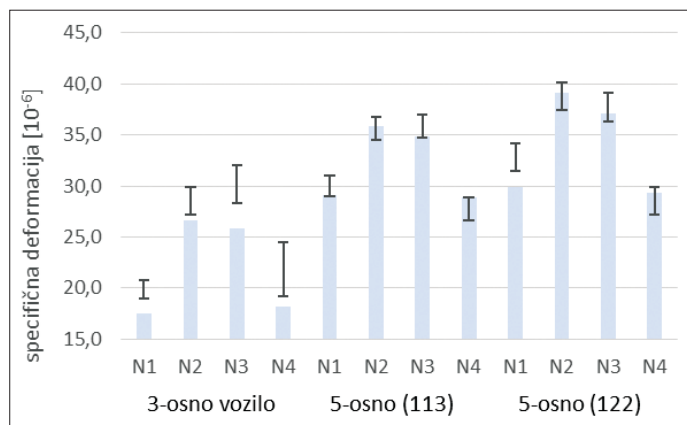
Tabela 4. Primerjava eksperimentalnih in s kalibriranim modelom izračunanih specifičnih deformacij.

Vrednosti izbranih parametrov po kalibraciji so podane v tabeli 3. Kalibrirani modul elastičnosti za ploščo je 33,3 GPa, kalibrirani modul elastičnosti za nosilce pa 36,3 GPa. Rezultata sta dokaj blizu zgoraj omenjenima in-situ izmerjenima vrednostma (35 in 37 GPa), kar je spodbudno. Treba je namreč povedati, da kalibrirane vrednosti niso nujno realne vrednosti elastičnih modulov posameznih konstrukcijskih elementov objekta, saj vsebujejo tudi negotovosti (oziroma napake) meritev (ki so v našem primeru lahko precejšnje), modelsko napako (ki seveda obstaja pri vsakem modelu) ter diskretizacijsko napako (ki se manjša z večanjem števila končnih elementov in je v našem primeru majhna). Čim manjše so omenjene tri vrste napak, tem bolj se kalibrirane

in izračunanih vrednosti po kalibraciji. Izmed 12 meritev je 5 takšnih, kjer numerične vrednosti ne padejo v območje standardne deviacije, od tega so 4 povezane s 3-osnim vozilom. To nakazuje, da merske napake pri 3-osnih in 5-osnih vozilih niso enake narave. Če se kalibrirane vrednosti približujejo eksperimentalnim za 5-osni vozili, se hkrati oddaljujejo za 3-osno, in obratno. Kalibracija je potrdila, da betonska zaščitna ograja prispeva k togosti prekladne konstrukcije. Brez modeliranja zaščitne ograje so bila odstopanja med numeričnimi in eksperimentalnimi vrednostmi mnogo večja (za območja parametrov iz tabele 3).

5 LASTNE FREKVENCE IN NIIHAJNE OBLIKE

Numerični model s kalibrirano togostjo prekladne konstrukcije smo uporabili za modalno analizo. Rezultati modalne analize so lastne frekvence, nihajne oblike in efektivne modalne mase viadukta med normalnim delovanjem. Pri tovrstni analizi je potrebna ocena mase konstrukcije. Za vse nosilne dele viadukta smo predpostavili specifično težo 25 kN/m^3 , upoštevali pa smo tudi asfaltno oblogo debeline 8 cm s specifično težo 22 kN/m^3 . Iz teh podatkov se je izračunala masna matrika, dodatne mase po konstrukciji nismo podajali. Izbrani nihajni časi in razmerja efektivnih modalnih mas in celotne mase (v nadaljevanju to razmerje ohlapno imenujemo kar efektivna modalna masa) so zbrani v tabeli 5 in na slikah 9 in 10, nihajne oblike pa na slikah 11-19. Omeniti je treba, da so za namen nazornega prikaza amplitude nihajnih oblik zelo povečane.



Slika 8. Grafična primerjava eksperimenta in kalibriranega modela.

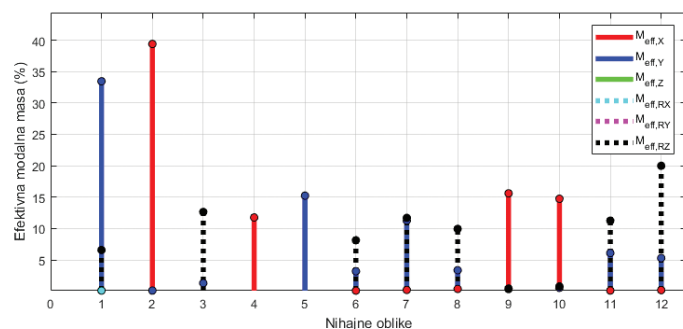
Nih. oblika	Frekvenca [Hz]	$M_{eff,X}$ [Hz]	$M_{eff,Y}$ [Hz]	$M_{eff,Z}$ [Hz]	$M_{eff,RX}$ [Hz]	$M_{eff,RY}$ [Hz]	$M_{eff,RZ}$ [Hz]	Prevladujoče nihanje
Nihajne oblike od 1 do 12 (frekvenca od 0,53 do 0,98 Hz)								
1	0,53		33 %				7 %	Kombinacija TY in RZ (E2)
2	0,56	40 %						TX (E2)
3	0,60		1 %				13 %	Kombinacija RZ in TY (E2)
4	0,67	12 %						TX (E3)
5	0,69		16 %					Kombinacija TY in RZ (E3)
6	0,76		3 %				8 %	Kombinacija RZ in TY (E3)
7	0,83		12 %				12 %	Kombinacija TY in RZ (E1)
8	0,84	1 %	3 %				11 %	Kombinacija TY in RZ (E4)
9	0,87	16 %					1 %	TX (E4)
10	0,88	15 %	1 %				1 %	TX (E1)
11	0,93		6 %				11 %	Kombinacija RZ in TY (E4)
12	0,98		5 %				20 %	Kombinacija RZ in TY (E1)
Izbrane nihajne oblike od 13 do 30 (frekvenca od 1,71 do 2,78 Hz)								
13	1,71							Upogib okoli Z (E2)
14	2,09							Nihanje enega stebra v X
18	2,41							Nihanje več stebrov v X
Izbrane nihajne oblike, večje od 31 (frekvenca večja od 2,87 Hz)								
44	3,61							Upogibno nihanje več polj (E1)
45	3,62							Torzijsko nihanje več polj (E4, E3)

TX – pretežno translacijska nihajna oblika v vzdolžni smeri viadukta X
 TY – pretežno translacijska nihajna oblika v prečni smeri viadukta Y
 RZ – pretežno torzijska nihajna oblika okoli navpične Z-osi
 E1, E2, E3, E4 so zavorne enote (E1 je najbližja enota v smeri Ljubljane)

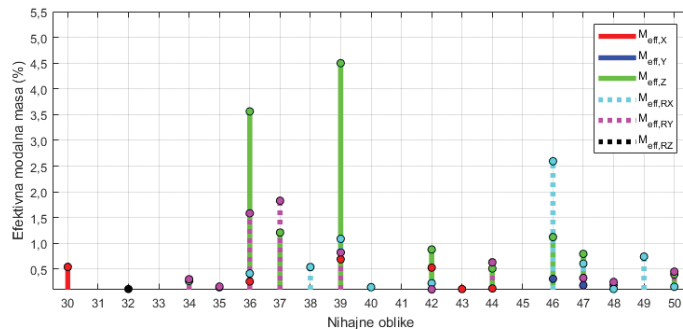
Tabela 5. Nihajni časi in efektivne modalne mase za izbrane nihajne oblike.

Prvih 12 frekvenc je manjših od 1 Hz (med 0,53 Hz in 0,98 Hz). Iz pripadajočih nihajnih oblik (slike 11–16) in efektivnih modalnih mas (slika 9) se vidi, da gre za nihanje zavornih enot v smislu

okvirjev s togo prečko. Nihajne oblike 2, 4, 9 in 10 so translacijske oblike v smeri osi viadukta X (efektivne modalne mase $M_{eff,X}$ so med 15 % in 40 %). Nihajne oblike 1, 3, 5, 6, 7, 8, 11 in 12 so kom-



Slika 9. Efektivne modalne mase za prvih 12 nihajnih oblik.

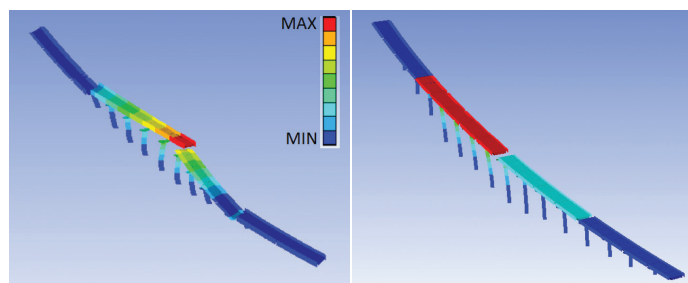


Slika 10. Efektivne modalne mase za nihajne oblike od 30 do 50.

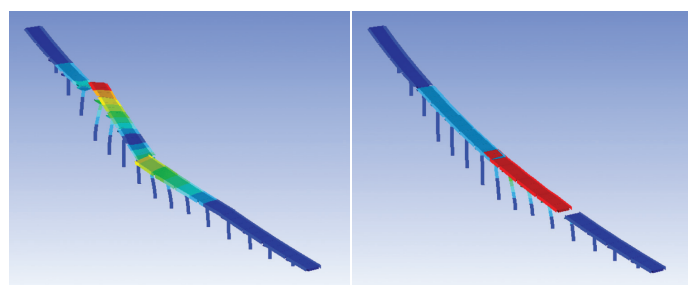
binacije torzije zavorne enote okoli navpične osi Z in translacije v prečni smeri Y. Za vsako zavorno enoto sta dve – v splošnem v eni prevladuje prečna translacija, v drugi pa torzija (efektivne modalne mase so med 3 in 33 % za $M_{\text{eff},Y}$ in med 8 in 20 % za $M_{\text{eff},RZ}$). Prvih 12 nihajnih oblik se vzbudi predvsem pri horizontalnem vzbujanju in imajo pomembno vlogo pri potresnih analizah, npr. ([Vidrih, 2006], [Rejec, 2006], [Jovanović, 2006]).

V območju frekvenc med 1,71 in 2,78 Hz (tj. med 13. in 30. nihajno obliko) imamo tudi oblike s skoraj ničnimi efektivnimi ma-

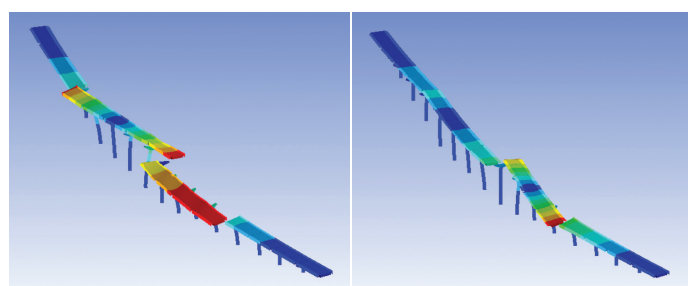
sami v vseh smereh (tabela 5). Lahko gre za upogibno nihanje posamezne zavorne enote (oblika 13 na sliki 17), ki je takšno, da je produkt nihajne oblike ψ , masne matrike $\mathbf{M}$ in vektorja smeri $\mathbf{D}$, ki določa efektivno modalno maso, približno nič. Del mase se premakne v pozitivno smer, drugi del pa hkrati v negativno smer, kot je to prikazano za ilustrativni primer na sliki 18. Lahko pa gre za izolirano nihanje stebrov – slika 19 levo prikazuje nihanje enega stebra, slika 19 desno pa nihanje več stebrov – kjer je razmerje efektivne modalne mase in celotne mase zelo majhno, ker je vzbujena masa zanemarljiva.



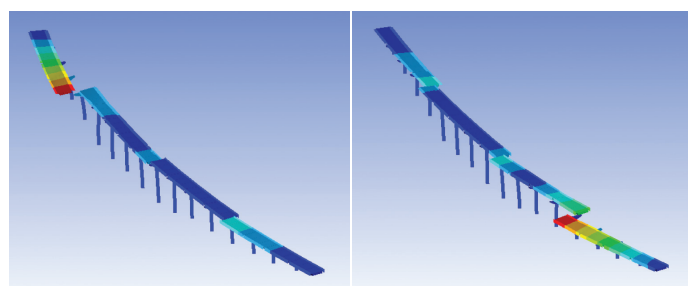
Slika 11. 1. in 2. nihajna oblika.



Slika 12. 3. in 4. nihajna oblika.

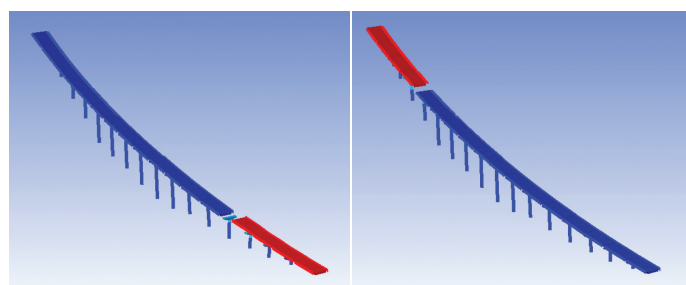


Slika 13. 5. in 6. nihajna oblika.

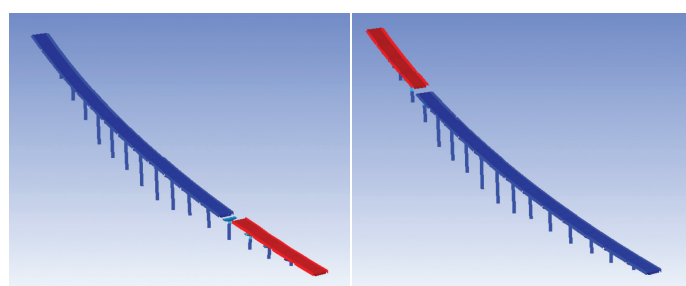


Slika 14. 7. in 8. nihajna oblika.

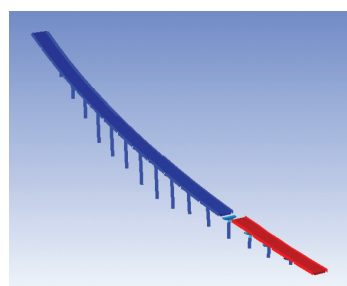
Upogibno in osno torzijsko nihanje prekladne konstrukcije se začne pri nihajni obliki 31 s pripadajočo frekvenco 2,87 Hz. Pri teh nihajnih oblikah imamo predvsem efektivne modalne mase $M_{\text{eff},Z}$, $M_{\text{eff},Y}$ in $M_{\text{eff},RZ}$, ki dajejo informacije o translacijskem nihanju v vertikalni smeri Z, upogibnem nihanju okoli prečne osi viadukta Y in torzijskem nihanju okoli osi viadukta X. Za nekatere nihajne oblike je lahko, podobno kot prej, efektivna modalna masa približno nič. Ker je prekladna konstrukcija iz štirih zavornih enot in poteka preko 17 polj, obstajajo številne oblike nihanja. Na sliki 20 sta prikazana tipična načina – upogibno in osno torzijsko nihanje enega ali več polj. Pričakovati je, da se takšne oblike vzbudijo pri vožnji vozil čez viadukt.



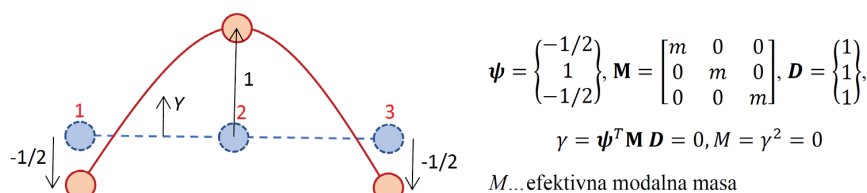
Slika 15. 9. in 10. nihajna oblika.



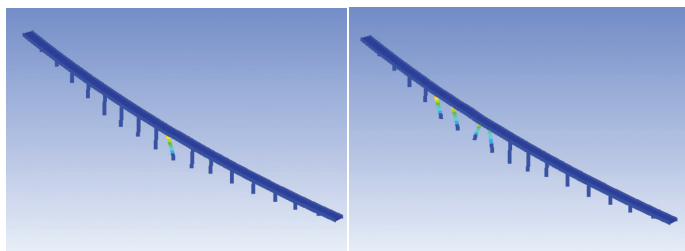
Slika 16. 11. in 12. nihajna oblika.



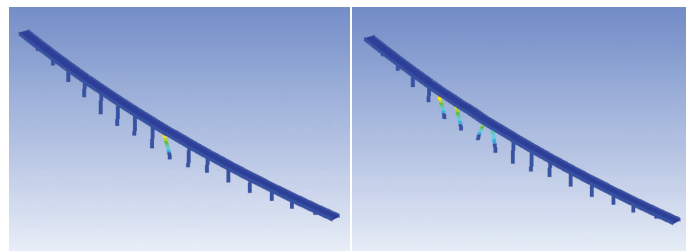
Slika 17. 13. nihajna oblika.



Slika 18. Ilustracija nihajne oblike z nično efektivno modalno maso (1D primer s tremi točkovnimi masami).



Slika 19. 14. in 18. nihajna oblika.



Slika 20. 44. in 45. nihajna oblika.

Model prve zavorne enote		Model celotnega mostu		Odstopanje v %	Komentar
Nihajna oblika	Frekvenca	Nihajna oblika	Frekvenca		
1	0,804	7	0,827	2,7	G
2	0,868	10	0,876	0,8	G
3	0,980	12	0,984	0,3	G
4	2,356	30	2,773	15,0	Nihanje stebra v X
5	2,572	26	2,619	1,8	G
6	2,837	32	2,913	2,6	L
7	3,364	40	3,362	0,0	L
8	3,611	44	3,609	-0,1	L
9	3,778	51	3,767	-0,3	L
10	3,812	53	3,813	0,0	L

Tabela 6. Primerjava prvih 10 lastnih frekvenc, ki jih dobimo, če modeliramo samo prvo zavorno enoto, z lastnimi frekvencami, ki jih dobimo z modeliranjem celotnega viadukta (G – prevladujoče nihanje podporne konstrukcije; L – prevladujoče nihanje prekladne konstrukcije).

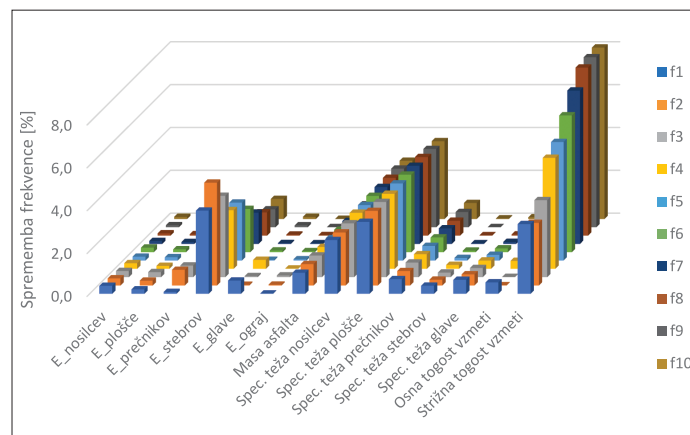
Na koncu tega poglavja podajamo še rezultate modalne analize za primer, ko modeliramo samo prvo zavorno enoto. Model prve zavorne enote preostali del viadukta enostavno zanemari. V tabeli 6 primerjamo rezultate. Očitno je, da so razlike v izračunanih osnovnih lastnih frekvencah majhne, kar kaže na to, da zavorne enote nihajo skoraj neodvisno druga od druge. Na podlagi rezultatov v tabeli 6 lahko zaključimo, da dovolj natančne osnovne lastne frekvence izračunamo tudi, če modeliramo samo posamezne zavorne enote (če ne gre ravno za nihanje stebra med dvema zavernima enotama).

6 OBČUTLJIVOSTNA ANALIZA

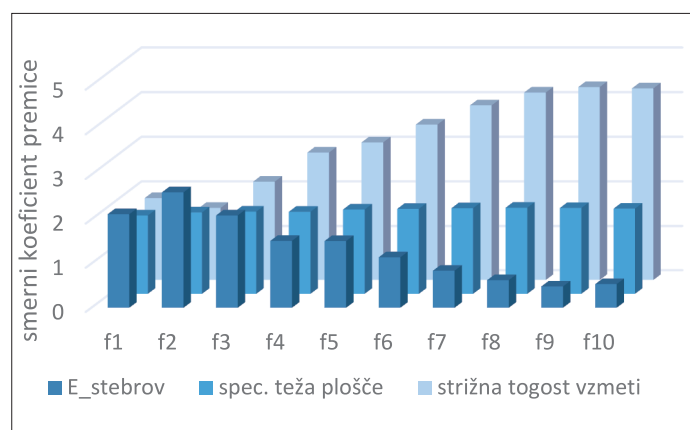
Zanimalo nas je, kateri parametri modela imajo največji vpliv na frekvence. Zato smo izvedli enostavno občutljivi-

vostno analizo po metodi »eden naenkrat«: izbranemu parametru smo spremenili osnovno vrednost za 20 % in pogledali vpliv na prvih 10 frekvenc. Rezultati na sliki 21 kažejo, da so najbolj vplivni elastični modul stebrov, specifična teža plošče in nosilcev (torej togost podporne konstrukcije) in masa prekladne konstrukcije, kar je logično glede na oblike s slik 11-16, ter strižna togost vzmeti. Za te tri najbolj vplivne parametre smo naredili še občutljivostno analizo z več podatki: izračunali smo frekvence pri osnovni vrednosti ter pri ± 10 % in ± 20 %. Smerne koeficiente regresijskih premic za te rezultate podajamo na sliki 22. Iz grafov na slikah 21 in 22 lahko razberemo, da imajo nekateri parametri (npr. modul elastičnosti stebrov) večji vpliv na nižje frekvence, drugi (npr. strižna togost vzmeti) pa večji vpliv na višje frekvence.

Masa prekladne konstrukcije vpliva na prvih 10 frekvenc približno enako. Grafi na slikah 20 in 21 so podobni (za 3 izbrane parametre).



Slika 21. Občutljivostna analiza.



Slika 22. Koeficienti regresijskih premic za tri najbolj vplivne parametre.

7 ZAKLJUČKI

Predstavili smo numerično oceno lastnih frekvenc in nihajnih oblik desnega objekta viadukta Ravbarkomanda. Zaradi zasnove, ki viadukt deli v štiri zavorne enote, so nihajne oblike viadukta raznovrstne. Osnovne oblike so takšne, da posamezne zavorne enote dokaj neodvisno nihajo ena od druge, in sicer tako, kot bi nihal prostorski okvir s togo prečko. Tudi pri višjih nihajnih oblikah, ki se aktivirajo pri vožnji vozil in kjer niha prekladna konstrukcija, se praviloma upogibne in osno torzijske oblike raztezajo le čez eno zavorno enoto. Le izjemoma se pojavijo nihajne oblike, ki se hkrati raztezajo čez dve zavorni enoti. Pomemben zaključek naših numeričnih analiz je, da zaradi zasnove viadukta lahko dovolj natančne osnovne lastne frekvence izračunamo tudi, če modeliramo samo posamezne zavorne enote. Iz občutljivostne analize pa se lahko zaključi, da imajo največji vpliv na spremembo

frekvenc togost podporne konstrukcije, masa prekladne konstrukcije in togost elastomernih vozlišč.

Dober numerični model viadukta predstavlja pomembno dodano vrednost eksperimentalni določitvi dinamičnih karakteristik. Z njim namreč dobimo predstav o tem, v kakšnem območju so lastne frekvence in kje je najbolj smiselno namestiti senzorje. Po končanih meritvah eksperimentalnih dinamičnih karakteristik, ki se načrtujejo, se bo izvedlo posodabljanje prikazanega modela desnega objekta viadukta Ravbarkomanda po načinu, predstavljenem v [Kurent, 2021].

8 ZAHVALA

Prispevek je rezultat raziskav, narejenih v okviru projekta Podatkovno podprto modeliranje obnašanja gradbenih konstrukcij (J2-2490), ki ga financira Agencija za raziskovalno delo Slovenije (ARRS). Posebna zahvala gre Družbi za avtoceste republike Slovenije (DARS), ki je omogočila uporabo rezultatov, dobljenih pri vzpostavitvi permanentnega monitoringa na viaduktu Ravbarkomanda.

9 LITERATURA

Ansys 2020 R1, ANSYS, Inc., 2020.

Anžlin, A., Bohinc, U., Hekič, D., Kreslin, M., Kalin, J., Žnidarič, A., Comprehensive permanent remote monitoring system of a multi-span highway bridge, Proceedings of the 2nd International Conference CoMS 2020/21, Volume 2, pp.12., 2021.

Cafnik, F., Hvastija, B., Veršnak, K., Viadukt Ravbarkomanda. Projekt in izvedba. Gradbeni vestnik, 20, 271-277, 1971.

Čabrilo, D., Rekonstrukcija viadukta Ravbarkomanda, Gradbeni vestnik, 46, 328-332, 1997.

Jovanović, S. Analiza viadukta Ravbarkomanda v skladu s standardom EC 8/2, visokošolska diploma, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2006.

Kalin, J., Žnidarič, A., Anžlin, A., Kreslin, M., Measurements of bridge dynamic amplification factor using bridge weigh-in-motion data. Structure and Infrastructure Engineering, str. 1-13, DOI: 10.1080/15732479.2021.1887291, 2021.

Kurent, B., Brank, B., Ao, W. K., Model updating of seven-storey cross laminated timber building designed on frequency-response-functions-based modal testing, Structure and Infrastructure Engineering, 19 strani, DOI: 10.1080/15732479.2021.1931893, 2021.

Mageba, Lasto@Block Elastomeric Bearings, spletna stran

https://www.mageba-group.com/kr/data/docs/ko_KR/3131/DATASHEET-LASTO-BLOCK-ch-en.pdf?v=2.1, datum vpogleda 23.4.2021, 2021.

Pepi, C., Gioffre, M., Grigoriu, M. D., Parameters identification of cable stayed footbridges using Bayesian inference, *Meccanica*, 54:1403–1419, 2019.

Promico d.o.o., Recenzijsko poročilo št. R-257/16 o pregledu PZI načrtov gradbenih konstrukcij za rehabilitacijo viaduktov Ravbarkomanda VA0174 (desni) v km 6,337 in VA0175 (levi) v km 6,347 na A1/0055 Unec-Postojna (desni objekt) in A1/655 Unec-Postojna (levi objekt), Zvezek 2/20 – Načrt rehabilitacije viadukta Ravbarkomanda VA0174 (desni), 2016a.

Promico d.o.o., Recenzijsko poročilo št. R-257/16 o pregledu PZI načrtov gradbenih konstrukcij za rehabilitacijo viaduktov Ravbarkomanda VA0174 (desni) v km 6,337 in VA0175 (levi) v km 6,347 na A1/0055 Unec-Postojna (desni objekt) in A1/655 Unec-Postojna (levi objekt), Zvezek 3/20 – Sanacija podporne konstrukcije, 2016b.

Promico d.o.o., Recenzijsko poročilo št. R-257/16 o pregledu PZI načrtov gradbenih konstrukcij za rehabilitacijo viaduktov Ravbarkomanda VA0174 (desni) v km 6,337 in VA0175 (levi) v km 6,347 na A1/0055 Unec-Postojna (desni objekt) in A1/655 Unec-Postojna (levi objekt), Zvezek 4/20 – Sanacija prekladne konstrukcije, 2016c.

Rejec, K., Analiza potresnega odziva in potresne utrditve viadukta Ravbarkomanda – vzdolžna smer, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2006.

Škafar, T., Rehabilitacija viadukta Ravbarkomanda, magistrsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, 2018.

Turk, I., Oman, M., Ljubetič, V., Inovativne in prilagojene rešitve ojačitve viaduktov Ravbarkomanda med letoma 2017 in 2019, *Gradbeni vestnik*, 68, 6-12, 2019.

Vidrih, Z., Analiza potresnega odziva in potresne utrditve viadukta Ravbarkomanda – prečna smer, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2006.

Žnidarič, A., Anžlin, A., Kreslin, M., Kalin, J., Bohinc, U., 2018. Poročilo o postavitvi permanentnega monitoringa na desnem viaduktu Ravbarkomanda VA0174-D in vrednotenje preliminarne rezultate meritev, Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2018.

Žnidarič, A., Anžlin, A., Kreslin, M., Kalin, J., Bohinc, U., 2019. Poročilo o postavitvi permanentnega monitoringa na desnem VA0174-D in levem VA0175-L viaduktu Ravbarkomanda in vrednotenje preliminarne rezultate meritev, Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2019a.

Žnidarič, A., Anžlin, A., Kreslin, M., Kalin, J., Bohinc, U., 2019. Poročilo o vrednotenju permanentnega monitoringa desnega VA0174-D in levega VA0175-L viadukta Ravbarkomanda, Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2019b.