

# Ispitivanje i analiza parametara velikih lučnih mostova

Mladenko Rak, Joško Krolo, Marko Bartolac

## Ključne riječi

lučni most,  
most Cetina kod Trilja,  
most Maslenica,  
ispitivanje parametara,  
analiza parametara,  
usporedba parametara

## Key words

arch bridges,  
Cetina Bridge in Trilj,  
Maslenica Bridge,  
parameter testing,  
parameter analysis,  
comparison of parameters

## Mots clés

ponts en arc,  
Pont de Cetina près de  
Trilj, Pont de Maslenica,  
essai de paramètres,  
analyse de paramètres,  
comparaison de  
paramètres

## Ключевые слова

арочный мост,  
мост Цетина у Трилья,  
мост Масленица,  
испытание параметров,  
анализ параметров,  
сравнение параметров

## Schlüsselworte

Bogenbrücken,  
Brücke Cetina bei Trilj,  
Brücke Maslenica,  
Parameteruntersuchung,  
Parameteranalyse,  
Parametervergleich

M. Rak, J. Krolo, M. Bartolac

Pregledni rad

## Ispitivanje i analiza parametara velikih lučnih mostova

Opisano je statičko i dinamičko ispitivanje dvaju lučnih mostova približno jednakih raspona od različitih materijala. Most Cetina kod Trilja (raspon 140 m) napravljen je od betona. Novi most Maslenica (raspona 155 m) izgrađen na temeljima starog, u ratu srušenog mosta napravljen je od čelika sa spregnutom betonskom kolničkom pločom. U radu se uspoređuju odgovarajući statički i dinamički parametri lukova tih dvaju velikih lučnih mostova dobiveni tijekom pokusnog ispitivanja.

M. Rak, J. Krolo, M. Bartolac

Subject review

## Testing and analysis of parameters for big arch bridges

The static and dynamic testing of two arch bridges, approximately equal in span but made of different materials, is described. The Cetina Bridge in Trilj (140 m in span) is made of concrete. The new Maslenica Bridge (155 m in span), built on foundations of the old bridge destroyed in war, is a composite steel/concrete structure, with the concrete deck slab. Appropriate static and dynamic arch parameters of these two big arch bridges, as obtained during load testing, are compared.

M. Rak, J. Krolo, M. Bartolac

Ouvrage de synthèse

## L'essai et l'analyse de paramètres pour les grands ponts en arc

La campagne des essais statiques et dynamiques pour deux ponts en arc, de portée semblable mais faits de matériaux différents, est décrite. Le Pont de Cetina à Trilj (140 m de portée) est construit en béton. Le nouveau Pont de Maslenica (155 m de portée), construit sur fondations du pont ancien détruit dans la guerre, est une construction mixte acier-béton, avec le tablier en béton. Les paramètres statiques et dynamiques des arcs de ces deux grands ponts en arc, obtenus au cours des essais de portance, sont comparés.

M. Rak, Ї. Кроло, М. Бартолац

Обзорная работа

## Испытания и анализ параметров крупных арочных мостов

Описаны статические и динамические испытания двух арочных мостов, имеющих приблизительно одинаковые пролеты и выполненных из различных материалов. Мост Цетина у Трилья (пролет 140 м) выполнен из бетона. Новый мост Масленица (пролет 155 м), построенный на фундаментах старого, разрушенного во время войны моста, выполнен из стали с сопряженной бетонной плитой проезжей части. В работе приводится сравнение соответствующих статических и динамических параметров арок этих двух крупных арочных мостов, полученных в процессе опытных испытаний.

M. Rak, J. Krolo, M. Bartolac

Übersichtsarbeit

## Untersuchung und Analyse der Parameter grosser Bogenbrücken

Beschrieben ist die statische und dynamische Untersuchung von zwei Bogenbrücken annähernd gleicher Spannweite aus verschiedenen Baustoffen. Die Brücke Cetina bei Trilje (Spannweite 140 m) ist aus Beton gebaut. Die neue Brücke Maslenica (Spannweite 155 m), erbaut auf den Lagern der alten, im Krieg zerstörten Brücke, ist aus Stahl mit Verbundfahrbahnplatte hergestellt. Im Artikel vergleicht man die entsprechenden statischen und dynamischen Parameter der Bögen dieser zwei grossen Bogenbrücken, erhalten in der Zeit der Probeuntersuchung.

Autori: Prof. dr. sc. **Mladenko Rak**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Joško Krolo**, dipl. ing. građ.; **Marko Bartolac**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

## 1 Uvod

### 1.1 Opis konstrukcije mosta preko rijeke Cetine kod Trilja

Betonska obostrano upeta lučna konstrukcija mosta preko rijeke Cetine (dalje: most Cetina) raspona je 140,27 m, visine strelice 21,5 m ( $L/f = 6,52$ ). Luk je oblika jednodijelnog sanduka, konstantnoga vanjskog obrisa i na najvećem dijelu konstantnoga poprečnog presjeka (slika 1.). Vanjske izmjere luka iznose  $B/H = 8,0/2,5$ ; debljina bočnih stijenki sanduka luka je 50 cm, a gornje i donje stijenske 40 cm s linearnim povećanjem na 60 cm od prvih stupova luka do pete. U petama i na mjestima oslanjanja stupova izvedene su vertikalne dijafragme debljine 3,0 m s otvorima za prolaz u sredini. Nadlučna konstrukcija je kontinuirana preko 10 jednakih raspona od 21,60 m. U svakom rasponu je 5 predgotovljenih usporedno položenih prednapetih nosača T presjeka, visine 120 cm, spojenih monolitnom kolničkom pločom debljine 20 cm. Rasponski se sklop oslanja na stupove i upornjake preko pokretnih i nepokretnih lončastih ležaja. Stupišta su sastavljena od dva stupa s monolitnim naglavnim gredama.



Slika 1. Most preko rijeke Cetine kod Trilja

### 1.2 Opis konstrukcije Masleničkoga mosta

Novi Maslenički most izgrađen je na temeljima i upornjacima starog mosta, srušenoga u Domovinskom ratu. Konstrukciju mosta čine dva dvozgloba čelična luka sandučastoga poprečnog presjeka na razmaku od osam metara, raspona  $L = 155,0$  m. Lukovi su međusobno povezani vjetrovnim spregom. Os luka, intrados i ekstrados oblikovani su kao kvadratne parabole s odnosom visine i raspona  $L/f = 3,0$  (slika 2.).

Nadlučnu konstrukciju čine čelični stupovi na rasponu 20,0 m i spregnuta kolnička konstrukcija od čelika i betona. Stupovi nad lukom su konstruirani sa zglobovima na oba kraja. Stupovi izvan luka također su sa zglobovima na krajevima osim portalnih stupova te stupova u osi N. Portalni su stupovi povezani sa spregom tako da čine jednu cjelinu. Kolnička se konstrukcija sastoji od

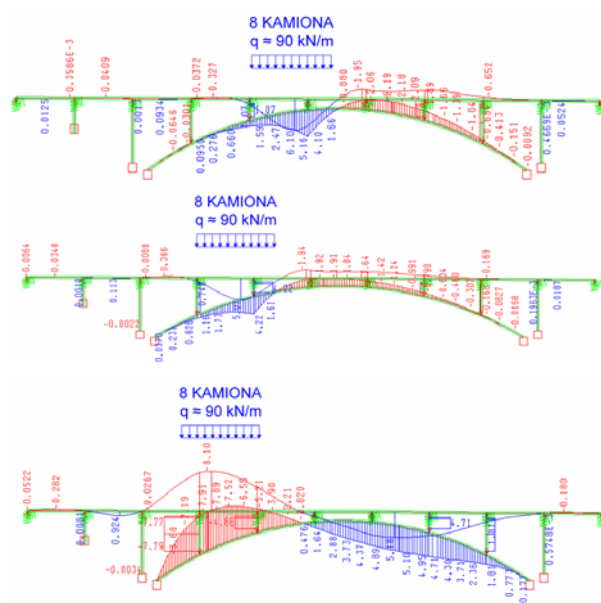
dvaju glavnih nosača spojenih poprečnim nosačima i armiranobetonskom pločom kolnika debljine  $d = 20$  cm.



Slika 2. Maslenički most na državnoj cesti D8

## 2 Program ispitivanja

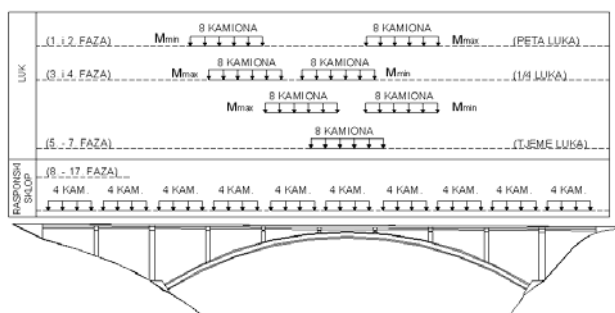
U skladu s HRN U.M1.046 [8] objavljeno je probno ispitivanje opisanih građevina statičkim i dinamičkim opterećenjem. Učinak probnog opterećenja mora u određenoj mjeri odgovarati učinku pokretnog opterećenja primijenjenog u statičkom proračunu odnosno u skladu s navedenom normom. Kako se u statičkom računu primjenjuju tipska opterećenja dana u odgovarajućim propisima za proračun cestovnih mostova, a za probno ispitivanje teški kamioni, potrebno je odrediti broj i masu kamiona tako da se dobiju adekvatne unutarnje sile. U tu se svrhu rabe odgovarajuće utjecajne linije za karakteristične poprečne presjeka luka (peta, četvrtina i tjeme) te odgovarajuće poprečne presjeka nadlučne konstrukcije (sredine raspona i oslonce) (slika 3.).



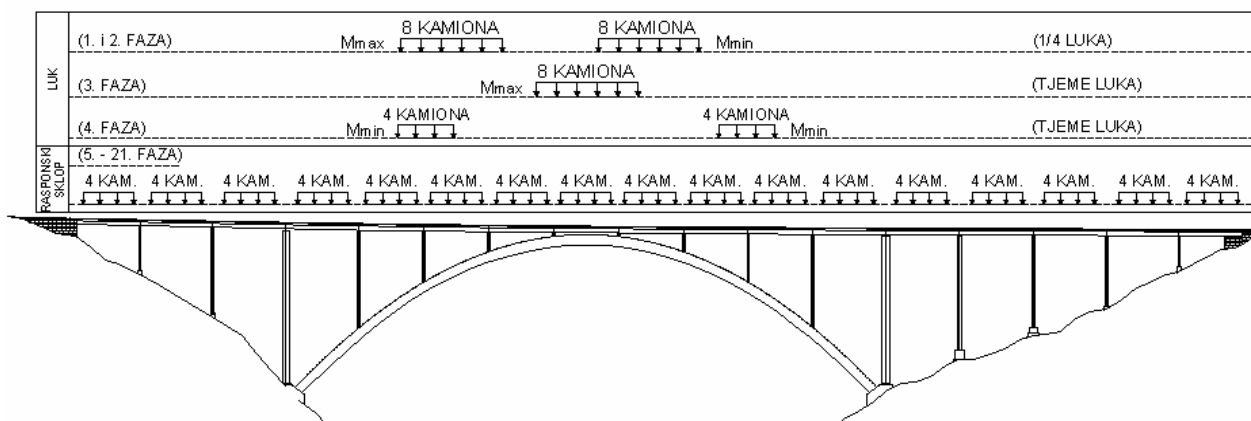
Slika 3. Utjecajne linije na mostu Cetina za karakteristične presjeka luka [1]

Karakteristične utjecajne linije za luk s pripadajućim opterećenjima vide se na slici 3. U svrhu smanjenja velikog broja faza opterećenja pri probnom ispitivanju koristi se simetrija ili približna simetrija konstrukcije mosta, a rabe se uglavnom samo utjecajne linije za momente savijanja u karakterističnim točkama konstrukcije mosta. Prema odgovarajućim utjecajnim linijama i raspoloživim pokretnim opterećenjem teškim kamionima, određeni su broj faza opterećenja te pripadni koeficijenti efikasnosti probnog opterećenja.

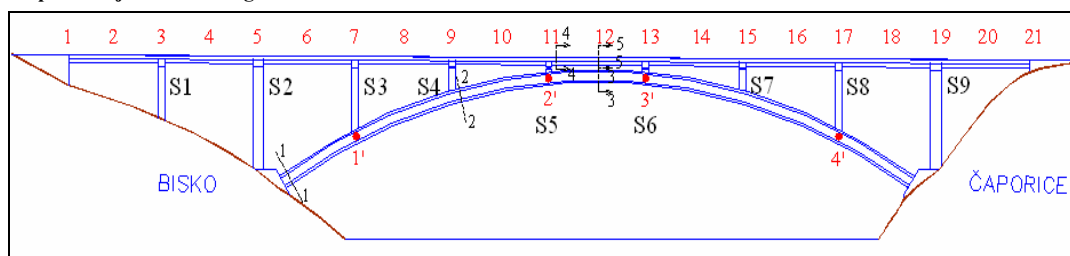
Koeficijent efikasnosti je omjer između učinka računskog opterećenja u projektu i učinka stvarno primijenjenoga pokusnog opterećenja teškim kamionima, a prema normi [8] mora biti između 0,5 i 1,0. Za oba mosta taj je koeficijent 0,75. Za most Cetina opterećivanje konstrukcije predviđeno je provesti u 17 faza (slika 4.), a za Maslenički most u 21 fazi (slika 5.).



Slika 4. Faze opterećenja mosta Cetina



Slika 5. Faze opterećenja Masleničkoga mosta

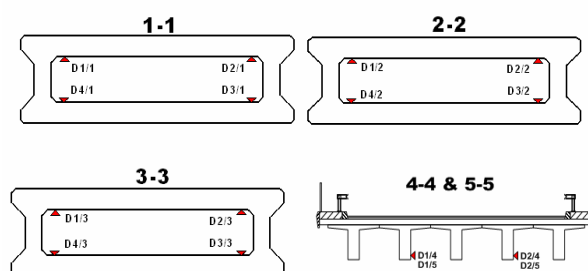


Slika 6. Mjesta mjerenja pomaka na mostu Cetina (uzdužni presjek)

Probim se opterećenjem provjerava ponašanje konstrukcije objekta pri statičkom i dinamičkom prometnom opterećenju radi usklađenosti s projektom, usklađenosti kvalitete radova sa zahtjevom u projektu i ocjeni konstrukcije o preuzimanju projektiranog opterećenja.

### 3 Opis ispitivanja i mjernih mjesta

Pokusno opterećenje provedeno je u skladu s opisanim programom i odredbama Hrvatske norme [8]. Ispitivanje statičkim opterećenjem obaju opisanih lučnih mostova provedeno je pomoću 8 teških kamiona za faze opterećenja luka i 4 teška kamiona za faze opterećenja kolničke konstrukcije. Prosječna ukupna masa kamiona iznosila je 30,5 tona.

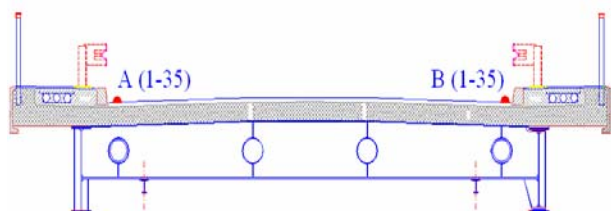


Slika 7. Mjesta mjerenja deformacija na mostu Cetina (poprečni presjek)

Pri pokusnom opterećenju opisanih mostova, geodetskom metodom mjereni su vertikalni pomaci duž dviju paralelnih linija na pješačkim stazama (A i B), i to nad oslonci-

ma i u sredinama raspona te horizontalni pomaci u tjemenu i četvrtinama luka. Osim pomaka mjerene su deformacije u kritičnim poprečnim presjecima luka i kolničke konstrukcije preciznim sensorima tipa LVDT, točnosti 0,001 mm.

Pregled mjernih mjesta za mjerenje pomaka i deformacija na mostu Cetina prikazan je na slikama 6. i 7., a na Masleničkom mostu na slikama 8. – 10.



Slika 8. Mjesta mjerenja pomaka na Masleničkom mostu (poprečni presjek)

Nakon statičkih ispitivanja provedena su dinamička ispitivanja opisanih građevina. U skladu s preporukama norme [8], tijekom dinamičkih ispitivanja prikupljeni su podaci o dinamičkom odgovoru konstrukcije pojedinih građevina pri različitim brzinama kretanja teških kamiona, uglavnom 20 - 80 km/h, u obliku vremenskih funkcija odgovora konstrukcije, te podaci o relevantnim dinamičkim parametrima konstrukcije pojedinog mosta u obliku funkcija spektralne gustoće snage frekvencija.

## 4 Rezultati statičkih ispitivanja

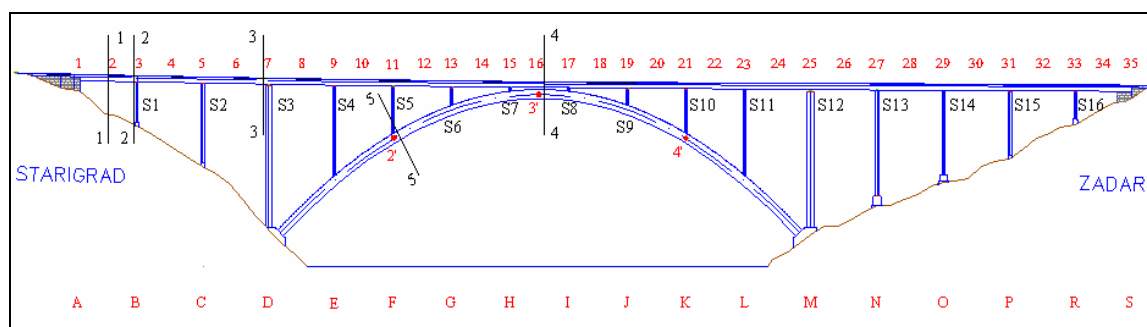
### 4.1 Pomaci mosta Cetina

Maksimalni pomaci mjereni na luku pri opterećenju grupe od 8 teških kamiona prikazani su u tablici 1., gdje su izravno uspoređeni s odgovarajućim proračunskim vrijednostima dobivenim pomoću modela s konačnim elementima (program SOFISTIK).

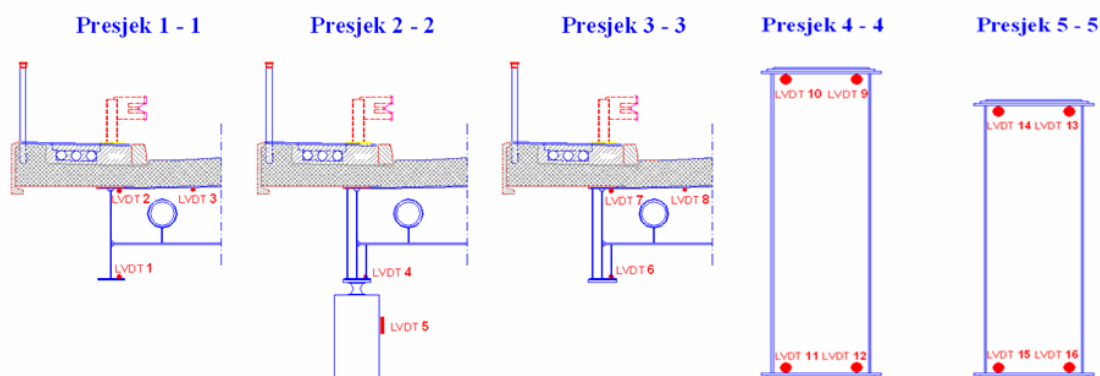
Tablica 1. Izmjereni i proračunski pomaci luka (mm) [1]

Faze opt.	Mjerna mjesta (stupovi)	Izmjereni pomaci (mm)	Proračunski pomaci (mm)
1.	S 5	6,5	7,4
	S 8	-3,7	-4,8
2.	S 5	-5,9	-5,4
	S 8	8,7	8,5
3.	S 5	8,4	10,1
	S 8	-7,3	-6,2
4.	S 6	7,6	7,2
	S 7	4,9	4,1
5.	S 6	8,2	8,6
	S 8	-5,5	-5,1
6.	S 5	-6,1	-5,8
	S 7	7,8	7,8
7.	S 5	5,7	6,5
	S 3	-1,3	-1,7

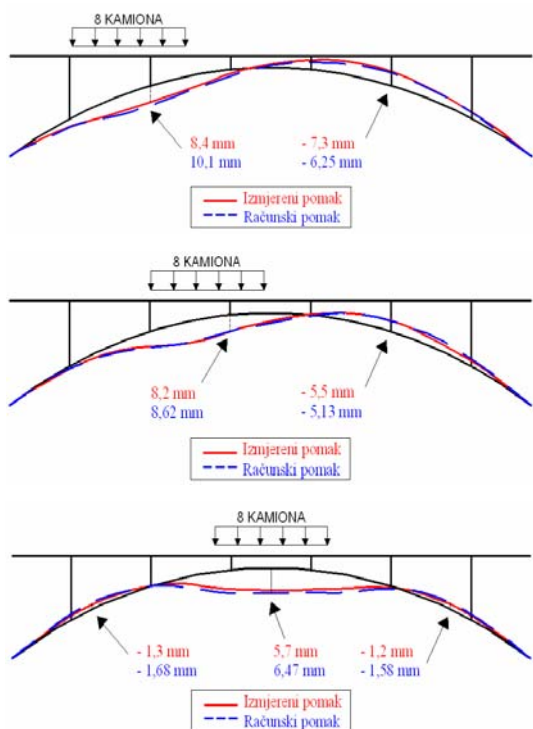
Na slici 11. prikazani su izmjereni i računski pomaci koji odgovaraju trećoj, petoj i sedmoj fazi opterećenja.



Slika 9. Mjesta mjerenja pomaka na Masleničkom mostu (uzdužni presjek)



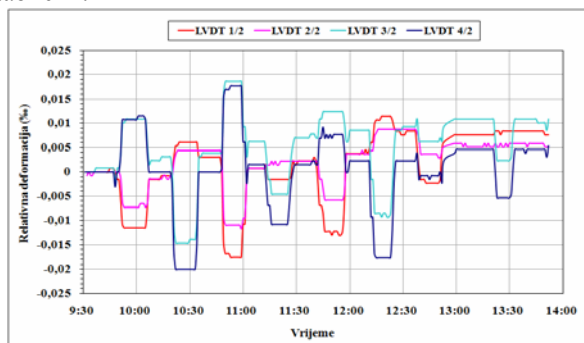
Slika 10. Mjesta mjerenja deformacija na Masleničkom mostu



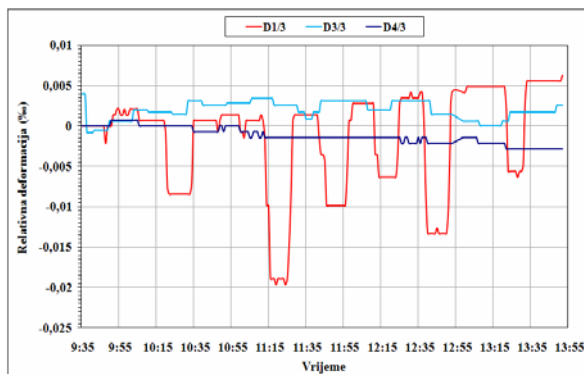
Slika 11. Pomaci mosta Cetina pri 3., 5., i 7. fazi opterećenja

#### 4.2 Deformacije mosta Cetina

Najznačajnije vrijednosti relativnih deformacija izmjerene tijekom probnog ispitivanja na luku prikazani su u tablici 2.



Slika 12. Vremenski tijek relativnih deformacija u presjeku 2-2 [1]



Slika 13. Vremenski tijek relativnih deformacija u presjeku 3-3 [1]

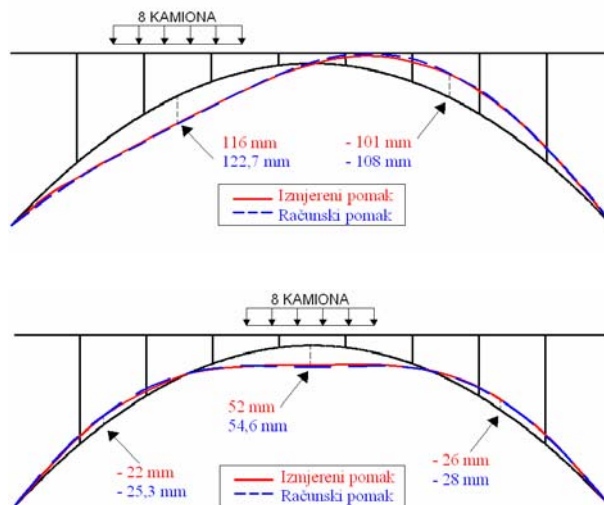
Na slikama 12. i 13. prikazan je vremenski tijek kretanja relativnih deformacija u presjecima 2-2 i 3-3 pri raznim fazama opterećenja.

Tablica 2. Relativne deformacije na luku mosta Cetina (%) [1]

Faze opterećenja	Mjerna mjesta	Izmjerene deformacije	Računske deformacije
1.	D4/1	-0,006	-0,008
	D4/2	0,012	0,013
	D1/3	0,002	0,001
2.	D1/1	-0,009	-0,012
	D4/2	-0,020	-0,024
	D1/3	-0,009	-0,013
3.	D4/1	-0,008	-0,014
	D3/2	0,019	0,020
	D1/3	0,001	0,001
4.	D4/1	-0,007	-0,014
	D4/2	-0,011	-0,015
	D1/3	-0,019	-0,018
	D2/4	-0,046	-0,078
	D1/5	0,055	0,050
5.	D4/1	-0,011	-0,018
	D1/2	-0,013	-0,008
	D1/3	-0,012	-0,015
6.	D1/1	-0,005	-0,011
	D4/2	-0,019	-0,023
	D1/3	-0,009	-0,014

#### 4.3 Pomaci Masleničkoga mosta

Maksimalni izmjereni pomaci u četvrtinama i tjemenu luka prikazani su u tablici 3. gdje su uspoređeni s odgovarajućim proračunskim vrijednostima. Na slici 14. prikazani su karakteristični vertikalni izmjereni i proračunski pomaci luka koji odgovaraju prvoj i trećoj fazi opterećenja.



Slika 14. Karakteristični vertikalni pomaci Masleničkoga mosta

Tablica 3. Pomaci u četvrtini i tjemenu luka [7]

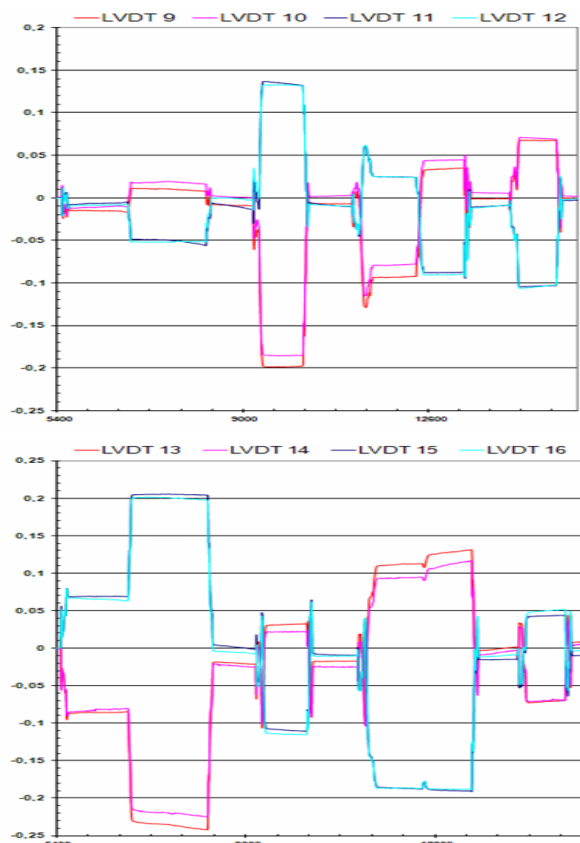
Mjerno mjesto	Faza opterećenja	Izmjereni pomaci (mm)	Proračunski pomaci (mm)
1/4 luka	1.	116,0	122,7
1/4 luka	2.	-69,0	-82,2
tjeme	3.	52,0	54,6
tjeme	4.	-15,0	-23,0

#### 4.4 Deformacije Masleničkoga mosta

Relativne deformacije mjerene u četvrtini i tjemenu luka u presjecima (5-5) i (4-4) prikazani su u tablici 4., a odgovarajući grafovi registrirani tijekom mjerenja prikazani su na slici 15.

Tablica 4. Relativne deformacije na luku Masleničkoga mosta [7]

Faze opterećenja	Mjerna mjesta	Izmjerene deformacije (‰)	Računske deformacije (‰)
1.	9	0,011	0,018
	10	0,019	0,018
	11	-0,049	-0,071
	12	-0,052	-0,071
	13	-0,242	-0,320
	14	-0,224	-0,320
	15	0,205	0,263
2.	9	-0,199	-0,309
	10	-0,185	-0,309
	11	0,135	0,208
	12	0,133	0,208
	13	0,031	0,037
	14	0,022	0,037
	15	-0,111	-0,203
3.	9	-0,093	-0,099
	10	-0,079	-0,099
	11	0,025	0,033
	12	0,025	0,033
	13	0,112	0,166
	14	0,095	0,166
	15	-0,187	-0,296
4.	9	0,067	0,108
	10	0,070	0,108
	11	-0,104	-0,166
	12	-0,104	-0,166
	13	-0,070	-0,159
	14	-0,079	-0,159
	15	0,043	0,085
16	0,050	0,085	



Slika 15. Vremenski tijek deformacija luka u presjecima 4-4 i 5-5

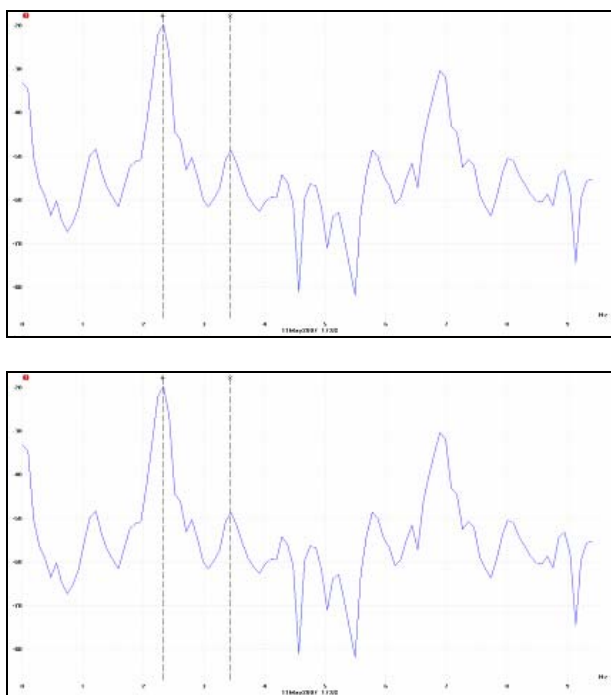
## 5 Rezultati dinamičkih ispitivanja

### 5.1 Vlastite frekvencije mosta Cetina

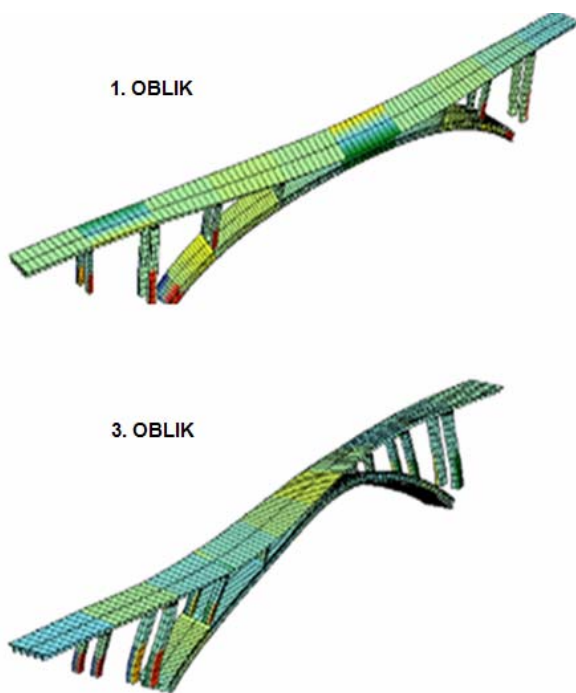
Najvažniji parametri dobiveni iz dinamičkih ispitivanja su vlastite frekvencije. Stoga su iz funkcija frekventnog odgovora konstrukcije mosta Cetina izdvojene odgovarajuće vlastite frekvencije pojedinih modova i prikazane u tablici 5. Na slici 16. prikazane su funkcije spektralne gustoće snage iz kojih su izdvojene neke vlastite frekvencije, a na slici 17. prikazani su proračunski modalni oblici osciliranja.

Tablica 5. Izmjerene i računski vlastite frekvencije (Hz)

Oblici titranja	Izmjerene vlastite frekvencije	Računske vlastite frekvencije
1. bočni	1,148	1,084
2. vertikalni	1,414	1,343
3. torzijski	2,344	2,302
4. vertikalni	2,352	2,303
5. torzijski	3,185	3,123
6. vertikalni	3,453	3,426
7. vertikalni	4,162	4,128
8. torzijski	4,609	4,654
9. vertikalni	5,141	5,072
10. vertikalni	5,883	5,788



Slika 16. Eksperimentalne funkcije spektralne gustoće snage (1. i 3. oblik) [1]



Slika 17. Prvi i treći proračunski modalni oblik titranja

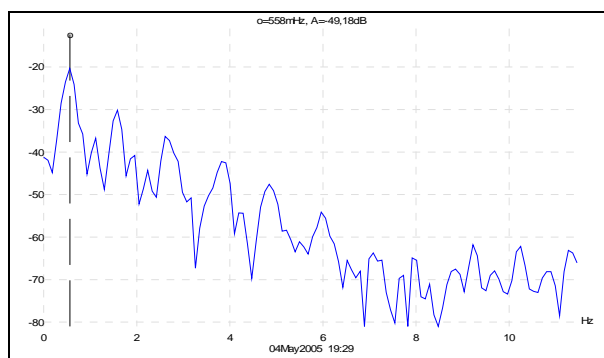
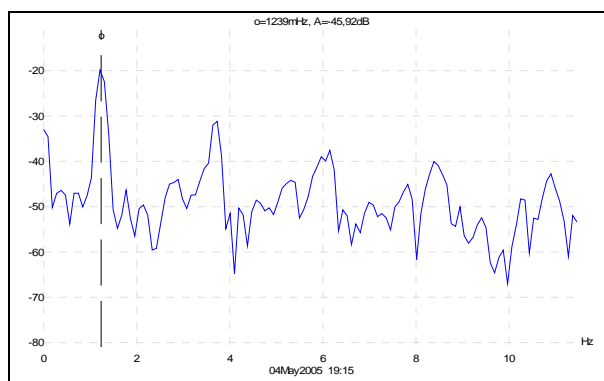
### 5.2 Vlastite frekvencije Masleničkoga mosta

Iz funkcija frekventnog odgovora konstrukcije Masleničkoga mosta izdvojene su odgovarajuće vlastite frekvencije pojedinih modova i prikazane u tablici 6. Na slici 18. prikazane su funkcije spektralne gustoće snage dobivene na temelju dinamičkih mjerenja iz kojih su iz-

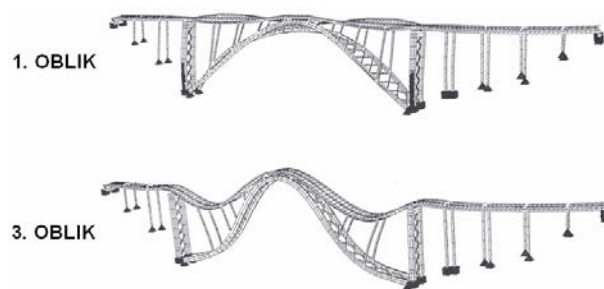
dvojene neke vlastite frekvencije, a na slici 19. prikazani su proračunski modalni oblici titranja.

Tablica 6. Izmjerene i računске vlastite frekvencije (Hz) [7]

Oblik titranja	Izmjerena frekvencija	Računska frekvencija
1. torzijski+bočni	0,558	0,555
2. vertikalni	0,643	0,614
3. vertikalni	1,239	1,241
4. bočni+uzdužni	1,570	1,515
5. bočni+uzdužni	1,958	1,952
5. torzijski	2,120	2,075
6. vertikalni	2,241	2,236
7. bočni+torzijski	2,714	2,717
8. vertikalni	3,031	3,059
9. vertikalni+bočni	3,367	3,383



Slika 18. Eksperimentalne funkcije spektralne gustoće snage (1. i 3. oblik) [7]



Slika 19. Prvi i treći proračunski modalni oblik titranja [7]

## 6 Zaključak

Tijekom statičkih i dinamičkih ispitivanja dvaju velikih i značajnih lučnih mostova, eksperimentalno su određeni njihovi relevantni statički i dinamički parametri (pomaci, deformacije i vlastite frekvencije) i međusobno uspoređeni s odgovarajućim proračunskim veličinama. Izmjereni i proračunski parametri uspoređuju se radi verifikacije proračunskog modela i kvalitete izvedbe. Analizom spomenutih izmjerenih i proračunskih parametara utvrđena je relativno visoka razina podudarnosti za pojedine konstrukcije, čime su verificirani proračunski model i izvedba pojedine građevine, nakon čega su oba mosta uspješno puštena u trajnu uporabu.

Jedan od glavnih ciljeva ovog rada jest međusobna usporedba mjerenih parametara (pomaka, deformacija i vlastitih frekvencija) obaju mostova čija razlika proiz-

lazi iz različitosti materijala iz kojega su izvedeni. Iako su to građevine s približno jednakim rasponima lukova i jednakim rasponima nadlučne konstrukcije, razlike su u izmjerenim parametrima velike. Čelični Maslenički most ima 10 do 15 puta veće pomake u karakterističnim točkama luka od betonskog mosta Cetina. Isto je i s razinom uporabnih naprezanja kada se ona odrede iz izmjerenih deformacija. S druge strane, spektar vlastitih frekvencija čeličnoga Masleničkoga mosta dvostruko je niži od spektra vlastitih frekvencija betonskog mosta Cetina. Ovi odnosi nisu neočekivani, ali ih konstruktor mostova treba poznavati. Odnos tih parametara svakako ovisi o više faktora, među kojima je veoma važan odnos raspona i strelice luka, kao i statički sustav s rubnim uvjetima. Primjerice Maslenički most je dvozglozni luk, a most Cetina upeti luk, stoga su ovi odnosi samo orijentacija za konstruktore koji se bave projektiranjem i ispitivanjem lučnih mostova.

## LITERATURA

- [1] Rak, M.; Damjanović, D.; Čalogović, V.: *Izješće o probnom ispitivanju mosta Cetina*, br. 180-136/07., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [2] Rak, M.; Bjegović, D.; Mikulić, D.; Krolo, J.; Stipanović, I.: *Projekt monitoringa mosta Cetina*, br. 180-304/05., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [3] Rak, M.; Bjegović, D.; Kapović, Z.; Stipanović, I.; Damjanović, D.: *Durability Monitoring System on the Bridge over Krka River*, Bridges, International conference proceedings Zagreb:2006. SECON HDGK.
- [4] Krolo, J.; Rak, M.; Šavor, Z.; Čalogović, V.; Kapović, Z.: *Statical and Dynamical Testing of the Bridge over River Drava near Bелиšće*, 19<sup>th</sup> Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics September 25.-28, 2002, Polanica Zdrój, Poland
- [5] Rak, M.; Krolo, J.; Čalogović, V.: *Report on experimental testing of the 'Bridge over Dubrovnik River'*, Faculty of Civil Engineering, Zagreb, Department of Engineering Mechanics, No. 180-84/02, April 2002.
- [6] Krolo, J.; Štorga, S.; Herceg, Lj.; Kapović, Z.; Juričević, Ž.; Damjanović, D.: *Statical and dynamical testing of the Maslenica bridge after renewal*, Bridge, Radić, Jure (ur.). Zagreb: SECON HDGK, 2006. 1091-1098
- [7] Rak, M.; Krolo, J.; Čalogović, V.; Damjanović, D.: *Izješće o probnom ispitivanju mosta Maslenica preko Novskog ždrila na državnoj cesti D – 8*, Br. 180-138/05, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [8] HRN U.M1.046:1984 Ispitivanje mostova pokusnim opterećenjem

