

Ispitivanje probnim opterećenjem mosta *Hercegovina*

dr. sc. Mladen Kustura, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
izvanredni profesor, mladen.kustura@fgag.sum.ba

dr. sc. Marino Jurišić, mag. građ.

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
docent, marino.juriscic@fgag.sum.ba

dr. sc. Radoslav Markić, dipl. ing. građ.

Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
izvanredni profesor, radoslav.markic@fgag.sum.ba

Sažetak: Članak prikazuje statičko i dinamičko ispitivanje probnim opterećenjem mosta Hercegovina preko rijeke Neretve. Uz prikaz osnovnih konstruktivnih elemenata mosta, u članku je ukratko opisan način ispitivanja te su date osnovne karakteristike primijenjene opreme korištene za ispitivanje. Provedena ispitivanja uključivala su mjerenje vertikalnih pomaka, deformacija i ubrzanja. Zbog obimnosti ispitivanja prikazani su najvažniji rezultati provedenog ispitivanja uz analizu i usporedbu izmjerenih parametara. Ovim postupcima određene su statičke i dinamičke karakteristike izvedene konstrukcije u cilju ocjene kvalitete izvedbe.

Ključne riječi: mostovi, ispitivanje probnim opterećenjem, frekvencije osciliranja, pomaci, deformacije, naprezanja

Load testing of the *Hercegovina* bridge

Abstract: The paper presents static and dynamic load testing of the Hercegovina bridge over the Neretva River. In addition to presenting the basic structural elements of the bridge, the paper briefly describes the testing method, and provides the basic characteristics of the equipment used for testing. The conducted tests included measurements of vertical displacements, strains and accelerations. Given the excessiveness of the testing, the paper presents the most important results, along with an analysis and comparison of the measured parameters. These procedures determined the static and dynamic characteristics of the constructed structure with the aim of assessing the quality of construction.

Key words: bridges, load testing, oscillation frequencies, displacements, strains, stresses

1. UVOD

Predmet ovoga rada je prikaz rezultata dobivenih probnim ispitivanjem mosta Hercegovina. Most se nalazi na koridoru Vc na dionici Počitelj-Bijača (Slika 1.). Prelazi dolinu rijeke Neretve, magistralnu cestu M17 i željezničku prugu (Slika 2.). Most je izveo konzorcij sastavljen od Azvirt Limited Liability Company (Azerbejdžan), Sinohydro Corporation Limited (Kina) i Powerchina Roadbridge Group Co. Ltd. (Kina), dok je podizvođač koji je izvodio najveći dio radova tvrtka Hering d.d. Široki Brijeg, Bosna i Hercegovina [1].

Normom oznake U.M1.046 iz 1984. godine, preuzetom iz JUS standarda [2] koji je važeći u Bosni i Hercegovini vrši se probno ispitivanje cestovnih mostova statičkim i dinamičkim opterećenjem, a prema istim učinak probnog opterećenja mora u određenoj mjeri odgovarati učinku pokretnog opterećenja primijenjenog u statičkom proračunu odnosno u skladu s navedenom normom.



Slika 1. - Lokacija mosta na koridoru Vc



Slika 2. - Most Hercegovina

Sukladno važećem pravilniku ispitivanje mostova probnim opterećenjem jedan je od uvjeta za tehnički pregled i izdavanje uporabne dozvole a odnosi se na cestovne mostove raspona većeg od 15 metara i željezničke mostove raspona većeg od 10 metara. Ispitivanje probnim opterećenjem mosta Hercegovina proveli su djelatnici Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Mostaru. Ispitivanjem se utvrđuju reakcije konstrukcije na određena statička i dinamička opterećenja koja su predviđena projektom [3].

2. OPIS KONSTRUKCIJE MOSTA

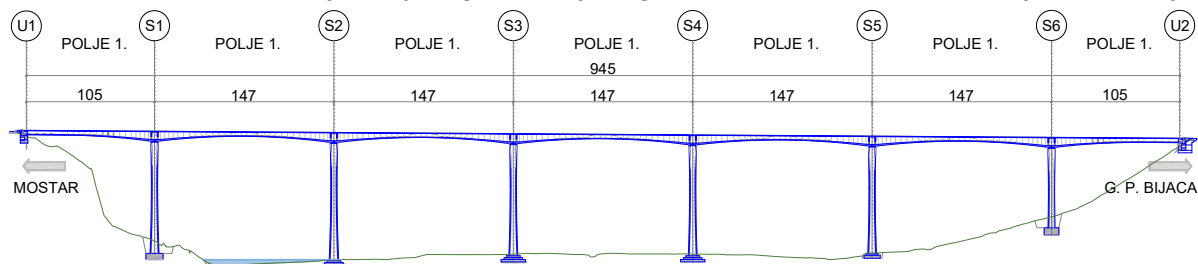
Opis konstrukcije mosta preuzet je iz Tehničkog izvješća projekta mosta kojega je izradilo poduzeće IPSA INSTITUT d.o.o. Sarajevo.

Most se klasificira se kao prednapeta betonska okvirna konstrukcija sa 7 polja ukupne duljine $105.00 + (5 \times 147.00) + 105.00 = 945.00$ m. Izveden je tehnologijom slobodno konzolne gradnje betoniranjem na licu mjesta pri čemu se koristila pomična skela (krletka).

Visine stupova su redom: $S1 = 92.00$ m, $S2 = 97.00$ m, $S3 = 92.00$ m, $S4 = 91.00$ m, $S5 = 88.00$ m, $S6 = 66.00$ m (Slika 3.). Svi stupovi su monolitno vezani sa rasponskom konstrukcijom i isto su oblikovani počevši od vrha stupa prema dolje, na način da je napravljen najviši stup S2, a ostali su skraćeni i zadržavaju iste presjeke. Stupovi imaju osmokutni promjenjivi poprečni presjek kod kojeg vanjske i unutarnje vute zadržavaju dimenzije visinom, a dijelovi između se mijenjaju. Najveći presjek na dnu ima stup S2 vanjskih dimenzija 9.0×7.6

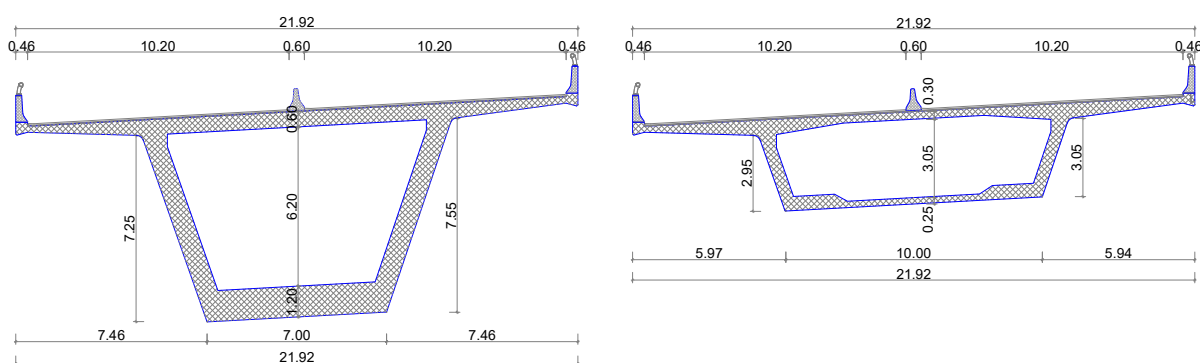
Kustura, M., Jurišić, M., Markić, R.
Ispitivanje probnim opterećenjem mosta Hercegovina

m, dok najmanji na dnu ima stup S6 dimenzija 8.36 x 5.65 m. Debljine zidova stupa su 0.6 m, osim zida na unutarnjoj strani krivine koji je 0.8 m. Kroz posljednje četiri kampade stupovi prelaze u pravokutni presjek koji odgovara dijafragmama i rebrima u rasponskoj konstrukciji.



Slika 3. – Uzdužni presjek mosta Hercegovina

Rasponska konstrukcija je jedinstvena za oba smjera autoceste i ima sandučasti poprečni presjek promjenjive visine, gdje je visina nad stupovima 8.0 m, a u sredini polja i na konstantnom dijelu uz upornjak 3.6 m. Gornja ploča je široka 21.92 m i ima promjenjivu debljinu (0.25 m na rubu konzole, 0.6 m na spoju sa rebrom i 0.3 m u sredini ploče). Rebra su kosa i imaju promjenjivu debljinu, najdeblja su uz stup 0.8 m i stanjuju se na 0.5 m. Donja ploča ima promjenjivu debljinu, najdeblja je uz stup 1.2 m i stanjuje se na 0.25 m, tj. 0.55 m na vutama koje se nalaze kod rebara. Obzirom na to da su rebra kosa donja ploča ima promjenjivu širinu, pa je najuža 7.0 m na dodiru sa stupovima, a najšira 10.0 m u sredini polja (Slika 4.).



Slika 4. - Poprečni presjek mosta Hercegovina (lijevo uz stup, desno u polju)

Konstrukcija je uzdužno i poprečno prednapeta kablovima sastavljenim od užadi čelika Y1860. Nad svakim stupom nalazi se 86 prednapetih kablova koji se koriste za faze gradnje (43 nad svakim rebrom). Kontinuitetni kablovi nalaze se u svakom polju i prednapeti su po spajanju konstrukcije. Polja 1 i 7 imaju po 34, polja 2 i 6 po 44, a polja 3, 4 i 5 po 40 kontinuitetnih kablova (ovdje su uključeni i kablovi u gornjoj ploči koji se prednapinju po završetku spojnog segmenta). Ukupno ima 276 uzdužnih prednapetih kablova za kontinuitet. U mostu je ugrađeno ukupno 792 kabla za uzdužno prednapinjanje.

Srednji stupovi su monolitno povezani sa rasponskom konstrukcijom, dok je rasponska konstrukcija na upornjacima oslonjena na ležajeve. Rasponska konstrukcija napravljena je od betona C45/55, stupovi su napravljeni od betona C40/50 (osim početnih kampada koje su od betona C50/60), dok su temelji od betona C30/37.

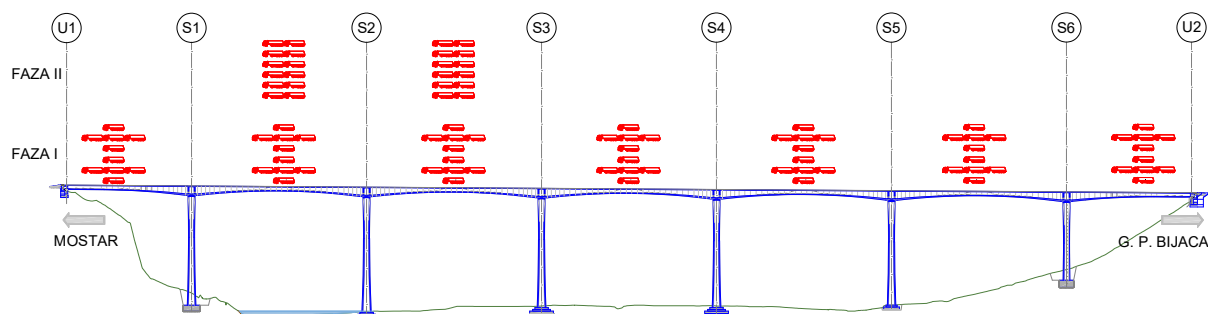
Pri projektiranju mosta korišteni su pravilnici DIN FB 101 i 102 [5], kao i EN 1998. [6]. Proračun se radio u računalnom programu SOFiSTiK [7].

3. PROGRAM ISPITIVANJA

Ponašanje konstrukcije objekta pri statičkom i dinamičkom prometnom opterećenju, usklađenost kvalitete radova sa zahtjevima projekta te sposobnost konstrukcije da preuzme projektirano opterećenje provjeravaju se upravo ispitivanjem mostova probnim opterećenjem.

U skladu s navedenim pravilnicima i normama učinak probnog opterećenja mora u određenoj mjeri odgovarati učinku pokretnog opterećenja primijenjenog u statičkom proračunu. Kako se u statičkom računu primjenjuju tipska opterećenja dana u odgovarajućim normama za proračun cestovnih mostova, a za probno ispitivanje teški kamioni, potrebno je odrediti broj i masu kamiona tako da se dobiju adekvatne unutarnje sile.

Prema izrađenom a zatim od strane nadzornog tijela i projektanta usvojenom Programu ispitivanja probno opterećenje se izvodilo s 10 teških kamiona pojedinačne mase oko 400 kN postavljenih u položaje u kojem izazivaju najveća naprezanje u svim poljima (Faza I) a za provedbu probnog ispitivanja nad stupovima S2 i S3 (Faza II) opterećenje se izvodilo s 12 teških kamiona (Slika 5.).



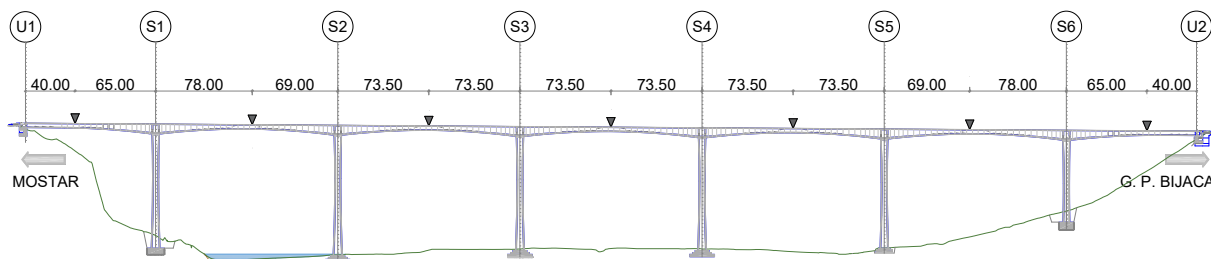
Slika 5. - Faze opterećenja mosta Hercegovina

Prema korištenim pravilnicima i normama koeficijent efikasnosti je omjer između učinka računskog opterećenja u projektu i učinka stvarno primijenjenoga probnog opterećenja teškim kamionima te isti mora biti između 0.5 i 1.0 što je za most Hercegovina prema usvojenom Programu ispitivanja i zadovoljeno. Odnosno, koeficijent efikasnosti za mjerenje utjecaja u poljima mosta iznosio je od 0.73 do 0.80 ovisno o polju dok je koeficijent efikasnosti za mjerenje utjecaja na stupovima iznosio 0.5.

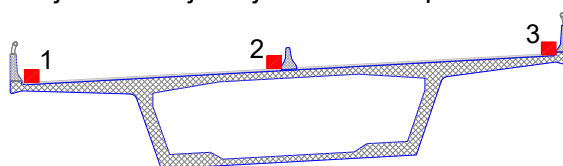
4. RASPORED MJERNIH MJESTA I KORIŠTENA OPREMA

4.1 Raspored mjernih mjesta

U skladu s prethodno ukratko opisanim Programom ispitivanja provedeno je probno ispitivanje gdje su se geodetski mjerili vertikalni pomaci u svim poljima mosta (Slika 6.) i to u tri točke po širini kolovoza (Slika 7.).

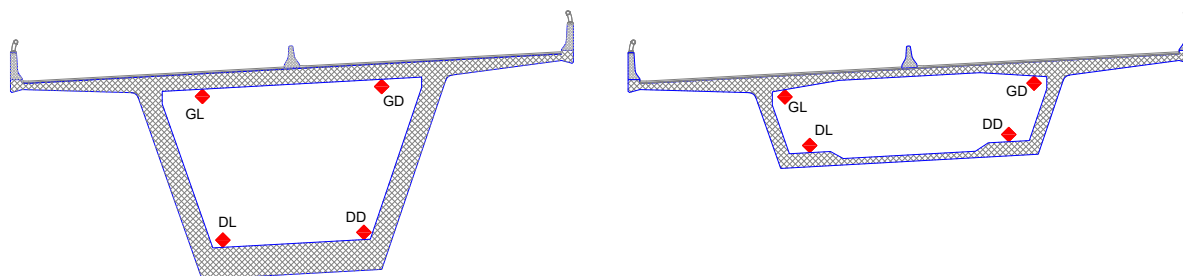


Slika 6. - Mjerna mjesta za mjerenje vertikalnih pomaka - uzdužni presjek



Slika 7. - Mjerna mjesta za mjerenje vertikalnih pomaka – poprečni presjek

Osim vertikalnih pomaka mjerenih u svim poljima mosta također su mjerene i deformacije koristeći mjerne trake za beton i čelik u kritičnim presjecima za polja 2, 3 i 4 te uz stupove S2 i S3 (Slika 8.). Budući da su sredine raspona kritične točke na mostu u tim točkama su mjereni vertikalni pomaci mosta osim za krajnja polja gdje su kritične točke mosta nešto bliže osloncu mosta. U poprečnom presjeku raspored mjernih točaka diktira sama geometrija poprečnog presjeka i širina konstrukcije mosta.



Slika 8. - Mjerna mjesta za mjerenje deformacija (lijevo uz stup, desno u polju)

4.2 Korištena mjerna oprema

Na mostu Hercegovina ukupno je promatrano 20 mjernih mjesta na kojima su postavljene mjerne trake na betonsku konstrukciju unutar mosta (Slika 9.).

Kustura, M., Jurišić, M., Markić, R.

Ispitivanje probnim opterećenjem mosta Hercegovina



Slika 9. - Mjerna oprema na mjestu ispitivanja

Za mjerenje deformacija korištene su mjerne trake tvrtke HBM tip K-LY411-15-120-0 (Slika 10.).



Slika 10. - Mjerne trake za beton

Mjerenje ubrzanja je obavljeno davačem ubrzanja odnosno jednoosnim akcelometrom tvrtke HBM tip B12/500 (Slika 11a.). Prikupljanje izmjerenih vrijednosti vršeno je sistemom *MGC plus* (Slika 11b.) a obrada izmjerenih vrijednosti vršena je u programskom paketu Catman AP.



a) Davač ubrzanja



b) Uređaj "MGC plus"

Slika 11. - Korištena mjerna oprema

5. REZULTATI STATIČKIH ISPITIVANJA I USPOREDBA S RAČUNSKIM

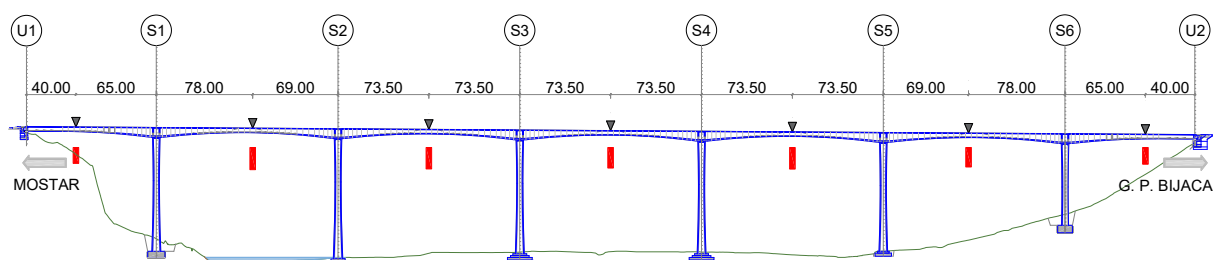
Statička ispitivanja (Slika 12.) provedena su prema shemama opterećenja prikazanim u poglavlju 3. U nastavku teksta bit će prikazani rezultati ispitivanja za vertikalne pomake i deformacije.



Slika 12. - Postavljanje opterećenja u položaj za statičko ispitivanje

5.1 Vertikalni pomaci mosta Hercegovina

Vertikalni pomaci mjereni su geodetskim instrumentima u tri točke mosta u poprečnom presjeku kako je prikazano u poglavlju 4. na način da se mjerenje vršilo prije, za vrijeme i poslije nanošenja probnog opterećenja. Maksimalne vrijednosti za središnju točku prikazane su dalje u tekstu (Slika 13.).



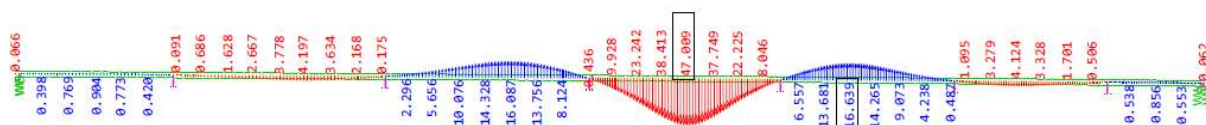
Slika 13. - Maksimalni vertikalni pomaci u sredini kolnika (mm)

Kustura, M., Jurišić, M., Markić, R.
Ispitivanje probnim opterećenjem mosta Hercegovina

Usporedba rezultata (Tablica 1.) dobivenih probnim ispitivanjem rađena je s vertikalnim pomacima dobivenim računskim proračunom u programskom paketu SOFiSTiK (Slika 14.).

Tablica 1. - Usporedba izmjerenih i računskih vertikalnih pomaka

		POLJE						
		1	2	3	4	5	6	7
IZMJERENI POMACI (mm)	1.	29.7	38.1	35.2	38.2	36.5	33.4	28.2
	2.	28.5	39.8	38.5	36.8	38.7	34.9	3.0
	3.	25.4	38.5	37.8	34.5	34.9	37.9	33.2
RAČUNSKI POMACI (mm)	1.	37.06	46.76	47.42	47.09	46.70	44.94	36.16
	2.	37.06	46.76	47.42	47.09	46.70	44.94	36.16
	3.	37.06	46.76	47.42	47.09	46.70	44.94	36.16



Slika 14. - Računski pomaci za polje 4.

Analizom rezultata može se zaključiti kako su izmjerene vrijednosti vertikalnih pomaka manje od računskih vrijednosti što je osnovni preduvjet da je konstrukcija tehnički ispravna.

5.2 Deformacije mosta Hercegovina

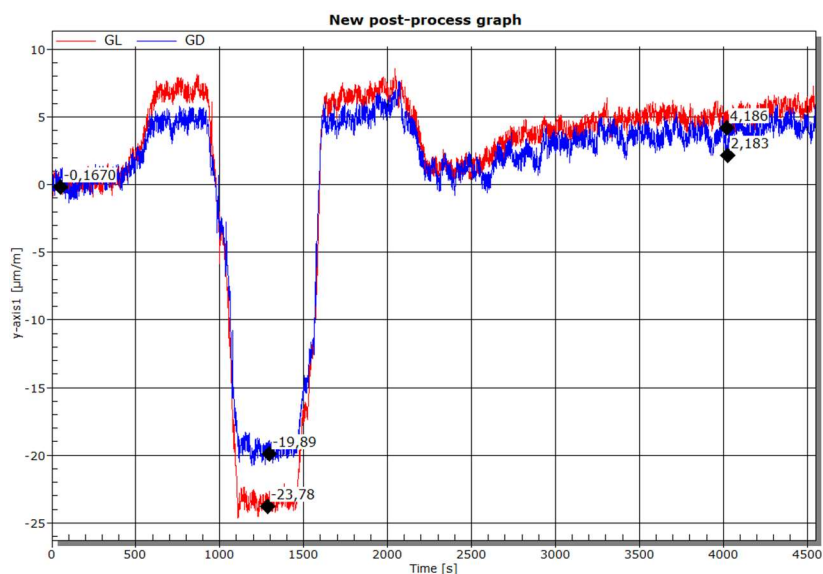
Rezultati probnog ispitivanja prikazani su tabelarno te na dijagramima dobivenim obradom izmjerenih vrijednosti u programskom paketu Catman AP.

S obzirom da se izmjerene deformacije u betonu nalaze u području linearno-elastičnog ponašanja betona na temelju poznatog sekantnog modula elastičnosti dobivenog iz Izvještaja o kontrolnim ispitivanjima projektiranog betona izračunata su ekvivalentna naprezanja u betonu prema slijedećem izrazu:

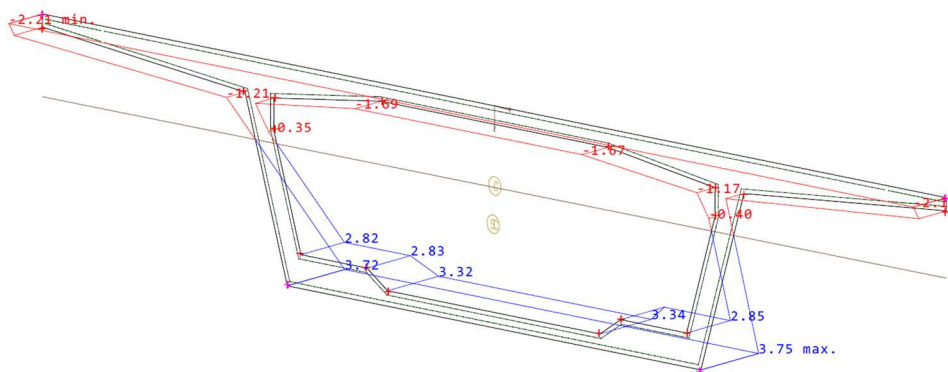
- Naprezanje za beton (C50/60): $\sigma = \varepsilon(\%) \cdot 37000(\text{MPa})$

Deformacije u poljima 2, 3 i 4 (Slike 15., 17. i 19.) kao i deformacije uz stupove S2 i S3 (Slike 21. i 23.) mjerile su se na 4 mjerna mjesta prema shemi prikazanoj u poglavlju 4. Korištene oznake za mjerna mjesta jesu: GL - gore lijevo, GD - gore desno, DL - dolje lijevo, DD - dolje desno. Nakon analize izmjerenih rezultata izvršena je usporedba dobivenih vrijednosti naprezanja s računskim modelom, izrađenom u programskom paketu SOFiSTiK, za polja 2, 3 i 4 (Slike 16., 18. i 20.) te za stupove S2 i S3 (Slike 22. i 24.).

5.2.1 Deformacije za polje 2



Slika 15. - Vremenski tijek deformacija za polje 2



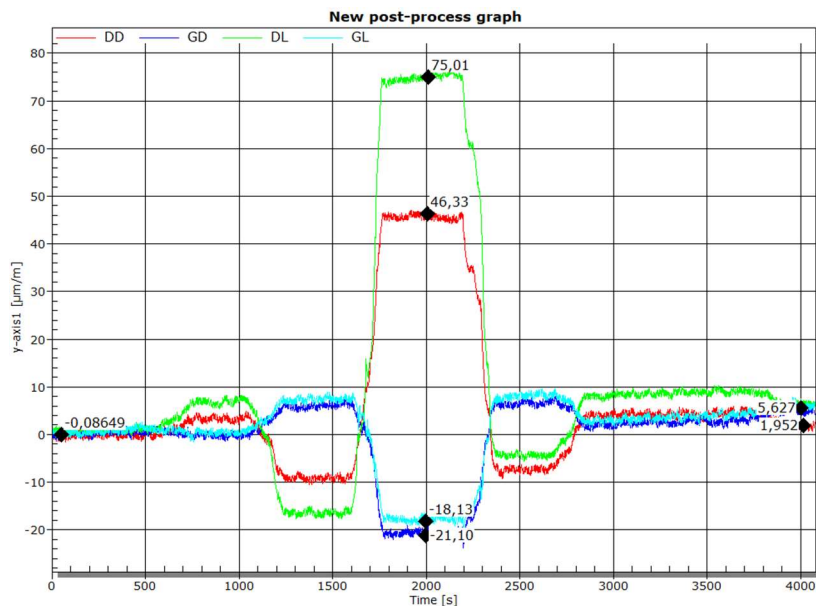
Slika 16. - Računska naprezanja za polje 2

Tablica 2. - Usporedba naprezanja za polje 2

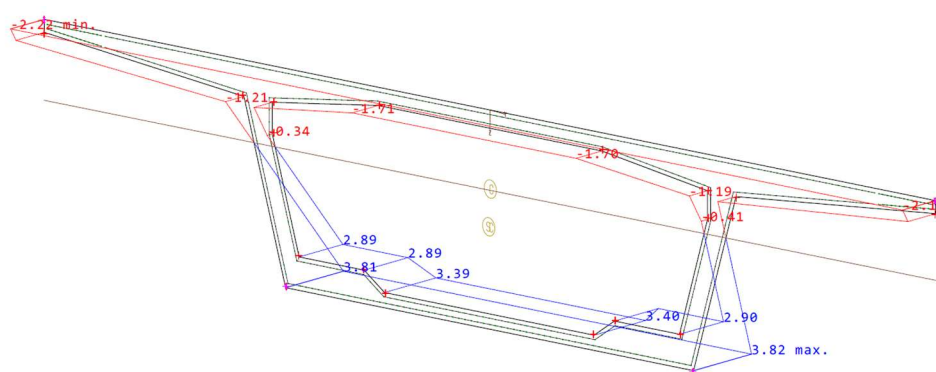
	GL	GD	DL	DD
Računsko naprezanje (MPa)	-1.21	-1.17	+2.83	+2.85
Izmjereno naprezanje (MPa)	-0.73	-0.87	/	/

Zbog oštećenja mjernih traka u točkama DL i DD vrijednosti za te mjerne točke nisu mogle biti izmjerene.

5.2.2 Deformacije za polje 3



Slika 17. - Vremenski tijek deformacija za polje 3

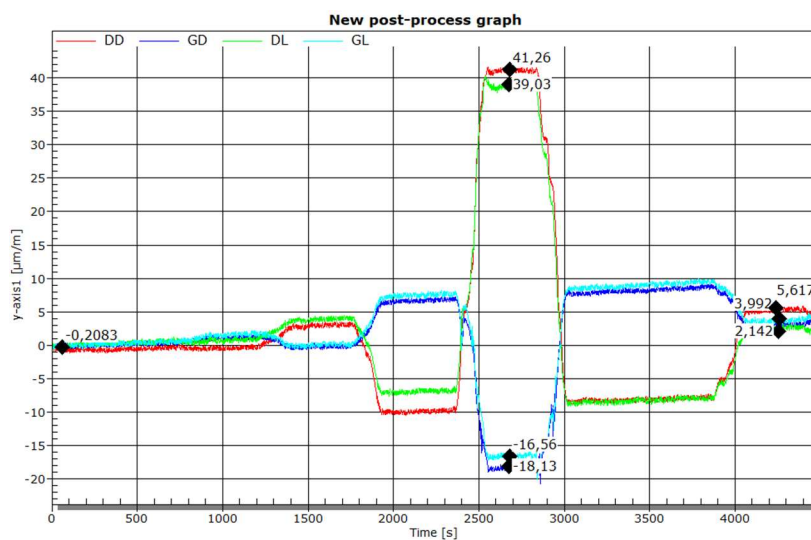


Slika 18. - Računska naprezanja za polje 3

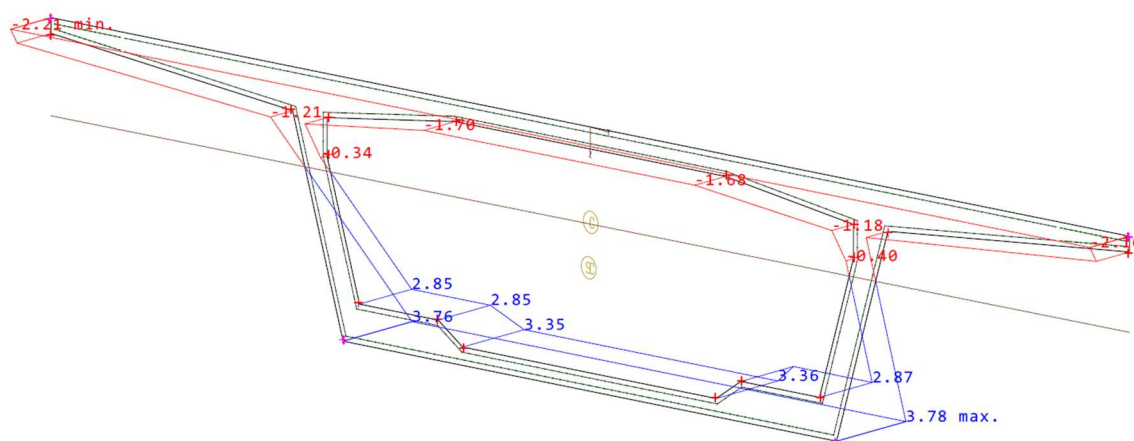
Tablica 3. - Usporedba naprezanja za polje 3

	GL	GD	DL	DD
Računsko naprezanje (MPa)	-1.21	-1.19	+2.89	+2.90
Izmjereno naprezanje (MPa)	-0.66	-0.77	+2.77	+1.71

5.2.3 Deformacije za polje 4



Slika 19. - Vremenski tijek deformacija za polje 4

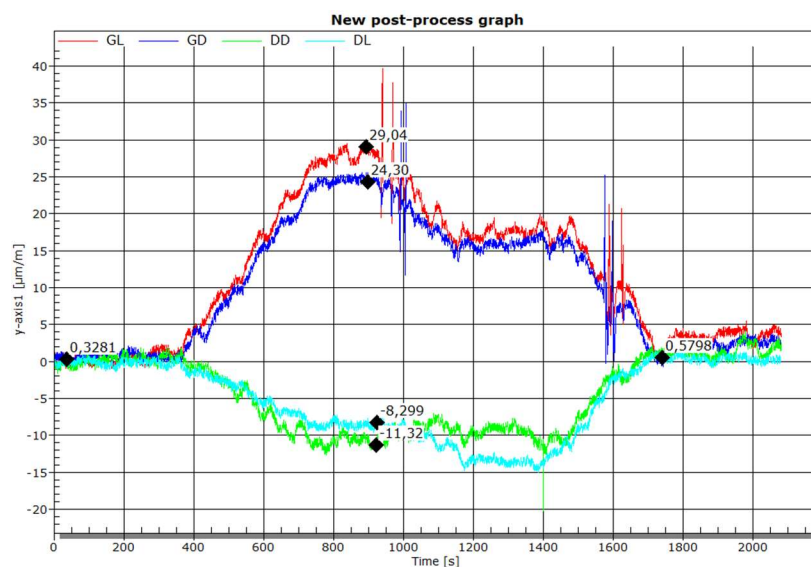


Slika 20. - Računska naprezanja za polje 4

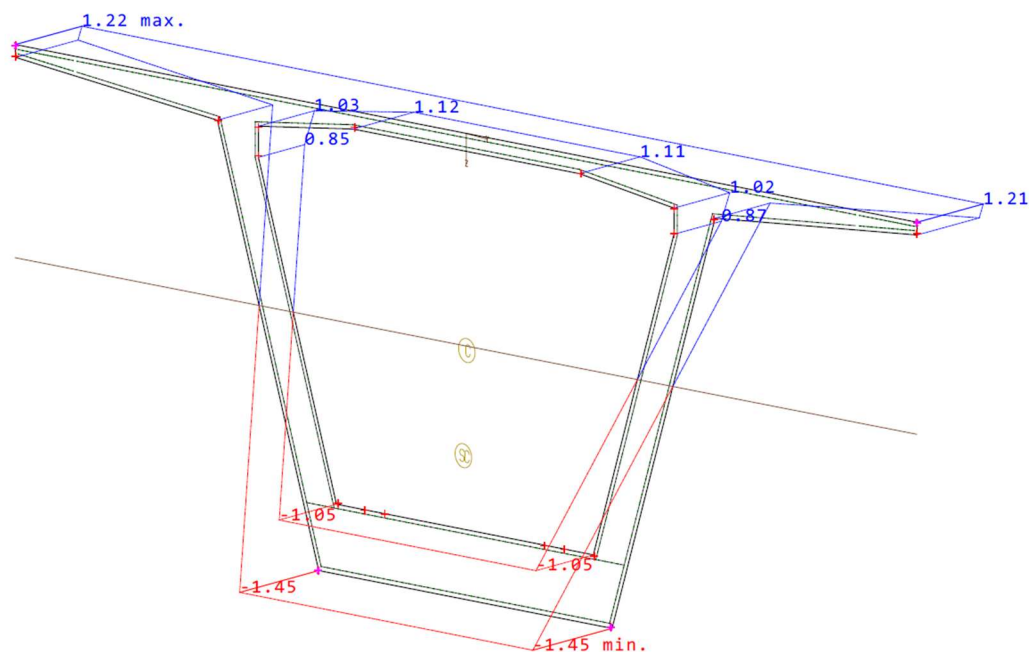
Tablica 4. - Usporedba naprezanja za polje 4

	GL	GD	DL	DD
Računsko naprezanje (MPa)	-1.21	-1.18	+2.85	+2.87
Izmjereno naprezanje (MPa)	-0.60	-0.66	+1.36	+1.53

5.2.4 Deformacije uz stup S2



Slika 21. - Vremenski tijek deformacija uz stup S2

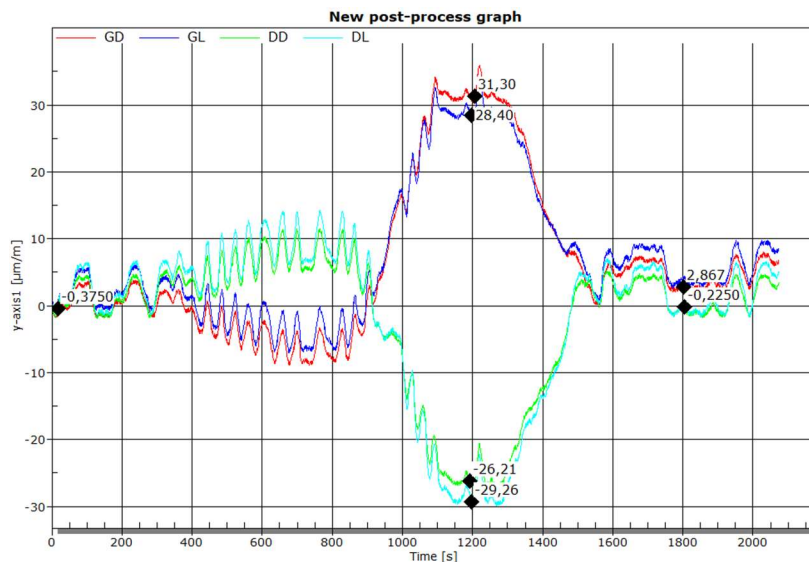


Slika 22. - Računska naprezanja uz stup S2

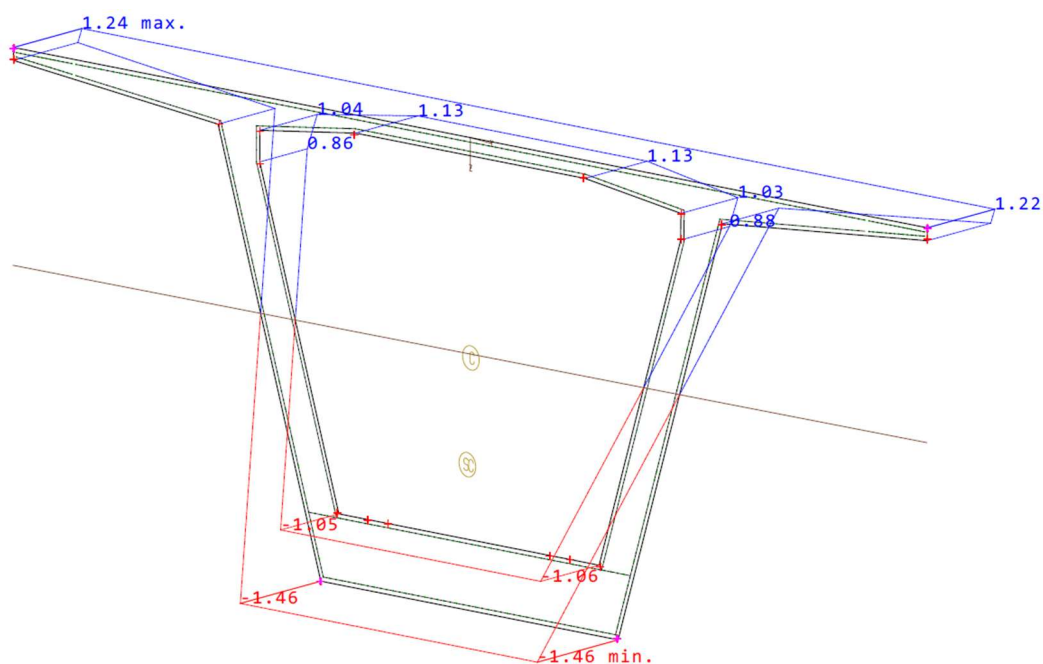
Tablica 5. - Usporedba naprezanja uz stup S2

	GL	GD	DL	DD
Računsko naprezanje (MPa)	+1.12	+1.11	-1.05	-1.05
Izmjereno naprezanje (MPa)	+1.06	+0.88	-0.31	-0.43

5.2.5 Deformacije uz stup S3



Slika 23. - Vremenski tijek deformacija uz stup S3



Slika 24. - Računska naprezanja uz stup S3

Tablica 6. - Usporedba naprezanja uz stup S3

	GL	GD	DL	DD
Računsko naprezanje (MPa)	+1.13	+1.13	-1.05	-1.06
Izmjereno naprezanje (MPa)	+1.06	+1.17	-0.95	-1.06

Kustura, M., Jurišić, M., Markić, R.

Ispitivanje probnim opterećenjem mosta Hercegovina

Analizom rezultata može se zaključiti kako su izmjerene vrijednosti naprezanja za odabrane presjeke manje od računskih vrijednosti što nam također ukazuje na to da je konstrukcija tehnički ispravna.

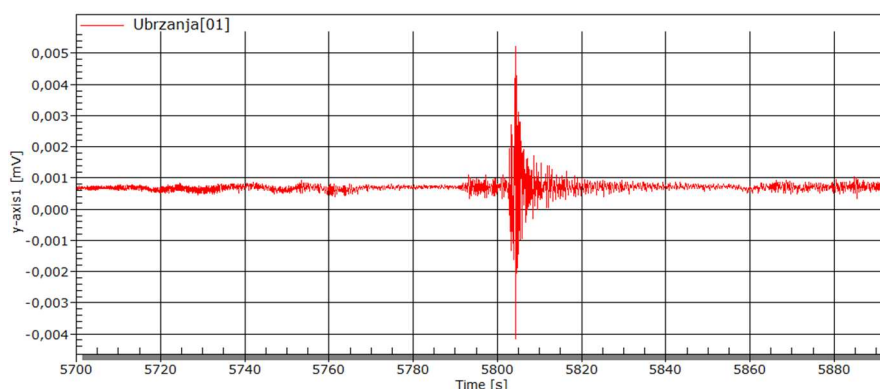


Slika 25. - Provedba ispitivanja probnim opterećenjem

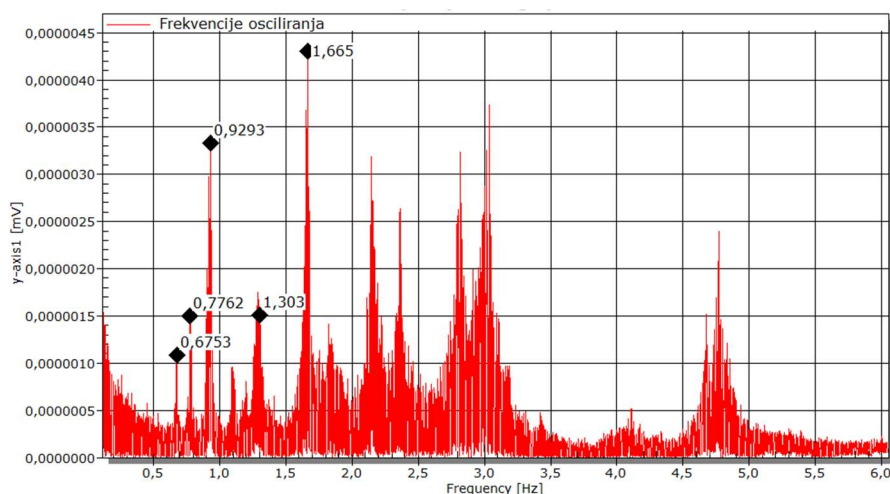
6. REZULTATI DINAMIČKIH ISPITIVANJA I USPOREDBA S RAČUNSKIM

Najbolji pokazatelji realnog stanja konstrukcije jesu dinamički parametri (odnosno vlastite frekvencije, prigušenja i modalni oblici) koji su funkcije globalne krutosti a svaka ozbiljna promjena uzrokovat će i promjenu vrijednosti dinamičkih parametara [8].

Pri dinamičkom ispitivanju mosta mjerena su vertikalna ubrzanja uslijed pobude vozilom koje je prešlo pri brzini od oko 30 km/h preko drvene daske debljine 5 cm u polju 4. Registracija ove pobude obavljena je akcelerometrom uz priloženi dijagram (Slika 26.) a nakon obrade rezultata dobiven je dijagram frekvencija osciliranja mosta (Slika 27.).

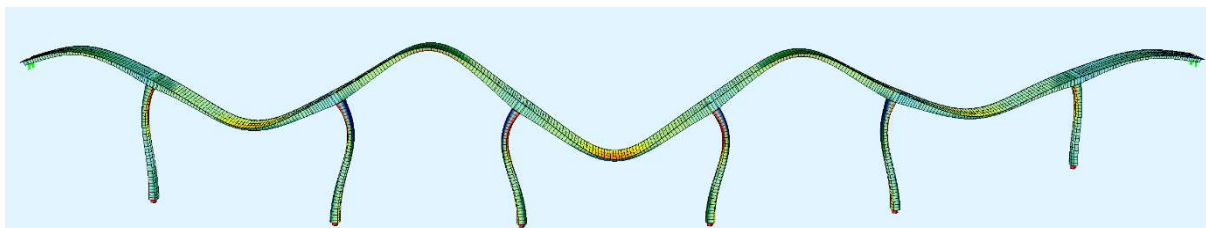


Slika 26. - Zapis ubrzanja dobiven akcelerometrom



Slika 27. - Frekvencije osciliranja

Računskim modelom, napravljenim također u SOFiSTiK-u, određeni su modalni oblici osciliranja (Slika 28.) te su obradom izmjerenih rezultata određene frekvencije osciliranja mosta i izvršena usporedba s računskim (Tablica 7.).\



Slika 28. - Prvi računski modalni oblik osciliranja (T= 0,60 Hz)

Tablica 7. - Usporedba frekvencija osciliranja

Frekvencija /Hz/	Vrijednost 1	Vrijednost 2	Vrijednost 3	Vrijednost 4	Vrijednost 5
Računske	0.60	0.72	0.87	1.19	1.79
Izmjerene	0.67	0.77	0.92	1.30	1.66

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti kako su izmjerene vrijednosti frekvencija osciliranja mosta usporedive s računskim frekvencijama te možemo zaključiti kako se most i za ove uvjete ponaša kao tehnički ispravna konstrukcija.

7. ZAKLJUČAK

U svrhu analize ponašanja konstrukcije mosta Hercegovina pri statičkom i dinamičkom prometnom opterećenju izvršeno je ispitivanje probnim opterećenjem. Ispitivanje probnim opterećenjem se provodi radi provjere usklađenosti s projektom, usklađenosti kvalitete radova sa zahtjevima projekta i ocjene sposobnosti konstrukcije da preuzme projektirano opterećenje. Tijekom statičkih i dinamičkih ispitivanja eksperimentalno su određeni relevantni statički i dinamički parametri (pomaci, deformacije i vlastite frekvencije) i međusobno uspoređeni s odgovarajućim računskim veličinama. Provedenom analizom dobivenih parametara, kako izmjerenih tako i računskih, utvrđena je visoka razina podudarnosti za statičke i dinamičke utjecaje, pa se može reći da se most u stanju korištenja ponaša sukladno projektu. Ovim postupkom je verificirana izvedba građevine što je preduvjet da se most Hercegovina pusti u funkciju.

8. LITERATURA

1. <https://www.jpautoceste.ba/>
2. JUS U.M1.046:1984 Pravilnik za ispitivanje mostova probnim opterećenjem, Sl. list 60/84
3. Rak, M.; Krolo, J.; Bartolac, M.: Ispitivanje i analiza parametara velikih lučnih mostova, Građevinar 62, str. 913-920., Zagreb 2010.
4. Biondić, H.: Probno opterećenje mostova, Ekscentar, br. 14, pp. 80-83, Zagreb 2011.
5. DIN-Fachbericht 101:2009-03, Actions on bridges, Germany, 2009
6. EN 1998-1:2004 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
7. www.sofistik.com
8. Damjanović, D.; Herceg, Lj.; Duvnjak, I.: Dinamička ispitivanja zavješanih i visećih mostova, Građevinar 62 (2010) 10, 905-912