



ANALITIČKO I EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE STAROGA MOSTA U MOSTARU

mr.sc. **Mladen Kustura**, dipl.ing.građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak: Članak ukratko opisuje ispitivanja provedena na Starom mostu u Mostaru. Kako bi saznali sve pojedinosti seizmičkog ponašanja mosta provedena su eksperimentalna ispitivanja metodom ambijentalnih vibracija kako bi definirali osnovne dinamičke karakteristike – vlastite frekvencije, tonovi osciliranja, koeficijente prigušenja. Numerička analiza mosta uređena je u programu Tower 3D gdje su razmatrani različiti slučajevi opterećenja. Usporedbom rezultata dobivenih eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkom analizom može se vidjeti sličnost istih. Dobiveni rezultati predstavljaju dobru podlogu za daljnja istraživanja ovoga spomenika kulturne baštine.

Ključne riječi: zidani lučni mostovi, ambijentalne vibracije, frekvencije osciliranja, prigušenje, pomaci, naprezanja.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL TESTING OF THE OLD BRIDGE IN MOSTAR

Abstract: The paper presents the investigation taken on Old Bridge in Mostar. In order to get cognitions about the seismic stability of the bridge, experimental testing was done by the ambient vibration method to define dynamic characteristics – own frequencies, mode shapes and damping coefficients. Numerical analysis of the bridge was done in Tower 3D program package at which different cases of overloads were taken in consideration. Comparing results and dynamical characteristics of the bridge obtained by experimental investigation with performed analysis of the mathematical model of the bridge we can see the compatibility. The obtained results present a qualitative base for performing further investigation of this respective monument.

Keywords: ambient vibrations, natural frequencies, mode shapes, damping, linear-elastic, acceleration spectra design, masonry.



1. UVOD

Predmet istraživanja ovoga rada je Stari most u Mostaru, objekt graditeljskog naslijeđa pod zaštitom UNESCO-a, spomenik koji svjedoči povezivanju ljudi, naroda i kultura kroz stoljeća. Kroz dugi period svoga postojanja most je preživio sve nedaće koje su ga zadesile, ali u jednom trenutku nije izdržao. Nakon rušenja most je ponovno izgrađen na način kao što je to izvedeno i stoljećima ranije te danas ponovno služi svojoj osnovnoj svrsi.

Da bi utvrdili stvarno stanje na mostu smo proveli eksperimentalna istraživanja metodom ambijentalnih vibracija. Kao ambijentalne sile tretiraju se vjetar, prometni šum ili neki drugi mikro-zamor. Za mjerenje i registraciju ambijentalnih vibracija konstrukcije primjenjuje se sustav seizmometara, amplifajera i rekordera. Usporedo je rađena i matematička analiza suvremenim softverom Tower 6.0.

Na ova dva načina su određene dinamičke karakteristike mosta koje uspoređujemo s odgovarajućim karakteristikama iz projekta rekonstrukcije mosta te zaključujemo razinu izvedbe i rekonstrukcije građevine.

2. OPIS STAROGA MOSTA

2.1. Općenito

Zidani lučni mostovi zauzimaju posebno mjesto u srcima mnogih stanovnika Europe. Pored svog značaja u kulturnom i povijesnom smislu, zidani lučni mostovi, u mnogim europskim zemljama, predstavljaju bitan dio suvremene prometne infrastrukture. Stari most je arhitektonsko remek-djelo i najznamenitiji mostarski spomenik. Most je preživio kroz stoljeća te postao UNESCO-ov zaštićeni spomenik kulture i graditeljskog naslijeđa kao i popularna turistička atrakcija. Rušenje mosta uslijedilo je 1993. godine tijekom rata u Bosni i Hercegovini. Tijekom rekonstrukcije Starog mosta, u razdoblju od 1999. do 2004., uloženi su veliki naponi da se poštuju prvobitni materijali i praksa.



Slika 1. – Stari most nakon rekonstrukcije



2.2 Konstruktivni elementi mosta

Glavni konstruktivni element mosta je bio noseći luk, rebro za ukrućenje, upornjak mosta i krilni zidovi, čeonni zidovi, pješačka kaldrma i kamene ploče, parapeti mosta te gornji i donji vijenci mosta. Kamene elementi mosta su bili ojačani korištenjem osobitog tehnološkog pribora ručno napravljenog od kovanog željeza i postavljenog preko vezivnih spojnica slijedeći različite tipološke metode sklapanja. U osnovi su te željezne spojnice bile dva različita tipa: klanfe i spone, a bile su primijenjene na kamene elemente s prorezima koji su ciljano izrezbareni s dnom koje je bilo neznatno šire kako bi se izbjegla potpuna hermetičnost. Metalne spojnice su imale također šire ivice, a kada su uklopljene, otopljeno olovo je nalijevano u proreze da se završi sklapanje.

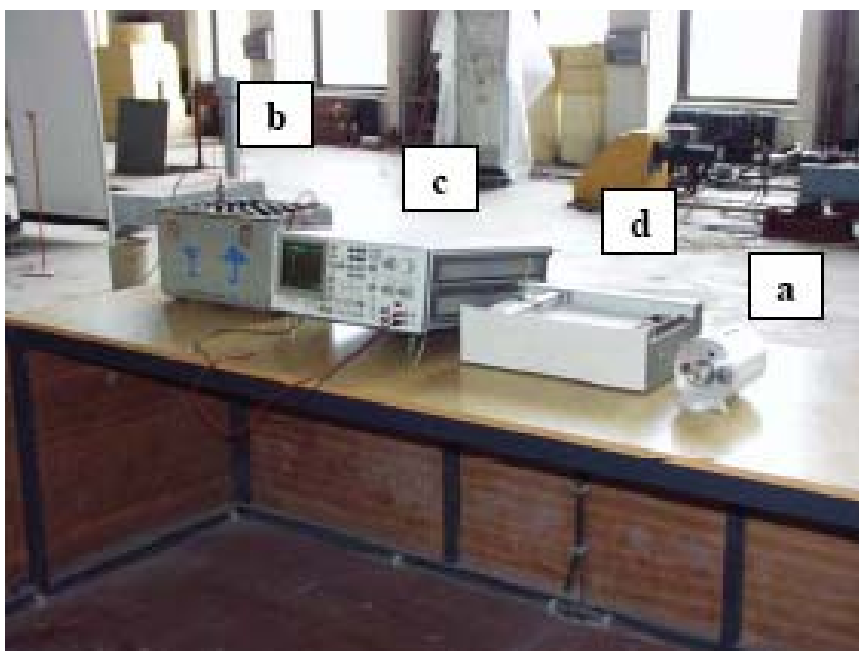
3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

3.1. Općenito

Stari most je ispitivan metodom ambijentalnih vibracija, mjerene su vibracije u karakterističnim točkama uzduž mosta, a zatim je vršena obrada snimljenih signala kako bi se odredile dinamičke karakteristike.

3.2. Oprema za ispitivanje

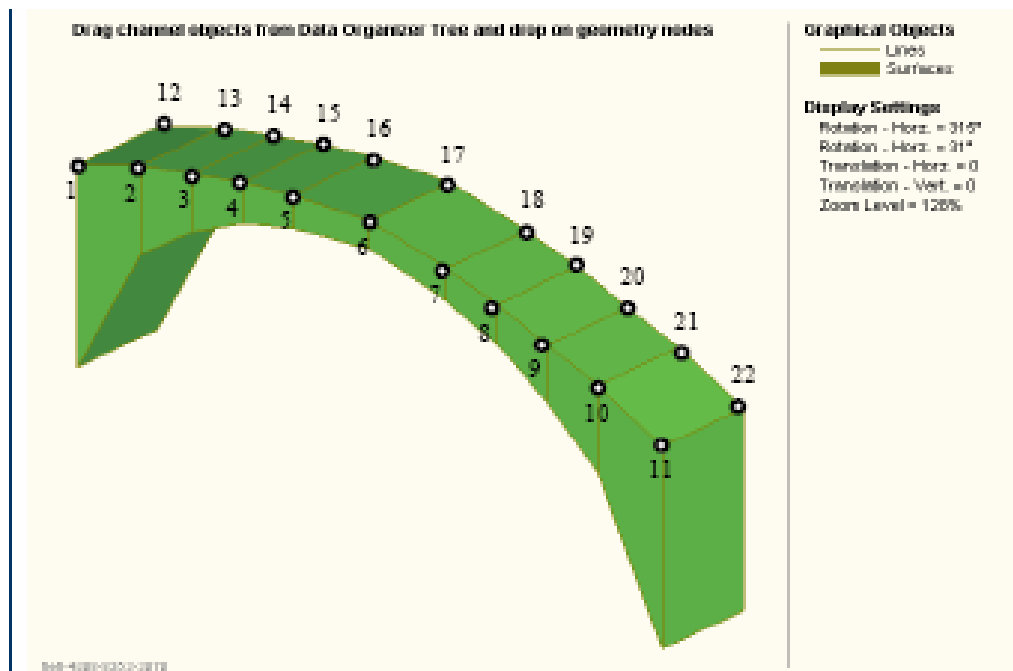
Za mjerenje i registraciju ambijentalnih vibracija konstrukcije primjenjuje se sistem seizmometara, amplifajera i rekordera, slika 2. Seizmometri (a) mjere brzinu i signal se dalje prenosi u sistem za podešavanje signala (b) koji eliminira efekt visokih frekvencija. Filtrirani i pojačani signal se prenosi do spektralnog analizatora (Spectrum analyzer (c)) i Furijevom transformacijom određuje se frekventni sastav vibracije. Pri ovoj frekventnoj analizi dobivaju se i amplitudni i fazni spektri, a obrada signala je u realnom vremenu i dobiveni spektri se mogu iscrtati (d) za dalju analizu i određivanje koeficijenata prigušenja.



Slika 2. – Oprema za ispitivanje

3.3. Ispitivanje Starog mosta

U prvoj fazi ispitivanja potrebna oprema je dopremljena na lokalitet mosta, te je izvršeno umrežavanje i spajanje iste u funkcionalnu cjelinu. Nakon toga pristupilo se postavljanju seizmometara na Stari most u prethodno definirane 22 točke.

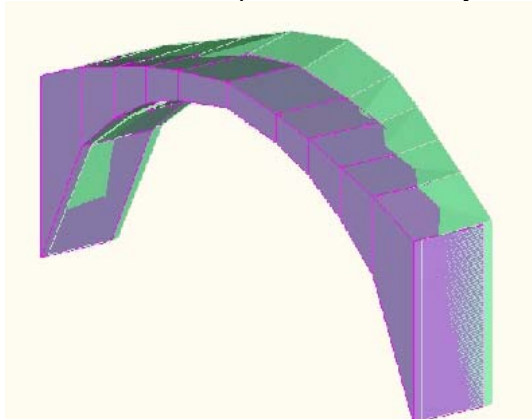


Slika 3. Odabrane točke za postavljenje seizmometara

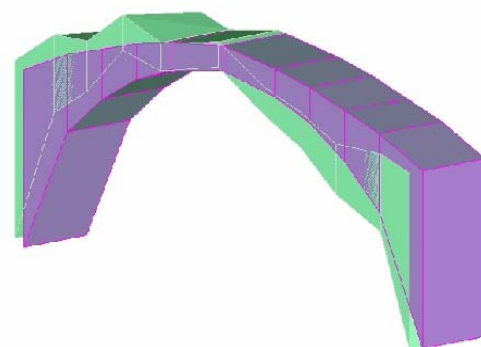
Seizmometri su se postavljali za horizontalne pravce uzduž osi i okomito na os mosta te za vertikalni pravac. Izvršeno je 88 mjerenja uključujući i test dinamičke kalibracije, a snimanje podataka vršeno je u trajanju od 100 sekundi pri testnoj frekvenciji od 200 čitanja u sekundi.

3.4. Dobiveni rezultati

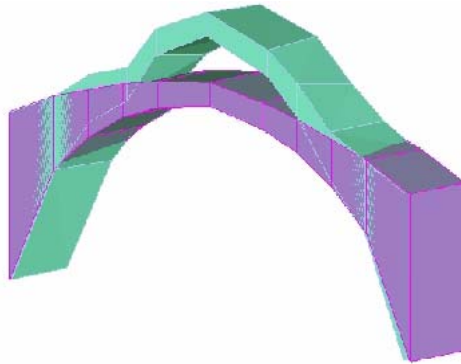
Dobiveni rezultati prikazani su na sljedećim slikama.



Slika 4. $f = 7,6\text{Hz}$ (transverzalni pravac)



Slika 5. $f = 11,43\text{Hz}$ (longitudinalni pravac)

Slika 6. $f = 13,96\text{Hz}$ (vertikalni pravac)

Frekvencija od 7,6Hz je rezonantna frekvencija, transverzalni pravac koji je okomit na pravac pružanja mosta, za longitudinalni pravac, tj. pravac u smjeru pružanja mosta dominantna frekvencija je 11,43Hz, a frekvencija 13,96Hz je rezonantna frekvencija u vertikalnom pravcu. Koeficijenti prigušenja su u rasponu od 1,5% do 4,3% i prikazani su zajedno s dobivenim frekvencijama u tablici 1.

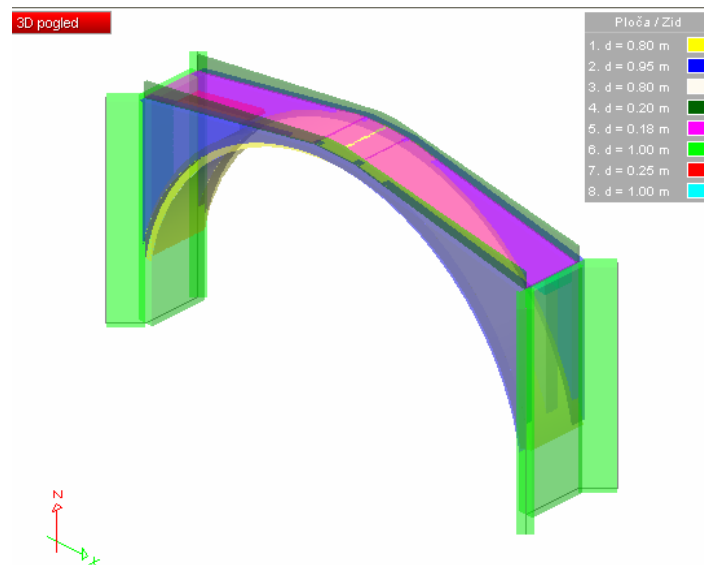
Dominantna frekvencija (Hz)	Koeficijenti prigušenja
7,2	2,3
7,6	1,5
11,43	2,6
13,1	3,1
13,6	2,8
13,96	2,4
14,6	4,3
23,7	3,4

Tablica 1. Dobivene vrijednosti frekvencija i koeficijenata prigušenja

4. NUMERIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE

4.1. Modeliranje konstrukcije

Cjelovit proračun je izveden u programskom paketu Tower – verzija 6.0. Modeliranje je izvršeno pomoću pločastih elemenata te njihov ukupan broj iznosi 892, ukupan broj čvorova na konstrukciji iznosi 726, a ukupan broj graničnih elemenata iznosi 408.



Slika 7. 3D model

4.2. Uvjeti i kombinacije opterećenja

Uvjeti opterećenja i njihove kombinacije definirani su prema Eurocode 1, a za definiranje seizmičkog opterećenja koristimo Eurocode 8.

Razmatrani su sljedeći slučajevi opterećenja:

- a. stalno opterećenje
- b. pokretno opterećenje jednoliko raspodijeljeno po cijelome mostu
- c. pokretno opterećenje jednoliko raspodijeljeno po polovici mosta
- d. potresno opterećenje

Kombinacije opterećenja su:

	Kombinacije opterećenja		Kombinacije opterećenja
1.	1.0 g + Sx	5.	1.35 g + 1.35 p
2.	1.0 g + Sy	6.	1.35 g + 1.35 p/2
3.	1.0 g + 1.0 p	7.	1.0 g + 0.5 p + 1.50 Sx
4.	1.0 g + 1.0 p/2	8.	1.0 g + 0.5 p + 1.50 Sy

Tablica 2. – Kombinacije opterećenja



4.3. Opis izvršene seizmičke analize

Izvršen je proračun na bazi linearno-elastičnog ponašanja konstrukcije. Seizmička djelovanja izračunavaju se modalnom analizom i projektnim spektrom ubrzanja. Seizmička sila određuje se izrazom:

$$F_B = S_d(T_1) \cdot W$$

gdje je:

$S_D(T)$ - ordinata projektnog spektra

W - ukupna težina

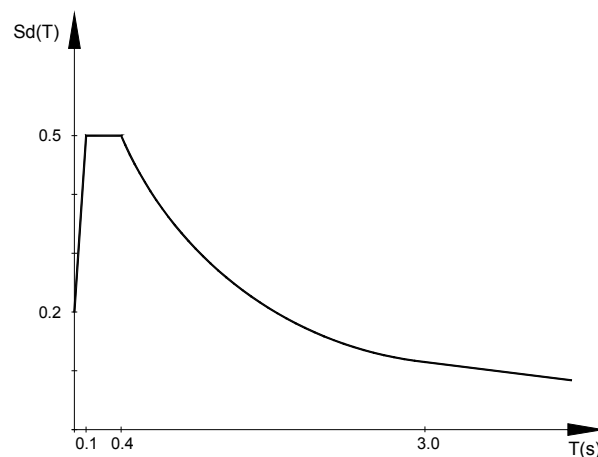
Most se nalazi na području na kojem se očekuje potres VIII. stupnja seizmičnosti prema ljestvici MCS za povratni period od 500 godina.

Ovome odgovara projektno ubrzanje tla $a_g = 0,2$.

Tlo je uvršteno u kategoriju A.

Za faktor ponašanja uzeta je vrijednost $q = 1,0$.

Takvim uvjetima odgovara projektni spektar na slici:



Slika 8. – Projektni spektar

4.3.1. Modalna analiza

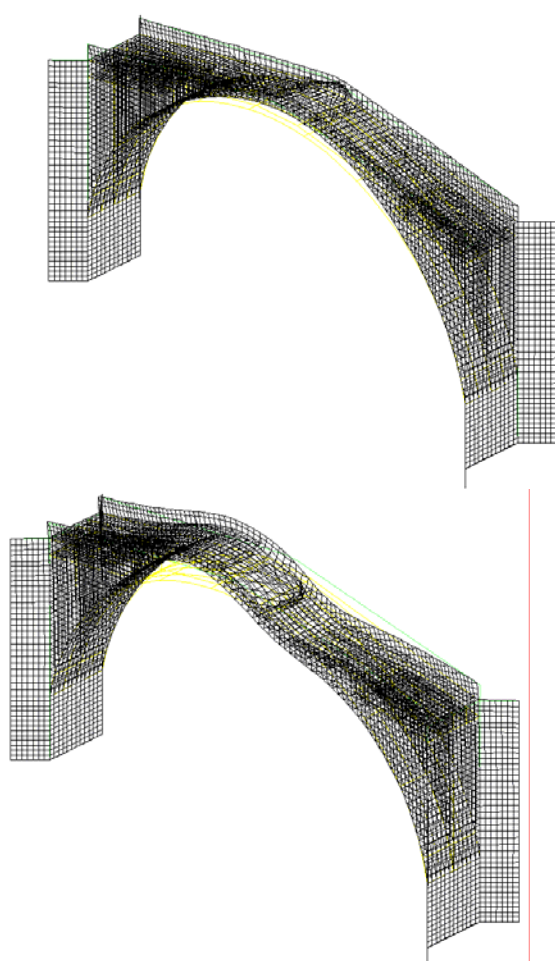
Dobivene vrijednosti perioda i frekvencije osciliranja prikazane su u tablici 3.

Period osciliranja (Hz)	Dominantna frekvencija (Hz)
0,137	7,24
0,109	9,14
0,095	10,51
0,087	11,49
0,076	13,12
0,074	13,43

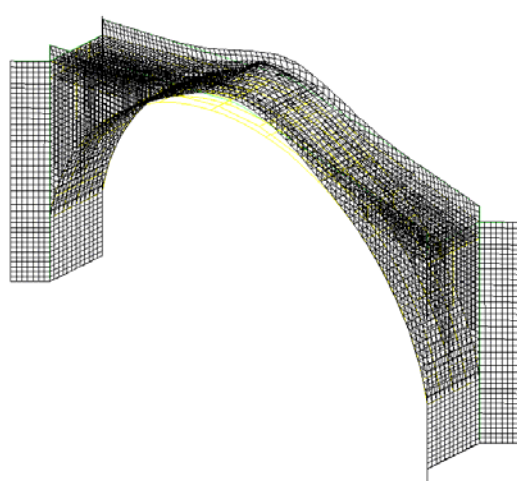
Tablica 3. Periodi osciliranja i vlastite frekvencije mosta



Oblici osciliranja dobiveni numeričkom analizom konstrukcije prikazani su na sljedećim slikama:



Slika 9. $f = 7,25\text{Hz}$ (transverzalni pravac) Slika 10. $f = 10,52\text{Hz}$ (longitudinalni pravac)



Slika 11. $f = 13,12\text{Hz}$ (vertikalni pravac)



4.4. Verifikacija modela mosta na osnovu dobivenih eksperimentalnih rezultata

Analiza ponašanja Staroga mosta provedena u programskim paketima Tower 6.0 i kao i programu Ansys, korištenom pri izradi projekta rekonstrukcije mosta, oba zasnovana na metodi konačnih elemenata uz zadavanje karakteristika materijala dobivenih za ispitivane uzorke, dala je rezultate za koje se može reći da se dobro slažu sa rezultatima analize provedene eksperimentalnim ispitivanjima metodom ambijentalnih vibracija.

Pravac osciliranja	Frekvencija osciliranja mosta (Hz)		
	<i>Eksperimentalna analiza</i>	<i>Matematički model - Tower 6.0</i>	<i>Matematički model - Ansys</i>
Transverzalni	7.6	7.25	6.88
Longitudinalni	11.4	10.52	10.48
Vertikalni	13.96	13.12	14.68

Tablica 4. Usporedba dobiveni rezultata

4.5. Rezultati provedene analize konstrukcije

U daljnjem tekstu bit će prikazana dobivena tlačna i vlačna naprezanja u svodu mosta, krilnim zidovima i središnjem rebro za razmatrane kombinacije opterećenja.

KOMBINACIJE OPTEREĆENJA	SVOD	SREDIŠNJE REBRO	KRILNI ZIDOVI
1. 1.0 g + Sx	-0,98	-0,44	-0,54
2. 1.0 g + Sy	-0,81	-0,60	-0,58
3. 1.0 g + 1.0 p	-0,66	-0,54	-0,77
4. 1.0 g + 1.0 p/2	-0,67	-0,54	-0,60
5. 1.35 g + 1.35 p	-0,89	-0,72	-0,81
6. 1.35 g + 1.35 p/2	-0,90	-0,72	-0,81
7. 1.0 g + 0.5 p + 1.50 Sx	-1,24	-0,45	-0,62
8. 1.0 g + 0.5 p + 1.50 Sy	-1,00	-0,76	-0,85

Tablica 5. Najveće vrijednosti dobivenih tlačnih naprezanja u mostu (MPa)



KOMBINACIJE OPTEREĆENJA	SVOD	SREDIŠNJE REBRO	KRILNI ZIDOVI
1. 1.0 g + Sx	0,42	0,25	0,27
2. 1.0 g + Sy	0,68	0,42	0,66
3. 1.0 g + 1.0 p	0,16	0,08	0,15
4. 1.0 g + 1.0 p/2	0,17	0,09	0,16
5. 1.35 g + 1.35 p	0,21	0,10	0,20
6. 1.35 g + 1.35 p/2	0,22	0,11	0,21
7. 1.0 g + 0.5 p + 1.50 Sx	0,70	0,19	0,60
8. 1.0 g + 0.5 p + 1.50 Sy	0,87	0,13	0,90

Tablica 6. Najveće vrijednosti dobivenih vlačnih naprezanja u mostu (MPa)

Nakon redukcije karakteristične čvrstoće kamenog ziđa usvojenim parcijalnim koeficijentima sigurnosti za materijal možemo zaključiti sljedeće:

- dobivena tlačna naprezanja u svodu i zidovima mosta prezentirana u tablici 6. manja su od srednjih tlačnih čvrstoća kamenog ziđa pretpostavljenih u projektu rekonstrukcije Starog mosta,
- dobivena vlačna naprezanja prezentirana u tablici 6.10. veća su od srednjih vlačnih čvrstoća kamenog ziđa pretpostavljenih u projektu rekonstrukcije Starog mosta,
- kod pojave vlačnih naprezanja sa gornje strane lučne konstrukcije mosta ista će preuzeti spona i pijavice korištene za povezivanje kamenih blokova u jednu monolitnu cjelinu, kapacitet ovoga načina povezivanja blokova trebalo bi dodatno utvrditi,
- kod pojave vlačnih naprezanja sa donje strane lučne konstrukcije mosta mogu se pojaviti mikro-naprslinae u mortu. To će dovesti do pomaka neutralne linije napona prema tlačnoj zoni i povećanja napona tlaka, ali neće ugroziti stabilnost mosta.

4.6. Pomak u svodu mosta

U sljedećoj tablici biti će prikazani maksimalni vertikalni i horizontalni pomaci u najvišoj točki svoda mosta za razmatrane kombinacije opterećenja, kao i maksimalni vertikalni i horizontalni pomaci na cijeloj površini svoda mosta.

Z_{P1} – vertikalni pomak u najvišoj točki svoda mosta

Y_{P1} – horizontalni pomak u najvišoj točki svoda mosta

Z_{P2} – vertikalni pomak u svodu mosta

Y_{P2} – horizontalni pomak u svodu mosta



KOMBINACIJE OPTEREĆENJA	Z_{P1}	Y_{P1}	Z_{P2}	Y_{P2}
1. S_x	0,55	1,09	1,19	1,09
2. S_y	1,83	3,62	1,84	3,62
3. $1.0g + 1.0 p$	1,73	0,01	1,74	0,02
4. $1.0 g + 1.0 p/2$	1,60	0,01	1,73	0,02
5. $1.35 g + 1.35 p$	2,33	0,02	2,34	0,03
6. $1.35 g + 1.35 p/2$	2,33	0,02	2,34	0,03
7. $1.0 g + 0.5 p + 1.50 S_x$	1,46	1,65	1,46	1,65
8. $1.0 g + 0.5 p + 1.50 S_y$	1,55	5,45	1,56	5,45

Tablica 7. Maksimalni pomaci u svodu mosta (mm)

Prezentirane vrijednosti pomaka pokazuju da su maksimalni pomaci u najvišoj točki svoda mosta uglavnom su i maksimalni pomaci na cijelome mostu.

5. ZAKLJUČCI I SMJERNICE DALJNJIH ISTRAŽIVANJA

5.1. Zaključci

Cilj ovoga rada bio je prezentirati stanje u kojemu se trenutačno nalazi obnovljeni Stari most kao građevina i kao spomenik kulture pod zaštitom UNESCO-a.

Na osnovu prethodno navedenoga možemo zaključiti:

- minimalne razlike u oblicima osciliranja mosta, tj. nešto kruće ponašanje mosta dobiveno metodom mjerenja ambijentalnih ispitivanja na licu mjesta može se objasniti kvalitetnom izradom uz sudjelovanje metalnih elemenata u mostu (elementi od kovanog željeza, klanfe i spone) koji utječu na krutost mosta, a koji u numeričkom modelu nisu mogli biti zastupljeni;
- dobivena maksimalna naprezanja i pomaci na mostu ukazuju da je konstrukcija mosta najosjetljivija za područje u blizini vrha luka mosta kao i u trećinama raspona mosta;
- dobiveni maksimalni pomaci u vrhu mosta za smjer okomit na pravac pružanja mosta pokazuju gdje je konstrukcija mosta najosjetljivija;
- umijeće i kreativnost starih graditelja, način građenja sa specifično izvedenim spojevima uz korištenje klanfi, pijavica i drugih metoda spajanja kamenih blokova neosporno daju jedinstvenu konstruktivnu cjelinu koja utječe na ponašanje konstrukcije u svim uvjetima korištenja;
- možemo konstatirati da su vlastita težina i oblik mosta dominantan faktor koji utječe na stabilnost cijele konstrukcije pa tako i za djelovanje sila potresa.



5.2. Smjernice daljnjih istraživanja

U cilju što boljeg razumijevanja ponašanja Staroga mosta kao i njegove zaštite i očuvanja za generacije koje dolaze potrebno je vršiti stalni monitoring na objektu suvremenim instrumentima koji bi registrirali i zapisali svaku aktivnost konstrukcije.

Sljedeći korak u definiranju osnovnih karakteristika mosta bio bi testiranje modela mosta na seizmičkoj platformi kako bi se dobila kvalitetnija slika seizmičkog ponašanja i stabilnosti ovoga spomenika kulture pod zaštitom UNESCO-a.

Jedan od važnih ciljeva bit će istraživanje i definiranje kapaciteta veza korištenih za povezivanje kamenih blokova u monolitnu cjelinu.

LITERATURA

1. R. Vukotić: Ispitivanje konstrukcija, Beograd, 1984.
2. Društvo građevinskih inženjera i tehničara Zagreb: Mjerenje deformacija i analiza naprezanja konstrukcija II, Zagreb, 1982.
3. M. Gilbert: Zidani i lučni mostovi – konstrukcija, teorija i novija istraživanja u UK, autor department of Civil and Structural Engineering University of Sheffield UK, 2004.
4. Dž. Čelić; M. Mujezinović: Stari mostovi u Bosni i Hercegovini, Sarajevo, 1998.
5. Glavni projekt rekonstrukcije Starog mosta u Mostaru, Mostar, 2000.
6. D. Ančić; P. Fajfar; B. Petrović; A. Szavits-Nossan; M. Tomažević: Zemljotresno inženjerstvo, Beograd, 1990.
7. Peković, Ž., Soil Investigation of Mostar bridge fortification, Collection of Papers 2 of the Faculty of Civil Engineering University of Mostar, Mostar, 2002.
8. Eurocode, Beussels, 2003.
9. M. Hrasnica : Seizmička analiza zgrada, Sarajevo, 2005.
10. J. Radić i suradnici: Zidane konstrukcije – priručnik, Zagreb, 2007.
11. Krstevska, L. & Tashkov, Lj. Ambient Test of Reconstructed Old Bridge in Mostar, ARTeMIS Newsletter 2007.
12. Tower 3D Model Builder, inačica 6.0, računalni program firme Radimpex, Beograd, 2008
13. Krstevska, L., Experimental in-situ testing of reconstructed Old Bridge in Mostar, Proceedings of The 14th World Conference on Earthquake Engineering, paper ID-12-01-0243, Beijing, China, 2008.
14. Krstevska, L., Kustura, M. & Tashkov, Lj., Dynamic testing of the Old Bridge in Mostar, International Scientific Symposium, Mostar 2008.
15. Krstevska, L., Kustura, M. & Tashkov, Lj., Dynamic testing of the Old Bridge in Mostar, II GNP, Podgorica, Crna Gora, 2008.