



# EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA SKALIRANOG MODELA I SEGMENTA LUKA STAROG MOSTA U MOSTARU

*Prethodno priopćenje/Preliminary communication*

*Primljen/Received: 10. 10. 2018.*

*Prihvaćen/Accepted: 14. 11. 2018.*

**Mladen Kustura, Ph.D.**

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet

**Lidija Krstevska, Ph.D.**

Univerzitet Sv. Ćiril i Metodij, Skopje

Institut za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju – IZIS

**Dragan Ćubela, Ph.D.**

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet

**Sažetak:** Zidani lučni mostovi zbog svojega karakterističnog izgleda i kompleksnosti materijala od kojih su građeni i danas su predmet eksperimentalnih i numeričkih analiza. Jedan od istaknutih primjera ovog tipa konstrukcija jeste i Stari most u Mostaru, koji je, zajedno s lokalitetom mosta, pod zaštitom UNESCO od 2005. godine. Upravo je ovaj simbol grada na Neretvi odabran kao osnova za analizu ponašanja zidanih lučnih mostova i njihovih elemenata. Kroz rad će biti prikazani rezultati kvazistatičkih ispitivanja elemenata veze provedenih na modelima segmenata svoda Starog mosta u razmjeri 1:3 kao i rezultati ispitivanja ponašanja fizičkog modela Starog mosta skaliranog u razmjeri 1:9 ispitivanog na seizmičkoj platformi za različite nivoe seizmičke pobude. Modeli su izgrađeni s realnom aplikacijom veza između kamenih elemenata - klamfe, trnovi i tekuće olovo. Utvrđivanje kapaciteta nosivosti i načina popuštanja elemenata veza ispitivanih segmenata te određivanje mehanizma loma modela mosta osnovne su zadaće provedenih eksperimentalnih istraživanja.

**Ključne riječi:** zidani lučni mostovi, statičko opterećenje, seizmičko opterećenje, elementi veze, kapacitet nosivosti, razvoj pukotina, mehanizam loma.

## EXPERIMENTAL TESTING OF SCALED MODEL AND ARCH SEGMENTS OF THE OLD BRIDGE IN MOSTAR

**Abstract:** Due to their characteristic appearance and complexity of materials used for their construction, masonry arch bridges are still the subject of experimental and numerical analyses. One of the characteristic examples of this type of structures is the Old Bridge in Mostar that, along with the bridge location, has been under UNESCO protection since 2005. It is exactly this symbol of the town residing on the Neretva River that has been selected as the basis for analysis of behavior of masonry arch bridges and their structural elements. This paper will present the results of the quasi-static tests on connection elements carried out on models of arch segments of the Old Bridge at the scale of 1:3 as well as the results of the shaking table tests of the behavior of the physical model of the Old Bridge scaled to 1:9 under different levels of seismic excitation. The models were built by application of real connection elements between stone elements – cramps, dowels and liquid lead. Definition of bearing capacity and mode of deterioration of the connection elements of the tested segments as well as definition of the failure mechanisms of the bridge model are the main tasks of the performed experimental investigations.

**Key words:** masonry arch bridges, static load, seismic load, connection elements, bearing capacity, development of cracks, failure mechanism.



## 1. OPIS PROVEDENIH ISTRAŽIVANJA

Poznavanje ponašanja zidanih konstrukcija izloženih potresu je od primarne važnosti u seizmički aktivnim područjima. Razorne štete na zidanim konstrukcijama u posljednjih nekoliko desetljeća uzrokovane potresima potaknule su inženjere da pažljivije razmotre zidne konstrukcijski materijal, tj. da uoče njegove nedostatke i pronađu načine kako ih prevladati, te tako što više umanje štete razornih potresa.

Eksperimentalna ispitivanja, podijeljena u dvije faze, trebala bi dati rezultate u vidu pomaka, ubrzanja, deformacije i svih drugih veličina od interesa za procjenu seizmičke stabilnosti lučnih mostova zidanih kamenim zidom. Laboratorijska ispitivanja provedena su na Institutu za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju-IZIS, Univerziteta Sv. Ciril i Metodij u Skopju, Republika Makedonija.

U prvoj fazi eksperimentalnih istraživanja izrađeno je šest segmenata luka u razmjeri 1:3 koji su ispitani u laboratoriju u kvazistatskim uvjetima. Cilj ove faze istraživanja je utvrditi kapacitet nosivosti elemenata veze na moguća opterećenja koja se javljaju u svodu nosivog luka i način otkazivanja veze i aktiviranje spojnih elemenata.

U drugoj fazi izgrađen je model Starog mosta u razmjeri 1:9 te je testiran na seizmičkoj platformi za različite nivoe opterećenja. Cilj ove faze istraživanja je utvrditi mehanizam loma modela Starog mosta uz mjerenje svih veličina od interesa za daljnje analize.

## 2. MOSTAR I NJEGOV MOST

Mostarsko područje je naseljeno od najranije povijesti o čemu svjedoče brojni arheološki nalazi od neolita do kasnog srednjeg vijeka. Posebnu pozornost privlače naselja karakteristična za brončano i željezno doba - gradine i kamene grobne humke - gomile, te ostaci naseljavanja iz raznih epoha.

Kako je zapisano u knjizi Stari mostovi u Bosni i Hercegovini lokacija današnjega Mostara prvi put se spominje 1452. godine u Dubrovačkom arhivu pod imenom "duo castellialponte de Neretva". Prema dostupnim arheološkim podacima te povijesnim zapisima točno na mjestu današnjeg Starog mosta, prije izgradnje Starog mosta postojali su i drveni mostovi podignuti sredinom 15. stoljeća. Dolaskom Osmanskog carstva i povećanom potrebom za transport preko ovog lokaliteta te sve većom potrebom za sigurnijim prelaskom preko Neretve turski sultan Sulejman Veličanstveni naređuje izgradnju novog kamenog mosta. Most je djelo neimara Mimara Hajrudina, učenika MimarSinana, najvećeg turskog arhitekta. Sagrađen je 1566. godine.



Slika 1. Stari most i rekonstruirani "novi" Stari most



Iako je most (Slika 1.-a) kroz stoljeća bio izložen raznim utjecajima kako silama tako zbog samog korištenja ozbiljnije mjere sanacije ili slični zahvati nisu zabilježeni u arhivima sve do 1952. godine kada je pregledom utvrđeno kako je potrebno izvršiti popravku dotrajale međukatne drvene konstrukcije na kulama mosta. Također, predloženo je uklanjanje raslinja sa zidova mosta koje je bilo uzrok pojave pukotina na istim. U periodu od 1954. do 1957. godine sanirani su temelji mosta i riječne obale. Godine 1963. Izvršena je do tada najobuhvatnija sanacija mosta kojom su injektirani luk most te zamijenjeni oštećeni kameni blokovi. Uz arheološka istraživanja lokaliteta, provedeno je i detaljno fotogrametrijsko snimanje cijelog objekta 1982. godine. Stari most je srušen 1993. godine a nakon rekonstrukcije koja je završena 2004. godine (Slika 1.-b) novi Stari most je upisan na UNESCO listu zaštićenih spomenika kulture.

Glavni konstruktivni element mosta je nosivi luk sa sjevernim rasponom od 28.71m i južnim rasponom 28.62m. Svodni kamen je dimenzija 40x80x100cm. Debljina svoda prosječno je 80cm a njegova širina 395cm. Veliki raspon i karakteristike materijala uvjetovali su uvođenje središnjeg rebra između čeonih zidova mosta kako bi se utjecalo na težinu mosta. Ostali elementi su upornjaci mosta, krilni zidovi, čeonni kameni zidovi koji definiraju fasadu mosta, kaldrma mosta, parapeti mosta, završni vijenac te ograda od kovanog željeza koja je naknadno postavljena na postojeće kamene parapete.

Kameni elementi mosta su ojačani korištenjem pribora ručno napravljenog od kovanog željeza i postavljenog preko vezivnih spojnica. U osnovi te željezne spojnice, odnosno klamfe i sponse, bile su primijenjene na kamene elemente sa prorezima koji su ciljano izrezbareni sa dnom koje je bilo neznatno šire kako bi se izbjegla potpuna hermetičnost. Spojnice su imale također šire ivice a kada su uklopljene otopljeno olovo je nalijeivano u proreze da se završi sklapanje (Slika 2.).



Slika 2. Detalji sklapanja svoda mosta

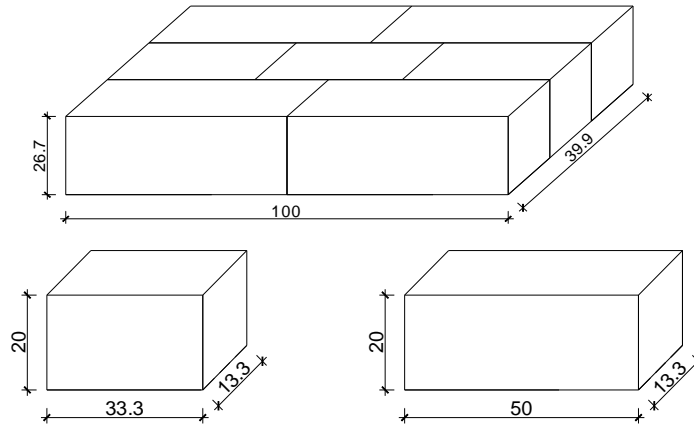
Arheološka istraživanja lokaliteta dokazala su prethodno opisane pretpostavke o drvenim mostovima koji su prethodili Starom mostu. Na obje obale pronađeni su ostatci u vidu klinova za spajanje kao i mjesta oslanjanja po devet okomito postavljenih hrastovih greda položenih u tri reda, koje su konzolno izlazile na rijeku. Arheološkim istraživanjima je potvrđeno i starije datiranje kula, koje su prije izgradnje kamenog mosta bile dio srednjovjekovnog fortifikacijskog sustava.

### 3. PRVA FAZA EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Veze korištene prilikom sklapanja kamenih elemenata svoda mosta, kako je rečeno u prethodnom poglavlju, jesu klamfe i trnovi napravljene od kovanog željeza uz dodatnu upotrebu lijevanog olova. Tehnika sklapanja koristeći prethodno navedena spojna sredstva dozvolila je, zajedno sa korištenjem maltera, efikasan sistem povezivanja koji je naširoko primijenjen prilikom izgradnje Starog mosta u Mostaru.



U prvoj fazi laboratorijskih ispitivanja radi se o izradi šest segmenata luka u razmjeri 1:3 i njihovom ispitivanju pod presom u laboratoriju. Sukladno usvojenoj razmjeri geometrija izrađenih segmenata svoda prikazana je na Slici 3. Cilj ove faze istraživanja je utvrditi nosivost svih elemenata veze na moguća opterećenja koja se javljaju u svodu nosivog luka, kao i način na koji dolazi do gubitka veze i nosivosti u kamenom zidu.



Slika 3. Dimenzije segmenata za ispitivanje

Izrađeni segmenti luka vjerna su replika segmenata luka Starog mosta u Mostaru, materijal kamenih blokova, maltera i elemenata veze korištenih za izgradnju segmenata približno istih su karakteristika kao materijali korišteni za gradnju Starog mosta.



Slika 4. Izrađeni modeli segmenata svoda

Pripremljeni segmenti, prikazani na Slici 4., ispitivali su se na način da se ispituju po dva kompleta s istim principom nanošenja opterećenja kako bi se odredio kapacitet nosivosti pod zadatim opterećenjem. Ovisno o položaju ispitivanog elementa dobiveni su rezultati koji opisuju ponašanje prilikom opterećenja na savijanje za dva različita načina orijentacije ispitivanih elemenata te ponašanje prilikom opterećenja na smicanje. Način postavljanja



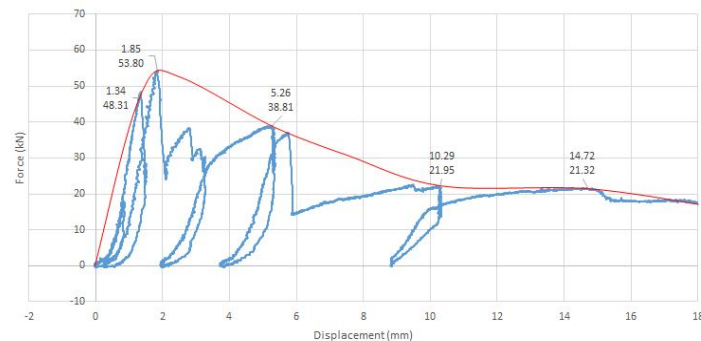
testnih segmenata u položaj za ispitivanje prikazan je na Slici 5.



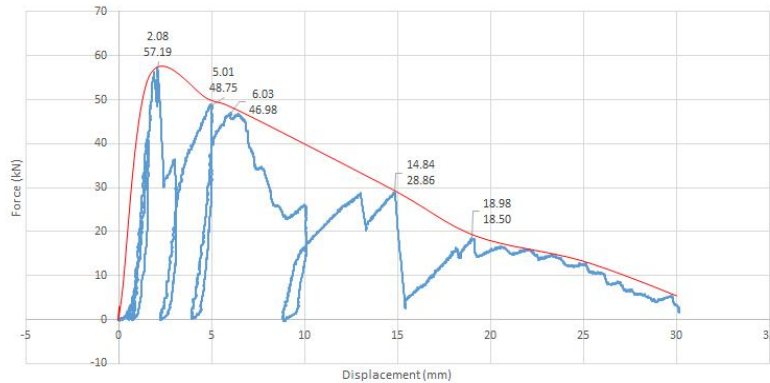
Slika 5. Izgrađeni segmenti zida postavljeni u položaj za ispitivanje

### 3.1. Ispitivanje izrađenih segmenata i rezultati

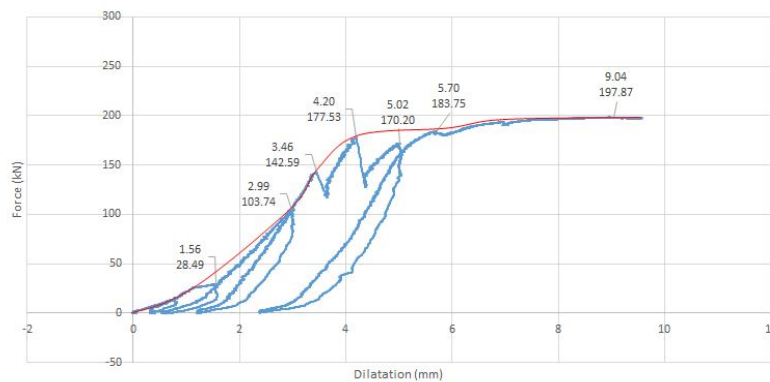
Ispitivanje izrađenih segmenata provodilo se polu-cikličkim nanošenjem opterećenja uz registriranje vrijednosti sile i njoj odgovarajućeg pomaka. Na slikama koje slijede prikazani su dijagrami sila-pomak za segmente ispitivane na savijanje – tip 1. (Slika 6.), savijanje – tip 2. (Slika 7.) te smicanje (Slika 8.). Dijagrami sila-pomak dobiveni za ostale ispitivane segmente sličnog su oblika.



Slika 6. Dijagram sila-pomak ispitivanog segmenta E1-1-B-V



Slika 7. Dijagram sila-pomak ispitivanog segmenta E2-1-B-L



Slika 8. Dijagram sila-pomak ispitivanog segmenta E3-1-S

Izmjerene vrijednosti pomaka za nanoseno opterećenje prikazane su u Tablici 1. za sve ispitivane segmente.

<b>E1-1-B-V</b>	Sila (kN)	48,31	53,80	38,81	21,95	21,32
	Pomak (mm)	1,34	1,85	5,26	10,29	14,72
<b>E1-2-B-V</b>	Sila (kN)	34,84	48,48	49,42	37,62	35,62
	Pomak (mm)	1,23	3,69	4,66	9,91	19,87
<b>E2-1-B-L</b>	Sila (kN)	57,19	48,75	46,98	28,65	18,50
	Pomak (mm)	2,08	5,01	6,03	13,03	18,98
<b>E2-2-B-L</b>	Sila (kN)	69,84	59,55	15,94	9,27	
	Pomak (mm)	1,88	7,40	10,13	18,25	
<b>E3-1-S</b>	Sila (kN)	28,49	103,74	142,59	183,75	197,87
	Pomak (mm)	1,56	2,99	3,46	5,70	9,04
<b>E3-2-S</b>	Sila (kN)	149,63	204,62	223,63	244,23	
	Pomak (mm)	2,89	3,93	4,46	5,53	

Tablica 1. Izmjerene vrijednosti pomaka



Pregledom izmjerenih vrijednosti pomaka za ispitivane segmente može se zaključiti je kapacitet nosivosti za segmente ispitivane na smicanje i do tri puta veći od kapaciteta nosivosti segmenata ispitivanih na savijanje. Sudjelovanje elemenata veze i njihov broj i način aktiviranja ovisno o nanijetom opterećenju direktno utječu na dobivene rezultate,

Gubitak nosivosti ispitivanih segmenata morta za početni stadij nanošenja opterećenja popraćen je pojavom prvih pukotina (Slika 9.) u sljubnicama morta, što je registrirano maksimalno nanesenom silom na prethodno prikazanim dijagramima sila-pomak.



Slika 9. Pojava prvih pukotina u sljubnicama morta

Daljnje nanošenje opterećenja preuzimaju spojna sredstva, odnosno klanfe i trnovi. Popuštanje ovih veza uzrokuje postepeno smanjenje nosivosti ispitivanih elemenata a sam mehanizam se ogleda u izvlačenju klanfi iz ležišta zalivenih tekućim olovom a nakon toga i izvlačenju trnova iz ležišta (Slika 10.).



Slika 10. Izvlačenje klanfi i trnova iz ležišta

Kroz ispitivanja je uočena i pojava pukotina i lom na kamenim elementima ali za već završni stadij nanošenja opterećenja kada je došlo do potpunog loma ispitivanih segmenata. Pucanje čeličnih elemenata veze, odnosno klanfi i trnova, nije uočeno za provedena ispitivanja.



#### 4. DRUGA FAZA EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Lučne konstrukcije zauzimaju važno mjesto u povijesnim građevinama i jedne su od vizualno upečatljivijih oblika osmišljenih ljudskim umom. Zidani lučni mostovi i danas osiguravaju nesmetan protok roba i usluga te plijene svojim izgledom i trajnošću ali i zahtijevaju posebnu pozornost kako bi i dalje služili svojoj svrsi. Za analizu ponašanja zidanih lučnih mostova osnovno je poznavati ponašanje nosivog svoda mosta. Elementi od kojih su izgrađeni nosivi svodovi lučnih zidanih mostova su kameni blokovi koji imaju visoku tlačnu čvrstoću i zanemarujuću čvrstoću na vlak te mort u čiju se nosivost ne može računati u seizmičkim uvjetima i čija je osnovna zadaća ispunjena sljubnica između kamenih blokova. Pored ova dva osnovna elementa u konstrukciji svjedočimo i konstruktivnim elementima veze kao što su klamfe, klinovi i tekuće olovo. Iz svega navedenog vidimo da su zidane lučne konstrukcije vrlo složene i zahtijevaju posebnu pozornost prilikom analize.

U drugoj fazi eksperimentalnih istraživanja pozornost je bila usmjerena na globalno ponašanje zidanih lučnih konstrukcija kako bi se dobila realna slika o efikasnosti veza kamenog zida te način loma nosivog svoda konstrukcije u uvjetima intenzivne vibracije. Za potrebu ove faze ispitivanja izrađen je model Starog mosta u Mostaru u razmjeri 1:9 (Slika 11.) sa svim detaljima veza koji je ispitivan na seizmičkoj platformi Instituta za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju u Skopju za različite nivoe opterećenja sve do loma konstrukcije.



Slika 11. Model Starog mosta u razmjeri 1:9

Cilj ispitivanja modela na seizmičkoj platformi je istraživanje seizmičkog ponašanja sve do loma modela, s praćenjem svih veličina odgovora konstrukcije – pomaka, ubrzanja, deformacija, koje su od značaja za procjenu globalne seizmičke stabilnosti i načina na koji se razvija mehanizam loma, odnosno, utjecaj veza u očuvanju integriteta konstrukcije.

Ispitivanje je obavljeno u nekoliko faza:

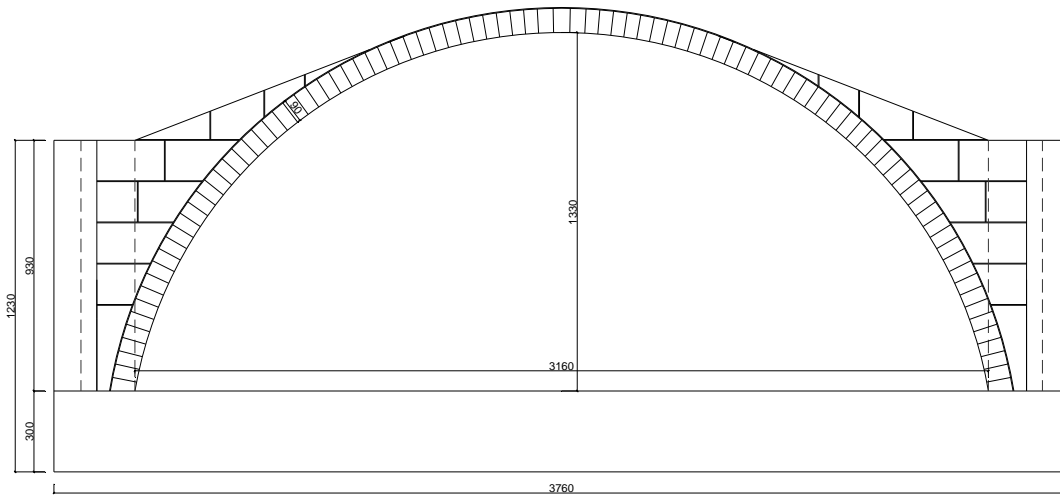
- definiranje dinamičkih karakteristika modela;
- ispitivanje u linearnom domenu sa serijom seizmičkih testova slabijeg intenziteta;
- ispitivanja do loma, sa intenzivnim pobudama, povremenom provjerom dinamičkih karakteristika i opadanja krutosti modela.





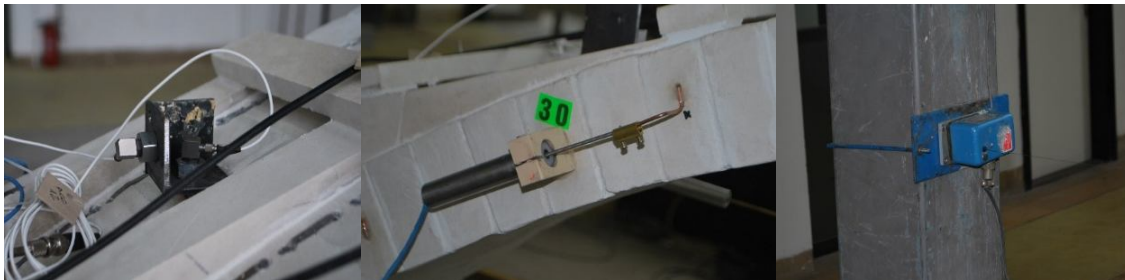
Model mosta izrađen za eksperimentalno istraživanje druge faze konstruiran je kao **gravity force neglected model**, gdje su korišteni materijali za kamen, mort te čelične elemente veze istih ili dovoljno sličnih karakteristika kao kod originalne konstrukcije. Odabrana

razmjera uvjetovana je i dimenzijama seizmičke platforme– 5,0x5,0 m. Sukladno tome ukupna dužina ispitivanog modela zajedno s temeljnom konstrukcijom iznosi 3.76m, raspon luka modela mosta iznosi 3.16m a visina luka modela od temelja do donje točke svoda 1.33m. Geometrija prema kojoj je i izgrađen model mosta prikazana je na Slici 12.



Slika 12. Geometrija modela mosta

Priprema modela za ispitivanje izvršena je na način da se obuhvati što više mjernih točaka na modelu, prvenstveno točke u blizini vrha luka te trećinske točke luka. Pored gore nabrojanih instrumentalizacijom su obuhvaćene točke uz i na temeljnoj konstrukciji. Programom ispitivanja predviđeno je 17 mjernih mjesta ubrzanja, 11 mjernih mjesta relativnih pomaka te 3 mjerna mjesta apsolutnih pomaka modela mosta (Slika13.) ukupno 31 mjerno mjesto.



Slika 13. Mjerač ubrzanja/akcelermetar, mjerač relativnih i apsolutnih pomaka

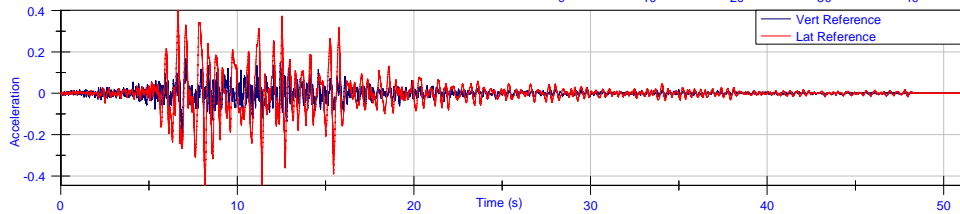
Kao mjerači ubrzanja konstrukcije postavljeni su akcelermetri koji su mjerili odgovor konstrukcije u horizontalnom (uzdužnom smjeru mosta) i vertikalnom smjeru. Kao mjerači relativnih pomaka konstrukcije postavljeni su LVDT senzori (LinearVariableDifferentialTransformer) koji su mjerili relativne pomake konstrukcije luka ili



relativne pomake između kamenih elemenata. Kao mjerači apsolutnih pomaka konstrukcije postavljeni su na referentni stup LP senzori koji su mjerili apsolutne pomake konstrukcije.

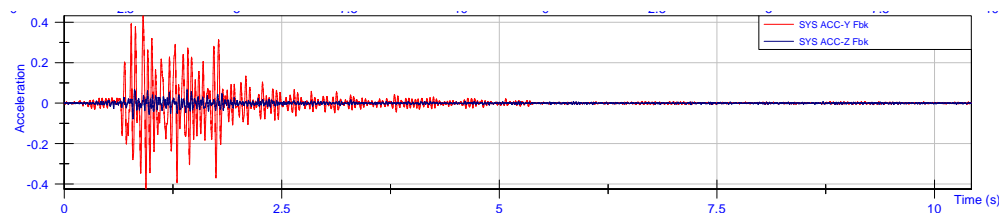
#### 4.1. Ispitivanje modela mosta i rezultati

Za seizmičko ispitivanje modela Starog mosta usvojeno je da se aplicira akcelerogram potresa Petrovac od 15.4.1979 godine koji je za potrebe ispitivanja modela, odnosno za pobuđivanje vibracija modela mosta u rezonantnom stanju skaliran faktorima 1:9, 1:6 i 1:3. Pobuda je aplicirana istovremeno u uzdužnom (Y) i u vertikalnom (Z) smjeru.

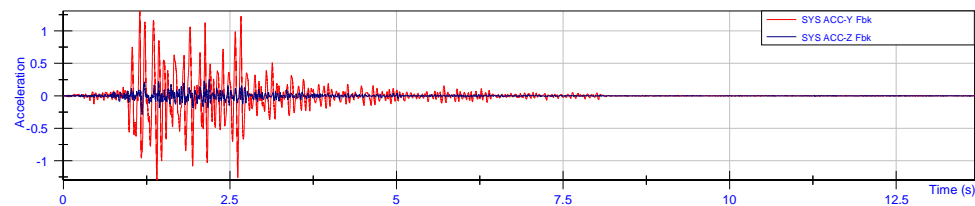


Slika 14. TH for Petrovac, SF 1:1

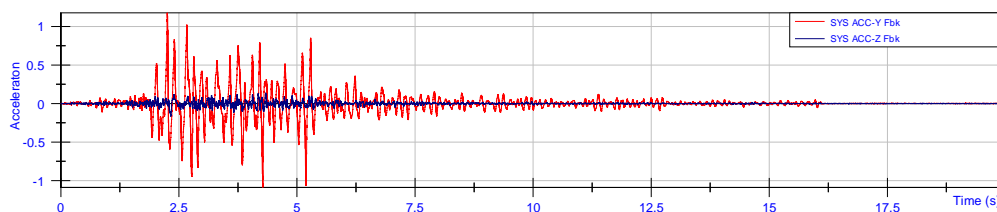
Skalirani akcelerogrami potresa Petrovac, korišteni za dinamičko ispitivanje modela Starog mosta prikazani su na slikama koje slijede:



Slika 15. TH for Petrovac, SF 1:9



Slika 16. TH for Petrovac, SF 1:6



Slika 17. TH for Petrovac, SF 1:3



Seizmička platforma koja se nalazi u Laboratoriji za dinamička ispitivanja na IZIS-u omogućava programirano generiranje translacijskih vibracija u horizontalnom i vertikalnom pravcu. Ukupno je izvršeno 39 testova od kojih je 14 provedeno u svrhu povremenog određivanja dinamičkih karakteristika i provjere degradacije krutosti modela (Random i Sweep) a ostalih 25 testova bili su seizmički testovi (Petrovac) koji su omogućili praćenje odgovora modela i praćenje razvoja mehanizma loma. Pregled provedenih testova prikazan je u Tablici 2.

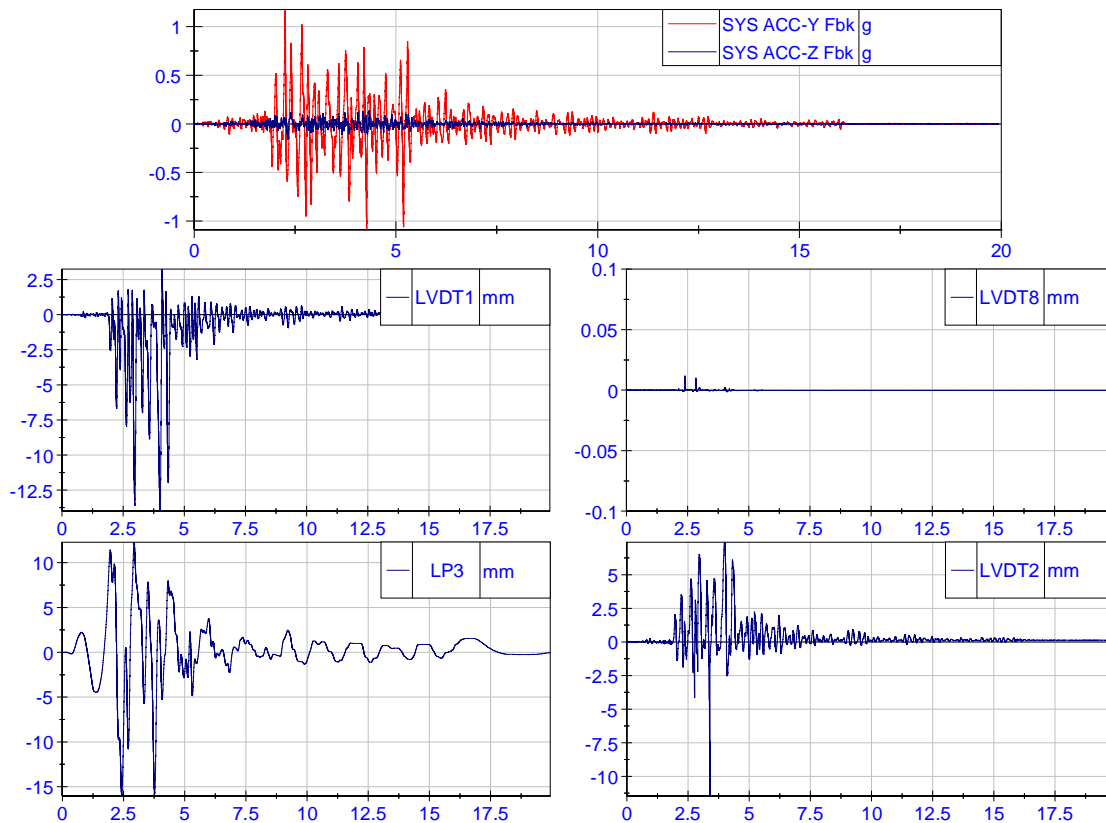
Mark	Type of excitation/input intensity/SF	Mark	Type of excitation/input intensity/SF
Test_01	Random / 3-55Hz / a=0.01g / X	Test_21	Random / 3-55Hz / a=0.01g / V
Test_02	Random / 3-55Hz / a=0.01g / Z	Test_22	Petrovac / Y=1.49g / Z=0.75g / SF 1:9
Test_03	Sweep / 3-55Hz / a=0.01g / X	Test_23	Petrovac / Y=1.79g / Z=0.85g / SF 1:9
Test_04	Sweep / 3-55Hz / a=0.02g / X	Test_24	Petrovac / Y=1.90g / Z=0.90g / SF 1:9
Test_05	Sweep / 3-55Hz / a=0.02g / X	Test_25	Petrovac / Y=2.1g / Z=1.6g / SF 1:9
Test_06	Sweep / 3-55Hz / a=0.02g / X	Test_26	Random / 3-55Hz / a=0.01g / H
Test_07	Petrovac / Y=0.04g / Z=0	Test_27	Random / 3-55Hz / a=0.01g / V
Test_08	Petrovac / Y=0.02g / Z=0	Test_28	Petrovac / Y=2.10g / Z=1.25g / SF 1:9
Test_09	Petrovac / Y=0.07g / Z=0.05g	Test_29	Petrovac / Y=2.30 g / Z=1.50g / SF 1:9
Test_10	Petrovac / Y=0.14g / Z=0.12g	Test_30	Petrovac / Y=2.38g / Z=1.8g / SF 1:9
Test_11	Petrovac / Y=0.27g / Z=0.20g	Test_31	Petrovac / Y=0.38g / Z=0.15g / SF 1:6
Test_12	Random / 3-55Hz / a=0.01g / H	Test_32	Petrovac / Y=0.74g / Z=0.30g / SF 1:6
Test_13	Random / 3-55Hz / a=0.01g / V	Test_33	Petrovac / Y=1.35g / Z=0.60g / SF 1:6
Test_14	Petrovac / Y=0.24g / Z=0.16g / SF 1:9	Test_34	Petrovac / Y=2.40g / Z=0.90g / SF 1:6
Test_15	Petrovac / Y=0.44g / Z=0.38g / SF 1:9	Test_35	Random / 3-55Hz / a=0.01g / H
Test_16	Petrovac / Y=0.51g / Z=0.40g / SF 1:9	Test_36	Random / 3-55Hz / a=0.01g / V
Test_17	Petrovac / Y=0.69g / Z=0.45g / SF 1:9	Test_37	Petrovac / Y=0.40g / Z=0.20g / SF 1:3
Test_18	Petrovac / Y=1.01g / Z=0.50g / SF 1:9	Test_38	Petrovac / Y=1.24g / Z=0.46g / SF 1:3
Test_19	Petrovac / Y=1.25g / Z=0.65g / SF 1:9	Test_39	Petrovac / Y=2.30g / Z=1.15g / SF 1:3
Test_20	Random / 3-55Hz / a=0.01g / H		

Tablica 2. Specifikacija provedenih testova



Zbog obimnosti provedenog istraživanja u ovom radu će biti prikazani i analizirani pomaci karakterističnih točaka modela mosta za pretposljednji test oznake Test\_38 te mehanizam loma modela koji je uslijedio u završnom testu oznake Test\_39.

Izmjereni pomaci modela mosta za ulazno ubrzanje za Test\_38, kod kojega je faktor skaliranja 1:3, prikazani su u Tablici 8. Za mjerno mjesto davača pomaka LVDT1 postavljenog na vrh luka modela, koji je mjerio vertikalne pomake, izmjeren je pomak 17.24 mm. Davač pomaka LP3, također postavljen na vrh svoda mosta, izmjerio je vrijednost horizontalnog pomaka od 31.65 mm. Za davač pomaka LVDT8 koji je postavljen na redove 46 i 48 gdje je mjerio relativne horizontalne pomake možemo očitati vrijednost od 0.01mm. Za mjerno mjesto davača pomaka LVDT2 koji je postavljen na red luka broj 69 izmjeren je pomak 18.89mm.



Slika 18. Ulazno ubrzanje i odgovor modela u karakterističnim točkama za Test\_38

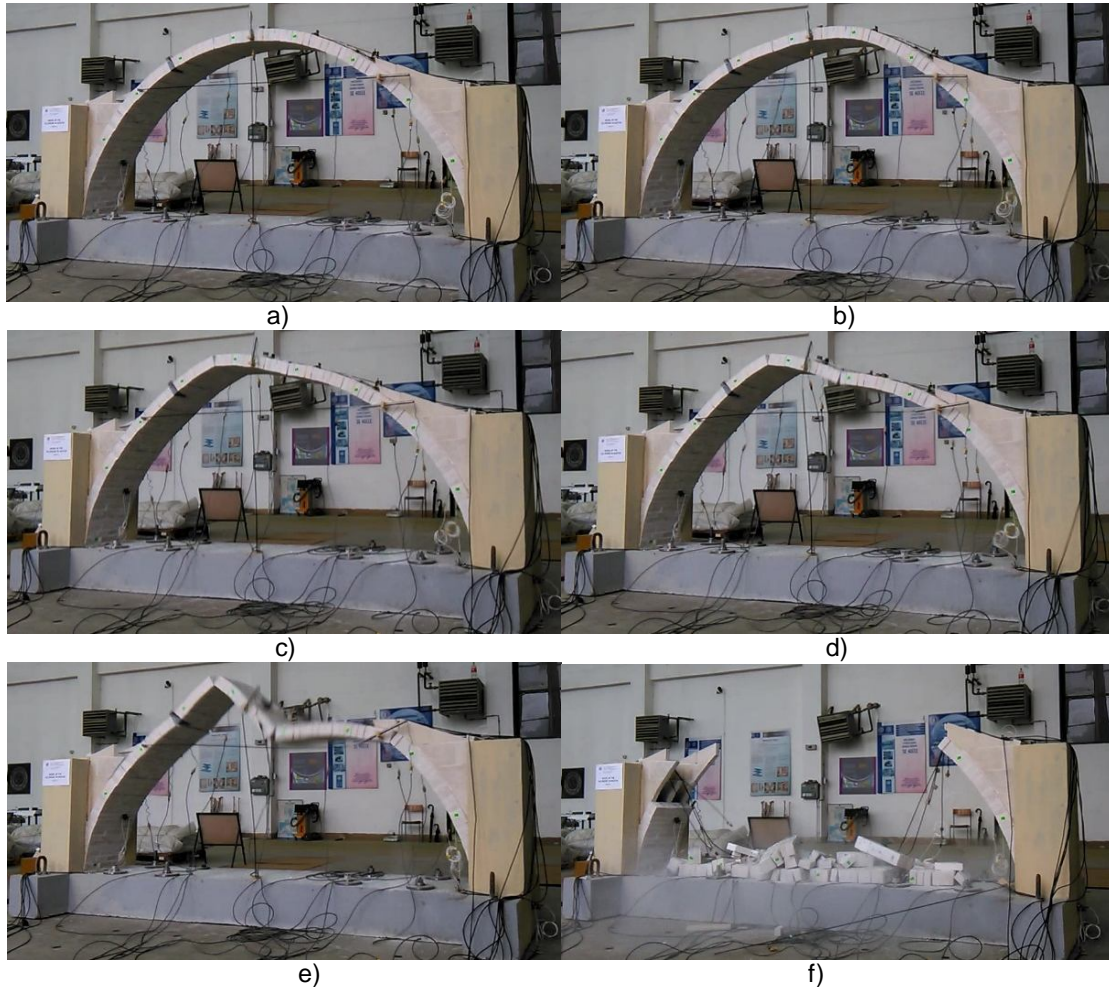
Oznaka	LVDT1	LP3	LVDT8	LVDT2
<b>Pomak (mm)</b>	17.24	28.09	0.01	18.89

Tablica 3. Vrijednosti pomaka vrha luka



Za zadnji test, oznake Test\_39, ulaznog ubrzanja 2.27g, skaliran faktorom skaliranja 1:3 u vremenskom domenu, kod kojega je došlo do loma modela možemo navesti da nije realan da će se dogoditi za lokalitet prototipa a proveden je u cilju analize načina ponašanja i određivanja mehanizma loma modela. Mehanizam loma modela prikazan na Slici 19. rezultat je nepovratnih deformacija modela, velikih pomaka, degradacije krutosti, otkazivanja implementiranih elemenata veza što je dovelo do gubitka stabilnosti koji se manifestira karakterističnim načinom loma konstrukcije.

Razvoj pukotina na modelu mosta potvrdio je kako su zona vrha luka mosta te zona trećinskih točaka ključna mjesta oštećenja za ove tipove konstrukcija. Maksimalni vertikalni i horizontalni pomaci izmjereni na ovim mjestima potvrđuju prethodno.



Slika 19. Mehanizam loma modela mosta



## 5. ZAKLJUČAK

U radu su prezentirana eksperimentalna ispitivanja na segmentima svoda Starog mosta u Mostaru u razmjeri 1:3 za djelovanje različitih tipova kvazi-statičkog opterećenja a u cilju određivanja kapaciteta nosivosti elemenata veza. Također rad prezentira ispitivanje modela Starog mosta u Mostaru u razmjeri 1:9 na seizmičkoj platformi u cilju određivanja kapaciteta nosivosti i mehanizma loma modela. Oba provedena istraživanja dala su nam korisne informacije o načinu ponašanja kako elemenata veze tako i konstrukcije u cjelini. Rezultati provedenih ispitivanja poslužit će za izradu i verifikaciju numeričkih modela čime bi se zaokružile provedene aktivnosti te dao kvalitetan doprinos zaštiti objekata ovakvog tipa koji su velikim dijelom i spomenici kulture.

## ZAHVALA

Realizaciju prezentiranih istraživanja pomogli su:

- ✓ Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru kroz projekt: "Ballast Water Management for Adriatic Sea Protection – BALMAS";
- ✓ Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju – IZIS, Sveučilišta Sv. Ćiril i Metod, Skopje, Republika Makedonija;
- ✓ Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilišta u Splitu, kroz projekt: "Razvoj numeričkih modela armirano-betonskih i kamenih zidanih konstrukcija izloženih potresnom opterećenju zasnovanih na diskretnim pukotinama", financiran putem Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ).

## LITERATURA

1. ČelićDž.; M. Mujezinović: Stari mostovi u Bosni i Hercegovini, Sarajevo, 1998.
2. Čolak, I.: Kratki prikaz revitalizacije lokaliteta Starog mosta, E-zbornik, Faculty of Civil Engineering University of Mostar, Mostar, 2013.
3. Gojković M.: Stari kameni mostovi, Naučna knjiga Beograd, 1982. godine.
4. Gotovac, B.: Numerički modeli luka Starog mosta, Draft varijanta revizije projekta rekonstrukcije Starog mosta u Mostaru, Omega engineering, Mostar, 2003.
5. Gotovac, B.: Ponovna izgradnja Starog mosta, Ceste i mostovi, glasilo Hrvatskog društva za ceste, br. 7-9, str. 23-33, Zagreb, 2004.
6. Kustura M.: Investigation of Seismic Stability of the Old Bridge in Mostar, Master's Thesis, Skopje 2009.
7. Kustura M.: Investigation of Seismic Behavior of Stone Arch Bridges Including the Effect of Connection Elements, Dissertation, Skopje 2018.