

Primljen / Received: 19.1.2012.

Ispravljen / Corrected: 19.6.2012.

Prihvaćen / Accepted: 24.8.2012.

Dostupno online / Available online: 15.9.2012.

Statička i dinamička analiza starog kamenog mosta u Mostaru

Autori:



¹ Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl.ing.građ.
jure.radnic@gradst.hr



¹ Prof. dr. sc. **Alen Harapin**, dipl.ing.građ.
alen.harapin@gradst.hr



¹ **Marija Smilović**, dipl.ing.građ.
marija.smilovic@gradst.hr



¹ **Nikola Grgić**, dipl.ing.građ.
nikola.grgic@gradst.hr



² Prof. dr. sc. **Mladen Glibić**, dipl.ing.građ.
mladen.glibic@tel.net.ba

¹ Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

² Sveučilište u Mostaru
Građevinski fakultet

Stručni rad

Jure Radnić, Alen Harapin, Marija Smilović, Nikola Grgić, Mladen Glibić

Statička i dinamička analiza starog kamenog mosta u Mostaru

U radu su prikazani rezultati statičke i dinamičke analize lučnog kamenog mosta u Mostaru koristeći prethodno razvijeni numerički model autora za statičku i dinamičku analizu različitih tipova zidanih konstrukcija. Razmatrana su dva modela geometrije mosta, s mikro i makro modelom zida. Analiziran je utjecaj vertikalnih opterećenja, temperaturnih promjena i djelovanje realnog potresa. Proračunski progibi i zone pukotina u luku dobro se slažu sa stvarnim stanjem, što potvrđuje pouzdanost korištenog numeričkog modela. U radu se ukazuje na potrebu hitne sanacije oštećenja obnovljenog kamenog luka.

Ključne riječi:

stari kameni most u Mostaru, obnova, oštećenja, statička i dinamička analiza, sanacija

Professional paper

Jure Radnić, Alen Harapin, Marija Smilović, Nikola Grgić, Mladen Glibić

Static and dynamic analysis of the old stone bridge in Mostar

The static and dynamic analysis results for the arch stone bridge in Mostar are presented. The analysis is based on the numerical model previously developed by the author for static and dynamic analysis of various types of masonry structures. Two bridge geometry models, with micro and macro modelling of masonry, are considered. The influence of vertical load, temperature change, and real earthquake action, is analyzed. The design deflections and crack zones in arch correspond well to the real life situation, which confirms reliability of the numerical model used. It is emphasized in the paper that the damage to the renovated stone arch should be remedied as soon as practicable.

Key words:

old stone bridge in Mostar, renovation, damage, static and dynamic analysis, repair

Fachbericht

Jure Radnić, Alen Harapin, Marija Smilović, Nikola Grgić, Mladen Glibić

Statische und dynamische Analyse der alten Steinbrücke in Mostar

In der Arbeit sind die Resultate der statischen und dynamischen Analyse der Bogensteinbrücke in Mostar dargestellt, wobei das vorher entwickelte numerische Modell des Autors für die statische und dynamische Analyse verschiedener Typen von Mauerkonstruktionen entwickelt wurde. Es wurden zwei Brückengeometrie - Modelle mit einem Mikro- und Makromodell des Mauerwerks in Erwägung gezogen. Ferner wurde der Einfluss von vertikalen Belastungen, Temperaturveränderungen und Wirkungen eines realen Erdbebens analysiert. Die berechneten Durchbiegungen und Risszonen in dem Bogen entsprechen sehr dem faktischen Zustand, womit die Verlässlichkeit des verwendeten numerischen Modells. In der Arbeit wird auf den Bedarf der dringenden Sanierung der Beschädigung des erneuerten Steinbogens hingewiesen.

Schlüsselwörter:

Alte Steinbrücke in Mostar, Renovierung, Beschädigung, statische und dynamische Analyse, Sanierung

1. Uvod

Stari kameni most u Mostaru preko nemirne i čudljive rijeke Neretve izgrađen je 1566. godine (slika 1.). Gradio ga je Hayruddin, učenik poznatog otomanskog graditelja Kodže Mimara Sinana. Smatra se jednim od najljepših svjetskih kamenih mostova. Most je na UNESCO-ovom popisu svjetske spomeničke baštine najviše kategorije.



Slika 1. Stari kameni most u Mostaru (prije rušenja)

Most ima izuzetno vitki kameni luk raspona oko 30 m i debljine 0,8 m. Širina luka iznosi 3,95 m. Ima 111 redova kamenih blokova, svaki širine 0,4 m. Kameni blokovi luka povezani su metalnim klanfama i trnovima. Na mnogim rješenjima mosta očituje se veliko graditeljsko umijeće njegovih graditelja. Intrados luka u tjemenu je na 57,82 metara nadmorske visine (m.n.v.), a hodna ploha u tjemenu na 60 m.n.v. Prosječna razina prilaznih ulica je na 55 m.n.v., a prosječna razina vode u riječnom koritu je na 42 m.n.v. O gradnji i ljepoti mosta sačuvano je mnogo legendi te napisano mnogo pjesama i priča.

U nedavnom ratu u Bosni i Hercegovini, 1993. godine srušena je rasponska konstrukcija mosta. Uz pomoć Europske zajednice, most i okolne građevine obnovljene su u potpunosti prema izvornom stanju 2004. godine. U studenom 2007. godine u kamenom luku mosta uočene su pukotine na nekoliko mjesta. Najveća izmjerena širina pukotine iznosila je oko 8 mm. Uzrok nastanka pukotina još uvijek nije precizno utvrđen. Nakon dovršetka obnove mosta, u periodu od 2006. do 2008. godine, registrirano je 6 potresa u okolici Mostara. Potresi su bili jakosti 2,6-4,5° po Richteru.

U radu su prikazani rezultati statičke i dinamičke analize mosta koristeći prethodno razvijeni numerički model autora za nelinearnu statičku i dinamičku analizu različitih tipova zidanih konstrukcija [1, 2]. Model omogućava simulaciju najvažnijih nelinearnih efekata ponašanja zida, betona, armature i tla (popuštanje u tlaku, otvaranje i zatvaranje pukotina u vlak, vlačna i posmična krutost materijala između pukotina, posmični lom i sl.), te promjenu geometrije sustava. Razmatrana su dva ravninska (2D) modela geometrije mosta.

Analiziran je utjecaj vertikalnih opterećenja, temperaturnih djelovanja i realnog potresa.

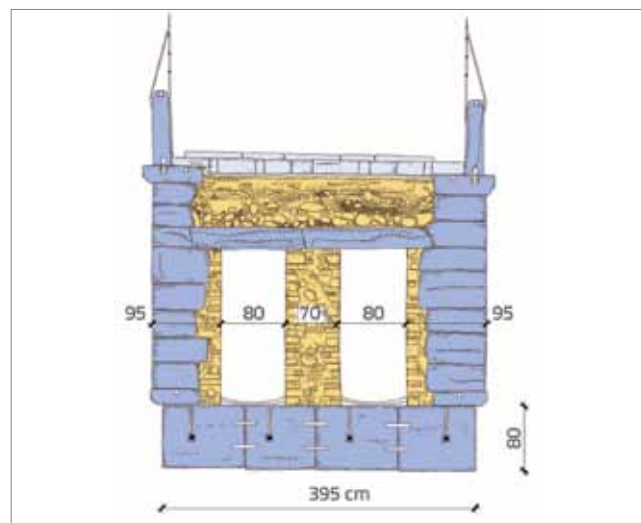
Rezultati provedenih analiza upućuju na stvarna naponska stanja u konstrukciji i stupanj sigurnosti mosta za razmatrana opterećenja. Također, u članku se navode vjerojatni razlozi nastanka pukotina u kamenom luku mosta.

2. Neke napomene vezane uz obnovu mosta

Izvorni most je obnovljen na temelju fotogrametrijske snimke iz 1982. godine [3]. Pri tome su, koliko je to bilo moguće, korišteni materijali, rješenja i postupci građenja sukladni onima kod izgradnje izvornog mosta [4]. Poprečni presjek mosta prikazan je na slici 2. Kao i kod izvornog mosta, luk i vanjski uzdužni zidovi obnovljenog mosta izgrađeni su od kamena tenelija, izvađenog iz istog kamenoloma. Tenelija je kamen vrlo niske čvrstoće, srednje prostorne mase, ekstremne poroznosti i velikog upijanja vode [5] (tablica 1.). Veliko upijanje vode ima za posljedicu znatno smanjenje čvrstoće ovog kamena u uvjetima vlaženja. Kamen se lako obrađuje, pa je stoga rado korišten. Tek izvađen iz kamenoloma, može se rezati ručnom pilom i obrađivati običnim alatima. Tijekom vremena kamen tenelija znatno dobiva na čvrstoći pa je poželjno da prije ugradnje kamen što duže odleži. Za podebljanje luka u peti korištena je tvrđa vrsta vapnenca (lomljeni kamen u mortu), a za hodnu plohu na mostu najtvrđa vrsta vapnenca. Neki podaci o obnovljenom mostu prikazani su u tablici 2. [4].

Tablica 1. Neki podaci za kamen tenelija

Prostorna masa	1977 kg/m ³
Poroznost	24,4 %
Upijanje vode	9,47 %
Koeficijent zasićenja	0,67
Tlačna čvrstoća u suhom stanju	32,9-45,0 MPa
Tlačna čvrstoća u vodom zasićenom stanju	27,2-36,2 MPa
Postojanost na mraz	nije postojan



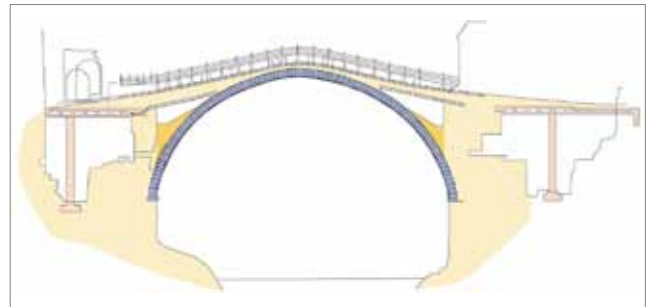
Slika 2. Poprečni presjek mosta

Tablica 2. Neki podaci o obnovljenom mostu

Sjeverni (uzvodni) otvor	28,71 m
Južni (nizvodni) otvor	28,62 m
Strelica luka sa sjeverne strane	12,06 m
Strelica luka s južne strane	12,05 m
Duljina krivulje intradosa luka sa sjeverne strane	40,58 m
Duljina krivulje intradosa luka s južne strane	40,36 m
Duljina krivulje ekstradosa luka sa sjeverne strane	36,07 m
Duljina krivulje ekstradosa luka s južne strane	36,38 m
Širina luka	3,95 m
Debljina bočnih uzdužnih zidova	0,60-0,85 m
Visina kamene ograde	0,90-0,92 m
Nagib nivelete na mostu	18-19 %
Izdizanje nivelete na mostu	2,7 m
Broj redova kamenih blokova u luku	111
Broj kamenih blokova u jednom redu luka	2-5
Broj kamenih blokova u luku	456
Broj kamenih blokova u bočnim zidovima	425
Broj kamenih blokova gornjeg vijenca	157
Broj kamenih blokova ograde	50
Broj metalnih klanfi za vodoravne veze blokova u luku	666
Broj metalnih klanfi za uzdužne veze blokova u luku	550
Broj metalnih klanfi za donje vijence	91
Broj metalnih klanfi za bočne uzdužne zidove	197
Broj metalnih klanfi za gornje vijence	124
Broj metalnih klanfi za blokove ograde	46
Broj metalnih klinova za veze blokova u osi luka	717
Broj metalnih klinova za vezu ograde i vijenca	93
Volumen luka	145 m ³

Uočena su sljedeća odstupanja obnovljenog mosta u odnosu na izvorni:

- Izvedena su velika ošupljenja neposredno iza obaju upornjaka [6], s armiranobetonskom nosivom konstrukcijom, u koje su smješteni arheološki muzeji (slika 3.). Dno ošupljenja je na razini peta luka. U odnosu na izvorno stanje, ovim je smanjeno povoljno djelovanje stalnog vertikalnog opterećenja iza peta luka i povećana horizontalna deformabilnost luka.



Slika 3. Uzdužni presjek mosta

- Obnovljeni most je vjerojatno globalno krući od izvornoga (ima veći prosječni modul elastičnosti) zato što:
 - kameni blokovi su preciznije klesani
 - fuge između blokova su prosječno uže i pravilnije
 - mort u fugama je vjerojatno bolje zbijen i manje deformabilan
 - luk je u tjemenu razuprt (prednapet) hidrauličkim prešama
 - metalne veze između kamenih blokova izvedene su kvalitetnije
 - skela luka je otpuštena tek nakon dovršetka konstrukcije nadlučnog sklopa
 - krutost upornjaka i nadlučnog sklopa povećana je naknadnim injektiranjem.
 - Nakon otpuštanja skele, progib luka u tjemenu iznosio je manje od jednog milimetra. Veća krutost luka je nepovoljnija za temperaturna djelovanja.
- Podebljanje luka u peti kod izvornog mosta urađeno je s pomoću čvrstog lomljenog vapnenca u specijalnom mortu (mješavina živog vapna, crljenice, pijeska, šljunka i vode). Kod toga su kameni blokovi između vanjskih čeonih zidova deblji od 0,8 m i na vrhu zaobljeni ili zasječeni, s vrlo hrapavom plohom ekstradosa (slika 4.). Kod obnovljenog mosta za podebljanje luka u peti korišten je mort manje čvrstoće, a kameni blokovi su podjednake debljine (0,8 m), s relativno ravnom plohom ekstradosa. Time je smanjena izvorna posmična nosivost na spoju ekstradosa luka i podebljanja luka u peti, tj. smanjena je otpornost spregnutog sklopa.

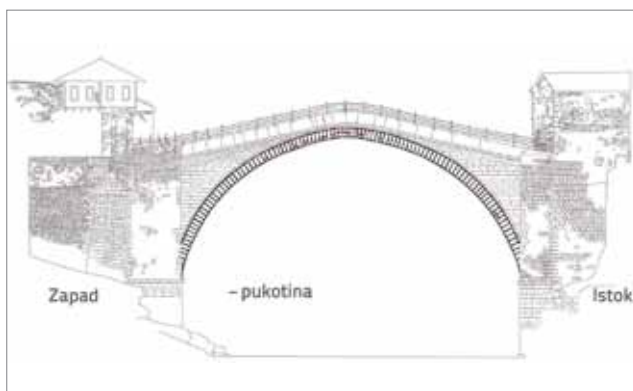


Slika 4. Ostatak kamenog luka izvornog mosta u peti, s podebljanjem iznad ekstradosa

- Geometrija luka nije izvedena kao u izvornom mostu, već s imperfekcijama (uleknućem) na južnoj strani, između tjemena i boka luka prema zapadu [6] (stvarna geometrija luka prije rušenja). Ovo je nepovoljnije sa stajališta naprezanja u luku.
- Izvorni most je građen devet godina, a njegova obnova je trajala manje od dvije godine. Dakle, čvrstoća kamena tenelija na dan otpuštanja skele kod obnovljenog mosta bila je manja od čvrstoće kamena izvornog luka kod njegova dovršetka.

3. Oštećenja luka

Kameni luk i još neki dijelovi izvornog Starog mosta sanirani su 1963. godine [7]. Nije poznato koja je oštećenja luk tada imao. Na fotogrametrijskoj snimci izvornog mosta iz 1982. godine [3], prema kojoj je izvršena njegova obnova, prikazane su pukotine na južnoj čeonj plohi luka (slika 5.). Detaljnim pregledom brojnih ostataka srušenog izvornog kamenog luka (slika 6.) u studenom 2011., ustanovljeno je da su intrados i čela luka imali brojna oštećenja.



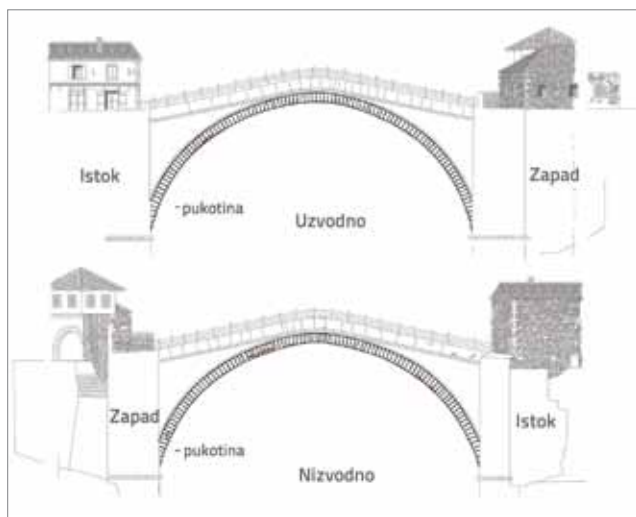
Slika 5. Pukotine u južnoj čeonj plohi luka Starog mosta prije rušenja [3]

Kameni bridovi između čela i intradosa luka su odbijeni na mnogim mjestima. Na mnogim dijelovima čela i intradosa luka odvojeni komadi kamena su pridržani za korpus luka ubušanim metalnim sidrima. Isto tako, brojni su kameni blokovi kod kojih su odbijeni ili oštećeni dijelovi zamijenjeni novim manjim kamenim blokovima, uglavnom manje čvrstoće. Ova je sanacija mjestimično izvedena vrlo kvalitetno, s jedva vidljivim fugama na spoju izvornog kamenog bloka i novog kamena. Na nekim je mjestima sanacija izvedena nekvalitetno. Neke plohe intradosa i čela luka sanirane su mortom i sitnozrnim betonom. Primjetno je da su sanacije luka rađene u različitim povijesnim razdobljima. Dakle, nedvojbeno je da je izvorni kameni luk neposredno prije rušenja mosta akumulirao brojna oštećenja i brojne sanacije tijekom 427 godina nakon izgradnje. Najveći broj oštećenja i sanacija na čeonim ploham luka lociran je uz intrados, a na intradosu uz čela luka.



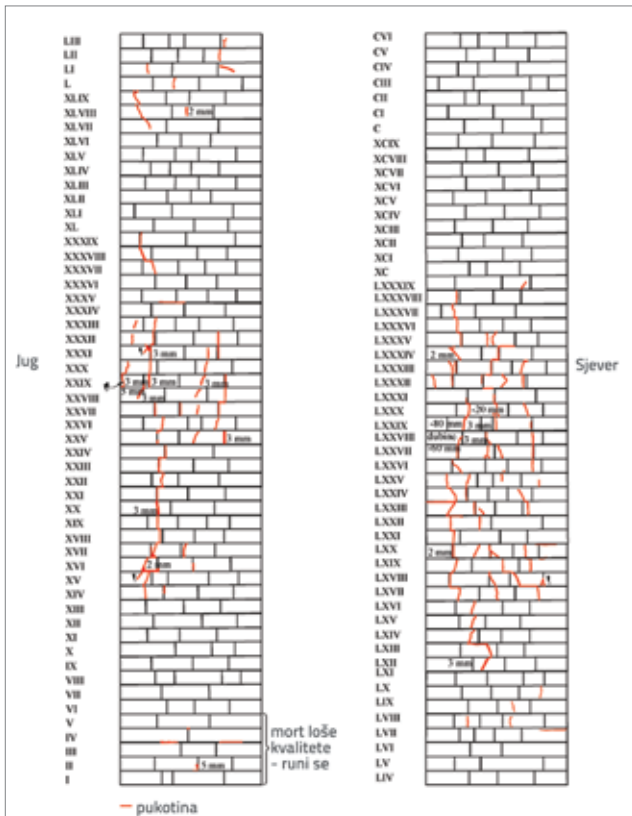
Slika 6. Neka oštećenja i sanacije na ostacima srušenog izvornog luka

Na obnovljenom Starom mostu prvi put su uočene pukotine 2007. godine [8]. Pukotine na čeonim ploham luka prikazane su na slici 7. Najveća širina pukotina iznosila je 8 mm. Također je uočen manji broj pukotina na intradosu luka uz lijevu (istočnu) obalu rijeke. Snimljene pukotine na intradosu luka 2010. godine prikazane su na slici 8 [9]. Osim pukotina u kamenim blokovima, primijećeno je i poprečno horizontalno razmicanje blokova okomito na ravninu mosta. Pregledom mosta početkom studenog 2011. uočeno je da su se prethodno registrirane zone pukotina na čeonim ploham luka [8] proširile po dužini luka. Na slici 9 prikazan je položaj snimljenih pukotina. Najveća širina pukotina iznosila je oko 10 mm. Također su registrirane pukotine na intradosu luka, a u svemu prema radu [9] i slici 8. Na ostalim dijelovima rasponskog sklopa nisu registrirane pukotine ili druga oštećenja.



Slika 7. Pukotine na čelima luka rekonstruiranog mosta registrirane 2007. godine [8]

Primjetno je da su pukotine na čeonim ploham luka približno paralelne s osi luka i da su blizu intradosa luka. Nije poznato kolika je dubina pukotina u poprečnom smjeru luka. Pretpostavlja se da one mjestimično sežu duboko u unutrašnjost vanjskog kamenog bloka, a neke vjerojatno po njegovoj čitavoj širini. Također se može primijetiti da je zona pukotina na južnoj čeonj plohi luka veća od one na sjevernoj čeonj plohi.



Slika 8. Pukotine na intradosu rekonstruiranog luka registrirane 2010. godine [9]

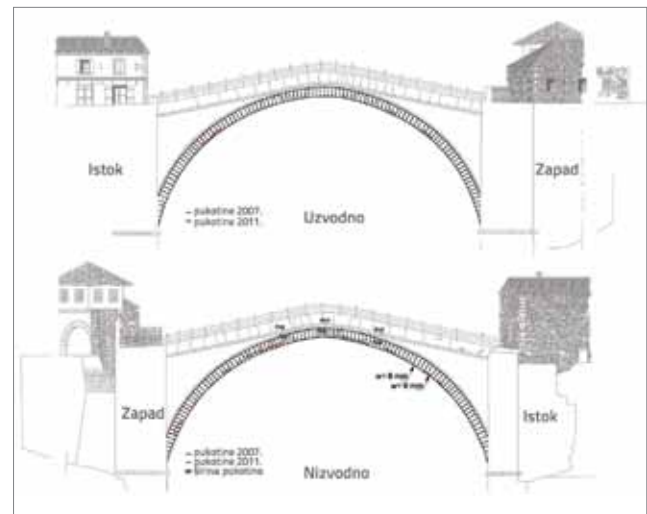
Pukotine na intradosu luka su također u smjeru osi luka, u više vertikalnih ravnina po širini mosta. Primjetno je da su najveća oštećenja intradosa uz južnu čeonu plohu luka. Također nije poznato do koje dubine sežu ove pukotine. Pretpostavlja se da one mjestimično prolaze po čitavoj debljini luka.

Prethodno navedene pukotine u kamenom luku posljedica su prekoračenja vlačne čvrstoće (granične vlačne deformacije) kamenih blokova u smjeru okomitom na ravninu tih pukotina. Vlačna naprezanja (deformacije) okomito na os luka u dvije međusobno okomite ravnine, odnosno navedene pukotine, posljedica su tlačnih naprezanja (deformacija) u smjeru osi luka.

Očito je da je obnovljeni luk, samo tijekom sedam godina nakon njegove ponovne izgradnje, pretrpio znatna oštećenja. Ona su vjerojatno veća od onih koje je imao izvorni kameni luk sedam godina nakon izgradnje. Očito je to posljedica nekih neadekvatnih rješenja ili zahvata pri obnovi mosta, koja su u kratkom vremenu rezultirala ozbiljnim oštećenjem kamenog luka i smanjenjem izvorne mehaničke otpornosti i sigurnosti rekonstruiranog mosta. Važno je napomenuti da obnovljeni i izvorni luk imaju slična oštećenja (pukotine), s podjednakim položajem na čelima i intradosu luka.

Smatra se da su navedena oštećenja izvornog i obnovljenog luka posljedica, ne samo utjecaja vertikalnih opterećenja, nego prije svega temperaturnih promjena. Isključuje se mogućnost

utjecaja slabih potresa nakon obnove mosta na navedena oštećenja luka, kao što je to također zaključeno u radu [8]. Glavni uzrok pukotina u izvornom i obnovljenom luku jest mala vlačna čvrstoća kamena tenelija, od kojeg su izgrađeni.



Slika 9. Pukotine na čelima rekonstruiranog luka registrirane 2011.

Dakle, pukotine u izvornom i obnovljenom luku izazvala su najvjerojatnije ista opterećenja, vjerojatno podjednagog intenziteta. Povećana oštećenja obnovljenog luka, u odnosu na izvorni, vjerojatno su posljedica nekog od sljedećih utjecaja ili kombinacije tih utjecaja:

- povećane krutosti kamenog luka-nepovoljnijeg utjecaja temperature
- povećane horizontalne deformabilnosti kamenog luka i nadlučnog sklopa zbog izvedbe ošupljenja iza pete luka
- umanjene efikasnosti spreznjanja luka u petama s njegovim podebljanjem iznad ekstradosa
- vjerojatno slabije kvalitete novih kamenih blokova u odnosu na izvorne (veća nehomogenost strukture i manja vlačna čvrstoća)
- vjerojatno nepovoljnijih temperaturnih uvjeta pri zatvaranju luka u tjemenu
- odstupanja u geometriji luka.

Kako bi se potvrdio položaj registriranih pukotina i navedenih mogućih uzroka njihova nastanka provedene su numeričke analize.

4. Numeričke analize

Između ostalog, problemi numeričkog modeliranja ponašanja konstrukcija vezani su za što preciznije opisivanje njihove stvarne geometrije i stvarnog ponašanja gradiva. Prostorni (3D) modeli geometrije konstrukcije svakako su najtočniji, ali i najzahtjevniji. Za njih su odgovarajući numerički modeli ponašanja gradiva redovito manje sofisticirani i manje pouzdani od onih za modele jednostavnije geometrije (primjerice 2D ili štapne). Ako se ponašanje neke konstrukcije za mjerodavna

opterećenja može dovoljno precizno opisati pojednostavljenim modelom geometrije, što vodi jednostavnijoj i preglednijoj analizi, a osobito ako se primjenjuje pouzdan numerički model ponašanja gradiva, takve modele treba preferirati u odnosu na kompleksne prostorne modele.

Za vertikalna statička opterećenja, temperaturne promjene i potresna ubrzanja u ravnini mosta, ponašanje Starog mosta može se pouzdano opisati ravninskim modelom geometrije (ravninsko stanje naprezanja, s elementima odgovarajuće širine). Ovdje je korišten prethodno razvijeni numerički model i odgovarajući računalni program za statičku i dinamičku analizu ravninskih zidanih konstrukcija [1, 2], koji će se niže ukratko opisati samo u dijelu koji se odnosi na modeliranje ponašanja ziđa.

Za ziđe je moguće koristiti anizotropni model ponašanja, s različitim modulima elastičnosti i posmika, čvrstoćama i graničnim deformacijama u dva međusobno okomita smjera. Modelirana je plastifikacija i drobljenje ziđa u tlaku, otvaranje pukotina u ziđu u vlaku u njihovom zatvaranje u tlaku, vlačna i posmična krutost ispucalog ziđa, te utjecaj posmika na lom ziđa. Moguće je koristiti makromodel i mikromodel ziđa.

U makromodelu, složeno ponašanje ziđa (zidni blokovi povezani mortom ili drugim spojnim sredstvima) opisuje se zamjenjujućim gradivom reprezentativnih mehaničkih karakteristika. U mikromodelu, moguća je simulacija na razini reški (morta) između zidnih elemenata, kao i na razini spoja između morta i zidnog elementa. Moguće je koristiti plošne i štapne kontaktne elemente, s različitim vezama normalnih i posmičnih naprezanja na plohi spoja između različitih gradiva. Analiza s makromodelom ziđa je jednostavnija, preglednija i vremenski znatno kraća od analize s mikromodelom ziđa. Makromodel ziđa osobito je prikladan za veće realne konstrukcije. Mikromodel ziđa je prikladan samo za prostorno jednostavne konstrukcije.

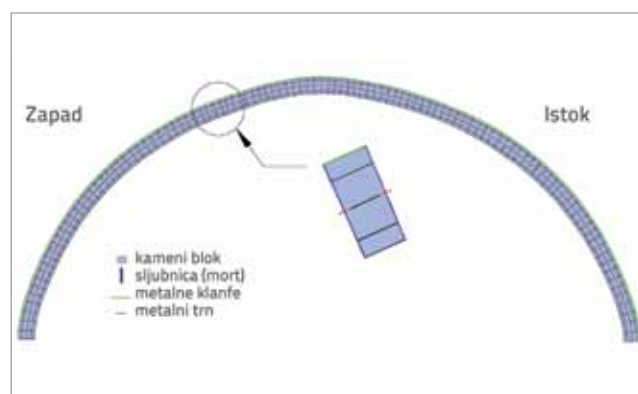
4.1. Numerički model NM1 za statička opterećenja

Nosiva konstrukcija Starog mosta u ovom modelu geometrije reprezentirana je samo kamenim lukom, kao dominantnim konstrukcijskim elementom. Ovo je sukladno pretpostavci, za koju se vjeruje da je bliska stvarnosti, da je kod ovog mosta doprinos nošenju luka od nadlučnog sklopa malen za mnoga referentna opterećenja. Naime, smatra se da je ovdje krutost i nosivost kamenog luka višestruko veća od krutosti i nosivosti nadlučnog sklopa.

Kameni luk ima veliku zakrivljenost, s radijalno položenim pravilnim kamenim klesancima, dodatno ukrućenim metalnim klanfama i trnovima. Sljubnice između kamenih blokova su tanke, kvalitetne, dominantno tlačno opterećene i malo stlačive. S toga luk ima vrlo malu deformabilnost u vertikalnoj ravnini.

Vanjski uzdužni nadlučni zidovi su formirani od kamenih blokova zidanih u horizontalnim slojevima. Dok luk dominantno nosi "na tlak", nadlučni sklop dominantno nosi "na savijanje". Na efikasnost spregnutog sustava luk – nadlučni sklop dominantno utječe efikasnost prijenosa posmičnih naprezanja u horizontalnim sljubnicama nadlučnih zidova, a osobito na spoju ekstradosa luka s podebljanjem luka u peti i s uzdužnim zidovima. Kako je posmična nosivost u navedenim sljubnicama relativno niska, a na spoju s upornjakom nadlučni zidovi ne mogu prenositi tlačna naprezanja na gornjoj trećini svoje visine [4], nosivost nadlučnog sklopa na vertikalna opterećenja i temperaturna djelovanja može se praktično zanemariti. Kod toga se još jednom napominje da obnovljeni most, u odnosu na izvorni, vjerojatno ima smanjenu graničnu nosivost nadlučnog sklopa zbog podatnije posmične veze između kamenog luka i njegovog podebljanja u peti, kao i zbog ošupljenja upornjaka neposredno iza peta luka.

Diskretizacija luka konačnim elementima prikazana je na slici 10. Usvojena je deformirana geometrija luka, uzeta pri obnovi mosta [3], s mikromodelom ziđa [1, 2]. U ovom modelu geometrije svaki je kameni blok duž osi luka modeliran konačnim elementima jednake širine. Po visini luka svaki je kameni blok modeliran s četiri konačna elementa. Mort između kamenih blokova simuliran je kontaktnim elementima debljine 6 mm, koliko iznosi širina sljubnice. Također je simulirana veza kamenih blokova po ekstradosu luka s pomoću metalnih klanfi (vlačni štapni elementi), kao i veza kamenih blokova u osi luka s pomoću metalnih trnova (posmični štapni elementi). Na spoju luka s masivnim upornjacima primijenjeni su odgovarajući rubni uvjeti.



Slika 10. Model geometrije konstrukcije mosta NM1

Posebna pozornost je posvećena definiranju odgovarajućih mehaničkih parametara kamena, morta (veza mort – kamen) i metalnih spona između kamenih blokova, koji su bazirani na literaturi [4, 6]. Usvojeni osnovni računski parametri gradiva prikazani su u tablici 3. Luk je aproksimiran stanjem ravninskog naprezanja, s debljinama elemenata 3,95 m. Analiziran je za vertikalna opterećenja i temperaturna djelovanja.

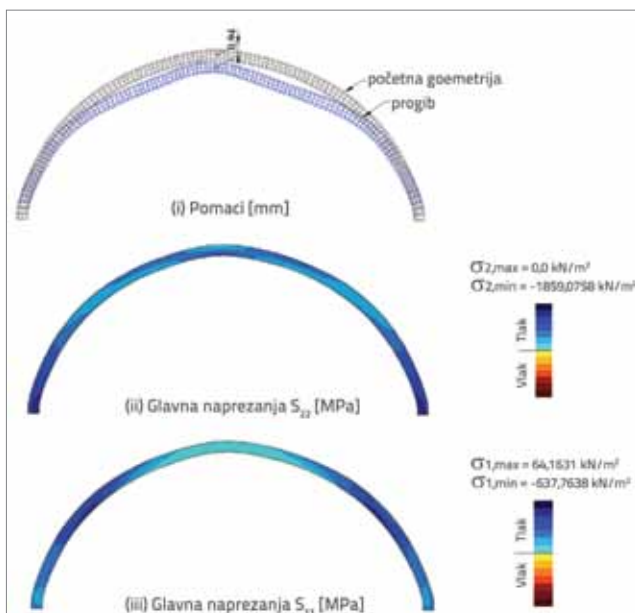
Tablica 3. Usvojeni osnovni parametri materijala za model NM1

Materijal	Usvojeni parametri	
Kamen (tenelija)	modul elastičnosti Poissonov koeficijent modul smika tlačna čvrstoća vlačna čvrstoća granična tlačna deformacija granična vlačna deformacija	$E_b = 2,3 \times 10^4$ MPa $\nu_b = 0,3$ $G_b = 8,84 \times 10^3$ MPa $f_{cb} = 35$ MPa $f_{tb} = 3$ MPa $\epsilon_{bu} = -0,0035$ $\epsilon_{tu} = 0,001$
Mort (reška)	modul elastičnosti Poissonov koeficijent modul smika tlačna čvrstoća vlačna čvrstoća granična tlačna deformacija	$E_m = 3 \times 10^3$ MPa $\nu_m = 0,20$ $G_m = 1,34 \times 10^3$ MPa $f_{cm} = 8$ MPa $f_{tm} = 0,4$ MPa $\epsilon_{mu} = -0,0035$
Klanfe i trnovi	modul elastičnosti vlačna čvrstoća granična vlačna deformacija	$E_s = 2 \times 10^5$ MPa $f_{st} = 100$ MPa $\epsilon_{su} = 0,01$

4.1.1. Rezultati proračuna za djelovanje samo vertikalnog opterećenja

Neki rezultati proračuna za djelovanje samo vertikalnog opterećenja (vlastita težina luka, težina nadlučnog sklopa i opterećenje pješaka) prikazani su na slici 11. Opterećenje pješaka uzeto je 5 kN/m² po čitavoj hodnoj plohi mosta. Ono iznosi samo oko 7% od ukupnog stalnog opterećenja.

Računski progib luka u tjemenu iznosi 0,94 mm, što se gotovo podudara s izmjerenim pomakom nakon otpuštanja skele (južna strana) od 0,9 mm [10]. Luk je u smjeru osi dominantno tlačno opterećen po čitavoj debljini. Najveće glavno tlačno naprezanje u luku iznosi -1,86 MPa. Vlačna naprezanja u kamenim blokovima ne premašuju vlačnu čvrstoću kamena, tj. u njima nema pukotina.



Slika 11. Neki numerički rezultati za samo vertikalno opterećenje (stalno opterećenje i pješaci) – model NM1

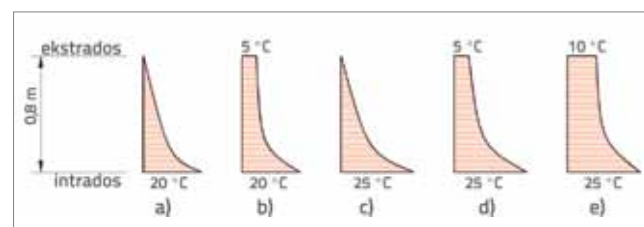
4.1.2. Rezultati proračuna za istovremeno djelovanje vertikalnog opterećenja i temperaturnih promjena

Naprezanja u luku od temperaturnih promjena započela su nakon njegova zatvaranja u tjemenu (21.8.2003.). Dakle, luk je zatvoren u tjemenu u ljetnom periodu, pri temperaturi od oko 25 °C. Godišnje temperaturne promjene u Mostaru su velike, pretežno od -5 °C do 50 °C [8]. Moguće su različite godišnje i dnevne distribucije temperature po dužini i debljini luka. Radi jednostavnosti proračuna, uzeto je da je temperatura konstantna po dužini luka i promjenjiva po njegovoj debljini. Neke razmatrane promjene temperature, za koje se vjeruje da su moguće i da su među najnepovoljnijima, prikazane su na slici 12. Naime, mjerodavne su one temperaturne promjene koje, u odnosu na stanje kod zatvaranja luka, izazivaju tlak uz intrados luka. Temperaturni koeficijent za kamene blokove uzet je $\alpha_{tb} = 6,5 \times 10^{-6}$, a za mort u sljubnicama $\alpha_{tm} = 6,0 \times 10^{-6}$. Neki rezultati proračuna za istovremeno djelovanje vertikalnog opterećenja i temperaturnih promjena prema slici 12a prikazani su na slici 13. Najveće glavno tlačno naprezanje u kamenim blokovima iznosi - 3,48 MPa. Računski položaj pukotina u kamenim blokovima na čelu luka prikazan je na slici 14., što se dobro slaže sa stvarnim sadašnjim pukotinama prema slici 9.

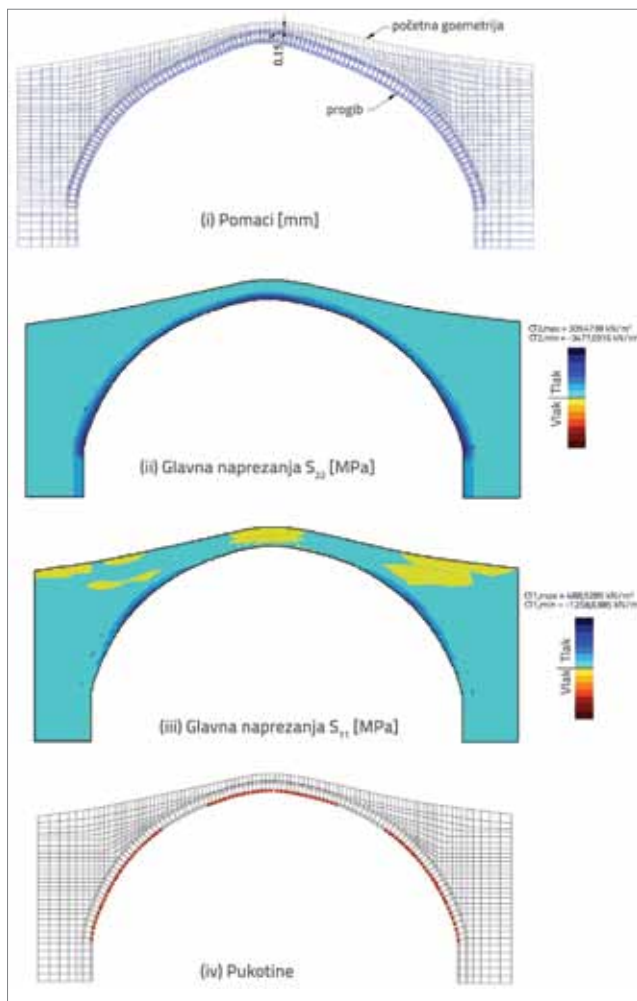
Također su dobivene računске pukotine u vertikalnoj ravni luka (prekoračenje granične vlačne deformacije kamena poprečno na luk) duž intradosa, što je konzistentno sa stvarnim stanjem prema slici 8.

Treba reći da rezultati proračuna ovise o vrijednosti brojnih parametara kamena i morta, a osobito o vlačnoj čvrstoći, modulu elastičnosti, Poissonovom koeficijentu i temperaturnom koeficijentu. Izvršene su brojne analize s varijacijama veličina navedenih parametara. Zbog ograničenja prostora, rezultati tih analiza ne mogu se prikazati. Analizom utjecaja prethodno navedenih parametara gradiva, može se zaključiti sljedeće:

- manja vlačna čvrstoća kamena rezultira širom zonom pucanja kamenih blokova
- veći modul elastičnosti i veći temperaturni koeficijent kamena rezultiraju nepovoljnijim učincima temperaturnih djelovanja
- veći Poissonov koeficijent kamena ima za posljedicu veće deformacije i veća vlačna naprezanja u kamenim blokovima okomito na os luka
- veće temperaturne razlike rezultiraju većim naprezanjima i oštećenjima luka.



Slika 12. Neke razmatrane temperaturne promjene po debljini luka

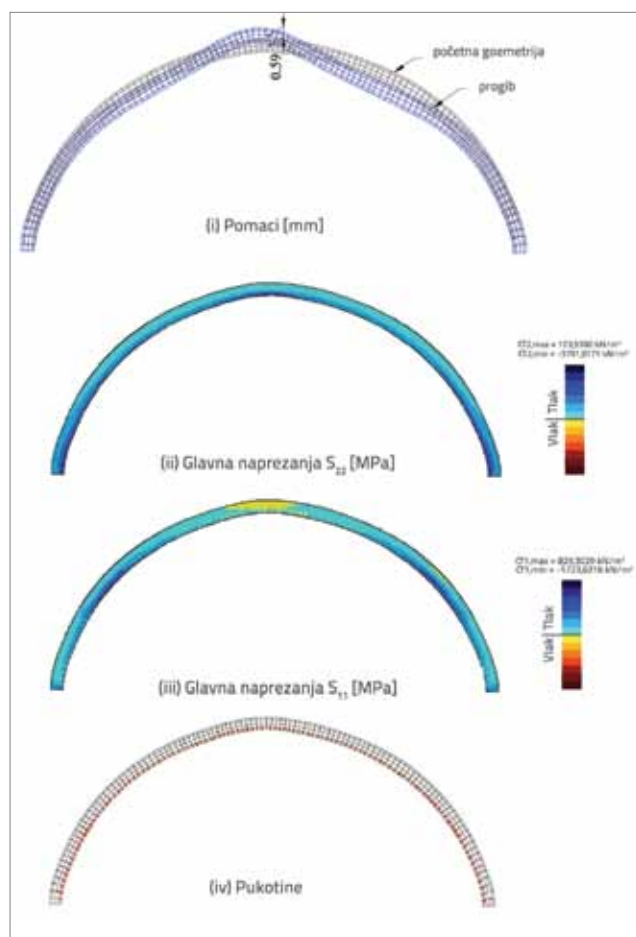


Slika 13. Neki rezultati proračuna za vertikalno opterećenje i temperaturne promjene prema slici 12.a (model NM1)

Neki rezultati proračuna za istovremeno djelovanje vertikalnog opterećenja i temperaturnih promjena prema slici 12.c prikazani su na slici 14. Može se primijetiti da se za ovo vjerojatno moguće opterećenje zone pukotina proširuju po čitavoj dužini luka uz intrados, što se nažalost u budućnosti može dogoditi na stvarnom luku. Tlačna naprezanja u kamenim lukovima dosežu - 3,79 MPa.

4.2. Numerički model NM2 za statička i dinamička opterećenja

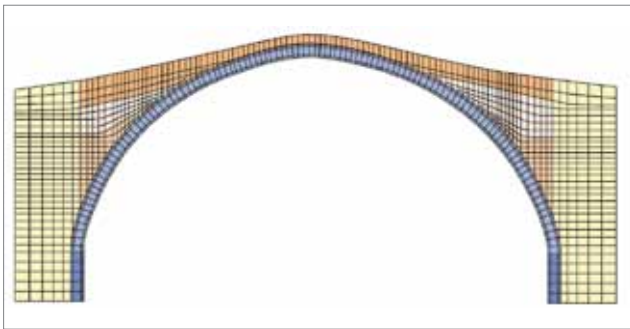
Ovaj ravninski model geometrije konstrukcije mosta uključuje luk, nadlučni sklop i upornjake, s elementima odgovarajuće širine i odgovarajućim svojstvima gradiva pojedinih dijelova. U usvojenom makromodelu zida [1, 2], složeno ponašanje kamenih blokova povezanih mortom simulirano je reprezentativnim modelom gradiva ekvivalentnih svojstava. U modelu luka uključen je utjecaj klanfi po ekstradosu. Usvojeni osnovni parametri gradiva za ovaj model prikazani su u tablici 4.



Slika 14. Neki rezultati proračuna za vertikalno opterećenje i temperaturne promjene prema slici 12.c (model NM1)

Tablica 4. Usvojeni osnovni parametri materijala za model NM2

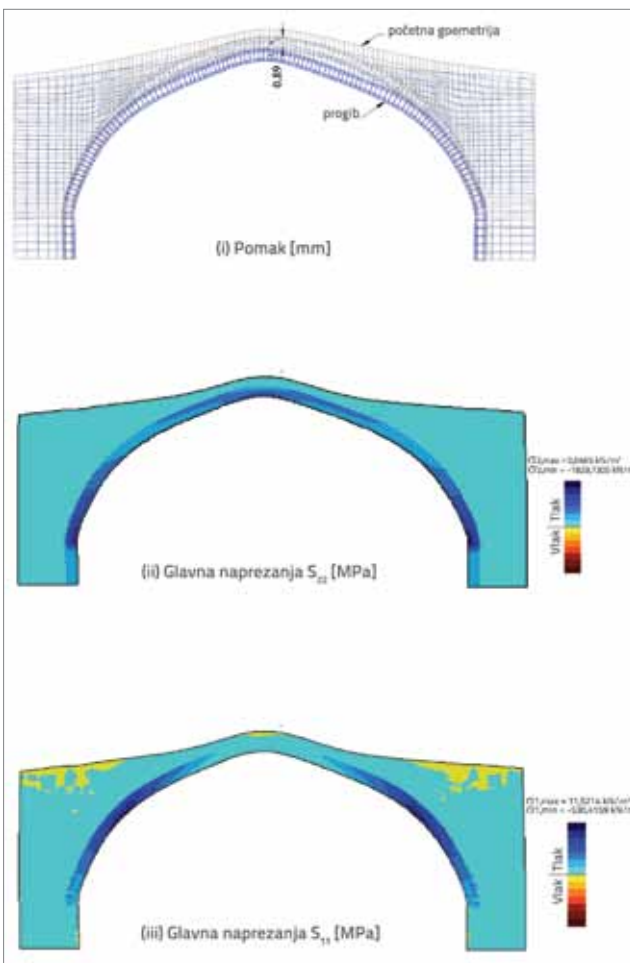
Element	Usvojeni parametri materijala	
Kameni luk	modul elastičnosti	$E_b = 2,3 \times 10^4 \text{ MPa}$
	Poissonov koeficijent	$\nu_b = 0,3$
	modul posmika	$G_b = 8,84 \times 10^3 \text{ MPa}$
	tlačna čvrstoća	$f_{cb} = 35 \text{ MPa}$
	vlačna čvrstoća	$f_{tb} = 3 \text{ MPa}$
	granična tlačna čvrstoća	$\epsilon_{bu} = -0,0035$
	granična vlačna čvrstoća	$\epsilon_{tu} = 0,001$
Upornjak	modul elastičnosti	$E_a = 3 \times 10^3 \text{ MPa}$
	Poissonov koeficijent	$\nu_a = 0,2$
	modul posmika	$G_a = 1,34 \times 10^3 \text{ MPa}$
	tlačna čvrstoća	$f_{ca} = 10 \text{ MPa}$
	vlačna čvrstoća	$f_{ta} = 0,4 \text{ MPa}$
	granična tlačna čvrstoća	$\epsilon_{au} = -0,0035$
Nadlučna konstrukcija	modul elastičnosti	$E_s = 3 \times 10^3 \text{ MPa}$
	Poissonov koeficijent	$\nu_s = 0,2$
	modul posmika	$G_s = 1,34 \times 10^3 \text{ MPa}$
	tlačna čvrstoća	$f_{cs} = 10 \text{ MPa}$
	vlačna čvrstoća	$f_{ts} = 0,4 \text{ MPa}$
	granična tlačna čvrstoća	$\epsilon_{su} = -0,0035$
Metalne klanfe	modul elastičnosti	$E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$
	vlačna čvrstoća	$f_{st} = 100 \text{ MPa}$
	granična vlačna čvrstoća	$\epsilon_{su} = 0,01$



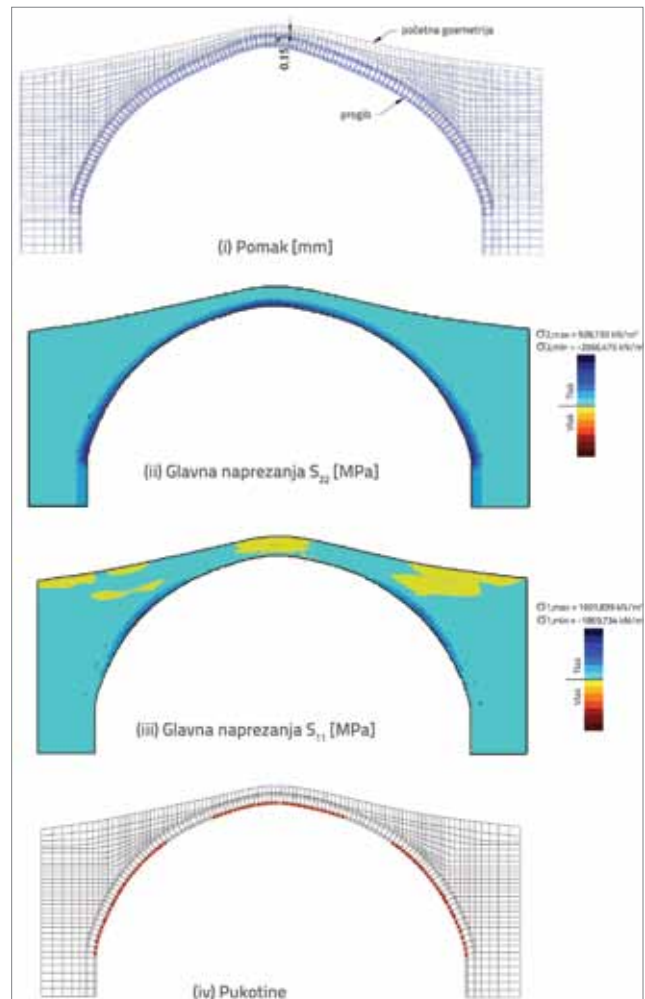
Slika 15. Model geometrije konstrukcije mosta NM2

4.2.1. Statička analiza

Neki rezultati proračuna za utjecaj samo vertikalnog opterećenja prikazani su na slici 16. Može se uočiti dobro slaganje rezultata s onima na slici 11. za model geometrije NM1. Neki numerički rezultati za utjecaj vertikalnih opterećenja i temperaturnih promjena prema slici 12.a prikazani su na slici 17. Također se može primijetiti dobro slaganje rezultata s onima na slici 13 za model NM1.



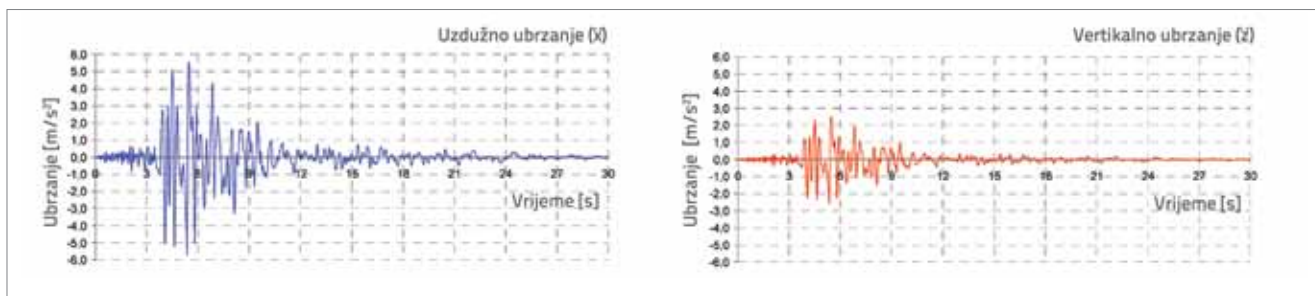
Slika 16. Neki rezultati proračuna za ukupno vertikalno opterećenje (model NM2)



Slika 17. Neki rezultati proračuna za vertikalno opterećenje i temperaturne promjene prema slici 12.a (model NM2)

4.2.2. Dinamička analiza

Kako nisu bili na raspolaganju akcelerogrami registriranih potresa u području Mostara nakon obnove Starog mosta [8], za njegovu dinamičku analizu korišten je akcelerogram potresa s epicentrom u području Stona iz 1996. godine, udaljenom oko 60 km od Mostara. Kod toga je razmatrano istovremeno djelovanje horizontalne komponente ubrzanja u smjeru osi mosta (najveće ubrzanje $5,6 \text{ m/s}^2$) i vertikalne komponente ubrzanja (slika 17.). Nažalost, zbog usvojenog ravninskog modela geometrije mosta, nije moguće uključiti poprečnu horizontalnu komponentu ubrzanja, čiji je utjecaj znatan. Također je urađena i analiza s istovremenom horizontalnom i vertikalnom harmonijskom pobudom, čiji periodi odgovaraju prvim periodima slobodnih oscilacija mosta za odgovarajuće oblike osciliranja. Stoga je prvo riješena svojstvena zadaća problema [1, 2]. Prva dva oblika slobodnih oscilacija mosta, s odgovarajućim periodima osciliranja, prikazana su na slici 19. Prvi period slobodnih oscilacija mosta iznosi $0,086 \text{ s}$, a drugi $0,072 \text{ s}$. Ovo se dobro slaže s odgovarajućim izmjerenim vrijednostima [11] ($T_1=0,087 \text{ s}$, $T_2=0,072 \text{ s}$). Prikazani su samo neki rezultati proračuna.

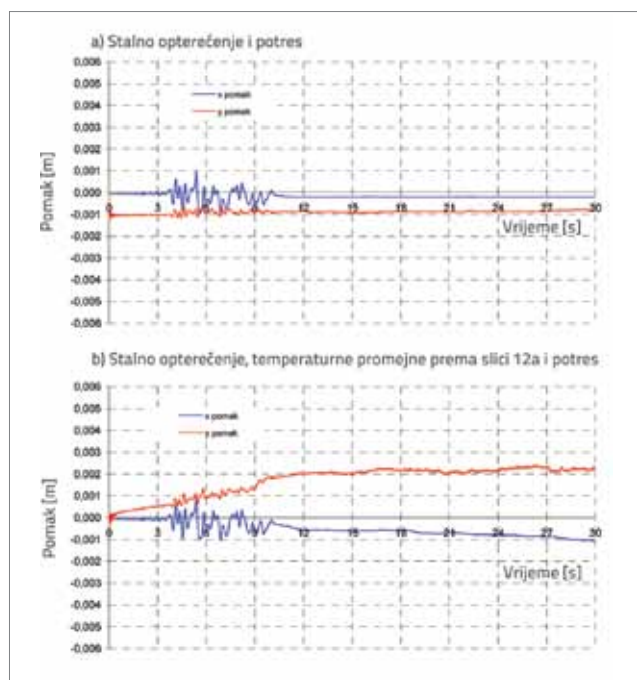


Slika 18. Akceleroagram potresa u Stonu iz 1996. godine

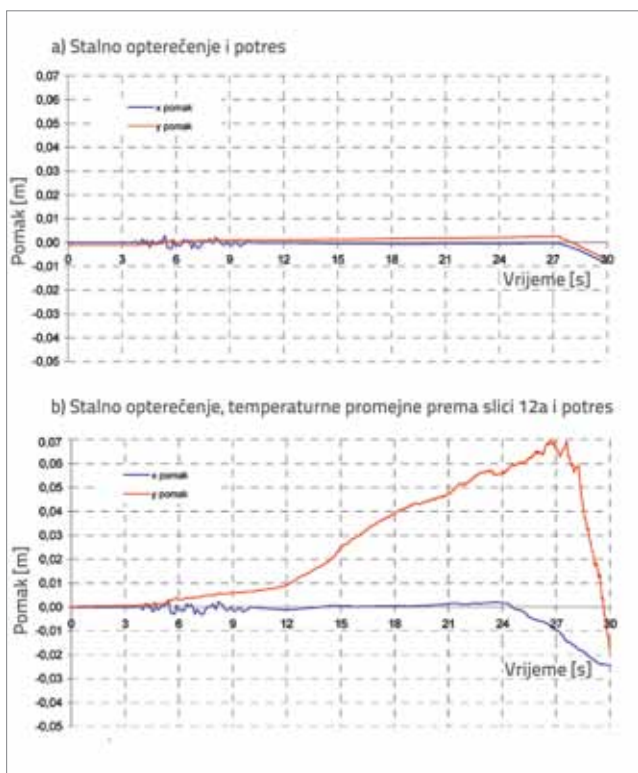
Pomak luka u tjemenu za tzv. stonski potres prema slici 18. prikazan je na slici 20. Kod toga su analizirani slučajevi: (a) samo stalno opterećenje i potres, te (b) stalno opterećenje, temperaturne promjene prema slici 12.a i potres. Za oba slučaja, pred kraj prestanka djelovanja potresa dolazi do naglog povećanja pomaka i drobljenja građiva, odnosno do divergencije numeričkog postupka tj. do sloma konstrukcije.



Slika 19. Prva dva oblika slobodnih oscilacija mosta

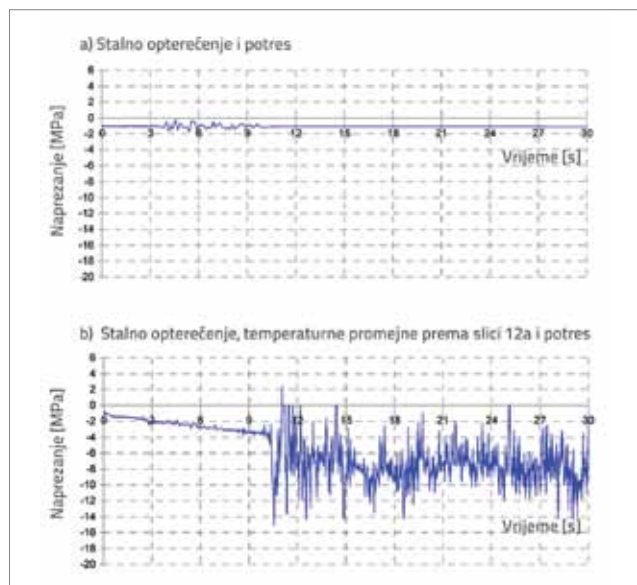


Slika 21. Pomak u tjemenu luka za skalirani stonski potres (najveće horizontalno ubrzanje 0,3 g)



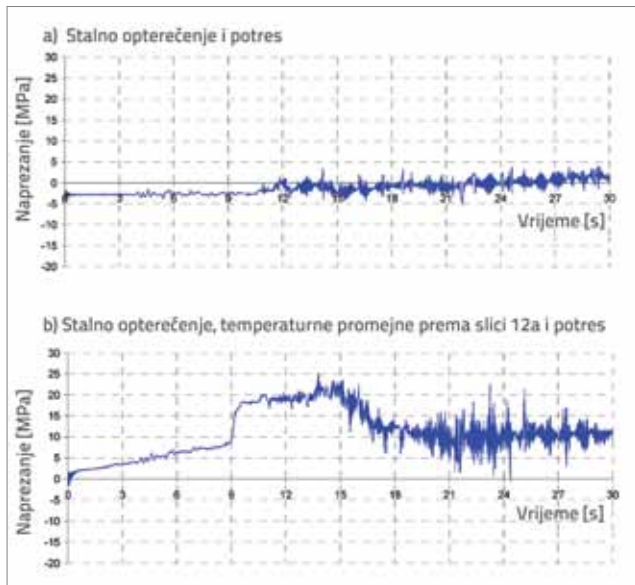
Slika 20. Pomak luka u tjemenu za stonski potres prema slici 18

Neki rezultati proračuna za skalirani stonski potres, s najvećim horizontalnim ubrzanjem 0,3g, prikazani su na slikama 21.-23.



Slika 22. Naprezanje u kamenom bloku pri peti luka uz intrados za skalirani stonski potres (najveće horizontalno ubrzanje 0,3 g)

Konstrukcija mosta, uz jača oštećenja (pukotine) "izdržala" je za slučajeve opterećenja: (a) stalno opterećenje i potres te (b) stalno opterećenje, temperaturne promjene prema slici 12.a i potres.



Slika 23. Naprezanje u metalnoj klanfi u tjemenu luka za skalirani stonski potres (najveće horizontalno ubrzanje 0,3g)

5. Zaključak

Proračunski progibi i zone pukotina u kamenom luku dobro se slažu sa stvarnim stanjem. Ovo potvrđuje pouzdanost korištenih numeričkih modela simulacije mosta. Izvorni most akumulirao je tijekom preko četiri stoljeća od izgradnje do rušenja brojna znatna oštećenja, kao i u različitim vremenima manje ili više uspješne brojne sanacije kamenog luka. Luk obnovljenog Starog mosta ima znatna oštećenja tijekom samo sedam godina od njegove izgradnje. Položaj pukotina i oštećenja u kamenom luku kod izvornog i obnovljenog mosta vrlo je sličan. Uz djelovanje vertikalnih opterećenja, smatra se da su temperaturna djelovanja glavni uzrok nastanka pukotina u izvornom i obnovljenom luku.

LITERATURA

- [1] Radnić, J., Matešan, D., Harapin, A., Trogrlić, B., Smilović, M., Grgić, N., Baloević, G.: "Numerički model za analizu zidanih konstrukcija", Građevinar, 63, p.p. 529-546, 2011.
- [2] Radnić, J., Matešan, D., Harapin, A., Smilović, M., Grgić, N.: "Numerical Model for Static and Dynamic Analysis of Masonry Structure", 5nd International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, Abstract book ACE-X 2011, Algarve, 2011.
- [3] Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: "Fotogrametrijska snimka Starog mosta u Mostaru", Zagreb, 1982.
- [4] Gotovac, B.: "Ponovna izgradnja Starog mosta", Ceste i mostovi, Vol. 50, No 7-9, p.p. 23- 33, 2004.
- [5] Šaravanja, K., Čolak, I.: "Kamen za obnovu Starog mosta u Mostaru", Prvi sabor hrvatskih mostograditelja, Brijuni, VI, 2005.
- [6] General Engineering: "Dijelovi glavnog projekta ponovne izgradnje Starog mosta", Firenca, 2002.
- [7] CONEX and YERALTI ARAMACILIK: "Reconstruction of the Olde Bridge in Mostar", SM 001-IMR-01, 2000.
- [8] Glibić, M.: "A possible reasons of cracks on the arch of the Old Bridge", International Scientific Symposium, Mostar, 2008.
- [9] IGA plan d.o.o.: Izvještaj sa trodimenzionalnog 3D snimanja Starog mosta u Mostaru, Mostar, 2010.
- [10] PROTON d.o.o.: "Geodetic recording of cracks on the Old Bridge", Mostar, 2008.
- [11] Krstevska, L., Kustura, M., Tashkov, Lj.: "Experimental dynamic testing of the Old Bridge in Mostar", International Scientific Symposium, Mostar, 2008.

Pukotine u luku su posljedica prekoračenja vlačne čvrstoće (granične vlačne deformacije) kamena u smjerovima okomitim na uzdužna tlačna naprezanja (deformacije) u luku. Vlačna naprezanja (deformacije) okomito na os luka izazivaju tlačna naprezanja (deformacije) u smjeru osi luka. Glavni uzrok nastanka oštećenja u izvornom i obnovljenom kamenom luku je neodgovarajuća kvaliteta kamena tenalija, kojim je luk izgrađen, a prije svega njegova mala vlačna čvrstoća. Povećana oštećenja obnovljenog luka u kratkom periodu vjerojatno su posljedica odstupanja u nekim rješenjima od onih kod izvornog mosta.

Kod obnovljenog mosta izvedena su velika ošupljenja neposredno iza peta luka na upornjacima, što je nepovoljnije za luk (povećava uzdužne horizontalne pomake) i upornjak. Posmična veza između kamenog luka i njegovog podebljanja u peti kod obnovljenog mosta je podatnija, tj. manja je krutost spregnutog sustava luk-nadlučni sklop. Kako kamen tenelija nakon vađenja iz kamenoloma znatno povećava čvrstoću tijekom vremena, uz činjenicu da je izvorni most građen devet godina, a obnovljeni manje od dvije, očito je pri otpuštanju skele luka kamen obnovljenog luka imao manju čvrstoću od izvornoga. Moguće je da je kamen za izvorni most bio bolje kakvoće. Rasponski sklop obnovljenog mosta vjerojatno je općenito krući od izvornoga, što je nepovoljnije za djelovanje temperature. Geometrija obnovljenog luka, s namjerno izvedenom imperfekcijom u odnosu na izvorni, nepovoljnija je za naprezanja u luku. Uleknučje izvornog luka do sada je pripisivano popuštanju njegove skele pri gradnji. Moguće je da je ono posljedica dugogodišnjeg prirasta pomaka na tom mjestu omekšanog luka (puzanje kamena tenelija je vjerojatno veliko), jer su na tom potezu pomaci luka najveći u stvarnosti i na numeričkim modelima.

Oštećenja luka obnovljenog mosta su takva da je umanjena njegova izvorna mehanička otpornost i sigurnost. Vjerojatno je da će se ona tijekom vremena povećavati. Već sada prijete opasnost ispadanja komada oštećenih kamenih blokova. Nužna je hitna sanacija oštećenja luka, s izradom studije koja treba iznaći odgovarajuća rješenja za izbjegavanje ili umanjene daljnjih oštećenja luka i potrebe njegove trajne sukcesivne sanacije kao kod izvornog luka.