

Primljen / Received: 26.5.2014.

Ispravljen / Corrected: 15.7.2014.

Prihvaćen / Accepted: 27.7.2014.

Dostupno online / Available online: 10.9.2014.

Seizmičko ocjenjivanje postojećih armiranobetonskih lučnih mostova

Autori:



Dr.sc. **Marin Franetović**, dipl.ing.grad.
Granova d.o.o.
franetovic@granova.hr



Doc.dr.sc. **Ana Mandić Ivanković**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za konstrukcije
mandicka@grad.hr



Prof.dr.sc. **Jure Radić**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za konstrukcije
jradic@grad.hr

Izvorni znanstveni rad

Marin Franetović, Ana Mandić Ivanković, Jure Radić

Seizmičko ocjenjivanje postojećih armiranobetonskih lučnih mostova

U ovome je radu prikazana nova metoda seizmičkog ocjenjivanja lučnih mostova. Linearni proračun metodom spektralne analize i nelinearne statičke metode postupnog guranja kombiniraju se u ovoj proceduri kroz razine ocjenjivanja i pripadne provjere. Predlažu se smjernice za prikupljanje podataka o lučnim mostovima s ciljem ostvarivanja tražene razine poznavanja konstrukcije. Pritom su kriteriji za seizmičku ocjenu, primjerice zahtijevano sudjelovanje djelotvorne modalne mase, prikladna raspodjela krutosti nadlučnih stupova i utvrđivanje poredbene točke za formiranje krivulja kapaciteta, ovom metodom poboljšani i prilagođeni lučnim mostovima.

Ključne riječi:

lučni mostovi, seizmičko ocjenjivanje, linearni proračun spektra odgovora, nelinearne statičke metode postupnog guranja

Original scientific paper

Marin Franetović, Ana Mandić Ivanković, Jure Radić

Seismic assessment of existing reinforced-concrete arch bridges

A new seismic assessment procedure for arch bridges is presented in the paper. The linear response spectrum analysis and the nonlinear static pushover methods are combined in this procedure through various assessment levels and appropriate checks. Guidelines for collecting arch-bridge data needed to reach the required level of knowledge on structural properties are proposed. Criteria for seismic assessment, such as the required participation of effective modal masses, adequate stiffness distribution of spandrel columns, and determination of reference point for forming capacity curves, are improved and adjusted for arch bridges.

Key words:

arch bridges, seismic assessment, linear response spectrum analysis, nonlinear static pushover methods

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Marin Franetović, Ana Mandić Ivanković, Jure Radić

Seismische Begutachtung bestehender Bogenbrücken aus Stahlbeton

In dieser Arbeit wird eine neue Methode der seismischen Begutachtung von Bogenbrücken dargestellt. Dabei werden lineare Antwortspektrum-Analysen und nichtlineare statische Pushover-Methoden durch Bewertungsstufen und entsprechende Nachweise kombiniert. Ebenso werden Richtlinien für die Zusammenstellung von Datenbanken gegeben, die das Erzielen der angestrebten Kenntnisstufe ermöglichen. Kriterien für die seismische Begutachtung, wie beispielsweise die erforderliche Teilnahme der effektiven modalen Masse, die angemessene Steifigkeitsverteilung der Brückenstützen und die Berechnung des Leistungspunktes bei der Ermittlung der Kapazitätsskurve sind durch diesen Vorgang verbessert und der Bewertung von Bogenbrücken angepasst worden.

Schlüsselwörter:

Bogenbrücken, Seismische Begutachtung, lineare Antwortspektrum-Analyse, nichtlineare statische Pushover-Methode

1. Uvod

Kako su mnogi hrvatski mostovi projektirani u skladu s prijašnjim propisima, ne uzimajući u obzir potresno djelovanje, promjene u zahtjevima suvremenih normi te oštećenja i razaranje konstrukcije tijekom uporabe uzrokuju da ti mostovi posjeduju različite razine pouzdanosti. Sadašnje europske norme o potresu ne nude proceduru za seizmičko ocjenjivanje mostova, pogotovo ne za lučne mostove. Europska norma EN 1998-3 [1] odnosi se na ocjenjivanje i obnavljanje zgrada, a njen drugi dio [2] na projektiranje novih mostova uzimajući u obzir potresno djelovanje. Ipak, kombinacija tih dviju normativnih preporuka može se primijeniti u ocjenjivanju postojećih mostova, ali samo uz dodatna poboljšanja određenih aspekata koji se razmatraju u ovome radu. Istraživanju nelinearnih metoda postupnog guranja posljednjih se godina posvećuje iznimna pozornost [3], pogotovo u području proširenja njihove primjene na konstrukcije sa značajnim učincima viših oblika vibriranja, što su upravo mnoge konstrukcije mostova.

Armiranobetonski lučni mostovi su posebne konstrukcije zbog svoje robusnosti i ne može se dovoljno naći u dostupnoj literaturi o seizmičkom ocjenjivanju te vrste mostova. Pojedini autori [4-6] sumnjaju u primjenljivost metode postupnog guranja na lučne mostove s razumnim stavom da ova vrsta proračuna ne uzima u obzir vrlo važan vertikalni odgovor luka. No autori ovoga rada smatraju da je metoda postupnog guranja prilično upotrebljiva za cjelokupnu konstrukciju lučnog mosta, poglavito kada želimo ocijeniti ponašanje nadlučnih stupova i pomake rasponskoga sklopa koji su dominantni u horizontalnim smjerovima. U ovome se radu dokazuje prikladnost kombiniranja linearne spektralne analize i nelinearnog proračuna postupnog guranja za ocjenjivanje lučnih mostova u novoj proceduri koja prolazi kroz odgovarajuće razvijene razine ocjenjivanja. Prva razina ocjenjivanja pokazat će se presudnom za luk, a druga za nadlučne stupove, posebice kratke stupove blizu tjemena luka.

2. Pregled mosta i projektne dokumentacije

Kako bi se ispravno modelirala postojeća konstrukcija i proveo prikladan proračun, nužno je utvrditi sadašnje znanje i zahtijevane razine znanja o postojećoj konstrukciji na temelju važnosti mosta. Te razine znanja (eng. *knowledge levels: KL*) mogu se dobiti na osnovi prikladno prikupljenih podataka o geometrijskim svojstvima i konstrukcijskim i nekonstrukcijskim elementima koji mogu utjecati na ponašanje konstrukcije, na osnovi podataka o konstrukcijskim detaljima uključujući količinu i raspored armature, zaštitni sloj betona, spojeve među pojedinim elementima te na osnovi podataka o mehaničkim svojstvima građevnih materijala koji su vezani uz odgovarajuće faktore povjerenja (eng. *confidence factors: CF*). Moramo biti svjesni da će opsežnost pregleda i ispitivanja uvelike ovisiti o raspoloživim ulaganjima od strane

investitora pa će inženjer često biti u situaciji da stanje mosta treba ocijeniti na temelju ograničenih podataka o konstrukciji. Stoga je od iznimne važnosti utvrditi najvažnija područja lučnog mosta koja treba pregledati i na kojima treba obaviti ispitivanja.

Na temelju analogije s normom EN 1998-3 [1] za zgrade, dostupnim smjernicama za mostove [7] i istraživanjima provedenim na hrvatskim lučnim mostovima [8-11], razvijene su smjernice za prikupljanje podataka o lučnim mostovima. Zahtijevane razine znanja, prikladne metode prikupljanja podataka o lučnim mostovima, uključujući preglede na samoj građevini (lokacija i opsežnost), te faktori povjerenja kojima se određuju svojstva postojećih materijala koji će se koristiti u proračunu, prikazani su u tablici 1. Za mostove prosječne važnosti koji nisu kritični za uspostavljanje prometa zahtijeva se razina znanja KL2. Za mostove iznimne važnosti u uspostavljanju komunikacija, poglavito odmah nakon potresa te za velike mostove kod kojih se traži duži vijek trajanja, prikladno je zahtijevati razinu znanja KL3.

3. Metoda seizmičkog ocjenjivanja armiranobetonskih lučnih mostova

Procedura ocjenjivanja prikazana u nastavku (slika 1.) prolazi kroz uzastopne razine i provjere. Oni daju odgovore o očekivanom ponašanju mosta u potresnoj situaciji s dovoljnom točnošću i upućuju na najkritičnije detalje i elemente mosta. Na temelju istraživanja provedenih na hrvatskim lučnim mostovima [8-11] zaključuje se da lukovi nisu najkritičniji elementi lučnog mosta jer, uslijed svoje važnosti pri svladavanju prepreke, posjeduju velike razine robusnosti. Ako se pokaže da bi ponašanje mosta bilo neprihvatljivo, na temelju ovih dviju razina ocjenjivanja mogu se preporučiti odgovarajuće mjere obnove odnosno popravka konstrukcije.

3.1. Razine seizmičkog ocjenjivanja s traženim udjelom djelotvorne modalne mase

Prva razina ocjene temelji se na linearnom višemodalnom spektralnom proračunu, uporabom djelotvorne krutosti stupova (poglavlje 3.2.), koji se provodi na modelu mosta formiranom na temelju rezultata pregleda mosta i projektne dokumentacije (poglavlje 2.).

U radovima [8-10] pokazano je da se linearnim višemodalnim spektralnim proračunom, koji se provodi u oba horizontalna te u vertikalnom smjeru, vrlo dobro pokriva ocjenjivanje lukova jer je njihov odgovor na potresno djelovanje obično linearan kao posljedica njihove robusnosti. Dakle za lukove se prihvatljivo ponašanje u potresnoj proračunskoj situaciji može dokazati već na prvoj razini.

Višemodalni proračun velikog broja postojećih lučnih mostova [8-11] pokazao je da je obuhvaćanje svih oblika vibriranja čija djelotvorna masa doprinosi ukupno 90 % cjelokupne mase

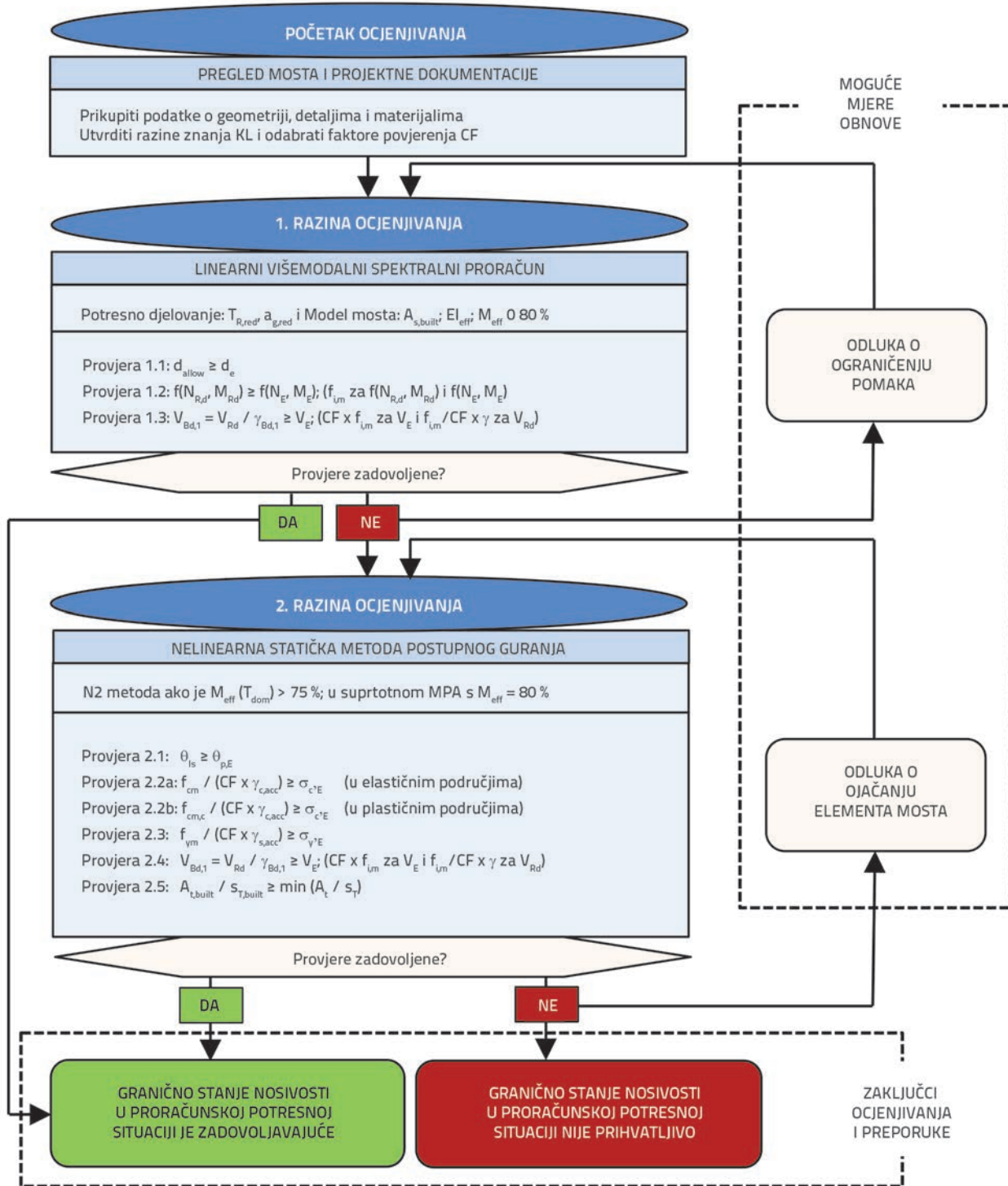
Tablica 1. Prikupljanje podataka za ocjenu ponašanja lučnih mostova

Razina znanja	Prikupljanje podataka i minimalni zahtjevi pregledavanja i ispitivanja na postojećoj građevini			Faktor povjerenja
	Geometrija	Detalji	Materijali	
	Osi luka i stupova, dimenzije poprečnih presjeka	Količina i raspored uzdužne armature, količina i oblikovanje armature za ovijanje u kritičnim područjima, debljina zaštitnog sloja betona, spojevi između elemenata (luk-stup, stup-rasponska konstrukcija)	Čvrstoća betona, granica popuštanja, granična čvrstoća i granična deformacija čelika	
KL2	Izmjere geometrije na odabranom uzorku lokacija na elementima treba usporediti s raspoloživim glavnim nacrtima iz izvorne dokumentacije o mostu. Ako dokumentacija o mostu ne postoji, treba napraviti potpuni snimak kojim će se rekonstruirati geometrija i dimenzije mosta.	Provjeriti podudaranja između stvarnih detalja na 20 % najkritičnijih poprečnih presjeka konstrukcije i <u>dostupnih nepotpunih</u> izvedbenih nacrti konstrukcije. Ako dokumentacija o mostu ne postoji, treba pregledati <u>40%</u> najkritičnijih poprečnih presjeka konstrukcije.	Nadopuniti podatke o svojstvima materijala dobivene iz <u>izvornih projekata ili izvještaja o ispitivanjima ili propisa koji su primjenjivani u doba izgradnje</u> s ispitivanjima u 20 % najkritičnijih poprečnih presjeka postojeće konstrukcije. Ako projekt mosta ili izvještaji o provedenim ispitivanjima ne postoje, treba na <u>40%</u> najkritičnijih poprečnih presjeka postojeće konstrukcije provesti ispitivanja svojstava materijala.	1,2
KL3	Ako dokumentacija o mostu ne postoji, treba napraviti potpuni snimak kojim će se rekonstruirati geometrija i dimenzije mosta.	Provjeriti podudaranja između stvarnih detalja na 20 % najkritičnijih poprečnih presjeka konstrukcije i <u>sveobuhvatnih</u> izvedbenih nacrti konstrukcije. Ako dokumentacija o mostu ne postoji, treba pregledati <u>60%</u> najkritičnijih poprečnih presjeka konstrukcije.	Nadopuniti podatke o svojstvima materijala dobivene iz <u>prethodnih izvještaja o ispitivanjima</u> s ispitivanjima u 20 % najkritičnijih poprečnih presjeka postojeće konstrukcije. Ako izvještaji o provedenim ispitivanjima ne postoje, treba na <u>60%</u> najkritičnijih poprečnih presjeka postojeće konstrukcije provesti ispitivanja svojstava materijala.	1,0
Napomene	Najkritičniji poprečni presjeci, na temelju seizmičkog ocjenjivanja postojećih lučnih mostova koje je provedeno u sklopu istraživanja, jesu neposredno uz petu luka, u tjemenu luka, u četvrtini raspona luka te poprečni presjeci na oba kraja stupova koji se protežu na duljini od jedne dvadesetine do jedne desetine ukupne visine stupa. Dodatno se najkritičnijim poprečnim presjecima smatraju oni na kojima su u sklopu vizualnog pregleda uočena oštećenja. Metode ispitivanja ovisit će o osiguranim raspoloživim troškovima (ultrazvučni uređaji, uklanjanje zaštitnog sloja betona). Nerazorne metode ispitivanja (sklerometrom) treba kombinirati s raznim metodama (vađenje betonskih jezgri i uzoraka armature).			

prema EN 1998-2 [2] prekonzervativno i može zahtijevati razmatranje velikog broja (stotinjak) oblika vibriranja od kojih je većina zanemariva [3] jer im je faktor sudjelovanja vrlo nizak (ispod 1 %). Ovo je posljedica činjenice da je dijelove lukova blizu peta (na duljini od 5 do 10 % ukupne duljine luka) koji imaju značajnu težinu, posebice u horizontalnim smjerovima, iznimno teško aktivirati. Stoga autori ovog rada predlažu da se za točnost linearnog višemodalnog spektralnog proračuna lučnih mostova usvoji manje zahtjevno pravilo koje traži sudjelovanje djelotvorne mase u iznosu 80 % ukupne mase konstrukcije.

Za nadlučne stupove (posebice kratke u blizini tjemena luka) bit će potrebno proći kroz drugu razinu ocjenjivanja koja se temelji na nelinearnom proračunu postupnog guranja jer je njihov odgovor na potresno djelovanje neelastičan [10]. Ova je vrsta proračuna dokazana pri ocjenjivanju grednih mostova poduprtih stupovima različite visine s kraćim središnjim stupovima [3, 12], što se može usporediti s nadlučnim stupovima lučnih mostova.

Druga razina ocjenjivanja temelji se na nelinearnoj metodi postupnog guranja (eng. *single-mode pushover analysis N2*) [13, 3] ili, ako se ukaže potreba, na višemodalnoj metodi postupnog guranja (eng. *Modal Pushover Analysis: MPA*) [3, 14]. Ako ocjenjivani lučni most ima dominantni oblik vibriranja u uzdužnom ili poprečnom smjeru uz sudjelovanje djelotvorne mase u iznosu od više od 75 % ukupne mase [15], može se primijeniti metoda postupnog guranja N2 temeljena na tom dominantnom obliku vibriranja kojom će se zanemariti viši oblici vibriranja. U suprotnom potrebno je primijeniti višemodalnu metodu postupnog guranja MPA koristeći sve oblike vibriranja čiji je faktor sudjelovanja viši od 1 % i kojom će se obuhvatiti najmanje 80 % ukupne mase. Dinamička posebitost lučnih mostova je fleksibilnost luka kao oslonca nadlučnim stupovima te velika masa smještena najčešće u sredini cjelokupnog mosta zbog položaja i mase luka. Stoga je, uslijed te fleksibilnosti mosta i položaja težišta, za armiranobetonske lučne mostove [8, 9] utvrđeno da su njihovih prvih nekoliko horizontalnih



Slika 1. Dijagram toka metode seizmičkog ocjenjivanja

oblika vibriranja (poprečni parabolični oblik i uzdužna translacija konstrukcije) sa srednjim do visokim periodima iznimno dominantni ($m_{eff} > 60\%$). Ako se nadlučni stupovi lučnih mostova usporede s grednim mostovima s kratkim središnjim stupovima (najveći zahtjevi se postavljaju na

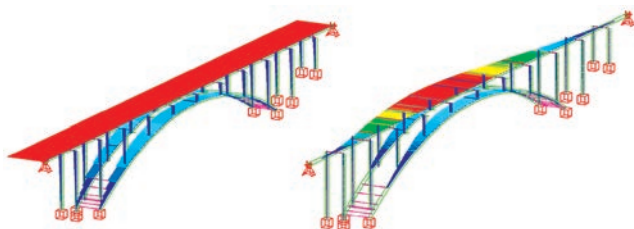
najkraće stupove), može se uočiti da će, uz dominantan parabolični oblik vibriranja u poprečnom smjeru, značajan oblik vibriranja za MPA metodu biti dijagonalno simetričan S-oblik vibriranja s najvećim poprečnim pomakom na vrhu najviših petnih stupova.

3.2. Potresno opterećenje postojećih mostova

Za postojeće mostove, čiji je preostali vijek uporabe t_L manji od 50 godina, prikladno je umanjiti vrijednost vršnog ubrzanja tla $a_{g,R}$ na $a_{g,red}$ koje ima vjerojatnost prekoračenja $p=0,1$ u kraćem povratnom periodu $T_{R,red}$ u odnosu na poredbeno povratno razdoblje potresnog djelovanja za zahtjev da ne nastupi rušenje T_{NCR} . Izraz (1) [16] nudi prihvatljivu aproksimaciju za umanjjenje vršnog ubrzanja tla, pri čemu vrijednost eksponenta k ovisi o seizmičnosti područja i uobičajeno se kreće između vrijednosti 0,30 do 0,40:

$$\frac{a_{g,red}}{a_{g,R}} = \left(\frac{T_{R,red}}{T_{NCR}} \right)^k; \quad T_{R,red} = 1 / (1 - (1 - p)^{1/t_L}) \quad (1)$$

U linearnom višemodalnom proračunu prve razine ocjenjivanja, potresno djelovanje na most se prikazuje spektrom odgovora reduciranim u odnosu na elastični (proračunski) spektar uvođenjem faktora ponašanja q u kojem se očituje kapacitet duktilnosti konstrukcije. Ako elementi mosta nisu detaljirani u skladu sa seizmičkim zahtjevima (što je gotovo uvijek slučaj kod starih mostova projektiranih u skladu s prijašnjim propisima), ne može se osloniti na njihov kapacitet duktilnosti (poglavlje 3.6., provjera 2.1.), te autori predlažu ocjenjivanje postojećih mostova uz primjenu faktora ponašanja $q = 1,0$. Primjenjivost metode postupnog guranja, koja će se upotrebljavati u drugoj razini ocjene, uvelike ovisi o odabiru prikladne raspodjele opterećenja koja će proizvesti odgovarajući dinamički odgovor mosta. Ako se upotrebljava N2 metoda u skladu s Dodatkom H norme EN 1998-2 [2], predlažu se dvije moguće raspodjele opterećenja: konstantno horizontalno opterećenje uzduž rasponske konstrukcije te horizontalno opterećenje razmjerno dominantnom obliku vibriranja s najvećim faktorom udjela u promatranom smjeru (slika 2.).



Slika 2. Konstantna raspodjela horizontalnog opterećenja uzduž rasponskog sklopa i horizontalno opterećenje razmjerno dominantnom obliku vibriranja konstrukcije u poprečnom smjeru

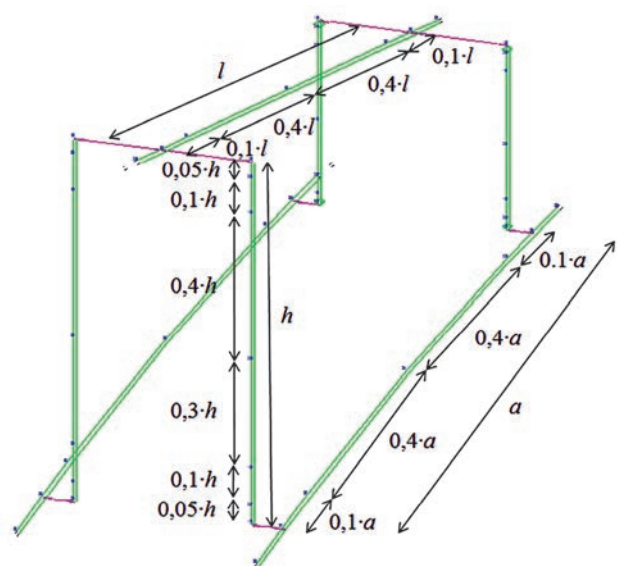
U slučaju primjene ova dva oblika opterećenja na lučne mostove, prvi oblik opterećenja (konstantan uzduž rasponske konstrukcije) izaziva veću cjelokupnu seizmičku silu na most i pokriva moguće učinke viših oblika vibriranja na obalne stupove bliže upornjacima, a drugi oblik opterećenja

(proporcionalan obliku vibriranja) nameće veće zahtjeve na nadlučne stupove smještene bliže tjemenu luka. Mostovi su izloženi konstantnom vertikalnom gravitacijskom opterećenju koje čini vlastita težina i dodatno stalno opterećenje od opreme mosta.

Ako je potrebno primijeniti MPA metodu, treba upotrijebiti raspodjele opterećenja srazmjerne svakom pojedinom značajnom obliku vibriranja, uzimajući u obzir i horizontalne i vertikalne komponente potresnog djelovanja, pri čemu su ove zadnje spomenute posebno značajne za proračun mosta u uzdužnom smjeru.

3.3. Smjernice za numeričko modeliranje

Lučni mostovi se uglavnom (kao i ocjenjivani hrvatski mostovi prikazani u poglavlju 4) temelje na stijeni pa se oslončke točke u numeričkom modelu (sastavljenom od štapnih konačnih elemenata) mogu definirati kao upete. Rubna područja stupova predstavljaju mjesta potencijalnih plastičnih zglobova koji se, ovisno o rubnim uvjetima, mogu pretpostaviti na duljini od jedne dvadesetine do jedne desetine duljine elementa [17]. Stoga se svaki stup dijeli u šest elemenata, duljine jednake 5 %, 10 %, 30 %, 40 %, 10 % i 5 % njegove ukupne visine [18] (slika 3). Za raspucala rubna područja stupova dodjeljuje se krutost $E_c I_{c,eff,i}$ (vidi 3.3.1) a za unutrašnje dijelove stupova krutost $E_c I_{c,gross,i}$. Svaki raspon rasponske konstrukcije dijeli se u četiri elementa, duljine jednake 10 %, 40 %, 40 % i 10 % raspona. Linearno elastično ponašanje elementa ne zahtijeva ovu podjelu na elemente različitih duljina, ali je ona ipak poželjna zbog točnosti kako bi se progustila mreža u blizini spojeva sa stupovima, gdje su važne promjene krutosti i svojstva mreže konačnih elemenata [18]. Također, dijelovi luka između nadlučnih stupova dijele se na četiri elementa duljine 10 %, 40 %, 40 % i 10 % ukupne duljine tog odsjeka luka.



Slika 3. Podjela na elemente na numeričkom modelu lučnog mosta

3.3.1. Djelotvorna krutost nadlučnih stupova

Poprečne presjeka mosta treba modelirati sa stvarno ugrađenom armaturom i djelotvornom krutošću. Raspucanost poprečnih presjeka u područjima potencijalnih plastičnih zglobova treba uzeti u obzir smanjenjem krutosti betonskog poprečnog presjeka [17]. Prema [2], djelotvorna krutost može se procijeniti izrazom (2) iz proračunskog graničnog momenta M_{Rd} i zakrivljenosti pri popuštanju Φ_y presjeka plastičnog zgloba [2]. Popravni koeficijent koji odražava učinak ukrućenja neraspucanog dijela stupa je $\nu = 1,20$:

$$E_c I_{eff} = \nu \cdot M_{Rd} / \Phi_y \tag{2}$$

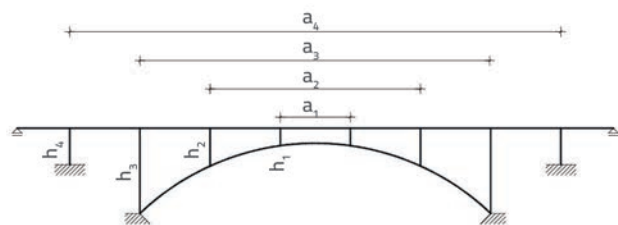
Ovaj je izraz primjenjiv za mostove s ujednačenim visinama stupova, što nije slučaj kod nadlučnih stupova lučnih mostova. Tijekom neelastičnog odgovora lučnog mosta uslijed početnog potresnog udara, najveći pomaci zahtijevaju se od najkraćih stupova što rezultira njihovim prekomjernim raspucavanjem i konačno nakon raznovidnog potresa i potrebom za njihovim popravcima ili obnovom [19, 20]. Nakon raspucavanja najkraćih stupova i pripadne redukcije krutosti, zahtjevi na pomake se premještaju od tjemernih prema obalnim stupovima što rezultira također i njihovom degradacijom. To prekomjerno raspucavanje treba na pravi način uzeti u obzir djelotvornom preostalom krutošću poprečnih presjeka stupova. Iz analogije s grednim mostovima s kratkim središnjim stupovima [21, 22] te iz istraživanja autora ovog teksta [11], djelotvorna krutost stupova lučnih mostova prije svega se pretpostavlja na sljedeći način.

Za svaki par nadlučnih i obalnih stupova, simetričnih u odnosu na tjeme luka, koeficijent α_i se određuje prema izrazu (3) za poprečni (y) i za uzdužni (x) smjer mosta. On ovisi o razmaku između promatranog para stupova a_i , njihovoj srednjoj visini h_i i zbroju visina svih stupova Σh_i (slika 4.).

$$\alpha_{i,y} = \frac{a_i}{1/h_i}; \quad \alpha_{i,x} = \frac{1}{1/\Sigma h_i} \tag{3}$$

Koeficijent α_i se nadalje umjeruje s $\alpha_{i,max}$ koji uobičajeno odgovara najvišem stupu, te se faktor umjeravanja SF za svaki par stupova određuje prema izrazu:

$$SF = \alpha_i / \alpha_{i,max} \tag{4}$$



Slika 4. Visine i razmaci stupova potrebni za proračun koeficijenta α_i

Najviši će stup, uslijed svoje popustljivosti, najvjerojatnije ostati u elastičnom području tijekom potresa, pa se njemu dodjeljuje djelotvorna krutost $E_c I_{eff,i} = 2 E_c I_{eff}$ ($E_c I_{eff}$ iz izraza (2)). Za ostale stupove krutost se umjeruje u skladu s prethodno proračunanim faktorom umjeravanja $E_c I_{eff,i} = SF \times 2 E_c I_{eff}$. S ovako proračunanom početnom djelotvornom krutošću dobivaju se rezultati prilično bliski onima u radovima [23, 24]. Pretpostavljena početna djelotvorna krutost može se provjeriti i iteracijama korigirati na sljedeći način. Globalna krutost stupa $K_{eff,i}$ računa se iz poprečne sile u njemu V_i i pomaka između dna i vrha stupa Δ_i :

$$K_{eff,i} = \frac{V_i}{\Delta_i} \tag{5}$$

Rezultantna djelotvorna krutost poprečnog presjeka dobiva se iz globalne krutosti stupa prema izrazu:

$$E_c I_{eff,ross,i} = \frac{K_{eff,i} \cdot h_i^3}{12} \tag{6}$$

Odnos krutosti raspucanog i neraspucanog poprečnog presjeka stupa $E_c I_{eff,i} / E_c I_{gross,i}$ u području potencijalnih plastičnih stupova mostova koji su ocijenjeni u ovom radu prikazan je u postocima na slici 9.

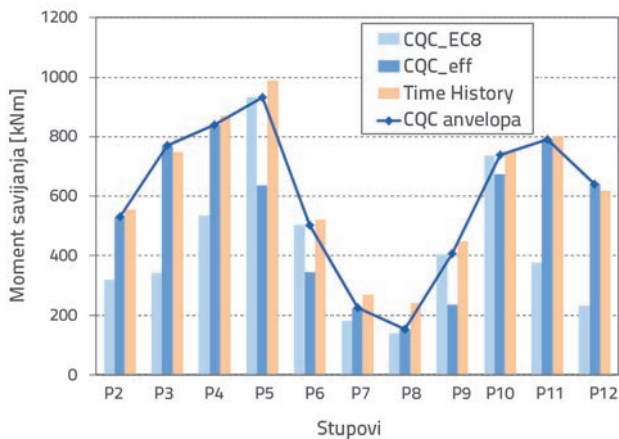
Na temelju iznesenog, za ocjenjivanje postojećih lučnih mostova autori predlažu prije svega provesti linearni višesmodalni spektralni proračun uz primjenu djelotvorne krutosti stupova prema izrazu (2). Nakon toga treba proračunati djelotvornu krutost na temelju gornje procedure prema izrazima (3) do (6) te s njome ponoviti linearni višesmodalni spektralni proračun uz moguću potrebu za iteracijama. Konačno se zahtjevi na pojedine stupove dobiveni početnom i konačnom višesmodalnom analizom uspoređuju uz odabir većih vrijednosti kao mjerodavnih za ocjenu. Na ovaj se način opisuje odgovor mosta i degradacija njegovih elemenata kroz vrijeme.

3.3.2. Provjera metodom vremenskog zapisa

Prikladnost primjene djelotvorne krutosti stupova, prema prijedlogu autora, provjerena je usporedbom rezultata iterativnog linearnog višesmodalnog spektralnog proračuna s najvećim učincima dobivenim nelinearnom dinamičkom metodom uz upotrebu triju vremenskih zapisa potresa (eng. *time history: TH*). Na temelju istraživanja u radovima [25, 26] gdje se naglašava da su za potresni proračun armiranobetonskih lučnih mostova važniji potresni zapisi s većim vršnim temeljnim brzinama (eng. *peak ground velocities: PGV*) nego oni s većim vršnim temeljnim ubrzanjem (eng. *peak ground acceleration: PGA*), za ovu provjeru autori su odabrali sljedeće potresne zapise: Imperial Valey, 1940, $a_g = 0,313$ g, $v_{max} = 33,4$ cm/s; Loma Prieta, 1989, $a_g = 0,363$ g, $v_{max} = 32,9$ cm/s i Northridge, 1994, $a_g = 0,56$ g, $v_{max} = 52,0$ cm/s. Izvorni vremenski zapisi odabranih potresa prilagođeni su spektru odgovora tipa 1 s vršnim ubrzanjem a_g na tlu tipa

A prema nHRN EN 1998-1. 2011/NA [16, 14] primjenom računalnog programa Seismomatch V.2.0.0. koji za prilagodbu koristi valični algoritam (wavelets algorithm) [27, 28].

Na slici 5. očito je da se anvelopa unutrašnjih sila (CQC anvelopa) dobivena u prvom koraku ocjenjivanja iz dvaju različitih linearnih višemodalnih spektralnih proračuna, prvi s djelotvornom krutošću stupova prema EN 1998-2, izraz (2), (CQC_EC8), a drugi s djelotvornom krutošću prema izvornom prijedlogu autora prema izrazima (3) do (6), (CQC_eff), uglavnom vrlo dobro podudaraju s rezultatima metode vremenskih zapisa (Time History).



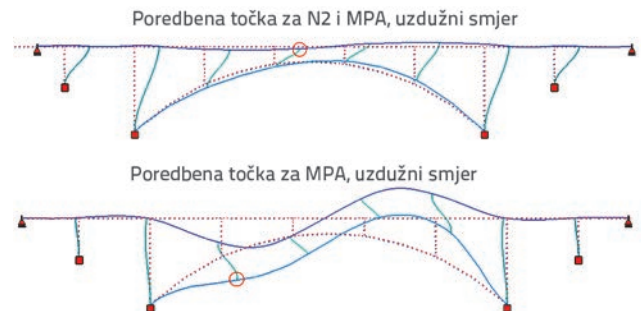
Slika 5. Momenti savijanja u stupovima jednog lučnog mosta (poprečni smjer): usporedba višemodalne spektralne analize uz uporabu potpune kvadratne kombinacije (CQC) i metode vremenskog zapisa (TH)

3.4. Poredbena točka i ciljani pomak

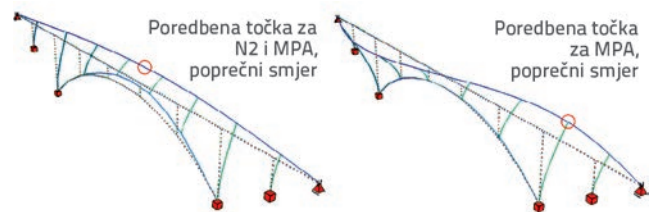
Nelinearni statički proračun provodi se u dva horizontalna smjera dok se ne dosegnu ciljani pomaci d_{Tx} i d_{Ty} u poredbenim točkama. Ako su zadovoljeni uvjeti za uporabu N2 proračuna (vidi 3.1) u uzdužnom i poprečnom smjeru, poredbene točke nalazit će se u sredini mosta na razini rasponskog sklopa (slika 6 gore, slika 7 lijevo). Kada je nužno provesti MPA proračun, poredbene točke u uzdužnom smjeru su uobičajeno: bilo gdje na rasponskome sklopu (značajna translacija rasponskoga sklopa, slika 6 gore), u čvoru u četvrtini raspona luka (uzdužna translacija luka s odizanjem jedne i propadanjem druge polovice, slika 6 dolje) i točka u sredini najvišega petnog stupa (lokalno vibriranje najvišeg stupa). Poredbene točke u poprečnom smjeru su uobičajeno: u sredini mosta na razini rasponske konstrukcije (parabolični oblik vibriranja, slika 7. lijevo) i na vrhovima najviših petnih stupova na razini rasponske konstrukcije (dijagonalno simetričan oblik vibriranja, slika 7 desno).

Ciljani pomak mosta kao sustava s više stupnjeva slobode (eng. *multimodal degree of freedom: MDOF*) u promatranoj poredbenoj točki d_r proračunava se iz ciljanog pomaka

idealiziranog jednakovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode (eng. *single degree of freedom: SDOF*) d_r^* , pomnoženog faktorom transformacije Γ prema N2 metodi koja se za mostove primjenjuje u odgovarajućim koracima [29, 3]. Kada je nužno provesti MPA proračun, zahtjev pomaka treba proračunati kombiniranjem svake pojedine metode postupnog guranja za svaki značajan oblik vibriranja i pripadnu poredbenu točku.



Slika 6. Uobičajeno značajni oblici vibriranja lučnog mosta u uzdužnom smjeru i poredbene točke za metode postupnog guranja



Slika 7. Uobičajeno značajni oblici vibriranja lučnog mosta u poprečnom smjeru i poredbene točke za metode postupnog guranja

3.5. Provjere na temelju linearnog višemodalnog proračuna

Linearni višemodalni spektralni proračun se provodi na modelu mosta sa srednjim vrijednostima svojstava materijala [1]. Prije svega treba provesti usporedbu uzdužnih i poprečnih pomaka rasponske konstrukcije na upornjacima pod seizmičkim opterećenjem d_E sa stvarno dopuštenim pomacima na tim mjestima d_{allow} :

$$\text{Provjera 1.1: } d_{allow} \geq d_E \quad (7)$$

Provjera je potrebna jer pomaci uslijed potresnog opterećenja mogu biti preveliki i rezultirati udarcima rasponske konstrukcije u zidic upornjaka. Na temelju provjere pomaka, upravitelj mosta može donijeti odluku da se pomaci rasponske konstrukcije ograniče postavljanjem na upornjake uređaja za sprečavanje pomaka ili prigušivača. Ako bi se primijenila ovakva mjera, važno je isti proračun provesti na modelu obnovljenog mosta te ponovno ocijeniti rezultate na isti način.

Kako bi se dobio odgovor konstrukcijskih elemenata na interakciju normalnih sila i momenata savijanja u potresu $f(N_{Ed}, M_{Ed})$, most se modelira sa srednjim vrijednostima svojstava materijala, a za dobivanje potresnog zahtjeva na posmik V_E most se modelira sa srednjim vrijednostima svojstava materijala f_{im} pomnoženim faktorom povjerenja CF. Uzimanjem u obzir stvarno ugrađene armature, proračunska otpornost na interakciju normalnih sila i momenata savijanja $f(N_{Rd}, M_{Rd})$ temelji se na srednjim vrijednostima svojstava materijala f_{im} , a otpornost na poprečne sile V_{Rd} na srednjim vrijednostima svojstava materijala podijeljenim faktorom povjerenja CF i parcijalnim koeficijentom γ (za beton $\gamma_{c,acc}=1,2$ i za armaturu $\gamma_{s,acc}=1,0$). Provjera unutrašnjih sila je zadovoljena ako vrijedi:

$$\text{Provjera 1.2: } f(N_{Rd}, M_{Rd}) \geq f(N_E, M_E) \quad (8)$$

$$\text{Provjera 1.3: } V_{Bd,1} = \frac{V_{Rd}}{\gamma_{Bd,1}} \geq V_E \quad (9)$$

gdje $f(N_{Rd}, M_{Rd})$ predstavlja otpornost na međudjelovanje savijanja i uzdužne sile, a $V_{Bd,1}$ predstavlja otpornost na poprečne sile V_{Rd} prema EN 1998-3 [1] dodatno podijeljenu koeficijentom sigurnosti $\gamma_{Bd,1}=1,25$ protiv krugog sloma.

Provjera unutrašnjih sila su obično zadovoljavajuće za luk i rasponsku konstrukciju te će za ove elemente prihvatljivo ponašanje u potresnoj proračunskoj situaciji biti dokazano na prvoj razini ocjene. Za nadlučne stupove ovo ne vrijedi i za njih će najčešće biti potrebno proći kroz drugu razinu ocjenjivanja.

3.6. Provjere na temelju nelinearne statičke analize

U ovome se koraku ocjene, elementi mosta modeliraju sa srednjim vrijednostima svojstava materijala [1]. Krivulje dobivene iz svakog proračuna postupnog guranja predstavljaju vezu između potresnog opterećenja F (ukupna poprečna sila u podnožju) i pomaka d u poredbenoj točki. Krivulje treba transformirati na model s jednim stupnjem slobode (idealizirati za točku popuštanja i dobiti moguć faktor duktilnosti) i

usporediti s potresnim zahtjevom izraženim spektrom odgovora (obje krivulje u formatu S_a-S_d , spektralno ubrzanje-spektralni pomak). Moguće idealizirane krivulje postupnog guranja jednakovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode s odgovarajućim ciljanim pomacima prikazane su na slici 8.

Lijeva krivulja odgovara mostu s duktilnim ponašanjem, a desna mostu s ograničenim duktilnim (gotovo elastičnim) ponašanjem koje najčešće karakterizira postojeće armiranobetonske lučne mostove. U N2 metodi, ovo će se ocjenjivanje provesti za dominantan oblik vibriranja u oba smjera, uzdužnom i poprečnom, a za MPA metodu ocjenjivanje će se provesti za svaki pojedini važni oblik vibriranja.

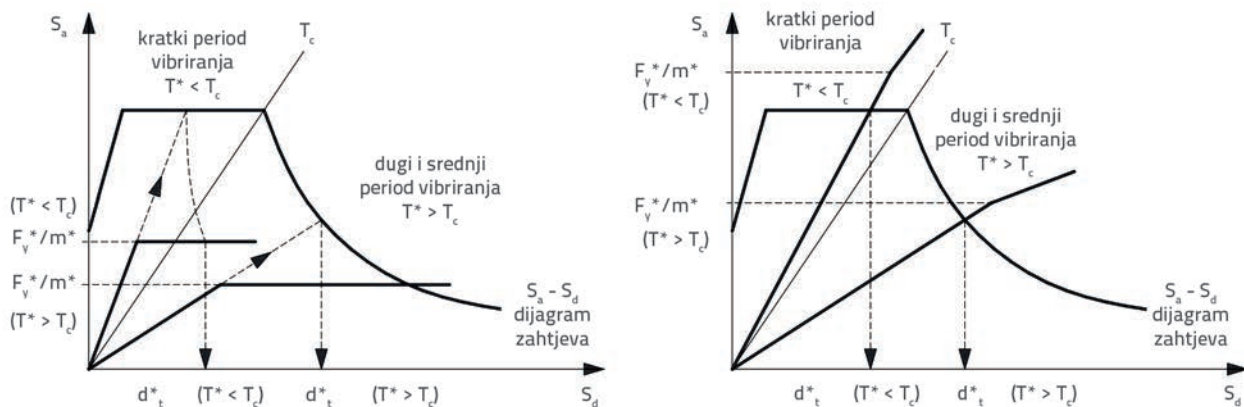
Dodatni proračun deformirane konstrukcije pod potresnim djelovanjem provodi se kroz sljedeće provjere. Kada je moguće primijeniti N2 metodu, ove će se provjere provesti za ciljani pomak sustava s više stupnjeva slobode, a kada je nužna MPA metoda, provjere će se provesti za konačan zahtjev pomaka proračuna kombiniranjem rezultata svakog pojedinog proračuna postupnim guranjem.

Rotacije na mjestima potencijalnih plastičnih zglobova se ocjenjuju na način da je zahtjev za rotacijom plastičnog zgloba $\theta_{p,E}$ dovoljno manji od sposobnosti granične rotacije vlakna θ_{is} .

$$\text{Provjera 2.1: } \theta_s \geq \theta_{p,E} \quad (10)$$

Za granično stanje mosta blizu rušenja, sposobnost zakretanja vlakna θ_{is} je ukupna sposobnost zaokretanja vlakna θ_{um} sastavljena od elastičnog i neelastičnog dijela. Za granično stanje znatnog oštećenja mosta, sposobnost zakretanja vlakna θ_{is} iznosi $3/4\theta_{um}$, a za granično stanje ograničenog oštećenja mosta, sposobnost zakretanja vlakna θ_{is} jednaka je zaokretanju vlakna u trenutku popuštanja θ_v [1]. U ovom su se istraživanju razmatrala prva dva granična stanja koja se smatraju važnima za ocjenjivanje postojećih mostova.

Točna ocjena granične sposobnosti rotacije armiranobetonskih elemenata može se, uslijed velikog broja geometrijskih i materijalnih parametara i uključenih nesigurnosti (oblik opterećenja: cikličko ili monotono, potresno oblikovanje,



Slika 8. Mogući idealizirani oblici krivulja postupnog guranja jednakovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode s odgovarajućim ciljanim pomakom, lijevo: duktilno ponašanje; desno: ograničeno duktilno (gotovo elastično) ponašanje

ovijanje betona, odlamanje zaštitnog sloja betona, rebrasta ili glatka armatura, duljina preklapanja, duljina plastičnog zgloba, utjecaj savijanja, visina poprečnog presjeka, i dr.), odrediti samo na temelju eksperimentalnih podataka [30].

EN 1998-3 [1, 29] nudi izraze za pravokutne poprečne presjeke elemenata s rebrastom armaturom, seizmički oblikovane, bez preklapanja uzdužnih šipki u blizini područja plastičnog zgloba i korekcijske faktore za spomenute parametre. Neobični poprečni presjeci mogu se konzervativno aproksimirati s pravokutnima (slika 12. za poprečne presjeke nadlučnih stupova). Ovo područje zahtijeva dodatna istraživanja koja su izvan planiranog doprinosa ovoga rada.

Naprezanja sastavnih materijala za neobavijeni beton $\sigma_{c,E}$ (luka, rasponske konstrukcije, stupova izvan područja plastičnih zglobova), obavijeni beton u područjima plastičnih zglobova $\sigma_{c,E}^{pl,hinge}$ i armaturu $\sigma_{y,E}$ trebaju biti manja od srednjih vrijednosti čvrstoća za neobavijeni beton f_{cm} , obavijeni beton $f_{cm,c}$ i armaturu f_{ym} podijeljenih s faktorom povjerenja CF i parcijalnim koeficijentom za beton $\gamma_{c,acc}$ i za armaturu $\gamma_{s,acc}$:

$$\text{Provjera 2.2.a: } \frac{f_{cm}}{CF \cdot \gamma_{c,acc}} \geq \sigma_{c,E} \quad (11)$$

$$\text{Provjera 2.2.b: } \frac{f_{cm,c}}{CF \cdot \gamma_{c,acc}} \geq \sigma_{c,E}^{pl,hinge} \quad (12)$$

$$\text{Provjera 2.3: } \frac{f_{ym}}{CF \cdot \gamma_{s,acc}} \geq \sigma_{y,E} \quad (13)$$

Provjera elemenata na neduktilne oblike otkazivanja provodi se kroz provjere poprečnih sila u svim elementima i spojevima u blizini plastičnih zglobova, uzimajući u obzir dodatan faktor sigurnosti protiv krčkog sloma ($\gamma_{Bd,1} = 1,25$), a pri čemu se otpornost na poprečne sile V_{Rd} elementa temelji na srednjim vrijednostima svojstava materijala $f_{l,m}$ podijeljenima s CF i parcijalnim koeficijentom γ (za beton $\gamma_{c,acc} = 1,2$ i za armaturu $\gamma_{s,acc} = 1,0$).

$$\text{Provjera 2.4: } V_{Bd,1} = \frac{V_{Rd}}{\gamma_{Bd,1}} \geq V_E \quad (14)$$

Mogućnost izbočivanja uzdužne tlačne armature A_s između poprečnih spona A_t na razmaku s_T uzduž potencijalnog područja plastičnog zgloba ocjenjuje se na temelju zahtijeva:

$$\text{Provjera 2.5: } \frac{A_{t,built}}{s_{T,built}} \geq \min\left(\frac{A_t}{s_T}\right) = \frac{\sum A_s}{1,6} \times \frac{f_{ys}}{f_{yt}} \quad (15)$$

gdje je f_{yt} čvrstoća popuštanja spone, a f_{ys} je čvrstoća popuštanja uzdužne armature. Oznaka "built" odnosi se na stvarno ugrađenu poprečnu armaturu.

Ako su sve provjere zadovoljene, dokazano je prihvatljivo ponašanje mosta u seizmičkoj proračunskoj situaciji. U suprotnom inženjer odgovoran za ocjenu mosta može u dogovoru s upraviteljem mosta donijeti odluku o ojačanju problematičnih elemenata mosta. Ako bi se provodile mjere

obnavljanja mosta, važno je istu proceduru proračuna primijeniti na modelu ojačanog mosta i ponoviti ocjenu kroz iste provjere.

4. Primjena metode u ocjeni tri postojeća hrvatska lučna mosta

Svi ocijenjeni mostovi prikazani u ovome radu projektirani su i izgrađeni u skladu s propisima koji su bili na snazi 60-ih godina prošlog stoljeća, ne uzimajući u obzir potresno djelovanje, a uz primjenu glatke armature i bez ikakvog protupotresnog oblikovanja. Nalaze se na područjima umjerene seizmičke aktivnosti, prema podjeli europskih norma za potres. Mostovi su na potresno djelovanje ocijenjeni uporabom prve razine (linearni dinamički proračun spektra odgovora) i druge razine (nelinearni statički proračun postupnog guranja) predložene metode ocjenjivanja, a u skladu sa zahtjevima sadašnjih europskih normi za potres. Treba napomenuti da, s obzirom na to da su svi ocjenjivani hrvatski lučni mostovi temeljeni na zdravoj stijeni, provjera sloma temeljnog tla nije razmatrana u ovom istraživanju. U suprotnom, trebalo bi u proceduru ocjenjivanja uključiti i provjeru sloma temeljnog tla.

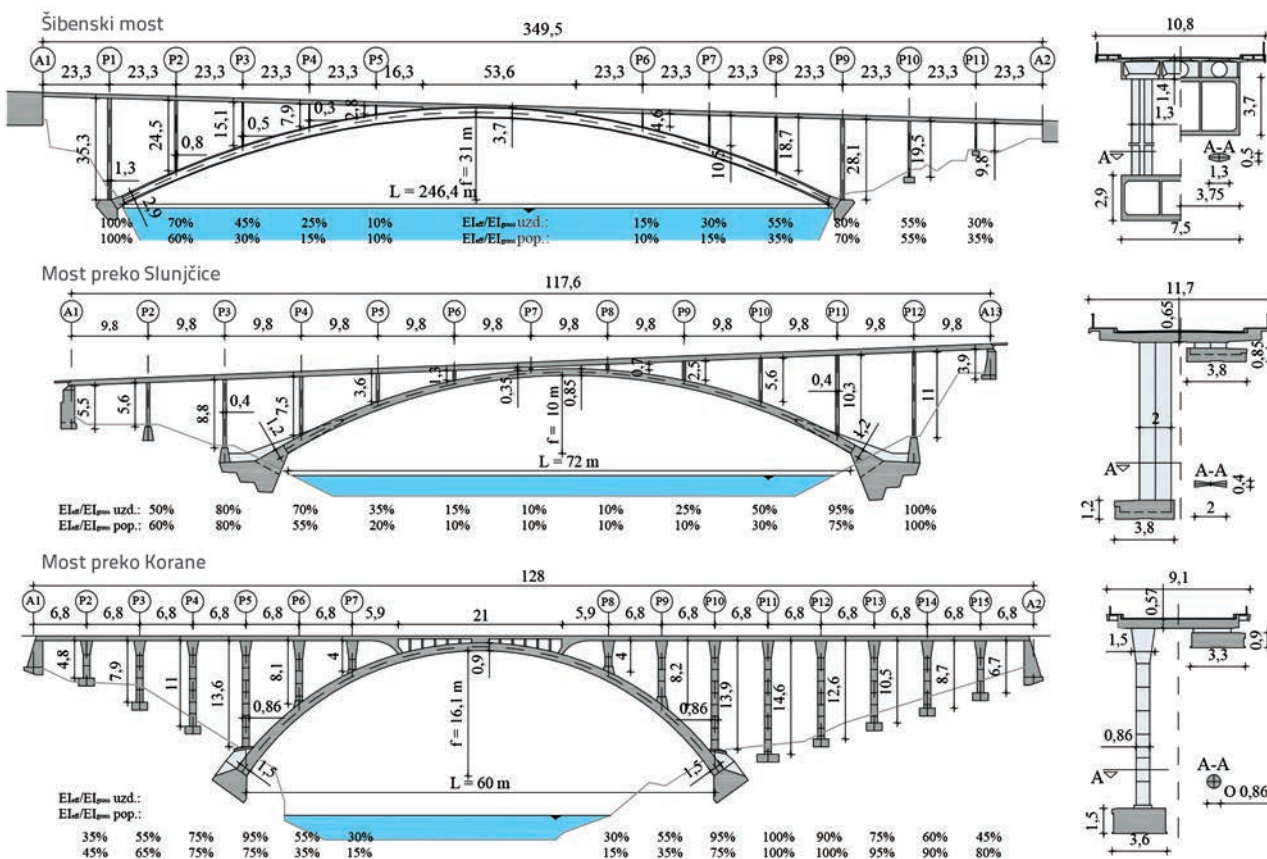
Šibenski most (slika 9., gore), sagrađen je 1966. kao armiranobetonski luk sandučastog poprečnog presjeka s tri čelije s rasponskom konstrukcijom građenom od slobodno oslonjenih roštilja sastavljenih od četiri predgotovljena prednapeta nosača. Svi stupovi su kruto vezani u poprečne nosače rasponske konstrukcije, luk ili svoje temelje.

Drugi most je armiranobetonski lučni most preko rijeke Slunjičice u Slunju, sagrađen 1961. (slika 9., sredina). Glavni nosivi element ovoga mosta je dvostruki armiranobetonski luk punog poprečnog presjeka promjenjive visine. Rasponska konstrukcija mosta je uobičajena armiranobetonska puna ploča. Svi stupovi su kruto vezani uz rasponsku konstrukciju, luk ili svoje temelje.

Treći je armiranobetonski lučni most preko rijeke Korane u Selištu sagrađen 1962. (slika 9., dolje). Luk čine dva svoda s postupnim povećanjem debljine od tjemena prema petama. Luk je u tjemenu povezan s armiranobetonskom punom pločastom rasponskom konstrukcijom. Svi stupovi su kružnog poprečnog presjeka i kruto vezani uz rasponsku konstrukciju, lukove ili svoje temelje. U skladu s hrvatskom kartom seizmičkog rizika, vršna ubrzanja temeljnog tla na lokacijama mostova jesu redom 0,2 g, 0,12 g i 0,12 g.

Uz uvjet da se ne provode značajne mjere obnove, optimalni preostali vijek trajanja t_L svijih ocjenjivanih mostova je procijenjen na 40 godina. U skladu s izrazom (1) to vodi do skraćenog povratnog perioda $T_{R,red} = 380$ godina i reducirane vrijednosti vršnog ubrzanja temeljnog tla za seizmičko ocjenjivanje $a_{g,red} = 0,92 \cdot a_{g,R}$.

U nastavku će se dati pregled rezultata dviju razina metode ocjenjivanja s naglaskom na manjkave (najkritičnije) elemente u potresnom odgovoru razmatranih mostova. Tablica 2. prikazuje ispunjenje provjera pri ocjenjivanju svakog



Slika 9. Uzdužni i poprečni presjeci triju ocjenjivanih mostova (dimenzije u metrima)

mosta s označenim (*kurzivom*) elementima mostova koji ne zadovoljavaju odgovarajuću provjeru.

Tablica 2. Zadovoljavanje pojedinih provjera pri ocjenjivanju postojećih triju hrvatskih mostova

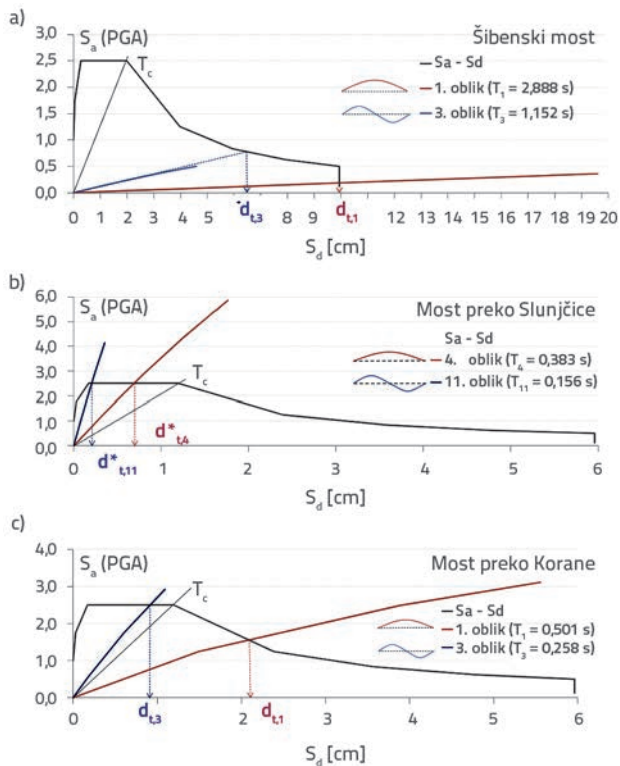
Provjera u sklopu ocjene	Šibenski most	Most preko Slunjičice	Most preko Korane
1.1 $d_{allow} \geq d_t$	DA	DA	DA
1.2 $f(N_{Rd}, M_{Rd}) \geq f(N_{E}, M_{E})$	NE P1, P5, P6, P9	NE P6, P7, P8, P9	NE P2, P3, P6 - P9, P14, P15
1.3 $V_{Bd,1} \geq V_E$	NE P5, P6	NE P5, P7, P8, P10	NE P2, P7, P8
2.1 $\theta_{ls} \geq \theta_{p,E}$	DA	DA	DA
2.2 $f_{ci} \geq \sigma_{ci}$	NE P5, P6	NE P6, P7, P8, P9	DA
2.3 $f_{vj} \geq \sigma_{vj}$	NE P5, P6	NE P6, P7, P8, P9	DA
2.4 $V_{Bd,1} \geq V_E$	NE P5, P6	NE P5, P7, P8, P10	NE P2, P7, P8
2.5 $A_{t,built}/s_{T,built} \geq \min(A_t/s_t)$	NE P1, P2, P3, P7, P8, P9, P10	NE Svi stupovi	DA

Provjere pomaka na prvoj razini ocjenjivanja, uzimajući u obzir pomake rasponske konstrukcije na upornjacima, zadovoljene su za sva tri mosta.

Provjere usporedbe unutrašnjih sila i otpornosti zadovoljene su za elemente lukova i rasponskih konstrukcija, ali ne i za stupove ocjenjivanih mostova. Stupovi Šibenskog mosta P1, P5, P6 i P9 nemaju dovoljnu nosivost na savijanje, a stupovi P5 i P6 dodatno nemaju ni dovoljnu nosivost na posmik. Najkritičniji elementi mosta preko rijeke Slunjičice jesu nadlučni stupovi P6, P7, P8, P9, čije nosivosti na savijanje nisu dovoljne, a stupovi P5, P7, P8, P10 nemaju ni dovoljnu nosivost na posmik. Na mostu preko rijeke Korane najkritičniji elementi su stupovi P2, P3, P6, P7, P8, P9, P14 i P15 s obzirom na nosivost na savijanje, pri čemu stupovi P2, P7 i P8 nemaju ni dovoljnu nosivost na posmik.

Na ovoj je razini ocjene preporučljivo nastaviti s drugom razinom ocjenjivanja zbog moguće povoljnije preraspodjele sila koja se dobiva nelinearnim proračunom postupnog guranja, umjesto da se već donose odluke o ojačanju slabih elemenata mosta.

Slika 10. prikazuje krivulje kapaciteta jednakovrijednog sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF) u usporedbi sa spektrom zahtjeva potresa na temelju višemodalne metode postupnog guranja (MPA) u poprečnom smjeru ocjenjivanih mostova.



Slika 10. Usporedba krivulja kapaciteta istovrsnog sustava s jednim stupnjem slobode za dominantne oblike vibracija ocjenjivanih mostova u poprečnom smjeru i zahtjeva potresa na temelju višemodalne pushover analize (MPA)

Višemodalni proračun u prvom koraku ocjenjivanja pokazao je da je za doseganje zahtijevane razine od 80 % ukupne mase za MPA u poprečnom smjeru dovoljno razmatrati dva dominantna oblika vibriranja s najvećim sudjelovanjem djelotvorne mase. Dominantan parabolični oblik vibriranja uključuje približno 60 % ukupne mase, a dijagonalno simetrični S-oblik vibriranja aktivira približno 25 % ukupne mase. U uzdužnom smjeru treba uzeti u obzir tri ili četiri oblika vibriranja kako bi se aktiviralo zahtijevanih 80 % ukupne mase.

Krivulje kapaciteta ocjenjivanih mostova su, općenito gledano, ravne linije što pokazuje da je seizmičko ponašanje postojećih mostova u cijelosti izrazito elastično (linearno), pa bilinearna idealizacija uglavnom nije potrebna. Također, kako postojeći mostovi nemaju protupotresno oblikovanje detalja elemenata, ne može se pouzdati u njihove sposobnosti duktilnosti, pa se krivulje kapaciteta uspoređuju s elastičnim spektrom zahtjeva potresa. Za treći S-oblik vibriranja Šibenski most ne doseže ciljani pomak, dok je odgovor i mosta Slunjičica i Korana, za oblike vibriranja s kratkim periodom $T^* < T_c$, elastičan pa je ciljani pomak sustava s jednim stupnjem slobode jednak neograničenom elastičnom pomaku.

Na drugoj razini ocjene, zahtjevi seizmičkog zakretanja na lokaciji potencijalnih plastičnih zglobova (krajnji dijelovi

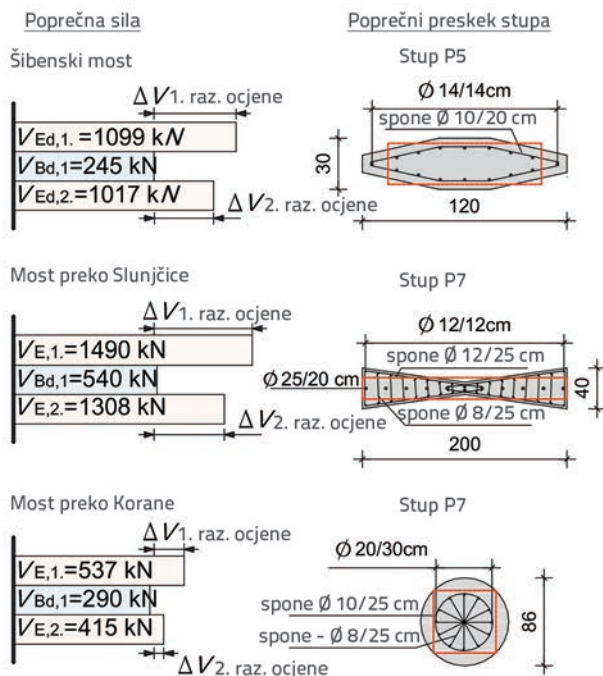
stupova) manji su u odnosu na sposobnosti zakretanja. Umjesto da se provjeravaju nosivosti na savijanje i uzdužnu silu, kako je to učinjeno na prvoj razini što je rezultiralo nedovoljnim otpornostima za sva tri mosta, na drugoj razini ocjenjivanja provjeravaju se naprezanja u betonu i armaturi te su za sve elemente mosta preko Korane te provjere zadovoljene. Za Šibenski most i most preko Slunjičice najkritičniji elementi, na temelju provjere naprezanja u betonu i armaturi, jesu kratki stupovi P5 i P6 za prvi odnosno P6, P7, P8 i P9 za drugi most. Kod mosta preko Slunjičice, na spoju stupa P7 i luka javlja se popuštanje armature pod seizmičkim opterećenjem, što je djelomično potvrđeno odlamanjem zaštitnog sloja betona koje je uočeno tijekom vizualnog pregleda mosta [8] (slika 11.).



Slika 11. Odlamanje zaštitnog sloja betona na najkritičnijem detalju mosta preko rijeke Slunjičice – veza stupa P7 i luka

Za sve ocjenjivane mostove, otpornosti na posmik nisu dovoljne u istim kritičnim stupovima kao i na prvoj razini ocjene, ali su seizmički zahtjevi proizašli iz druge razine ocjenjivanja niži od onih na prvoj razini što je prikazano na slici 12. Razlike između otpornosti i zahtjeva na posmik ΔV mogu se nadoknaditi prikladnim ojačanjem elemenata. Iz iste slike očito je da druga razina ocjenjivanja, koja traži nešto više ulaganja u proračun, rezultira ekonomičnijim mjerama obnove mosta u odnosu na one koje bi se provele na temelju rezultata prve razine ocjenjivanja. Stupovi P2, P7 i P8 mosta preko Korane mogu se ojačati obavijanjem FRP trakama kritičnih područja, u skladu s prezentiranim u radu [31]. Zahtjev na posmičnu otpornost na stupovima P5 i P6 Šibenskog mosta i stupovima P7 i P8 mosta preko Slunjičice je prevelik te bi, umjesto velike promjene dimenzija kritičnog poprečnog presjeka, prikladnije rješenje bio prijenos seizmičke sile uzduž rasponskog sklopa sa stupova na upornjake postavljanjem seizmičkih prigušivača ili uređaja za prijenos udara na upornjake.

Provjere mogućnosti izvijanja uzdužne tlačne armature između poprečnih spona uzduž područja potencijalnog plastičnog zgloba pokazale su da su razmaci spona preveliki (osim za most Korana) s obzirom na suvremene seizmičke zahtjeve, te bi obavijanje područja potencijalnih plastičnih zglobova (5 - 10 % krajnjih dijelova stupova) čelikom ili FRP-om bila prikladna mjera ojačanja.



Slika 12. Usporedba u potresu zahtijevane nosivosti na posmik na najkritičnijim stupovima dobivene prema prvoj i drugoj razini ocjene te poprečni presjeci stupova

5. Zaključak

Na temelju istraživanja ponašanja postojećih armiranobetonskih lučnih mostova izloženih potresnom djelovanju, poznate metode seizmičkog ocjenjivanja konstrukcija dodatno su razvijene i unaprijeđene te prikladno uključene u izvornu proceduru primjenjivu za seizmičko ocjenjivanje postojećih armiranobetonskih lučnih mostova (slika 1.). Ova procedura, koja prolazi kroz razine ocjenjivanja, primjenjiva je za cjelokupnu konstrukciju lučnog mosta i upućuje na kritične detalje i elemente u seizmičkom odgovoru mosta. Sastoji se od dviju razina i nekoliko provjera na svakoj

razini ocjenjivanja. Svaka provjera daje odgovor na pitanje da li je postavljeni zahtjev zadovoljen ili nije. Na temelju tih odgovora može se donijeti dovoljno precizna smjernica o potresnoj obnovi ocjenjivanog mosta, koja se onda prezentira vlasniku koji donosi konačnu odluku hoće li se most sanirati ili ne.

Prva razina ocjene, u odnosu na drugu razinu, rezultira konzervativnijom ocjenom stanja mosta u pogledu seizmičkog odgovora. Stoga je kod mostova koji ne zadovoljavaju sve provjere na prvoj razini nužno proći i kroz drugu razinu ocjenjivanja. Kako su armiranobetonski lučni mostovi posebne konstrukcije zbog svoje robusnosti, utvrđeno je da se zadovoljavajuće ponašanje lukova u potresnoj proračunskoj situaciji može dokazati već na prvoj razini ocjenjivanja uporabom višemodalnog linearnog proračuna. Za nadlučne stupove (posebice kratke stupove u blizini tjemena) bit će nužno proći i kroz drugu razinu ocjenjivanja koja se temelji na nelinearnom proračunu postupnog guranja. Druga razina zahtijeva veća numerička i proračunska ulaganja, ali rezultira manje konzervativnom procjenom stanja mosta u odnosu na prvu razinu, a time i ekonomski povoljnijim rješenjem obnove. Ako bi se provodile mjere obnavljanja mosta, važno je istu proceduru proračuna primijeniti na modelu ojačanog mosta i ponoviti ocjenu kroz iste korake provjere.

Određeni aspekti raspoloživih metoda seizmičkog ocjenjivanja dodatno su poboljšani i razvijeni kako bi bili prikladni za ocjenjivanje upravo lučnih mostova. To su: prikladna raspodjela krutosti nadlučnih stupova, zahtijevano sudjelovanje djelotvorne modalne mase, utvrđivanje poredbene točke za formiranje krivulja kapaciteta lučnog mosta te smjernice za prikupljanje podataka o lučnim mostovima s ciljem ostvarivanja tražene razine znanja.

Autori ovoga rada smatraju da prikazana izvorna metoda seizmičkog ocjenjivanja može postati jednostavna u primjeni kao svakodnevni alat za otkrivanje slabosti lučnog mosta, odlučivanje o potrebi ojačanja i projektiranje seizmičke obnove mosta.

LITERATURA

- [1] EN 1998-3: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, CEN- European Committee for Standardization, Bruxelles, 2005.
- [2] EN 1998-2: Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges, CEN- European Committee for Standardization, Bruxelles, 2005.
- [3] Kappos, A. J., Saiidi, M. S., Aydinoglu, M. N., Isaković, T. (eds.): Seismic design and assessment of bridges – Inelastic methods of analysis and case studies. Volume 21 of the Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Springer, 2012.
- [4] Lu, Z., Ge H., Usami, T.: Applicability of pushover analysis-based seismic performance evaluation procedure for steel arch bridges, *Engineering Structures* 26 (2004) 14, pp. 1957-1977
- [5] Nakamura, S., Cetinkaya, O.T., Takahashi, K.: A Static Analysis-Based Method for Estimating the Maximum Inelastic Seismic Response of Upper-Deck Steel Arch Bridges, In *SECON - CSSE Proceeding of Sixth International Conference on Arch Bridges*, Fuzhou, CN, pp. 927-934, 2010.

- [6] Liang, C., Chen, A.: Effect of Site Condition on the Seismic Response of a Fixed-end Deck Steel Arch Bridge and the Feasibility of the Pushover Method. In SECON - CSSE Proceedings of Sixth International Conference on Arch Bridges, Fuzhou, CN, pp. 641-650, 2010.
- [7] Mancini, M.: Structural performance assessment of existing reinforced concrete bridges in seismic prone areas. PhD dissertation, University of Naples Federico II, 2011.
- [8] Franetović, M., Radić, J., Šavor, Z.: Seismic Assessment of Arch Bridge Across Slunjčica River in Slunj. In SECON - CSSE Proceedings of the 3rd Chinese-Croatian Joint Colloquium: Sustainable arch bridges. Zagreb, HR, pp. 249-258, 2011.
- [9] Mandić, A.: Granična stanja postojećih mostova. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [10] Franetović, M., Mandić Ivanković, A., Radić, J.: Seismic Assessment of Existing Bridges in Croatia. In Proceedings of the International IABSE Conference: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures, Rotterdam, NL, pp. 330-331+ CD, 2013.
- [11] Franetović, M.: Potresni proračun integralnih nadlučnih stupova lučnih mostova, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [12] Isaković, T., Fischinger, M.: Recent Advances in the Seismic Analysis and Design of RC Bridges in Slovenia. In Protection of Built Environment against Earthquakes, (ed: M. Dolšek), pp. 259-288, 2011.
- [13] EN 1998-1: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN-European Committee for Standardization, Bruxelles, 2004.
- [14] Paraskeva, T.S., Kappos, A.J.: Further development of a multimodal pushover analysis procedure for seismic assessment of bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 39 (2010) 2, pp. 211-222.
- [15] Isaković, T., Fischinger, M.: Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 35 (2006) 1, pp. 95-114.
- [16] nHRN EN 1998-1. 2011/NA. Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings - National Annex, HZN - Croatian Standards Institute, Zagreb, 2011.
- [17] Priestly, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M.: *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. New York: John Wiley, Sons, Inc., 1996.
- [18] Pinho, R.: Nonlinear Dynamic Analysis of Structures Subjected to Seismic Action. In *Advanced Earthquake Engineering Analysis*, (ed: A. Pecker), pp. 63-90, 2007.
- [19] McCallen, D., Noble, C., Hoehler, M.: *The Seismic Response of Concrete Arch Bridges with focus on the Bixby Creek Bridge, Carmel, California*. Lawrence Livermore National Laboratory Report No. UCRL-ID-134419 on a research and development project sponsored by the California Department of Transportation. Livermore, California, 1999.
- [20] Valluvan, R., Stephenson, J., Bergman, D., Buckland, P., Pajouhesh, D.: *Innovative Retrofit Techniques for Seismic Retrofit of Concrete Arch Bridges of Earlier Vintage*. Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, NZ, Paper No. 2562, 2000.
- [21] Kowalsky, M. J.: *A Displacement Based Approach for the Seismic Design of Continuous Concrete Bridges*." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (2002)31: pp. 719-747.
- [22] Alvarez, J. C.: *Displacement Based Design of Continuous Concrete Bridges Under Transverse Seismic Excitation*. MD dissertation, Pavia, Rose School, 2004.
- [23] Khan, E., Sullivan, T. J.: *Direct Displacement Based Design of a Reinforced Concrete Deck Arch Bridge*. Proceedings of NUST International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Islamabad, PK, 2011.
- [24] Khan, E., Sullivan, T. J., Kowalsky, M. J.: *Direct Displacement Based Design of a Reinforced Concrete Arch Bridges*. *Journal of Bridge Engineering* 19 (2013) 1: pp. 44-58.
- [25] Chavez, H., Alvarez, J.J.: *Seismic Performance of a Long Span Arch Bridge Taking Account of Fluctuation of Axial Force*. Proceedings of Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China: Mira Digital Publishing, 2008.
- [26] Alvarez, J.J., Aparicio, A.C., Jara, J.M., Jara, M.: *Seismic assessment of a long-span arch bridge considering the variation in axial forces induced by earthquakes*. *Engineering Structures* 34 (2012), pp. 69-80.
- [27] Abrahamson, N.A.: *Non-stationary spectral matching*. *Seismological Research Letters*, 1992: 30.
- [28] Hancock, J.: *An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets*. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10, 2006: 67-89.
- [29] EN 1998-3:2005/AC Design of structures for earthquake resistance Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Corrigendum, CEN - European Committee for Standardization, Bruxelles, 2010.
- [30] Verderame G.M., Ricci, P., Manfredi, G., Cosenza, E.: *Ultimate chord rotation of RC columns with smooth bars: some considerations about EC8 prescriptions* *Bull Earthquake Eng* 8 (2010), pp.1351-1373.
- [31] Balaguru, P., Nanni, A., Giancaspro. J.: *FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*, New York, Taylor, Francis, 2009