

Ocjenjivanje seizmičke oštećljivosti postojećih mostova pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja

Gordana Hrelja Kovačević¹, prof. dr. sc. **Ana Mandić Ivanković²**

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, gordana.hrelja.kovacevic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ana.mandic.ivankovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Mostovi su važan dio prometne infrastrukture, a podaci dobiveni ocjenom seizmičke oštećljivosti mostova važan čimbenik u donošenju odluka o postupcima sanacije i o postupcima koji slijede nakon potresa. U Hrvatskoj postoji značajan broj mostova koji su izgrađeni prije stupanja na snagu niza normi HRN EN 1998 za seizmički proračun konstrukcija, te je stoga važno provesti ocjenjivanje njihove potresne oštećljivosti. Ocjenjivanje mostova provodi se pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja. U radu je prikazana metodologija izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja uz prikaz osnovnih tipova mostova u Hrvatskoj.

Ključne riječi: postojeći mostovi, potresno opterećenje, granično stanje, inkrementalna dinamička analiza, krivulje vjerojatnosti oštećenja

Assessing seismic vulnerability of existing bridges using fragility curves

Abstract

Bridges are an important part of transport infrastructure, and the data obtained by assessing seismic vulnerability of bridges are an important factor in making decisions about rehabilitation procedures and post-earthquake procedures. A significant number of bridges were built in Croatia in the pre-Eurocode era, and it is therefore important to perform an assessment of their seismic vulnerability. The assessment of bridges is carried out using probability curves. The methodology for development of probability curves is presented, and a short overview of basic types of bridges in Croatia is given.

Key words: existing bridges, seismic load, limit state, incremental dynamic analysis, fragility curves

1 Uvod

U svijetu je već duže vrijeme aktualna tema ocjene seizmičke oštjetljivosti postojećih građevina, pa tako i mostova. Ocjenjivanje oštjetljivosti provodi se za specifične regije (države), uzimajući u obzir specifičnosti mostova i potresno opterećenje mjerodavno za pojedino područje [1-5].

Mostovi su iznimno važan dio prometne infrastrukture, a naročito nakon izvanrednih događaja kao što je potres, kada je nužno osigurati komunikaciju s ugroženim područjima. U Hrvatskoj postoji veliki broj mostova na ključnim prometnicama koji je projektiran i građen prije stupanja na snagu niza normi HRN EN 1998 [6, 7] za seizmički proračun konstrukcija. Prije spomenutih normi mostovi su projektirani uzimanjem potresnog djelovanja prema tadašnjim propisima [8, 9].

Upravo ti mostovi sada su došli do trenutka kada je potrebna njihova sanacija. Prilikom odluke o sanaciji nekog mosta postavlja se pitanje i njegove otpornosti na potres, međutim, rijetko se analizira potresna otpornost postojećih mostova, a još rjeđe ili gotovo nikada ne provodi se ojačanje mosta.

Razlog za to je, dijelom, i nepostojanje propisa koji bi regulirao zahtjeve potrebne otpornosti kod velikog broja postojećih građevina, pa tako i mostova. Naime, europska norma EN 1998-3 [10] odnosi se primarno na ocjenjivanje i obnavljanje zgrada.

Slijedom navedenoga, procjena potresne oštjetljivosti postojećih mostova pomoću krivulja vjerojatnosti oštećenja, daje korisne informacije o stanju postojećih mostova, koje mogu pomoći prilikom donošenja odluka o sanaciji mostova, ali i o postupcima i prioritetima nakon potresa.

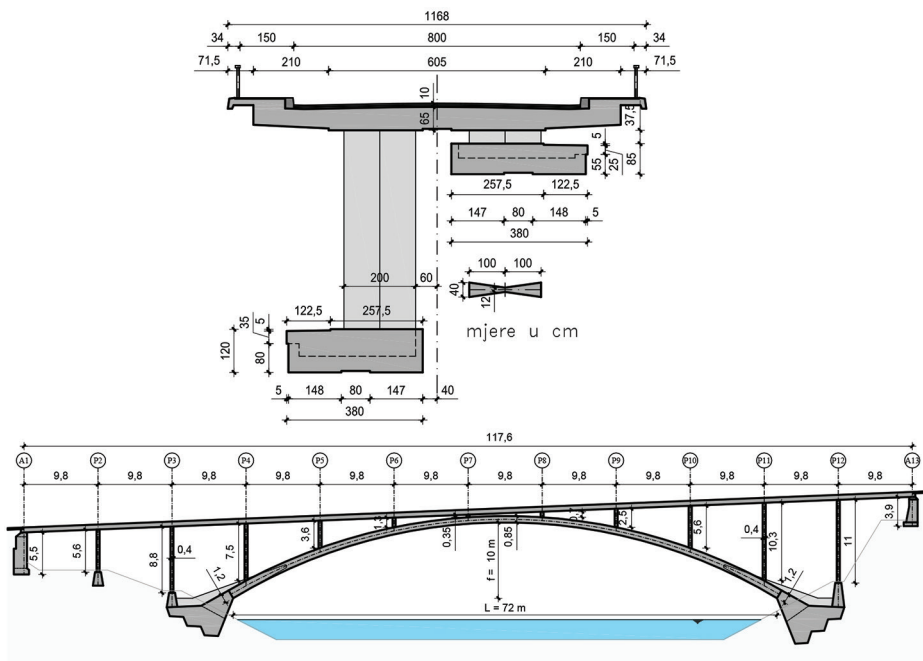
Potresna oštjetljivost odnosi se na opasnost ili izloženost premašaju pojedinih graničnih stanja oštećenja [11].

U nastavku su prikazani osnovni tipovi postojećih mostova u Hrvatskoj i metodologija izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja.

2 Mostovi u Hrvatskoj

U ovom poglavlju opisani su značajniji tipovi i prikazani primjeri betonskih mostova sagrađenih u Hrvatskoj, počevši od 50-ih godina prošlog stoljeća pa do danas.

Nakon Drugog svjetskog rata, mostovi manjih raspona (do 30 m) građeni su od armiranog ili prednapetog betona pločastog ili rebrastog poprečnog presjeka. Mostovi većih raspona su lučni mostovi (slika 1.) ili pak gredni mostovi sandučastog poprečnog presjeka od prednapetog betona građeni na skeli ili postupkom slobodne konzolne gradnje. Šezdesetih godina prošlog stoljeća počinje upotreba predgotovljenih prednapetih nosača u gradnji mostova.

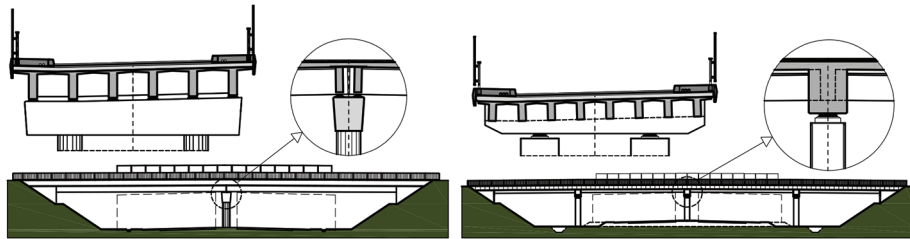


Slika 1. Uzdužni i poprečni presjek mosta preko Slunjičice u Slunju

Kad promatramo betonske mostove (armiranobetonske i mostove od prednapetog betona), u Hrvatskoj su mnogi mostovi građeni tzv. polumontažnom gradnjom, a njihova je karakteristika da rasponski sklop čine predgotovljeni prednapeti nosači s dobetoniranom kolničkom pločom (slika 2). Prethodne varijante takvih mostova građene su bez dobetonirane ploče povrh montažnih nosača.

U statičkom smislu postoji više varijacija ovakvih mostova: niz prostih greda, niz prostih greda s kontinuitetnom pločom povrh stupova, kontinuirani rasponski sklopovi pri čemu se kontinuitet iznad stupova uspostavlja mekom armaturom, integralni spoj rasponskog sklopa i stupova (ponekad i upornjaka).

Predgotovljeni prednapeti nosači, koji su korišteni, različitih su oblika (ovisno o opremi izvoditelja). Oslanjanje nosača na donji ustroj (stupove i upornjake) ostvareno je preko neoprenskih ležajeva za sustav prostih greda, a za kontinuirane sustave oslanjanje se realizira preko neoprenskih, lončastih ili u novije vrijeme preko kalotnih ležajeva.



Slika 2. Poprečni presjeci nadvožnjaka s predgotovljenim prednapetim nosačima (lijevo niz prostih greda, desno s uspostavom kontinuiteta iznad stupova)

Velika prednost polumontažnih mostova je izostanak skele i oplate duž raspona, pa samim time jednostavnost i velika brzina gradnje, te su oni bili najčešće korišteni sustavi pri izgradnji većine dionica na autocestama [12].

Mostovi građeni prije 1990. (a ujedno i prije nego se počela projektirati trajnost betona) imaju značajno manje dimenzije u odnosu na mostove koji su projektirani prema današnjim smjernicama, što ima za posljedicu, s jedne strane veće degradacije i oštećenja uslijed djelovanja vode, okoliša i sl., a s druge strane, elementi tih mostova imaju manju težinu (rasponski sklop) i vitkiji su (stupovi).

U vrijeme gradnje polumontažnih mostova, a naročito prije pojave takve gradnje, građeni su i monolitni mostovi pločastog ili rebrastog presjeka, vrlo često s monolitnim spojem na elemente donjeg ustroja.

2.1 Projektiranje i detaljiziranje mostova na potresno opterećenje prije EC8

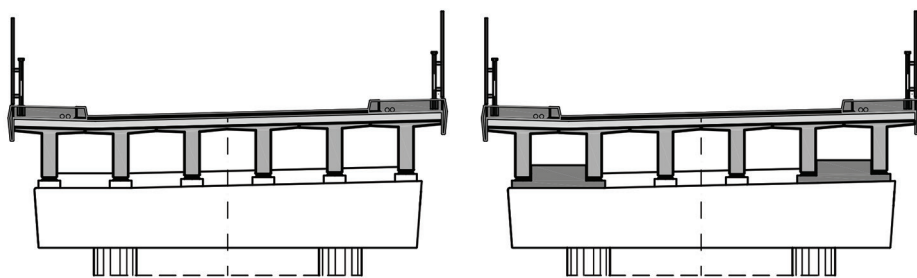
Opterećenja na koja su projektirani mostovi mijenjala su se kroz povijest, pa tako i ona potresna, pri čemu sadašnji propisi [6, 7] propisuju najveća opterećenja. Osim toga, razvoj hardvera i softvera, koje danas imamo na raspolaganju, omogućuju provedbu složenijih analiza u kraćem vremenu.

Ovisno o statičkom sustavu mosta, potresno opterećenje koje se prenosi s rasponskog sklopa na donji ustroj može biti raspodijeljeno na sve elemente donjeg ustroja, ovisno o njihovoj krutosti, što je slučaj kad se oslanjanje rasponskog sklopa na sve elemente donjeg ustroja ostvaruje na isti način. To je slučaj kod monolitne veze rasponskog sklopa na sve elemente donjeg ustroja i kod oslanjanja preko neoprenskih ležajeva podjednake krutosti.

Korištenjem kliznih ležajeva (lončasti, kalotni i slični ležajevi koji imaju klizne plohe), pojedine elemente donjeg ustroja možemo isključiti iz prijenosa potresnog opterećenja (samo za jedan ili za oba smjera), a s druge strane upotrebom fiksnih ležajeva (također lončasti, kalotni i slični) prenosimo potresno opterećenje samo na one elemente donjeg ustroja na koje to želimo. Naravno, moguće su kombinacije svih načina oslanjanja na jednom mostu.

Kod prije spomenutih polumontažnih mostova sustava niza prostih greda oslanjanje je, u pravilu, ostvareno preko neoprenskih ležajeva (tzv. "plivajuće" oslanjanje), kod kojega nije ograničeno poprečno ni uzdužno pomicanje rasponskog sklopa (ne postoje nepomični ležajevi). Vrlo često kod takvih mostova prijašnja generacije (prije EC) nije ostvareno ni dovoljno nalijeganje na elemente donjeg ustroja.

Pojavom novih propisa, ali i analizom sličnih mostova, uglavnom u SAD-u, počeli su se često u takvim dispozicijama mostova koristiti tzv. seizmički blokovi (ili seizmički graničnici) (slika 3.), koji sprečavaju "slijetanje" rasponskog sklopa sa stupova ili upornjaka, ali osim toga služe i za rasipanje seizmičke energije te dio potresne sile prenose na donji ustroj.



Slika 3. Oslanjanje prednapetih nosača naglavnicu stupa: bez seizmičkih graničnika (lijevo), sa seizmičkim graničnicima (desno)

Daljnijim istraživanjem bit će obuhvaćeni gredni mostovi na autocestama i državnim cestama. U istraživanju će biti napravljena sistematizacija postojećih mostova u odnosu na parametre koji se pokazuju ključnima za procjenu rizika od potresa. Razmotrit će se godina izgradnje/projektiranja kao pokazatelj po kojim propisima je analiziran potres, tip rasponskog sklopa (prednapeti montažni nosači s dobetoniranom pločom ili bez nje, monolitni rasponski sklop...), statički sustav (niz prostih greda sa seizmičkim graničnicima i bez njih, kontinuirani sustav, okvirni sustav, miješani sustav...) i ostali parametri koji se pokazuju značajnima.

Za ocjenu seizmičke oštećljivosti mostova koji nisu projektirani i detaljizirani prema suvremenim propisima, u današnje vrijeme najčešće se koriste krivulje vjerojatnosti oštećenja koje se objašnjavaju u sljedećem poglavlju.

3 Krivulje vjerojatnosti oštećenja

3.1 Općenito o krivuljama vjerojatnosti oštećenja

Krivulja vjerojatnosti oštećenja je prikaz funkcije vjerojatnosti oštećenja i predstavlja vjerojatnost da će nastupiti granično stanje (oštećenje) konstrukcije ili nekog njenog dijela uslijed djelovanja potresa određenog intenziteta.

Kao što je već ranije spomenuto, u Hrvatskoj, ali i u svijetu, brojni su mostovi projektirani i izgrađeni prije stupanja na snagu suvremenih propisa za potresno projektiranje. S obzirom na važnost mostova u prometnoj infrastrukturi, postavlja se pitanje ponašanja tih mostova na potresno opterećenje. Širom svijeta razvijane su metode procjene oštećljivosti postojećih mostova uslijed potresnog djelovanja [13].

Vjerojatnost oštećenja konstrukcije, odnosno mosta, uvjetna je vjerojatnost i može se prikazati kao vjerojatnost da će nastupiti granično stanje nekog elementa mosta pri djelovanju potresnog opterećenja određenog intenziteta [13]:

$$\text{Vjerojatnost oštećenja} = P[LS | IM=y] \quad (1)$$

gdje je LS granično stanje (Limit State), IM je intenzitet potresnog djelovanja (Intensity Measure).

Krivulje vjerojatnosti oštećenja počinju se razvijati 70-ih godina prošlog stoljeća [13], a od kraja 90-ih FEMA (Federal Emergency Management Agency) razvija softvere za ocjenu potresnog rizika Hazard United States (HAZUS) [14]. U posljednjih dvadesetak godina krivulje vjerojatnosti oštećenja razvile su se u učinkovit alat pri donošenju odluka vezano za sanaciju odnosno ojačavanje postojećih mostova kao i za postupanja nakon potresa [15].

Konstrukcija krivulja vjerojatnosti oštećenja moguća je na više načina [2, 13]:

- **krivulje na temelju mišljenja stručnjaka (Expert-base/judgmental fragility curves)** konstruiraju se na temelju mišljenja stručnjaka iz područja potresnog inženjstva
- **empirijske krivulje vjerojatnosti oštećenja** konstruiraju se na temelju iskustava iz prethodnih potresa, odnosno na temelju podataka o oštećenjima građevina nakon potresa
- **eksperimentalne krivulje vjerojatnosti oštećenja** nisu uobičajene jer njihovo konstruiranje iziskuje veća financijska sredstva da bi se mogli izrađivati uzorci (modeli cijelih mostova ili dijelova mosta) u velikom broju radi dovoljno podataka za konstruiranje krivulja
- **analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja** konstruiraju se pomoću provedenih analiza konstrukcija za različita potresna opterećenja.

Slijedi detaljniji opis analitičke metode.

3.2 Analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja

Analitičke krivulje vjerojatnosti razvijaju se u novije vrijeme zahvaljujući mogućnostima i razvoju softvera za proračune. Za različite intenzitete potresnog djelovanja provode se proračuni modela (statički ili dinamički), a podaci koji se dobiju iz prora-

čuna su baza za statističku analizu i dalje konstruiranje krivulja vjerojatnosti oštećenja. Funkcija vjerojatnosti oštećenja najčešće se definira lognormalnom funkcijom razdiobe prikazanom u jednadžbi (2) [1] i predstavlja vjerojatnost (P) da će zahtjev na konstrukciju (D) biti veći od kapaciteta konstrukcije (C) pri djelovanju potresa određenog intenziteta (IM):

$$P[D > C | IM] = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{S_D}{S_C} \right)}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right) \quad (2)$$

gdje se D i C odnose na zahtjeve i kapacitet pojedinih elemenata mosta (engl. demand and capacity), a S_D i S_C su medijani zahtjeva odnosno kapaciteta. $\beta_{D|IM}$ i β_C su standardna devijacija zahtjeva odnosno kapaciteta.

Krivulje vjerojatnosti oštećenja mogu se izrađivati za pojedinačne mostove ili za određene skupine mostova gdje se raznim statističkim metodama ili parametarskom analizom mogu uzeti u obzir razne varijacije. Osnovni koraci u izradi krivulja vjerojatnosti oštećenja su [16]:

1. Određivanje graničnih stanja (kapaciteta, C) pojedinih elemenata mosta koje uključuje određivanje svih parametara vezano za geometriju, karakteristike materijala, proračune graničnih stanja. Po potrebi se rade usklađivanja modela sa stvarnim stanjem na temelju ispitivanja postojećih mostova (naročito ako ne postoje projekti ili pouzdani podaci o građevini). Granična stanja pojedinih elemenata mosta potrebno je definirati na način koji se kasnije može povezati sa zahtjevima (npr. pomak vrha stupa koji se može ostvariti prije otkazivanja nosivosti stupa). Određivanje graničnih stanja nekih postojećih mostova prikazano je u radovima [17, 18].
2. Određivanje zahtjeva (demand, D) za pojedine elemente mosta predstavlja provođenje analize na modelu mosta za potresno opterećenje određenog intenziteta (IM), rezultat koje je npr. pomak stupa.
3. Prema podacima iz prethodna dva koraka konstruiraju se krivulje vjerojatnosti oštećenja.

Koraci 2 do 3 detaljnije su opisani u sljedećim poglavljima.

3.3 Statička i dinamička analiza mostova

Pojednostavljeno, analiza koja se provodi za određeni most može biti statička ili dinamička, linearna ili nelinearna (materijalno i geometrijski).

Koja će analiza biti provedena ovisi o razini projektiranja, vrsti mosta, veličini mosta, intenzitetu potresnog opterećenja itd.

Za izradu krivulja vjerojatnosti oštećenja mogu se primijeniti sljedeće analize [1]:

- statička analiza metodom postupnog guranja
- dinamička analiza metodom spektralnog odziva
- nelinearna dinamička analiza (engl. non linear time history analysis NLTHA)
- inkrementalna dinamička analiza (IDA)

U novije vrijeme, za potrebe izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja, najčešće se koristi inkrementalna dinamička analiza [1].

3.3.1 Inkrementalna dinamička analiza

Inkrementalna dinamička analiza je nelinearna dinamička analiza koja se provodi za različite veličine potresnog opterećenja. Detaljni prikaz ove metode dali su Vamvatsikos i Cornell [19]. Potresna opterećenja se u analizi zadaju u obliku vremenskog zapisa i skaliraju se odnosno inkrementalno uvećavaju ili smanjuju, te se za svaki korak skaliranja provodi analiza. Ovakav način analize omogućava nam uvid u ponašanje konstrukcije za različite jačine potresa. Kroz smanjenje i uvećanje početnog zapisa prolazi konstrukcija kroz sve faze, od elastičnog ponašanja, preko tečenja pa do konačnog sloma ili gubitka stabilnosti.

U nastaku su navedeni osnovni pojmovi vezani za ovu analizu [19, 11].

Faktor skaliranja (engl. Scale Factor, SF), predstavlja pozitivni cijeli broj (veći od 1 za uvećanje ili manji od 1 za umanjeње) kojim se skalira osnovni potresni zapis.

Mjera intenziteta potresa (engl. A Monolithic Scalable Ground Motion Intensity measure, Intensity Measure, IM) parametar je koji predstavlja relativnu jačinu potresnog djelovanja. S obzirom na to da to mora biti parametar koji se može smanjivati/uvećavati (skalirati), najčešće se koriste: vršno ubrzanje temeljnog tla (PGA), vršna brzina temeljnog tla (PGV), spektralno ubrzanje za prvi vlastiti period s 5 % prigušenja $S_a(T_1, 5 \%)$. Moguća je primjena snimljenih potresnih zapisa, ali i numerički simuliranih potresnih zapisa [20].

Mjera odziva konstrukcije je mjera ponašanja konstrukcije pod potresnim opterećenjem i , vezano na prethodno poglavlje, predstavlja zahtjeve na konstrukciju. Kod zgrada je to najčešće iskazano kao međukatni pomak konstrukcije, a kod mostova to može biti više parametara, ovisno o specifičnostima pojedinog mosta (rotacija temelja, pomak vrha stupa, pomak ili rotacija upornjaka, itd). Ukupni odziv mosta kao

sustava, sastoji se od odziva pojedinih elemenata mosta, pri čemu treba imati na umu da nisu svi elementi mosta podjednako važni za njegovu stabilnost. Primjerice slom stupa uzrokovat će rušenje mosta, ali slom prijelazne naprave neće sam po sebi biti uzrok rušenja mosta. Podjela elemenata mosta na primarne i sekundarne, u odnosu na utjecaj na stabilnost cijelog mosta prikazan je u [1], za potrebe izrada krivulja oštećenja mostova u Kaliforniji.

Poželjno je definirati više razina oštećenja, pa su tako u [1] definirane četiri razine oštećenja za primarne elemente mosta (najmanje oštećenje je estetske prirode a najveće predstavlja oštećenje koje implicira zamjenu elementa), a za sekundarne elemente definirana su dva stupnja oštećenja. Krivulje vjerojatnosti oštećenja izrađuju se za svaku razinu oštećenja.

Jedan zapis IDA analize predstavlja rezultate parametarske dinamičke analize određenog modela, gdje je parametar faktor skaliranja. Dakle, za jedan zapis ubrzanja tla (akcelegogram) provodi se više nelinearnih dinamičkih analiza (NLTHA) za svaki korak skaliranja. Za svaki korak (IM) bilježi se mjera odziva (damage measure, DM). **IDA krivulja** je krivulja konstruirana za sve korake skaliranja za pripadni zapis (IM) i pripadne mjere odziva (DM).

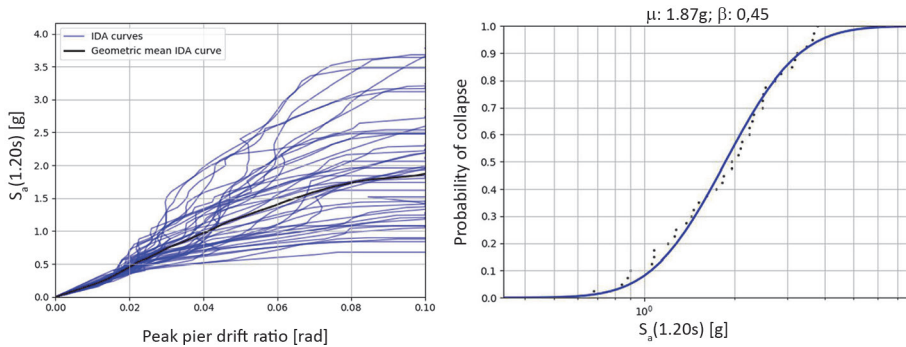
Set IDA krivulja je skup svih IDA krivulja na osnovu provedenih analiza za sve potrebne zapise na jednom modelu (slika 4).

IDA krivulje podloga su za konstruiranje krivulja vjerojatnosti oštećenja. Krivulje vjerojatnosti oštećenja izrađuju se za pojedinačne elemente mosta i za cijeli most. Vjerojatnost oštećenja mosta (engl. bridge system fragility), uvjetovana je vjerojatnošću otkazivanja pojedinih elemenata mosta [16] (otkazivanje stupa kod integralnih mostova, ležajeva kod slobodno oslonjenih mostova, itd.). Konzervativna pretpostavka je serijska povezanost elemenata mosta, a vjerojatnost oštećenja mosta kao cjeline može se prikazati sa dvije granične vrijednosti kao u jednadžbi (3) [16]:

$$\max_{i=1}^n [P(F_i)] \leq P(F_{system}) \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(F_i)] \quad (3)$$

U izrazu (3) F_i predstavlja otkazivanje elementa mosta, a F_{system} otkazivanje mosta kao cjeline.

Lijeva strana jednadžbe predstavlja vjerojatnost otkazivanja sustava koji se sastoji od serijski povezanih elemenata, a desna strana predstavlja otkazivanje sustava koji se sastoji od paralelno povezanih elemenata. Što se tiče mostova, stvarno stanje bi moglo biti negdje između, i ovisno je o više čimbenika (statički sustav, analizirani elementi, robustnost sustava...). Jer, kao što je već napomenuto, rušenje stupa znači i rušenje mosta, ali lom prijelazne naprave, sam po sebi, ne znači i rušenje mosta.



Slika 4. IDA krivulje (lijevo) i pripadne krivulje vjerojatnosti oštećenja (desno) za stup armiranobetonskog mosta [20], gdje Peak Pier Drift Ratio predstavlja relativni pomak vrha stupa u odnosu na dno stupa

4 Zaključak

U radu je prikazana metodologija izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja i dan je kratak osvrt na mostove u Hrvatskoj, uz napomenu da su brojni postojeći mostovi koji su dio važnih prometnih pravaca projektirani i izgrađeni prije stupanja na snagu suvremenih seizmičkih propisa za projektiranje i detaljiziranje. Hrvatska je smještena u seizmički aktivnom području, što je, nažalost, pokazao i nedavni potres u Zagrebu. U radu [21] istaknuto je kako je potres neprihvatljiv rizik za Hrvatsku, te je također naznačen nedostatak istraživanja u području mostova u Hrvatskoj.

U daljnjem istraživanju potrebno je, najprije, sistematizirati bazu podataka postojećih mostova u Hrvatskoj u odnosu na parametre procjene rizika od potresa.

Nakon toga pristupa se provedbi koraka opisanih u ovom radu, a krajnji rezultat biti će krivulje vjerojatnosti oštećenja za određeni tip mosta. Takve bi se krivulje dalje, mogle iskoristiti za cjelokupnu analizu stanja mostova u RH te donošenje odluka o ojačanju mostova za koje analiza pokaže da su osjetljivi na potrese niskog intenziteta (koji bi se definirali uzimajući u obzir vjerojatnosti njihova pojavljivanja tijekom trajanja mosta), ili pak mostova velike važnosti (od kojih moramo zahtijevati više razine pouzdanosti na potresno djelovanje).

Zanimljivo je istaknuti mostove koji su projektirani i građeni od 1970-ih pa do primjene suvremenih propisa (do 2010.), koji su sada predmet sanacija, i gdje bi krivulje vjerojatnosti oštećenja mogle poslužiti kao alat prilikom donošenja odluke da li bi ih trebalo dodatno ojačati s obzirom na potresnu otpornost.

Literatura

- [1] Desroches, R., Padgett, J.E., Ramanathan, K., Dukes, J.: Feasibility Studies for Improving Caltrans' Bridge Fragility Relationships Final Report, State Calif Dep Transp. 2012; 0003(2): 540.
- [2] Avşar, Ö.: Fragility based seismic vulnerability assessment of ordinary highway bridges in Turkey, 2009.
- [3] Simon, J., Vigh, L.G.: Seismic fragility assessment of integral precast multi-span bridges in areas of moderate seismicity, *Bull Earthq Eng.*, 14 (2016) 11, pp. 3125–50.
- [4] Borzi, B., Ceresa, P., Franchin, P., Noto, F., Calvi, G.M., Pinto, P.E.: Seismic vulnerability of the Italian roadway bridge stock, *Earthq Spectra.*, 31 (2015) 4, pp. 2137–61.
- [5] Sextos, A., Kilanitis, I., Kappos, A., Pitsiava, M., Sergiadis, G., Margaritis, V., et al.: Seismic resilience assessment of the Western Macedonia highway network in Greece, *COMPADYN 2017 - Proc 6th Int Conf Comput Methods Struct Dyn Earthq Eng.*, 1 (2017), pp. 1828–42.
- [6] HRN EN 1998-1:2011 + HRN EN 1998-1:2011/NA, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, HZN, Zagreb, Hrvatska.
- [7] HRN EN 1998-2:2011 + HRN EN 1998-2:2011/NA, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 2. dio: Mostovi, HZN, Zagreb, Hrvatska.
- [8] Furundžić, B.: Privremeni tehnički propisi za građenje u seizmičkim područjima PTP-12 (1964), Zbirka tehničkih propisa u građevinarstvu. Beograd: Izdavačko preduzeće Građevinska knjiga, 1969.
- [9] Pravilnik o tehničkim normativima za projektiranje i proračun inženjerskih objekata u seizmički aktivnim područjima. Službeni list SFRJ br.07- 93/96, 1987.
- [10] EN 1998-3: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, Bruxelles: CEN- European Committee for Standardization; 2005.
- [11] Hadzima – Nyarko, M., Nikić, D., Morić D.: Potresno inženjerstvo – procjena oštećljivosti zgrada, Osijek: Grafika d.o.o Osijek; 2018.
- [12] Hrvatske autoceste, monografija, Zagreb: Hrvatske autoceste, HAC; 2007.
- [13] Muntasir Billah, A.H.M., Shahria Alam, M.: Seismic fragility assessment of highway bridges: a state-of-the-art review, [Internet] *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 11(2015), pp. 804–32. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2014.912243>
- [14] Technical and User's Manual of Advanced Engineering Building Module (AEBM) "Hazus MH 2.1," Fed Emerg Manag Agency, 2015 , pp. 121.

- [15] Mackie, K.R., Stojadinović, B.: Fragility Basis for California Highway Overpass Bridge Seismic Decision Making, 2005.
- [16] Stefanidou, S.P., Kappos, A.J.: Methodology for the development of bridge-specific fragility curves, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 46 (2017) 1, pp. 73–93.
- [17] Mandić, A., Radić, J., Šavor, Z.: Ocjenjivanje graničnih stanja postojećih mostova, *Gradjevinar*, 61 (2009) 6, pp. 533–45.
- [18] Franetović, M., Ivanković, A.M., Radić, J.: Seizmičko ocjenjivanje postojećih armiranobetonskih lučnih mostova, *Gradjevinar*, 66 (2014) 8, pp. 691–703.
- [19] Vamvatsikos, D., Allin Cornell, C.: Incremental dynamic analysis, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 31 (2002) 3, pp.491–514.
- [20] Oreb, J.: Primjena generiranih potresnih zapisa u procjeni seizmičkog rizika mostova, *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet*; 2018.
- [21] Atalić, J., Šavor Novak, M., Uroš, M.: Rizik od potresa za Hrvatsku: pregled istraživanja i postojećih procjena sa smjernicama za budućnost, *Gradjevinar*, 71 (2019), pp. 923–47.