

Primljen / Received: 15.6.2017.

Ispravljen / Corrected: 16.11.2017.

Prihvaćen / Accepted: 15.12.2017.

Dostupno online / Available online: 10.7.2018.

Primjena numeričkog modela cijelog mosta u analitičkom postupku izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja

Autori:



Mr.sc. **Nadjib Hemaïdi Zourgui**, dipl.ing.građ.
Visoka Nacionalna škola za graditeljstvo (ENSTP), Alžir
Nacionalni istraživački centar za potrese
nhemaïdizourgui@cgs-dz.org



Izv.prof.dr.sc. **Abderrahmane Kibboua**, dipl.ing.građ.
Visoka Nacionalna škola za graditeljstvo (ENSTP), Alžir
Nacionalni istraživački centar za potrese
akibboua@cgs-dz.org



Prof.dr.sc. **Mohamed Taki**, dipl.ing.građ.
Visoka Nacionalna škola za graditeljstvo (ENSTP), Alžir
atik_med@yahoo.fr

Pregledni rad

Nadjib Hemaïdi Zourgui, Abderrahmane Kibboua, Mohamed Taki

Primjena numeričkog modela cijelog mosta u analitičkom postupku izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja

U radu se analizira utjecaj različitih numeričkih modela mosta na definiranje krivulja vjerojatnosti oštećenja njihovih stupova analitičkim postupkom. Uspoređuju se dva različita modela, model s jednim stupnjem slobode te predloženi model cijelog mosta. Za potrebe određivanja krivulja vjerojatnosti oštećenja promatranog stupa, određeni su njegovi indeksi oštećenja pomoću dinamičke i statičke nelinearne analize (metoda postupnog guranja i time-history analiza). Utvrđeno je da način modeliranja utječe na krivulje nosivosti, duktilnosti i vjerojatnosti oštećenja.

Ključne riječi:

krivulje vjerojatnosti oštećenja, metoda postupnog guranja, seizmička oštetljivost, model stupa mosta

Subject review

Nadjib Hemaïdi Zourgui, Abderrahmane Kibboua, Mohamed Taki

Using full bridge model to develop analytical fragility curves for typical concrete bridge piers

This study shows the effect of various numerical models on the development of analytical fragility curves for bridge piers. Two distinct models are compared: model with a single degree of freedom, and the proposed full bridge model. Bridge pier damage indexes are obtained by performing both dynamic and static nonlinear analyses (pushover and time history analysis), in order to develop fragility curves for this bridge pier. It was observed that capacity curves, ductility curves, and fragility curves, are sensitive to structural modelling.

Key words:

fragility curves, pushover analysis, seismic vulnerability, bridge pier model

Übersichtsarbeit

Nadjib Hemaïdi Zourgui, Abderrahmane Kibboua, Mohamed Taki

Anwendung eines Vollbrückenmodells im analytischen Verfahren zur Erstellung der Wahrscheinlichkeitskurve der Beschädigungen

In der Abhandlung wird der Einfluss verschiedener numerischer Brückenmodelle auf die Festlegung der Wahrscheinlichkeitskurve der Beschädigungen ihrer Pfeiler durch ein analytisches Verfahren analysiert. Verglichen werden zwei unterschiedliche Modelle, das Modell mit einem Freiheitsgrad sowie das vorgeschlagene Vollbrückenmodell. Zum Zweck der Festlegung der Wahrscheinlichkeitskurve der Beschädigung des betrachteten Pfeilers wurde sein Beschädigungsindex mithilfe der dynamischen und statischen nicht linearen Analyse (Methode der inelastischen statischen Untersuchung und Time-history-Analyse) festgelegt. Festgestellt wurde, dass die Art der Modellierung die Tragfähigkeits-, Duktilitäts- und Wahrscheinlichkeitskurven der Beschädigung beeinflusst.

Schlüsselwörter:

Wahrscheinlichkeitskurve der Beschädigung, Methode der inelastischen statischen Untersuchung, seismische Beschädigbarkeit

1. Uvod

Sjeverni Alžir smatra se jednom od seizmički najaktivnijih regija zapadnog Sredozemlja. U posljednja četiri desetljeća u ovom su području zabilježena četiri potresa, od kojih naročito vrijedi spomenuti potres u El Asnamu (1980.) te potres koji je pogodio grad Boumerdes (2003.). U oba slučaja zabilježeno je mnogo ljudskih žrtava (3000 u prvom te 2300 u drugom potresu). Osim ljudskih, ti su potresi alžirskoj ekonomiji nanijeli i znatne financijske gubitke od otprilike 8 milijardi američkih dolara [1-3].

Nadležna upravna tijela svjesna su da je potrebno povećati razinu osviještenosti o važnosti seizmičkog ocjenjivanja građevina. Iz tog razloga odgovarajuće državne institucije, centri i istraživači ulažu goleme napore kako bi što detaljnije istražili stupanj seizmičke osjetljivosti postojećih građevina.

Opsežna su istraživanja provedena o ocjenjivanju seizmičke osjetljivosti konstrukcija [4-6], a samo je nekoliko za mostove [7, 2] iako su oni, kao ključni segment prometne infrastrukture izuzetno značajni za svakodnevne aktivnosti stanovništva i, u širem smislu, za gospodarski napredak države.

U Alžiru ukupno ima oko 12.000 mostova, a više od devedeset posto njih su tipski mostovi. Velika se pažnja posvećuje održavanju njihove funkcionalnosti te se u tom smislu preporučuje izrada istraživačkih studija u svrhu povećanja otpornosti tih mostova na seizmička djelovanja, kako bi se spriječilo njihovo daljnje propadanje i rušenje. Jedna od tema koje se tada razmatraju jest i izrada krivulja vjerojatnosti oštećenja u sklopu ocjenjivanja seizmičke osjetljivosti postojećih armiranobetonskih mostova, vrlo čestih u Alžiru.

Zbog važnosti ove teme u proteklim je desetljećima objavljen velik broj radova koji se bave pitanjem izrade krivulja vjerojatnosti oštećenja u okviru procjene seizmičkog rizika, počevši još 1975. godine kada su Whitman i dr. [9] definirali postupak za procjenu seizmičkog rizika [8].

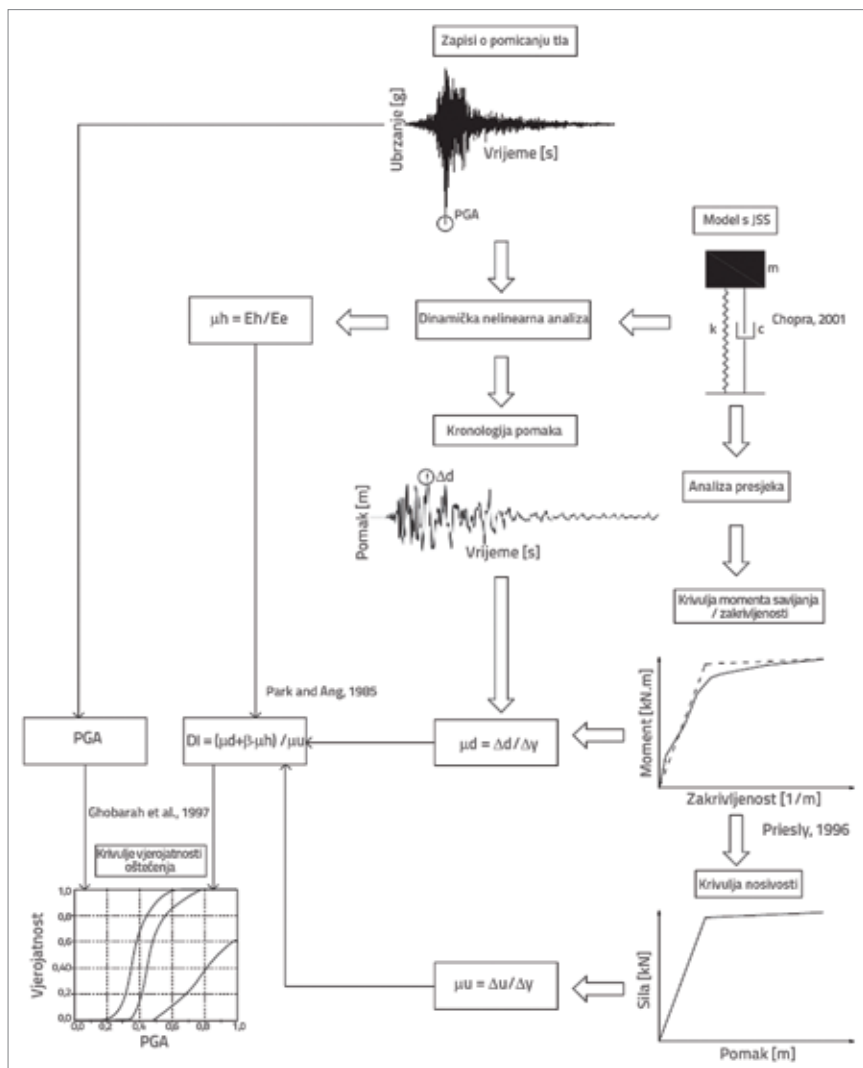
Krivulje vjerojatnosti oštećenja, na temelju pomaka tla, iskazuju stupanj vjerojatnosti da će doći do oštećenja konstrukcije uslijed seizmičkog djelovanja, te predstavljaju korisnu metodu za ocjenjivanje seizmičke osjetljivosti konstrukcija. Spomenute se krivulje mogu izraditi na temelju izvještaja o štetama zabilježenima tijekom prethodnih

potresa [10, 11] ili primjenom analitičkih metoda [7, 12-16], a neki su istraživači izrađivali krivulje i u okviru eksperimentalnih postupaka. Vosooghi i dr. [17] koristili su podatke dobivene na trideset i dva modela stupova mostova kao osnovu za izradu krivulja vjerojatnosti oštećenja. Perrault i dr. [18] koristili su eksperimentalne podatke u svrhu ocjenjivanja vjerojatnosti oštećenja poslovnog tornja BRD u Bukureštu. Choi i dr. [19] koristili su eksperimentalne rezultate dobivene na armiranobetonskim stupovima kao podlogu za izradu nelinearnih modela. Nelinearna *time-history* analiza provedena je primjenom podataka o pomacima tla, definirajući podlogu za izradu krivulja vjerojatnosti oštećenja stupova.

Nekoliko analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja izrađeno je u Japanu, SAD-u i u drugim razvijenim državama [20-23].

Bhuiyan i Alam [24], Alam i dr. [15] i Abbasi i dr. [25] izradili su krivulje vjerojatnosti oštećenja na bazi analitičkih postupaka simulacijom potresa.

U više od pedeset posto radova koji su objavljeni u proteklih petnaest godina utvrđeno je da se vjerojatnost oštećenja



Slika 1. Shematski prikaz postupka A

mostova u cjelini temelji na vjerojatnosti oštećenja njihovih stupova [26].

Karim i Yamazaki [9] koristili su pojednostavljeni model konstrukcije za izradu analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja stupova mostova. U Alžiru su Kibboua i dr. [7] izradili analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja za tipične armiranobetonske stupove mostova primjenjujući pojednostavljeni postupak.

Međutim, kao preduvjet za predviđanje realnog ponašanja mostova u cjelini, potrebno je razmotriti i njihove pojedinačne komponente. Nielson i DesRoches [27] razvili su analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja na temelju analize pojedinačnih kritičnih dijelova mostova. Ghotbi [28] je analizirao most kao cjelinu, a Choi i dr. [29] analizirali su ležajeve u okviru ocjenjivanja vjerojatnosti oštećenja cijelog mosta.

Osnovni je cilj ovog istraživanja izraditi analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja za tipični armiranobetonski most u Alžiru primjenom dva računalna modela (pojednostavljeni model i model čitavog mosta) te usporediti dobivene rezultate.

Most analiziran u ovom radu nalazi se na autocesti Bousmail-Cherchell u sjevernom dijelu Alžira. Nelinearna time-history analiza provedena je korištenjem podataka o petnaest potresa zabilježenih u Alžiru i drugim zemljama, nakon čega su provedene analize postupnog guranja kako bi se definirale krivulje vjerojatnosti oštećenja. Zaključeno je da krivulje vjerojatnosti oštećenja ovise o odabranom računalnom modelu mosta.

2. Metodologija

Krivulje vjerojatnosti oštećenja prikazane u ovom radu definirane su pomoću dva analitička postupka, postupkom A i postupkom B.

2.1. Postupak A

Za statičke i dinamičke nelinearne proračune korišten je model s jednim stupnjem slobode (eng. *single degree of freedom* - SDOF). U proračunima je korišteno ukupno petnaest vremenskih zapisa potresa u Alžiru i u drugim državama. U modelu je definiran stup visine h , čija je krutost izražena s vrijednošću k , na čijem se vrhu nalazi koncentrirana masa m . Postupak izrade analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja [7, 9] čine sljedeći koraci, slika 1:

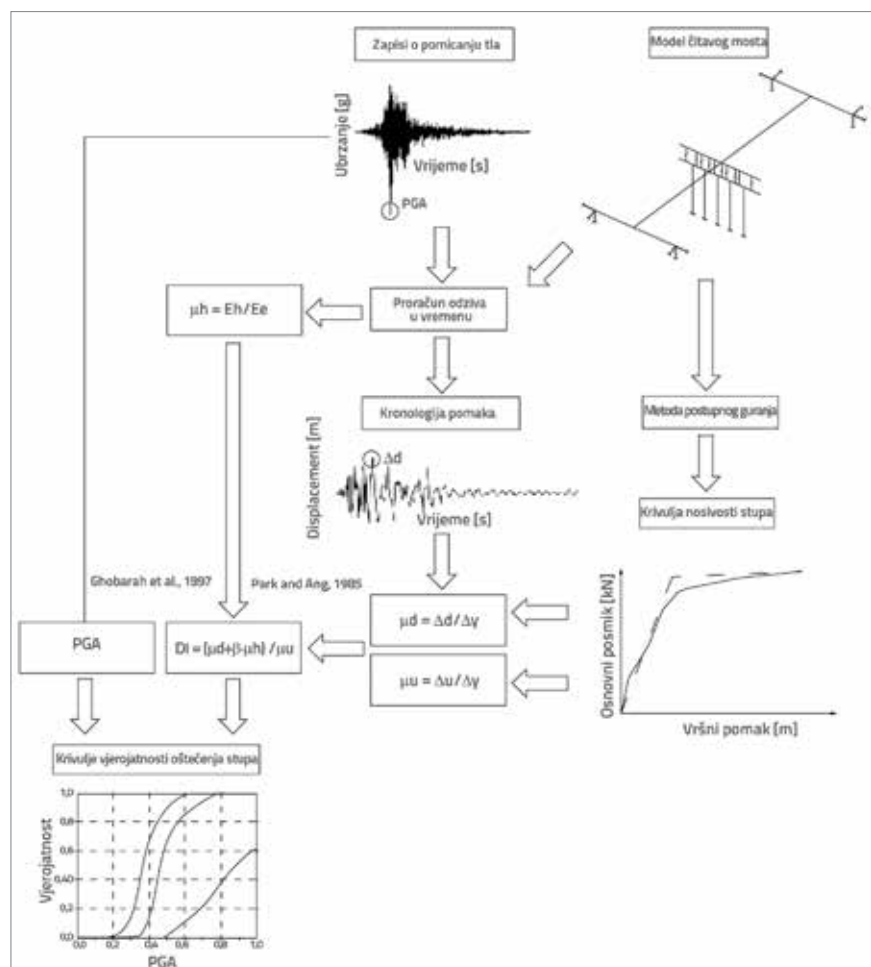
1. odabir seizmičkog zapisa o pomaku tla
2. usklađivanje zapisa o pomaku tla za razne vrijednosti vršnog ubrzanja tla (eng. *Peak Ground Acceleration* - PGA)

3. izrada analitičkog modela stupa mosta s jednim stupnjem slobode [30, 31]
4. analiza poprečnog presjeka stupa kako bi se definirala duktilnost pomaka pomoću programa Xtract [32]
5. provedba nelinearne dinamičke analize modela s jednim stupnjem slobode korištenjem odabranih zapisa radi određivanja potrebne duktilnosti te duktilnosti kumulativne energije [33]
6. definiranje indeksa oštećenja stupa [34] za svaku razinu pobude
7. izrada krivulja vjerojatnosti oštećenja.

2.2. Postupak B

U ovom je postupku najteži korak izrada modela čitavog mosta zbog nelinearnog ponašanja njegovih komponenata (upornjaka, ležaja itd.), kao što se može vidjeti na slici 2. Kao i u postupku A, izrada krivulja vjerojatnosti oštećenja uključuje određen broj koraka:

1. odabir seizmičkog zapisa o pomaku tla
2. usklađivanje zapisa o pomaku tla za razne vrijednosti vršnog ubrzanja tla (PGA)



Slika 2. Shematski prikaz postupka B

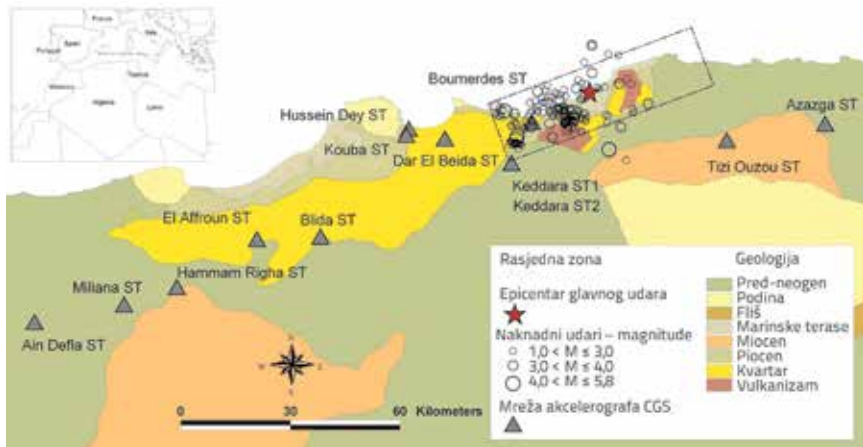
3. izradu numeričkog modela čitavog mosta
4. provedbu analize postupnog guranja
5. provedbu nelinearne dinamičke analize modela čitavog mosta korištenjem odabranih zapisa radi određivanja potrebne duktilnosti
6. primjenu analitičkog modela stupa za izračunavanje duktilnosti kumulativne energije.
7. definiranje indeksa oštećenja stupa za svaku razinu pobude
8. izradu krivulja vjerojatnosti oštećenja.

3. Odabir pomaka tla

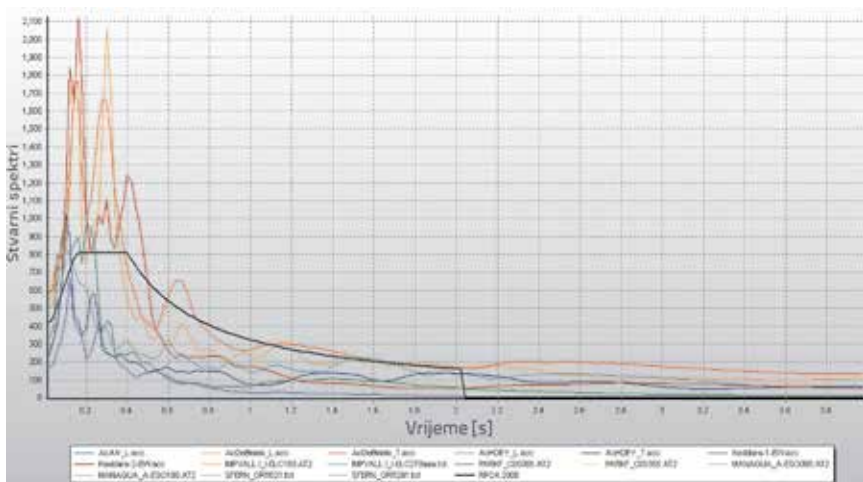
U izradi nelinearnog dinamičkog proračuna korišten je niz od petnaest seizmičkih zapisa pomaka tla s različitim rasponom vršnih ubrzanja tla, koji bi trebali odgovarati seizmičkim karakteristikama lokacije mosta [35]. Korištene su dvije vrste zapisa, za simulaciju lokalnog i međunarodnog seizmičkog djelovanja. Za lokalne zapise korišten je potres Boumerdes (zabilježen na sjeveru Alžira 21. svibnja 2003. godine), lokacija vidljiva na slici 3., čije je podatke o ubrzanju zabilježio i pratio naš istraživački centar (CGS) za vrijeme i nakon glavnog udara. Za međunarodne zapise korištena je baza podataka PEER u kojoj se koristi spektar odziva koji je u skladu s alžirskim propisom o seizmičkom projektiranju RPOA 2008 [36] (slika 4.). Odabrani pomaci tla prikazani su u tablici 1.

4. Opis mosta

Odabrani most je tipični naknadno prednapeti betonski most projektiran prema propisima RPOA-2008 [36], i prikazan na slici 5. Statički sustav mosta sastoji se od dvije slobodno oslonjene grede raspona 25,7 m s ukupnom duljinom od 51,5 m (dilatacija između nosača iznosi 0,10 m). Nosiva konstrukcija mosta sastoji se od deset prednapetih "I" nosača povezanih monolitnom armiranobetonskom pločom ukupne širine 16,50 m. Nosači su oslonjeni na elastomerne ležajeve debljine 0,05 m, tlocrtnih dimenzija 0,20 m x 0,40 m, kao što je to prikazano na slikama 6. i 7.



Slika 3. Mreža akcelerografskih stanica Istraživačkog centra CGS u središnjem dijelu sjevernog Alžira [37]



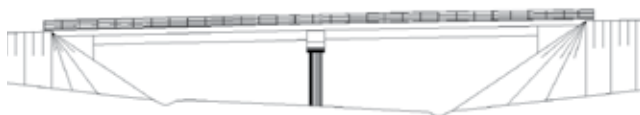
Slika 4. Spektri odziva ubrzanja s 5-postotnim koeficijentom prigušenja za odabrane zabilježene pomake tla i spektar odziva prema propisima RPOA 2008

Tablica 1. Zapisi pomaka tla

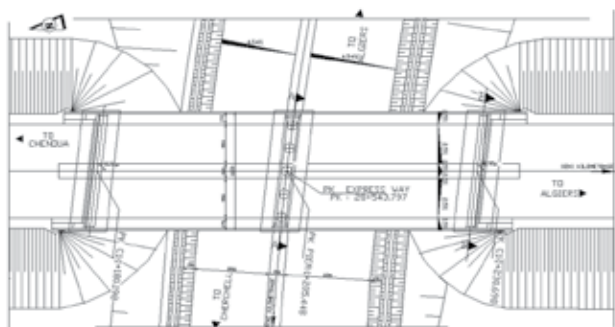
Magnituda	PGA [g]	Naziv potresa	Zapiska stanica i uprava	Godina
6,8	0,548	Boumerdes	Dar El Beida_L	2003.
6,8	0,511	Boumerdes	Dar El Beida_T	2003.
6,8	0,275	Boumerdes	H-Dey_L	2003.
6,8	0,237	Boumerdes	H-Dey_T	2003.
6,8	0,339	Boumerdes	Keddara_EW1	2003.
6,8	0,588	Boumerdes	Keddara_EW2	2003.
6,8	0,167	Boumerdes	El Affroun_EW	2003.
6,24	0,372	Managua_ Nicaragua-01	Managua_ ESSO,90	1972.
6,24	0,329	Managua_ Nicaragua-01	Managua_ ESSO,180	1972.
6,61	0,320	San Fernando	Castaic - ORR021	1971.
6,61	0,275	San Fernando	Castaic - ORR091	1971.
6,19	0,368	Parkfield	Cholame - #5,C05355	1966.
6,19	0,444	Parkfield	Cholame - #5,C05085	1966.
6,95	0,254	Imperial Valley	El Centro Array #9, 180	1940.
6,95	0,150	Imperial Valley	El Centro Array #9, 270	1940.



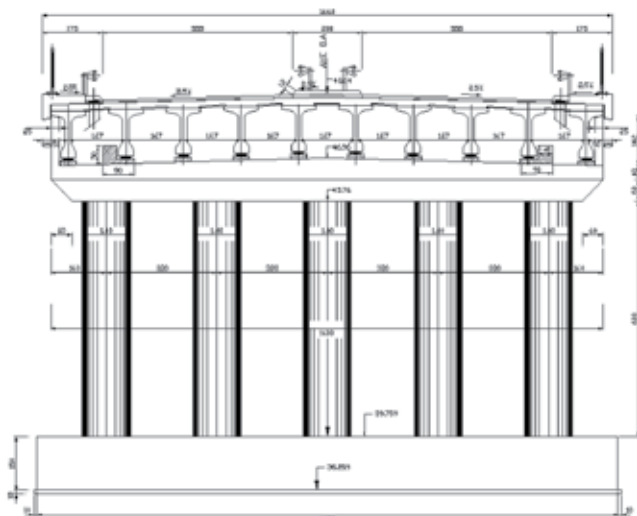
Slika 5. Pogled na analizirani most



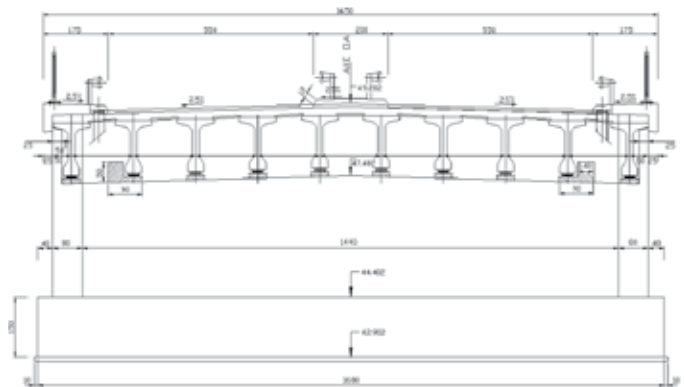
Slika 6. Uzdužni prikaz mosta



Slika 7. Tlocrt mosta



Slika 8. Poprečni presjek mosta (presjek A-A)

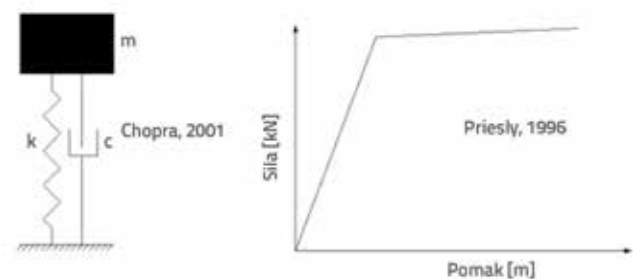


Slika 9. Poprečni presjek mosta (presjek B-B)

Stupište na sredini mosta se sastoji od pet okruglih stupova (promjera $\varnothing = 1.4$ m i ukupne visine $H = 6$ m), na kojima se nalazi naglavna greda dimenzija $2,00 \times 1,00$ m, ukupne duljine od $16,00$ m, kao što je prikazano na slici 8. Krajevi mosta oslonjeni su na dva kruta upornjaka, čiji krilni zidovi podupiru nasipe, kao što je prikazano na slici 9. Stupište mosta, kao i upornjaci, temeljeni su na krutim trakastim temeljima, prikazanim na slikama 8. i 9.

5. Izrada numeričkog modela

Osnovni cilj izrade modela i primjene analitičkih metoda sastoji se u kvantificiranju seizmičkog odziva mostova u vidu određivanja pomaka konstrukcije te sila i deformacija na elementima [30]. U ovom su radu ispitana dva modela stupa mosta: pojednostavljeni model stupa mosta koji uključuje primjenu bilinearnog modela predloženog od strane Priestleya i drugih [30] (slika 10.), te model čitavog mosta koji je prikazan na slici 12. Računalni program [38] baziran na *fiber-based* modelu za seizmičku analizu raznih konstrukcija [38], korišten je za provedbu metode postupnog guranja i dinamičke nelinearne analize mosta, te za predviđanje ponašanja mosta u slučaju potresa.

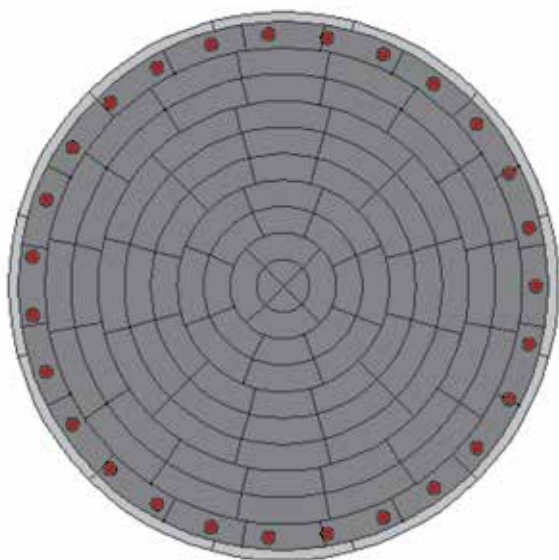


Slika 10. Sustav s jednim stupnjem slobode

Izrađen je 3D model mosta, uzimajući u obzir nelinearno ponašanje materijala te geometrijsku nelinearnost.

Modelirani su svi elementi mosta, tj. stupovi, upornjaci, elastomerni ležajevi potresni blokovi i dilatacijski razmaci (10 cm uzdužnog razmaka između ploče i upornjaka te 6 cm razmaka između potresnih blokova i nosača). Nelinearnost modela mosta postignuta je štapnim elementima, te bezdimenzijskim elementima, kako bi se simuliralo stvarno ponašanje mosta (slika 12.). Temeljne stope modelirane su kao kruti spojevi, što je u skladu s pravilima SDC [39].

Rasponski sklop mosta modeliran je primjenom elastičnog linearnog štapnog elementa s jednoliko raspoređenom masom duž osi mosta, te je izračunan kao spregnuti presjek nosača i AB ploče. Spoj između ploče i nosača definiran je pomoću krutih veza, a djelovanje elastomernih ležajeva modelirano je pomoću opruga određene krutosti. Stupovi kružnog poprečnog presjeka modelirani su na bazi diskretnih vlakana, a svojstva ovijenog i neovijenog betona uzeta su u obzir pomoću vlakana jezgre te zaštitnog sloja betona. U stup je ugrađeno 27 uzdužnih armaturnih šipki promjera 32 mm, a kao poprečna armatura definiran je spirala promjera 6 mm (slika 11.).



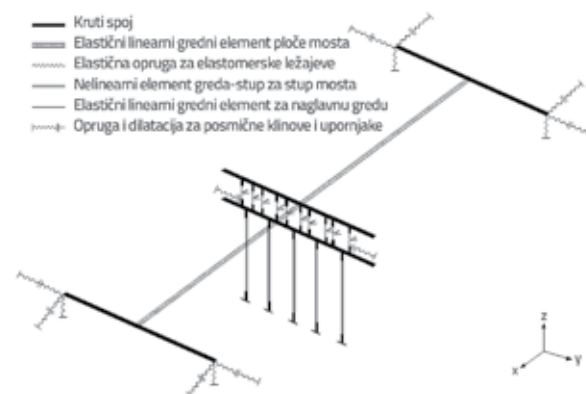
Slika 11. Diskretizirani presjek stupa

Za definiranje betona te zaštitnog sloja stupova korišten je nelinearni model betona koji su predložili Mander i dr. [40]. Armatura je definirana primjenom bilinearnog modela čelika čiji su autori Menegotto i Pinto [41].

Nelinearno ponašanje stupova mosta simulirano je primjenom neelastičnih okvirnih elemenata infrmFB, definiranih s 5 integracijskih presjeka te 150 presjeka na razini vlakana. Naglavna je greda modelirana kao armiranobetonski elastičnolinearni štapni element, povezan sa stupovima pomoću krutih veza. Elastomerni ležajevi su u uzdužnom i poprečnom smjeru modelirani primjenom efektivne krutosti od $K_{ležaj} = 2160$ kN/m i rotacijske krutosti od $K_q = 5000$ kN/rad.

Tablica 2. Materijalna svojstva definirana pomoću Seismostructa

Parametri materijala	Vrijednosti
Beton	
Tlačna čvrstoća	27 MPa
Vlačna čvrstoća	2,1 MPa
Modul elastičnosti	33000 MPa
Deformacija pri vršnom naprezanju	0.002
Specifična težina	25 kN/m ³
Armatura	
Modul elastičnosti	200000 MPa
Granica popuštanja	400 MPa
Parametar očvršćivanja	0.005
Specifična težina	78 kN/m ³



Slika 12. Predloženi model čitavog mosta

Upornjaci su modelirani pomoću opruga u uzdužnoj osi mosta [42], kao sustav opruga povezanih s rasponskim sklopom mosta. Pretpostavljeno je da potresni blokovi pridonose krutosti u poprečnom smjeru, nakon što pomak u poprečnom smjeru dosegne vrijednost dilatacijskog razmaka od 6 cm. Potresni blokovi su projektirani tako da zadrže svoju elastičnost u slučaju seizmičkih pobuda ($K_{skey} = 5000000$ kN/m na stupu a $K_{skey}/2$ na upornjacima) [43].

Krutost upornjaka u modelu [42] definirana je P- Δ krivuljom prikazanom na slici 13., koja je određena prema preporukama SDC-a (2006) [39]. Krivulja krutosti definirana je kao elastičnoplastična, s krutosti upornjaka (K_{abut}) izvedenoj prema jednadžbi (2) te graničnoj čvrstoći (P_{bw}) prema jednadžbi (3).

$$K_{abut} = K_i \cdot w \cdot (h_{bw}/1,7) \quad (2)$$

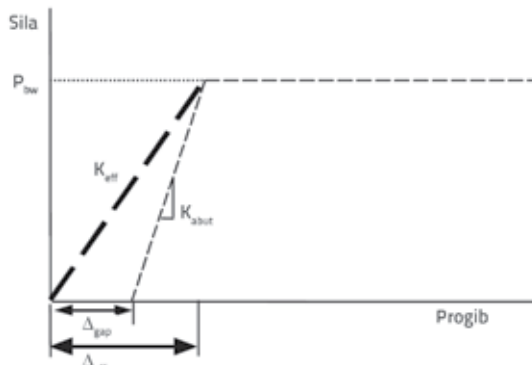
$$P_{bw} = A_e \cdot 239 \cdot (h_{bw}/1,7) \quad (3)$$

gdje je:

K_{abut} - inicijalna krutost upornjaka korigirana prema visini zidića upornjaka

K_i - inicijalna krutost upornjaka dobivena rezultatima ispitivanja (11,5 kN/mm/m), (prema verziji 1 SDC-a od 7. travnja 2013., predlaže se vrijednost $K_i = 14,35$ kN/mm/m)

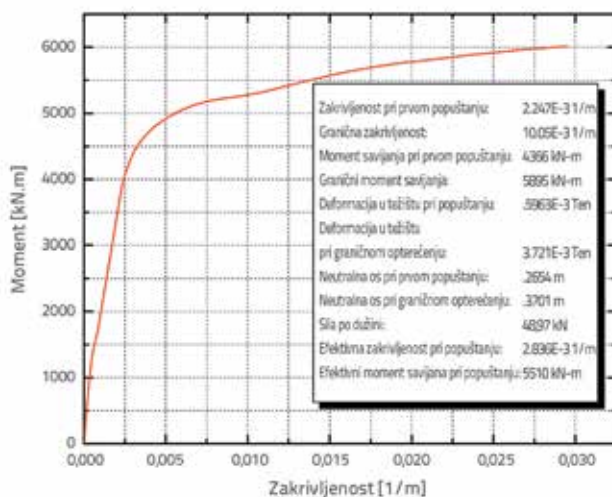
- w - širina zidića upornjaka
 h_{bw} - visina zidića upornjaka
 P_{bw} - maksimalna tlačna sila
 A_e - efektivna površina upornjaka
 Δ_{gap} - razmak između upornjaka i rasponskog sklopa mosta (0,10 m)



Slika 13. Efektivna krutost upornjaka ovisno o vrsti ležišta [39]

6. Moment savijanja/zakrivljenosti i metoda postupnog guranja

Granica popuštanja stupa određena je analizom momenta savijanja / zakrivljenosti poprečnog presjeka stupa. Podaci se dobivaju iz računalnog programa, a zatim se provodi proračun prema Priestleyu i dr. [30]. U ovom je radu presjek stupa diskretiziran primjenom vlaknastog modela, a dijagram momenta savijanja i zakrivljenosti određen je pomoću programa XTRACT, [32] (slika 14.).



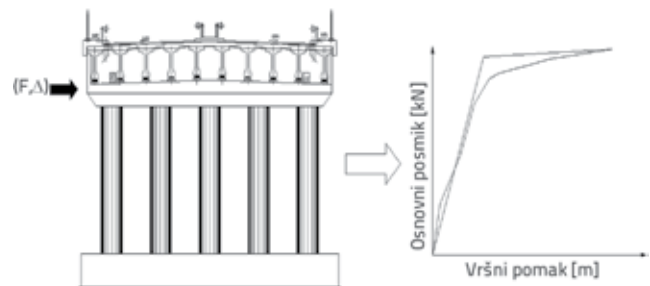
Slika 14. Krivulja momenta savijanja / zakrivljenosti za jedan stup (jedan stupanj slobode)

Krutost pojednostavljenog modela određena je pomoću krivulje momenta savijanja i zakrivljenosti, a ukupna masa mosta

korištena je za određivanje karakteristika modela (K_{elast} = 183667 kN/m i K_{plast} = 13948.91 kN/m).

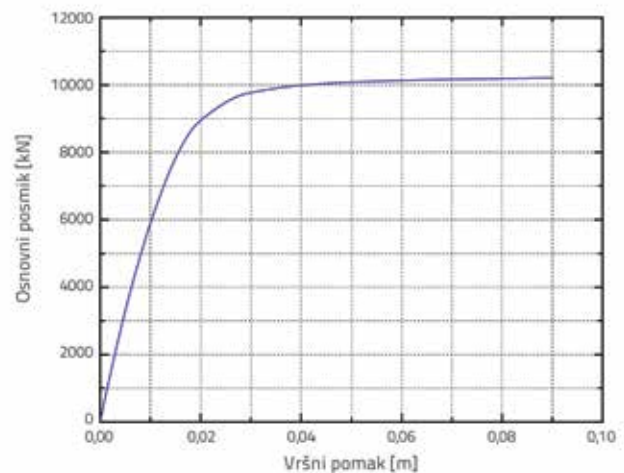
U modelu čitavog mosta kapacitet je stupa predstavljen pomoću krivulje postupnog guranja, kao što se to vidi na slici 15.

Ova krivulja predstavlja seizmičku pobudu i pomak tla, a dobije se postupnim povećanjem horizontalne sile postavljene na vrh stupa. Analitički postupci koji se temelje na metodi postupnog guranja sve su češći zbog svoje djelotvornosti i pouzdanosti rezultata [44]. Mnogi istraživači [45, 46] primjenjuju tu metodu za izradu analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja mostova.



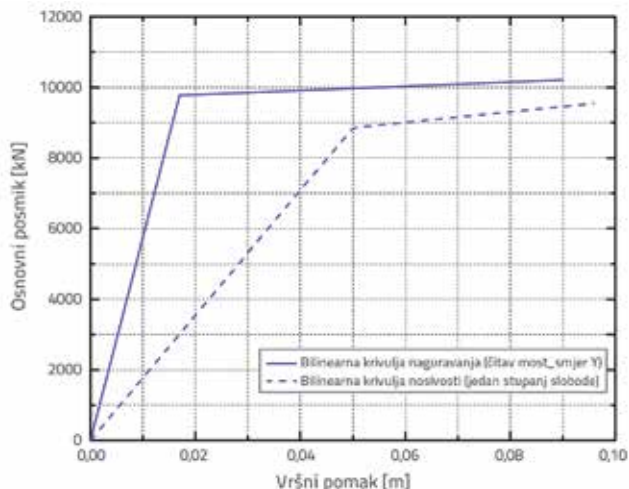
Slika 15. Postupak definiranja krivulje postupnog guranja

Rezultati analize metodom postupnog guranja prikazani su na slici 16. Rezultati su dani kao odnos između nelinearne sile i pomaka stupa za model čitavog mosta prikazan u ovisnosti o ukupnoj poprečnoj sili te pomaka vrha stupa. Analiza prikazana na slici 15. provedena je za poprečni smjer, a opterećenje je definirano na osnovi prvog (translacijskog) vlastitog oblika (slika 16).



Slika 16. Krivulja postupnog guranja smjer Y (čitav most)

Na slici 17. iskazane su dvije krivulje nosivosti kako bi se naglasio utjecaj numeričkog modela. Prva krivulja definirana je pomoću analize momenta savijanja i zakrivljenosti [30, 39], a druga je krivulja dobivena metodom postupnog guranja. Obje krivulje definirane su na pretpostavci da je poprečni smjer kritičan kod seizmičkog djelovanja.



Slika 17. Usporedba krivulja nosivosti

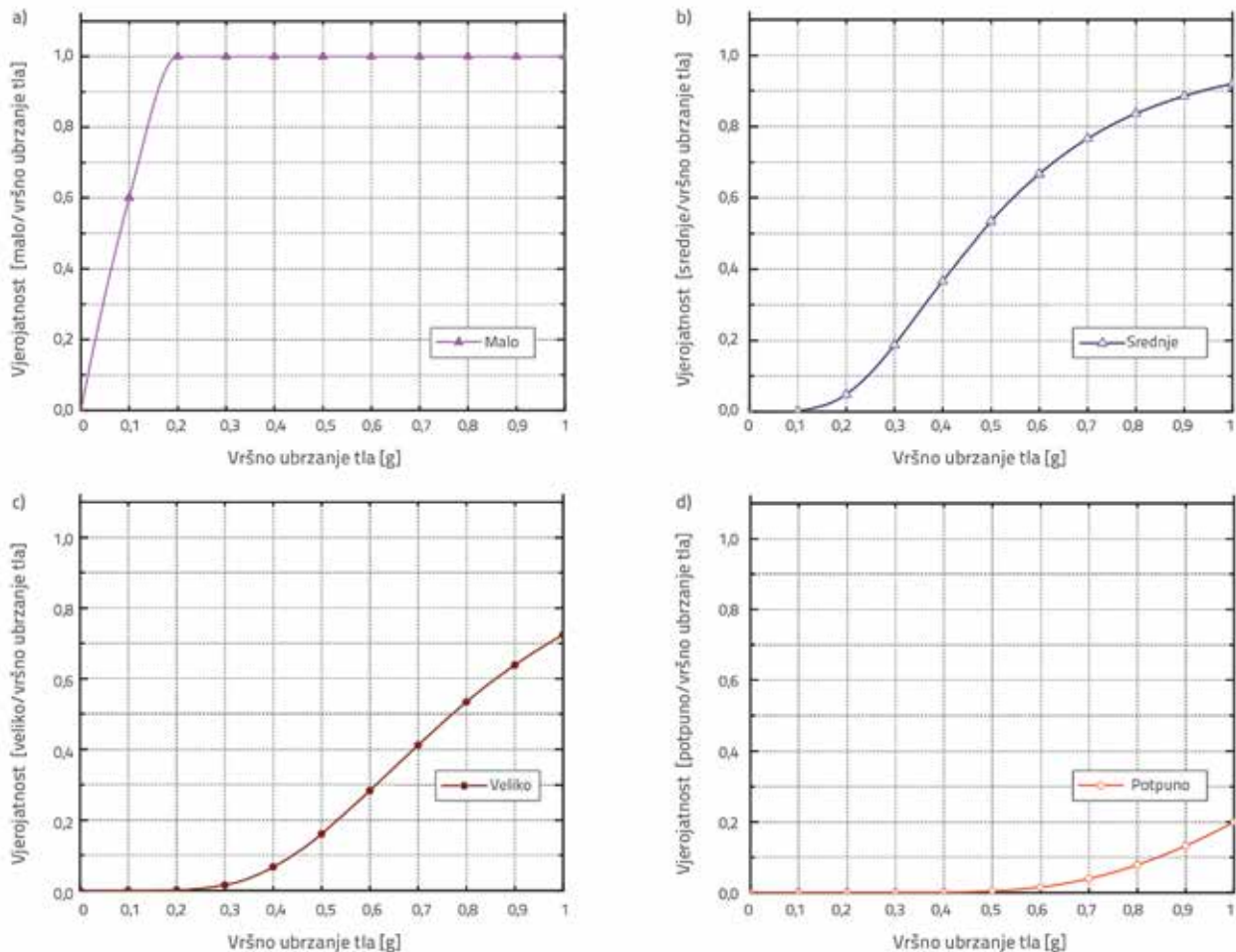
Slika 17. prikazuje znatan pad pomaka pri dostizanju sile popuštanja (od 0,05 cm na 0,017 cm), kao i njeno 9 postotno povećanje (od 8900 kN na 9800 kN) jer nije uzeta u obzir potpuna

krutost svih elemenata mosta(krutost upornjaka, elastomernih ležajeva i potresnih blokova). Usporedba pokazuje 6-postotno povećanje granične sile kod modela čitavog mosta u odnosu na pojednostavljeni model.

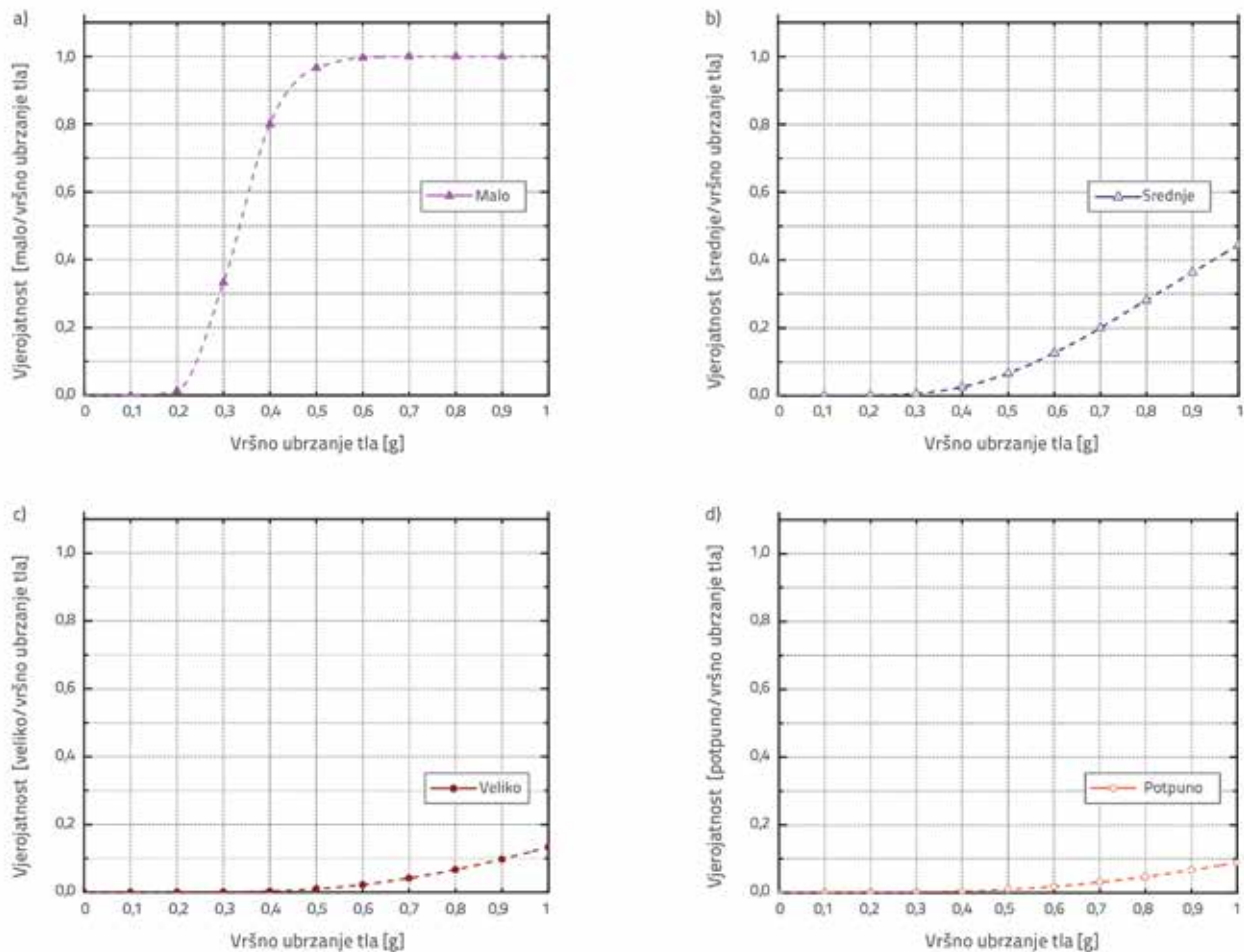
7. Nelinearna *time-history* analiza

Time-history analiza najtočnija je metoda za procjenu konstrukcija njihovog nelinearnog neelastičnog odziva na seizmičko djelovanje. Ta je analiza najsofisticiranija metoda ocjenjivanja u području potresnog inženjerstva [47], jer u obzir uzima nelinearnost elemenata provođenjem postupnog integracijskog postupka koji se smatra najdjelotvornijim postupkom za ovu vrstu analize [48].

Za primjenu *time-history* analize mosta analizirana su dva modela, a pritom je korišteno 15 vremenskih zapisa (tablica 1.). Provedeno je više od 300 nelinearnih analiza (provedba i naknadna obrada rezultata za svaki zapis) kako bi se ovom numeričkom simulacijom dobile analitičke krivulje vjerojatnosti oštećenja, te ocijenila seizmička osjetljivost mosta [16, 22, 27].



Slika 18. Krivulje vjerojatnosti oštećenja stupa mosta (model s jednim stupnjem slobode): a) malo oštećenje; b) srednje oštećenje; c) veliko oštećenje; d) potpuno oštećenje



Slika 19. Krivulje vjerojatnosti oštećenja stupa mosta (model čitavog mosta): a) malo oštećenje; b) srednje oštećenje; c) veliko oštećenje; d) potpuno oštećenje

8. Krivulje vjerojatnosti oštećenja

U ovom se radu naglasak stavlja na ocjenu seizmičke osjetljivosti tipičnih postojećih mostova u Alžiru (slobodno oslonjeni prednapeti gredni mostovi preko više raspona) pomoću analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja izrađenih na temelju metode postupnog guranja i *time-history* analize. Savezna agencija za upravljanje u izvanrednim okolnostima (FEMA) i Vijeće za primjenu tehnologija (ATC) pridonijeli su razvoju funkcija vjerojatnosti oštećenja i postupaka za ocjenu osjetljivosti nakon 1975 kada su Whitman i dr. [8] formalizirali postupak procjene seizmičkih rizika. Oni su definirali uvjetnu vjerojatnost da će sila koja djeluje na konstrukciju biti veća od kapaciteta konstrukcije [49], smatrajući pritom da je navedeni postupak jedno od najkorisnijih sredstava za ocjenjivanje ponašanja postojećih mostova u slučaju seizmičkog udara [50, 51], što je od ključnog značenja u planiranju prije i u pregledima nakon samog potresa. Krivulje vjerojatnosti oštećenja stupa mosta (slike 18. i 19.) izračunate su kao funkcije s log-normalnom raspodjelom. Kumulativna funkcija vjerojatnosti da će oštećenje PR biti jednako ili veće od razreda R iskazuje se kao:

$$P_R = \Phi \left[\frac{\ln X - \lambda}{\zeta} \right] \quad (4)$$

gdje je:

Φ - funkcija standardne normalne raspodjele

X - indeks pomaka tla u funkciji vršnog ubrzanja tla.

Dva parametra raspodjele, λ i ζ , predstavljaju srednju vrijednost i standardnu devijaciju indeksa X . Dodatne informacije o tim funkcijama mogu se pronaći u radovima sljedećih autora: Karim i Yamazaki [9, 22], Kibboua i dr. [7] te Kibboua [52].

Spomenuti su autori utvrdili odnos između indeksa oštećenja DI koji su uveli Park i Ang. [34] i broja razreda oštećenja i to primjenom duktilnosti kumulativne energije, pomaka i ukupne duktilnosti.

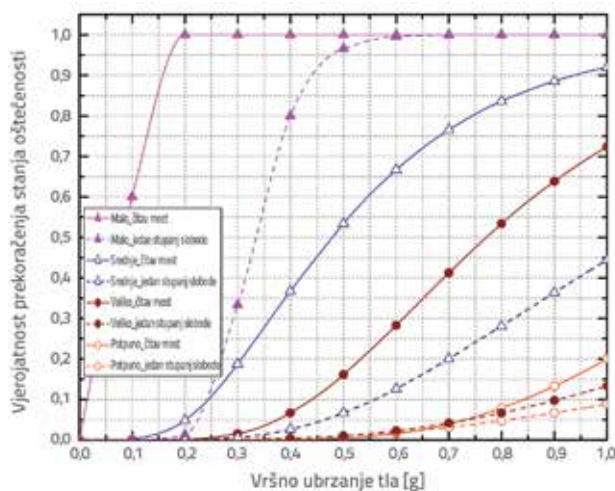
9. Analiza rezultata

Većina istraživača koristi četiri granična stanja oštećenja tj. malo, srednje, veliko i potpuno oštećenje. Rezultati analize pojednostavljenog sustava pokazuju nižu vjerojatnost

za malo, srednje i veliko oštećenje. Međutim, krivulja vjerojatnosti oštećenja za potpuno oštećenje u velikoj se mjeri podudara s modelom za čitav most, kao što se to vidi na slici 20.

Vjerojatnost prekoračenja malog oštećenja postignuta je kod pojednostavljenog modela pri vrijednosti vršnog ubrzanja tla (PGA) od 0,2 g. Međutim, samo 0,01 iste vjerojatnosti zabilježena je pri istoj vrijednosti vršnog ubrzanja tla (PGA) za model koji se odnosi na cijeli most. Za ovo stanje oštećenja usporedba između krivulja vjerojatnosti oštećenja pokazuje razliku koja varira od 20 % pri 0,4 g do 99 % pri 0,2 g. Ako se analiza provodi nakon 0,5 g, za ovo se stanje oštećenja dobivaju iste krivulje vjerojatnosti oštećenja za oba modela mosta.

Analizom krivulja vjerojatnosti oštećenja za drugo stanje oštećenja (srednje oštećenje), razlika u vjerojatnosti da će doći do prekoračenja tog stanja varira od 5 % pri 0,2 g do 55 % pri 0,7 g. Vrijednosti od 5 % pri 0,4 g do 55 % pri 0,9 g zabilježene su za veliko oštećenje, a maksimalna vrijednost od 10 % zabilježena je pri 1 g za potpuno oštećenje.



Slika 20. Usporedba krivulja vjerojatnosti oštećenja

Nakon usporedbe pojednostavljenog sustava s modelom čitavog mosta, ustanovljeno je da na krivulje vjerojatnosti oštećenja znatno utječe odabrani model konstrukcije. Pojednostavljeni sustav modeliran je kao sustav s jednim stupnjem slobode, pri čemu su zanemarene neke komponente mosta kao što su

elastomerni ležajevi, upornjaci, potresni blokovi i dilatacije. Spomenuta usporedba pokazuje da stvarna krutost sustava bitno utječe na nosivost stupa mosta, pa tako i na krivulje vjerojatnosti oštećenja.

10. Zaključak

U ovom se istraživanju razmatra utjecaj modela konstrukcije na ocjenu seizmičke osjetljivosti stupova mosta, primjenom analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja. U svrhu ostvarivanja tog cilja, provedene su statička nelinearna analiza *te time-history* nelinearna analiza pomoću programa Siesmostruct 2015. Krivulje vjerojatnosti oštećenja stupa prednapetog betonskog mosta definirane su probablističkim pristupkom. U ovom je radu prikazan postupak izrade analitičkih krivulja vjerojatnosti oštećenja za jedan od najčešćih tipova mostova koje nalazimo u Alžiru.

Usporedbom krivulja nosivosti i krivulja vjerojatnosti oštećenja utvrđeno je da model konstrukcije može bitno utjecati na ocjenjivanje seizmičkog ponašanja mostova. Nosivost stupa mosta podcijenjena je kada se koristi pojednostavljeni sustav, a vjerojatnost da će doći do prekoračenja stanja oštećenosti prevelika je jer je zanemarena krutost pojedinih komponenata mosta.

Može se ustvrditi da je izrada modela čitavog mosta vrlo realan postupak za ocjenjivanje seizmičkog ponašanja mostova. U tom je slučaju vjerojatnost da će doći do prekoračenja stanja velike i srednje oštećenosti manja od 0,45 (45 %). Oba modela pokazuju da je vjerojatnost potpunog oštećenja prilično niska kod ove vrste postojećih mostova.

Važan zaključak je da pojednostavljeni modeli nisu uvijek idealan sustav za provedbu analiza vjerojatnosti oštećenja, kao što su to tvrdili neki prijašnji istraživači. Ustvari, svaki pristup ima svoje prednosti i nedostatke. Istraživanja o seizmičkom ocjenjivanju mostova još uvijek su vrlo aktualna u svim dijelovima svijeta. Tim naporima pridonosi i ovaj rad kroz analizu alžirske baze podataka.

Zahvala

Ovaj je rad izrađen uz potporu Državnog centra za potresno građevinarstvo (CGS). Autori zahvaljuju gospodinu Saidiju Faycalu za doprinos u pripremanju rada.

LITERATURA

- [1] Gates, A.E., Ritchie, D.: Encyclopedia of Earthquakes and Volcanoes, Facts on File, Inc. New York, USA, 2007.
- [2] Kibboua, A., Bechtoula, H., Mehani, Y., Naili M.: Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Bridge Structures in Algiers Using Scenario Earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering, 12 (2014), pp. 807-827, <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9523-7>
- [3] EERI - Earthquake Engineering Research Institute.: The Boumerdes, Algeria, Earthquake of May 21, 2003, Learning from Earthquakes. Reconnaissance Report 2003-0.4 Oakland. California, 2003.
- [4] Kibboua, A.: Etude de vulnérabilité au séisme d'un bâtiment stratégique en béton armé, Génie parasismique et réponse dynamique des ouvrages. 5 ème Congrès AFPS, Cachan 19-21 Octobre 1999, Paris, France, 1999.

- [5] Zermout, S., Bakhti, F., Mehani, Y., Inukai, M., Azuhata, T., Saito, T.: Seismic Vulnerability of a Strategic Building Designed by Algerian Seismic Code RPA 99, Using the Capacity Spectrum Method. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [6] Mehani, Y., Bechtoula, H., Kibboua, A., Naili, M.: Assessment of Seismic Fragility Curves for Existing RC buildings in Algiers after the 2003 Boumerdes Earthquake. *Structural Engineering & Mechanics*, 46 (2013) 6, pp. 791-808.
- [7] Kibboua, A., Naili, M., Benouar, D., Kehila, F.: Analytical Fragility Curves for Typical Algerian Reinforced Concrete Pier Bridges. *Structural Engineering and Mechanics*, 39 (2011) 3, pp. 411-425.
- [8] Billah, A.H.M., Alam, M.S.: Seismic Fragility Assessment of Concrete Bridge Pier Reinforced with Super elastic Shape Memory Alloy. *Earthquake Spectra*, 31 (2015) 3, pp. 1515-1541.
- [9] Karim, K.R., Yamazaki, F.: Effect of Earthquake Ground Motions on Fragility Curves of Highway Bridge Piers Based on Numerical Simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30 (2001), pp. 1839-1856, <https://doi.org/10.1002/eqe.97>
- [10] Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T.: Statistical Analysis of Fragility Curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126 (2000) 12, pp. 1224-1231.
- [11] Elnashai, AS., Borzi, B., Vlachos, S.: Deformation-based vulnerability functions for RC bridges. *Structural Engineering and Mechanics*, 17 (2004) 2, pp. 215-244.
- [12] Pan, Y., Agrawal, A.K., Ghosn, M.: Seismic Fragility of Continuous Steel Highway Bridges in New York State. *Journal of Bridge Engineering*, 12 (2007) 6, pp. 689-699.
- [13] Padgett, J.E., DesRoches, R.: Retrofitted Bridge Fragility Analysis for Typical Classes of Multi-span Bridges. *Earthquake Spectra*, 25 (2009) 1, pp. 117-141.
- [14] Agrawal, A.K., Ghosn, M., Alampalli, S., Pan, Y.: Seismic Fragility of Retrofitted Multispan Continuous Steel Bridges in New York. *Journal of Bridge Engineering*, 17 (2012) 4, pp. 562-575.
- [15] Alam, S.M., Bhuiyan, R.M.A., Billah, A.H.M.: Seismic Fragility Assessment of SMA-Bar Restrained Multi-Span Continuous Highway Bridge Isolated by Different Laminated Rubber Bearings in Medium to Strong Seismic Risk Zones. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (2012), pp. 1885-1909, <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9381-8>
- [16] Ramanathan, K., Padgett, J.E., DesRoches, R.: Temporal Evolution of Seismic Fragility Curves for Concrete Box-Girder Bridges in California. *Engineering Structures*, 97 (2015), pp. 29-46, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.069>
- [17] Vosooghi, A., Saïdi, M.S.: Experimental Fragility Curves for Seismic Response of Reinforced Concrete Bridge Columns. *ACI, Structural Journal*, 109 (2012) 6, pp. 825-834.
- [18] Perrault, M., Gueguen, P., Aldea, A., Demetriu, S.: Using Experimental Data to Reduce the Single-Building Sigma of Fragility Curves: Case Study of the BRD Tower in Bucharest, Romania. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12 (2013) 4, pp. 643-658.
- [19] Choi, E., Youn, H., Cho, B.S.: Probabilistic Seismic Performance Assessment of Lap-Spliced RC Columns Retrofitted by Steel Wrapping Jackets. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15 (2016) 2, pp. 223-238.
- [20] Hwang, H., Huo, J.R.: Probabilistic Seismic Damage Assessment of Highway Bridges, *Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, WA, USA, 1998.
- [21] Mander, J.B., Basoz, N.: Seismic fragility curves theory for highway bridges. *Proceedings of 5th U.S Conference of Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, pp. 31-40, 1999.
- [22] Karim, K.R., Yamazaki, F.: A Simplified Method of Constructing Fragility Curves for Highway Bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32 (2003), pp. 1603-1626, <https://doi.org/10.1002/eqe.291>
- [23] Dezfuli, F.H., Alam, M.S.: Seismic Vulnerability Assessment of a Steel Girder Highway Bridge Equipped with Different SMA Wire-Based Smart Elastomeric Isolators. *Smart Materials and Structures*, 25 (2016), pp. 39-54, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/7/075039>
- [24] Bhuiyan, R.M.A., Alam, S.M.: Seismic Vulnerability Assessment of a Multi-Span Continuous Highway Bridge Fitted with Shape Memory Alloy Bars and Laminated Rubber Bearings. *Earthquake Spectra*, 28 (2012) 4, pp. 1379-1404.
- [25] Abbasi, M., Abedini, M.J., Zakeri, B., Amiri, G.G.: Seismic vulnerability assessment of a Californian multi-frame curved concrete box girder viaduct using fragility curves. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12 (2016) 12, pp. 1585-1601.
- [26] Billah, A.H.M., Alam, S.M.: Seismic Fragility Assessment of Highway Bridges: a State-of-the- Art Review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11 (2014) 6, pp. 804-83.
- [27] Nielson, B., DesRoches, R.: Analytical Seismic Fragility Curves for Typical Bridges in the Central and South Eastern United States. *Earthquake Spectra*, 3 (2007) 23, pp. 615-633.
- [28] Ghotbi, A.R.: Performance-Based Seismic Assessment of Skewed Bridges with and without Considering Soil-Foundation Interaction Effects for Various Site Classes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13 (2014) 3, pp. 357-373.
- [29] Choi, E., DesRoches, R., Nielson, B.: Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zones. *Engineering Structures*, 26 (2004), pp. 187-199, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.09.006>
- [30] Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.: *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley & Sons Inc, New York, 1996, <https://doi.org/10.1002/9780470172858>
- [31] Chopra, A.K.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall: New Jersey, 2001.
- [32] Chadwell, C.B., Imbsen, R.A.: *XTRACT Cross Sectional Analysis of Structural Components*. Imbsen and Associates Inc., Sacramento, 2004.
- [33] Charney, F.A.: *NONLIN - Nonlinear Dynamic Time History Analysis of Single Degree of Freedom Systems*, Federal Emergency Management Agency Training Center, Emmetsburg, Maryland. *Advanced Structural Concepts*. Golden, CO and Schnabel Engineering, Denver, Co, 1998.
- [34] Park, Y.J., Ang, A.H.S.: Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings. *Journal of Structural Engineering - ASCE*, 111 (1985) 4, pp. 740-757.
- [35] Zhongxian, L., Yang, L., Ning, L.: Vector-Intensity Measure Based Seismic Vulnerability Analysis of Bridge Structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13 (2014) 4, pp. 695-705.
- [36] RPOA: *Règles Parasismiques Applicables au Domaine des Ouvrages d'Art*. Document Technique Règlementaire. Ministère des Travaux Publics, Algiers. Alegria, 2008.
- [37] Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y., Benouar, D., Laouami, N., Benkaci, N.: Site-Response Characteristics Evaluated from Strong Motion Records of the 2003 Boumerdes, Algeria, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 26 (2010), pp. 803-823, <https://doi.org/10.1193/1.3459158>

- [38] Seismostruct: A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures. Available from <http://www.seismosoft.com>. Last accessed November 2016.
- [39] Caltrans, SDC: Caltrans Seismic Design Criteria version 1.4. California Department of Transportation. Sacramento, California, 2006.
- [40] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 114 (1998) 8, pp 1804-1826.
- [41] Menegotto, M., Pinto, P.E.: Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behaviour of Elements Under Combined Normal Force and Bending, In: IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads. Zurich, pp. 112-1231, 1973.
- [42] Aviram, A., Mackie, K.R., Stojadinovic, B.: Effect of Abutment Modelling on the Seismic Response of Bridge Structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7 (2008) 4, pp. 395-402.
- [43] Yilmaz, T.: Seismic Response of Multi-span Highway Bridges with Two-Column Reinforced Concrete Bents Including Foundation and Column Flexibility. Master Thesis, Civil Engineering Department. Middle East Technical University. Ankara, Turkey, 2008.
- [44] Ahmad, S., Kyriakides, N., Pilakoutas, K., Neocleous, K., Uzzaman, Q.: Seismic fragility Assessment of Existing Sub-Standard Low Strength Reinforced Concrete Structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14 (2015) 3, pp. 439-452.
- [45] Shinozuka, M., Feng, M., Kim, H., Kim, S.: Nonlinear Static Procedure for Fragility Curve Development. *Journal of Engineering Mechanics*, 126 (2000) 12, pp. 1287-1295.
- [46] Moschonas, I.F., Kappos, A.J., Panetsos, P., Papadopoulos, V., Makarios, T., Thanopoulos, P.: Seismic Fragility Curves for Greek Bridges: Methodology and Case Studies. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7 (2009), pp. 439-468, <https://doi.org/10.1007/s10518-008-9077-2>
- [47] Duan, A., Zhao, Z.Z., Chen, Qian, J.R., Jin, W.L.: Nonlinear Time History Analysis of a Pre-stressed Concrete Containment Vessel Model Under Japan's March 11 Earthquake. *Computers and Concrete*, 13 (2014) 1, pp. 1-16.
- [48] Clough, R.W., Penzien, J.: Dynamics of Structures. McGraw-Hill, Singapore, 1993.
- [49] Mosleh, A., Jara, J., Varum, H.: A Methodology for Determining the Seismic Vulnerability of Old Concrete Highway Bridges by Using Fragility Curves. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 5 (2015) 1, pp. 1-7.
- [50] Padgett, J.E., DesRoches, R.: Methodology for the Development of Analytical Fragility Curves for Retrofitted Bridges. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37 (2008), pp. 1157-1174.
- [51] Zanini, M.A., Pellegrino, C., Morbin, R., Modena, C.: Seismic Vulnerability of Bridges in Transport Networks Subjected to Environmental Deterioration. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11 (2013), pp. 561-579, <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9400-9>
- [52] Kibboua, A.: Developpement d'une Méthodologie d'analyse pour la Vulnérabilité Sismique des Piles de Ponts Algériens, PhD dissertation, University of Science and Technology Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Algiers, Algeria, 2012.