

Primljen / Received: 25.10.2022.

Ispravljen / Corrected: 16.2.2023.

Prihvaćen / Accepted: 1.3.2023.

Dostupno online / Available online: 10.7.2023.

Skalarna i vektorska analiza ranjivosti tipskih AB stupova mostova u Alžiru

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Fouad Kehila**, dipl.ing.građ.
Nacionalni istraživački centar za potresno inženjerstvo CGS, Alžir
Odjel za građevinarstvo
fkehila@cgs-dz.org
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Mebarek Khelfi**, dipl.ing.građ.
Nacionalni istraživački centar za potresno inženjerstvo CGS, Alžir
Odjel za građevinarstvo
mkhelfi@cgs-dz.org



Izv.prof.dr.sc. **Mounir Ait Belkacem**, dipl.ing.građ.
Nacionalni istraživački centar za potresno inženjerstvo CGS, Alžir
Odjel za građevinarstvo
ait_belkacem1@yahoo.fr

Prethodno priopćenje

Fouad Kehila, Mebarek Khelfi, Mounir Ait Belkacem

Skalarna i vektorska analiza ranjivosti tipskih AB stupova mostova u Alžiru

Ovaj rad predstavlja i analizira pristup za izvođenje skalarne i vektorske ocjene ranjivosti tipskih AB stupova mostova u Alžiru. Putem inkrementalne dinamičke analize, seizmički je odziv izračunan uzimajući u obzir 60 seizmičkih gibanja tla i 10 mjera intenziteta (IM). Optimalni IM za skalarnu analizu procijenjen je i odabran pomoću regresijske analize. Provjeren je na temelju nekoliko metrika uključujući korelaciju, učinkovitost, praktičnost i sposobnost. Vektorska analiza ranjivosti, uz primjenu dva para IM-ova izračunana je i uspoređena s krivuljama ranjivosti dobivenim skalarnom analizom. Usporedba je pokazala da se u analizi ranjivosti vjerojatnost štete može podcijeniti ili precijeniti.

Ključne riječi:

krivulje ranjivosti, inkrementalna dinamička analiza, mjera intenziteta, granična stanja, seizmičko ponašanje

Research Paper

Fouad Kehila, Mebarek Khelfi, Mounir Ait Belkacem

Scalar and vector-valued fragility analysis of typical Algerian RC bridge piers

This paper presents and discusses an approach for performing scalar and vector vulnerability assessments of typical Algerian RC bridge piers. Across incremental dynamic analysis, the seismic response was calculated while considering 60 seismic ground motions and 10 intensity measures (IMs). An optimal scalar-valued IM was assessed and selected through regression analyses. It was validated based on several metrics including the correlation, efficiency, practicality, and proficiency. The fragility of vector-valued functions that use two pairs of IMs were calculated and compared with fragility curves based on scalars. The comparison indicated that the damage probability can be underestimated or overestimated in vulnerability analysis.

Key words:

fragility curves, incremental dynamic analysis, intensity measure, limit states, seismic performance

1. Uvod

Mostovi su ključni elementi cestovne mreže u urbanim područjima i na glavnim autocestama te značajno utječu na promet i odgovor u hitnim situacijama u slučaju štete uzrokovane potresom.

Potrebno je poboljšati seizmičko ponašanje takvih mostova u područjima s jakim potresima. Cilj je spriječiti rušenje mosta i učinkovito upravljati preostalim stanjima oštećenosti kako bi se osiguralo da globalni pokazatelji otpornosti mosta budu zadovoljeni tijekom njegova trajanja i pod potencijalnim seizmičkim djelovanjima uz minimalne troškove. Stoga su istraživanja seizmičkog ponašanja mostova izloženih seizmičkoj pobudi značajna.

AB stupovi mostova predstavljaju jednu od najvažnijih komponenti sustava mosta koji određuju cjelokupno ponašanje mostova tijekom potresa. Posljednjih su godina provedena brojna istraživanja s ciljem poboljšanja proračuna i seizmičkih svojstava stupova mostova. Zhou i sur. [1] proveli su ispitivanje horizontalnog udarnog opterećenja armiranobetonskih stupova mosta s različitim omjerima armature uzdužnih čeličnih šipki. Milić i sur. [2] proučavali su strategiju usvojenu za forenzičko konstrukcijsko inženjerstvo nakon urušavanja mosta. Yilmaz i sur. [3] istraživali su učinke promjena u koeficijentu varijacije probabilističkih varijabli podlokavanja i distribucije vjerojatnosti na vjerojatnost gubitka stabilnosti oko dvostrukih stupova mosta. Kovačević i sur. [4] usporedili su i analizirali sedam najsuvremenijih tehnika strojnog učenja za procjenu troškova izgradnje AB mostova. Wang [5] je temeljito opisao sustav nadzora koji se primjenjuje na mostu Junshan preko rijeke Jangce. Ovdje je fokus uglavnom bio na odabiru varijabli praćenja, rasporedu osjetila, sustavu prikupljanja i prijenosa podataka, strategiji pohrane i upravljanja podacima te sustavu korisničkog sučelja.

Većina mostova u Alžiru izgrađena je prije 2008. (godina objave prve verzije alžirskih seizmičkih propisa za mostove RPOA 2008 [6]) i prije uvođenja seizmičkih normi. Značajan broj tih mostova treba nadograditi ili ojačati zbog učinaka zamora. Nacionalne vlasti izrazile su zabrinutost u vezi s održavanjem mostova na ključnim cestama nakon većeg potresa.

Međutim, zbog nepredvidivosti u gibanjima tla i dinamičkih karakteristika mostova, probabilističke metode se često primjenjuju za ocjenu seizmičkog ponašanja mostova.

Procjena seizmičkog rizika bavi se ranjivošću konstrukcije, opasnošću od seizmičkih događaja i gubitcima uzrokovanim događajem u smislu ljudskih žrtava i ekonomskog utjecaja. Krivulja ranjivosti (krivulja vjerojatnosti oštećenja) vrsta je alata za seizmičku oštetivost koji se primjenjuje u procjeni rizika.

U tom je pogledu istraživački centar "Pacific Earthquake Engineering Research Center" (PEER) razvio okvir za primarnu metodu vjerojatnosti za seizmičko projektiranje i ocjenu na temelju ponašanja. Temeljni okvir seizmičke analize ranjivosti konstrukcija temelji se na teoriji pouzdanosti i njezinom teorijskom okviru. Njime se kvantificira seizmičko ponašanje

konstrukcije na probabilistički način i povezuje intenzitet gibanja tla sa stanjem oštećenja konstrukcije iz makroperspektive. Međutim, razina intenziteta gibanja tla ovisi o usvojenom parametru gibanja tla, a nesigurnost odziva konstrukcije može se opisati pomoću mjere intenziteta (IM). Stoga je važno odabrati odgovarajući IM među parametrima gibanja tla za analizu konstrukcije mosta s obzirom na seizmičku ranjivost.

Odabir IM-a određuje stupanj disperzije probabilističkog modela. Dostupni su određeni IM-ovi gibanja tla koji se odnose na: vršne vrijednosti, trajanja, spektralne karakteristike i energiju. Postojeći IM-ovi su podijeljeni u dvije tipične klase: skalarne i vektorske. Skalarni IM odnosi se na jedan IM. Vektorski IM obično uključuje najmanje dvije komponente IM-a za postojeće krivulje ranjivosti za AB mostove, uglavnom razrađene u skalarnom IM-u.

Pouzdanost rezultata dobivenih probabilističkim pristupom ovisi o razini nesigurnosti probabilističkih seizmičkih modela zahtjeva (engl. *Probabilistic Seismic Demand Model - PSDM*). Njime se prikazuje odnos između IM-a gibanja tla i inženjerskih parametara odziva (engl. *Engineering Demand Parameter - EDP*) i, zauzvrat, ovisi o odabranom IM-u. S time u vezi, mnogi su istraživači preporučili određene metrike za procjenu optimalnog IM-a. Učinkovitost, praktičnost, sposobnost i dostatnost [7] identificirani su kao najčešći. Brojni su istraživači predložili nekoliko IM-ova za upotrebu u gradnji mostova. Dva koja se intenzivno primjenjuju su maksimalno vršno ubrzanje tla (engl. *Peak Ground Acceleration - PGA*) i $Sa(T_1)$, tj. spektralno ubrzanje u osnovnom periodu konstrukcije.

PGA i $Sa(T_1)$ smatraju se optimalnim IM-ovima u slučaju višeraspanskog mosta s čeličnim gredama [8]. $Sa(T_1)$ je odabran kao optimalni IM za ocjenu seizmičke ranjivosti mosta brze željeznice [9, 10]. Vršna brzina tla (engl. *Peak Ground Velocity - PGV*) preporučuje se kao optimalan IM za ovješeni most koji je izložen gibanjima tla na udaljenosti od rasjeda i u njegovoj blizini [11]. PGV često predstavlja optimalni IM za kondicioniranje PSDM-ova za izolirane mostove podvrgnute pulsним gibanjima tla [12]. Ispitivana su tri IM-a (PGA, PGV i PGD) kako bi se procijenila ranjivost stupa sustava mosta podvrgnutog gibanjima tla u blizini rasjeda uzimajući u obzir prototip mosta u Kini i odabirom PGV-a kao optimalnog IM-a zahvaljujući učinkovitosti, relativnoj dostatnosti i praktičnosti [13]. PGD predstavlja vršno pomicanje tla (engl. *Peak Ground Displacement*). PGA, PGV i intenzitet spektra brzine (engl. *Velocity Spectrum Intensity - VSI*) horizontalne komponente gibanja tla te intenzitet spektra ubrzanja (engl. *Acceleration Spectrum Intensity - ASI*) horizontalne i vertikalne komponente identificirani su kao optimalni IM-ovi za višeraspanske mostove s kontinuiranim betonskim rasponskim sklopom, na kojima su potresi s plitkim žarištem naglašeni. Spektralno ubrzanje pri 1,0 s (Sa_{10}) usvojeno je kao optimalni IM za tipski alžirski most s naknadnim prednapinjanjem [14]. Nekoliko je istraživača predložilo nove IM-ove. Bayat i sur. [15] odabrali su prosječno spektralno ubrzanje (engl. *Average Spectral Acceleration - ASA*) kao optimalni IM za kose cestovne mostove i spektralno ubrzanje za 0,3 sekunde ($Sa(0,3T_g, 5\%)$) za seizmički izolirane mostove [16].

ASA predstavlja prosječnu vrijednost S_a između donjeg i gornjeg perioda konstrukcije. Prikladna je za upotrebu u odgovarajućem rasponu perioda.

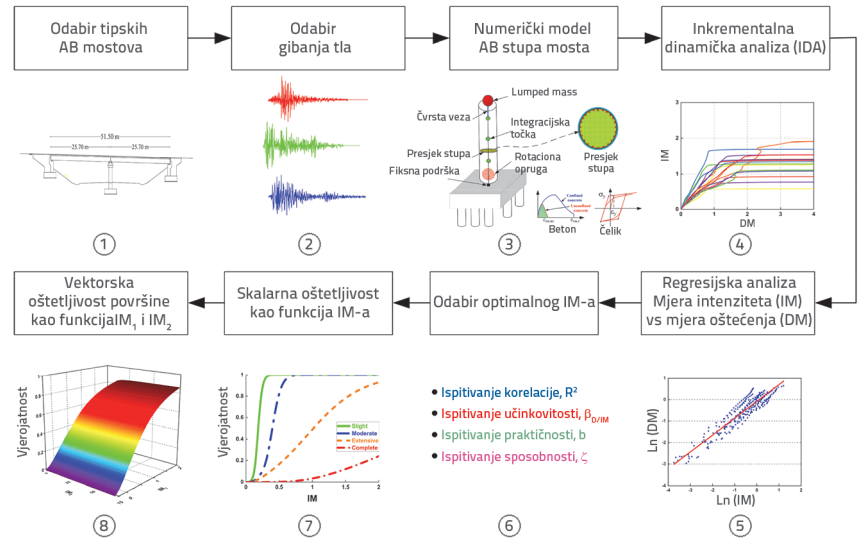
Što se tiče vektorskih IM-ova, preporučuje se uporaba dvoparametarskih IM-ova za AB okvirne konstrukcije [17] i nearmirane zidane zgrade [18].

Za AB mostove, autori Li i sur. [19], primijenili su plohe seizmičke ranjivosti za izvođenje funkcija ranjivosti za pojedine komponente mosta. Spektralna ubrzanja u prva dva perioda vibriranja, $S_a(T_1)$, $S_a(T_2)$ odabrani su kao vektorski IM. Baker i Cornell [20] predložili su spektralno ubrzanje u osnovnom periodu vibriranja $S_a(T_1)$ i mjerenje spektralnog oblika, $R_{T_1, T_2} = S_a(T_2) / S_a(T_1)$. Spektralno ubrzanje S_a i razlika ε između spektralnog ubrzanja zapisa i srednje vrijednosti jednadžbe predviđanja gibanja tla u zadanom periodu smatrani su vektorskim IM [21].

Međutim, funkcije ranjivosti dobivene vektorskom analizom IM-ova za alžirske mostove nisu dostupne. Stoga je potrebno poboljšanje i daljnji razvoj kako bi se postigla integrirana procjena rizika za te mostove. U kontekstu ovih ograničenja, cilj je ovog istraživanja razviti vektorske i skalarne funkcije ranjivosti za izvođenje analize seizmičke ranjivosti i ocjene temeljene na svojstvima AB stupova mosta uzimajući u obzir klasu tla specificiranu u alžirskim propisima za projektiranje mostova RPOA 2008 [6]. Izveden je niz inkrementalnih dinamičkih analiza kako bi se dobio seizmički odziv AB stupova mosta pomoću 60 zapisa gibanja tla na temelju brzine posmičnih valova V_{s30} koji se primjenjuje za klasifikaciju tla u RPOA 2008 [6]. Zatim je odabrano 10 IM-ova kako bi se odredio najpovoljniji za primjenu u skalarnoj analizi ranjivosti. Skalarne krivulje ranjivosti konstruirane su u smislu optimalnog IM-a dobivenog na temelju rezultata korelacije, učinkovitosti, praktičnosti, sposobnosti i dostatnosti za odabrane IM-ove. Nakon toga je dobivena vjerojatnost prekoračenja različitih stanja oštećenja pomoću vektorskih funkcija ranjivosti. Na kraju je provedena komparativna analiza s rezultatima izvedenim iz skalarnih funkcija ranjivosti. Stoga je u ovom radu pružen pregled važnosti drugog IM-a u analizi seizmičke ranjivosti tipskog alžirskog AB stupa mosta.

2. Postupak za skalarnu i vektorsku analizu ranjivosti

U ovom je istraživanju proveden niz inkrementalnih dinamičkih analiza (IDA) [22] u svrhu generiranja skalarnih i vektorskih krivulja ranjivosti (koje se temelje na numeričkoj analizi) za AB stupove mostova. Shematski pregled predloženog postupka prikazan je na slici 1. sa sljedećih osam koraka:



Slika 1. Pregled postupka razvoja skalarnih i vektorskih funkcija ranjivosti AB stupova mostova

1. Odabir reprezentativnog alžirskog mosta koji ima odgovarajuću geometriju i oblik stupova.
2. Odabir niza gibanja tla s dovoljnom točnošću kako bi se odredili seizmički zahtjevi odabranog mosta.
3. Izrada numeričkog modela AB stupova mostova prema geometriji i obliku odabranih stupova.
4. Izvođenje skupa IDA-a primjenom koraka numeričkog modela (3) i procjena mjere odziva, tj. oštećenja (engl. *Damage Measure* - DM) s odabranim IM-om za proučavane stupove mosta.
5. Postavljanje regresijskih modela između odabranih IM i DM.
6. Identifikacija najprikladnijeg IM-a potrebnog za skalarnu analizu ranjivosti provođenjem testova korelacije, učinkovitosti, praktičnosti i sposobnosti
7. Razvijanje skalarne funkcije ranjivosti primjenom optimalnog IM-a dobivenog u koraku (6) za ispitivani most.
8. Razvijanje vektorske funkcije ranjivosti za ispitivani most na temelju dva IM-a.

3. Definicija skalarne i vektorske funkcije ranjivosti

Seizmička ranjivost mosta odnosi se na uvjetnu vjerojatnost da odziv elementa postigne ili premaši određeno specificirano granično stanje oštećenja uzrokovano višestrukim potresima različitih razina intenziteta.

U ovom je radu razmatrana metoda teorijske analize koja primjenjuje načelo vjerojatnosti pouzdanosti u svrhu istraživanja seizmičke ranjivosti AB stupova mostova.

S_d je seizmički zahtjev, a S_c je kapacitet konstrukcije. Vjerojatnost seizmičke ranjivosti AB stupova može se izraziti kao što je prikazano u izrazu (1) [23]:

$$P_f = P \left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1 \right] = P \left[\ln \frac{S_d}{S_c} \geq 0 \right] \quad (1)$$

Tablica 1. Granične vrijednosti različitih mjera oštećenja

Mjere oštećenja	Granične vrijednosti za stanja oštećenja				Referenca
	Malo	Umjereno	Vrlo teško	Urušavanje	
Duktilnost zakrivljenosti	1	1,18	3,22	4,18	[25]
	1	2,73	4,54	6,5	[26]
Duktilnost pomaka	1	1,2	1,76	4,76	[27]
Pomak [%]	2,25	2,9	4,6	5	[28]
	0,46	0,72	1,05	4,91	[29]
	1	1,22	1,78	4,8	[30]
	0,7	1,5	2,5	5	[31]

3.1. Skalarna funkcija ranjivosti

U prethodnim istraživanjima pretpostavljeno je da S_d i S_c slijede lognormalnu distribuciju. Stoga, $\ln(S_d/S_c)$ slijedi normalnu distribuciju. Neovisno o tome je li linearna regresijska analiza između $\ln(IM)$ i $\ln(S_d/S_c)$ provedena, srednja vrijednost λ , izraz (2), i standardna devijacija σ mogu se izraziti kao što je prikazano u izrazu (3):

$$\lambda = a \ln(IM) + b \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{S_r / (n-2)} \quad (3)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^N \left[\ln \lambda_i - \ln(aIM_i^b) \right]^2 \quad (4)$$

pri čemu su a i b koeficijenti linearne regresije, a S_r je zbroj kvadrata reziduala za regresijsku ravninu za raspršene točke, izraz (4).

Izraz (1) se može transformirati u standardni oblik normalne distribucije [24]:

$$P_f = P \left[\frac{S_d}{S_c} \geq 1 \right] = 1 - \phi \left(\frac{\ln(IM) - \lambda}{\sigma} \right) = \phi \left(\frac{\lambda}{\sigma} \right) \quad (5)$$

ϕ je standardna normalna kumulativna funkcija gustoće, a λ i σ su dva parametra slučajne distribucije DM-a.

3.2. Vektorska funkcija ranjivosti

U slučaju kada se za mjeru intenziteta IM primjenjuju dva parametra u vektorskom obliku $IM = (IM_1, IM_2)$, srednja vrijednost i standardna devijacija $\ln(S_d/S_c)$ mogu se izraziti izrazom (6), pri čemu su a , b i c koeficijenti linearne regresije.

$$\lambda = a \ln(IM_1) + b \ln(IM_2) + c \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{S_r / (n-3)} \quad (7)$$

Zamjenom izraza (6) i izraza (7) u izrazu (5), funkcija ranjivosti elementa mosta s vektorskim vrijednostima definirana je pomoću

$$p_f = \phi \left(\frac{a \ln(IM_1) + b \ln(IM_2) + c}{\sqrt{S_r / (n-3)}} \right) \quad (8)$$

4. Stanja i mjere oštećenja

Pretpostavlja se da DM (engl. *damage measure*) kvantificira stanje seizmičkog oštećenja (engl. *damage state* - DS) bilo kojeg elementa konstrukcije, kao što su stupovi mosta koji su izloženi seizmičkom djelovanju. Stoga su različite kvantitativne definicije graničnih stanja oštećenja mosta dostupne u nekoliko propisa. U slučaju stupova mostova, obično se primjenjuju duktilnost zakrivljenosti [25, 26], duktilnost pomaka [27] i pomak [28-30]. Trenutno nisu dostupna kvantitativna mjerenja graničnog stanja oštećenja za alžirske mostove.

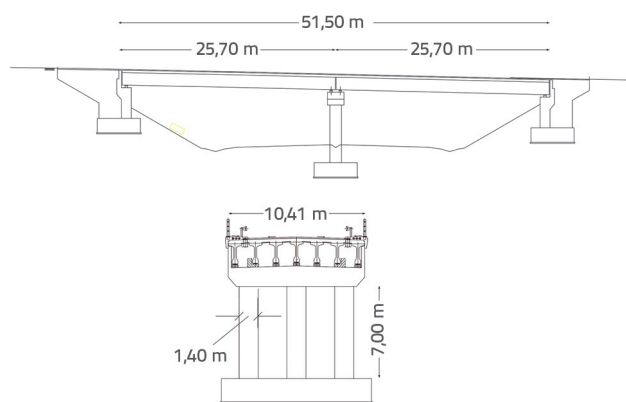
Različite mjere oštećenja i granične vrijednosti koje su u ocjeni ranjivosti stupova mostova upotrijebili istraživači sažete su u tablici 1. U ovom istraživanju, kao DM odabran je pomak. Nadalje, granična stanja [31] odabrana su za definiranje granica pomaka stupova mosta. Definirana su četiri kvalitativna granična stanja oštećenja: malo, umjereno, vrlo teško i urušavanje. Korelacija s graničnim vrijednostima pomaka koja se razmatraju za stupove mosta iznosila je 0,7 %, 1,5 %, 2,5 % i 5 %.

5. Numeričko modeliranje

5.1. Odabrani most

Za skalarnu i vektorsku analizu ranjivosti armiranobetonskih stupova mosta odabran je postojeći most s jednostavno poduprtom dvorasponskom konstrukcijom koja se sastoji od naknadno prednapetih nosača i dobetonirane kolničke ploče, ukupne duljine 51,50 m. Rasponi su jednake duljine, 25,70 m, a rasponski sklop oslanja se preko elastomernih ležajeva (koji ujedno predstavljaju i seizmičku izolaciju) na elemente donjeg ustroja. Nosivi sustav mosta sastoji se od AB kolničke ploče,

na koju je položen zastor debljine 80 mm, širine 10 m, koja se oslanja na sedam prednapetih "I" nosača. Nosači se oslanjaju na elastomerne ležajeve debljine 0,05 m i tlocrtnih izmjera 0,3 m x 0,3 m. Stupište mosta sastoji se od tri kružna stupa, svaki promjera 1,40 m i visine 7,00 m, i naglavne grede dužine 12,00 m i presjeka 2,00 x 1,00 m. Na upornjacima se nalaze po dva protuseizmička bloka (engl. *shear key*). Uzdužni razmak između rasponskog sklopa i upornjaka iznosi 10 cm, a razmak između protupotresnih blokova i nosača 6 cm. Armaturu stupa čini dvadeset sedam uzdužnih armaturnih šipki promjera 32 mm i spirala promjera 20 mm s korakom od 15 cm. Supište i upornjaci temeljeni su na krutim širokim temeljnim pločama. Upornjaci su masivni, služe za oslanjanje rasponskog sklopa s jedne strane, i podupiranje nasipa s druge strane. Na slici 2. prikazana je geometrija mosta i konfiguracija stupišta.



Slika 2. Konfiguracija i geometrija odabranog mosta

5.2. Numerički model

Numerički model koji može obuhvatiti nelinearnosti u elementima i materijalima mosta potreban je za točno kvantificiranje seizmičkih odziva mosta na pomake. Softver SeismoStruct [32] primijenjen je za izvođenje seizmičke ocjene mosta iz primjera. On omogućuje vizualizaciju obrasca oštećenja tijekom različitih potresa. Također se primjenjuje za predviđanje pomaka konstrukcija podvrgnutih statičkom i dinamičkom opterećenju. Softver je primijenjen u prethodnim istraživanjima koja su uključivala ocjenu seizmičkog ponašanja AB mostova. Za most je izrađen trodimenzionalni (3D) model koji uključuje materijalne i geometrijske nelinearnosti. Osim toga, u ovom se istraživanju nelinearnost materijala trebala temeljiti na zakonima ponašanja betonske i čelične armature (izvedene prema istraživanjima Mander i sur. [33] i Menegottoa i Pintoa [34]). Napominje se da su čelični model modificirali Filippou i sur. [35] kako bi uključili Bauschingerov efekt koji bilježi degradaciju krutosti pod cikličnim opterećenjem.

Svojstva betona definirana u softveru SeismoStruct [32] uključuju tlačnu čvrstoću (f_c) od 27 MPa, vlačnu čvrstoću (f_t) od 2,2 MPa, modul elastičnosti (E_c) od 24421,92 MPa, deformaciju

pri vršnom naprezanju (ϵ_c) od 0,002 i specifičnu težinu (γ) od 24 kN/m³. Nadalje, parametri uvedeni u model armaturnog čelika su sljedeći: granica razvlačenja (f_g) od 420 MPa, Youngov modul elastičnosti (E_s) od 200 000 MPa, i omjer između deformacija i ojačavanja (R) od 0,005.

Nelinearnost u stupovima mosta uvedena je pomoću plastičnih elemenata temeljenih na FB formulaciji koja se zasniva na neelastičnoj sili duž vlakna u presjeku. Diskretizacija poprečnog presjeka stupa rezultirala je s 250 vlakana s pet točaka za Gauss-Lobattovu kvadraturnu integraciju.

Naglavna greda stupova modelirana je kao linearni elastični gredni element povezan sa stupovima krutim spojevima u uzdužnom i poprečnom smjeru. Za rasponski sklop primijenjen je linearni elastični gredni element s masom raspoređenom duž osi nosivog sustava mosta, s jednakovrijednim poprečnim presjekom koji uključuje nosače i kolničku ploču. Za spajanje ploče i nosača primijenjen je kruti spoj.

Elastomerni ležajevi modelirani su kao opruge u uzdužnom i u poprečnom smjeru i s nosačima su povezani krutim vezama. Efektivna krutost K_{bear} i rotacijska krutost K_q od 2160 kN/m, odnosno 5000 kN/rad, primijenjene su u računalnom programu SeismoStruct [32].

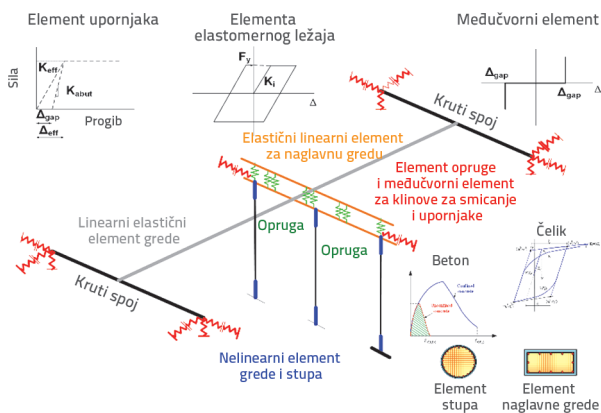
Da bi se opisalo aktivno i pasivno djelovanje upornjaka, primijenjene su tri translacijske i tri rotacijske linearne opruge kako bi se prikazali elementi opruge i elementi prigušenja povezani s rasponskim sklopom. U analizi je primijenjen predloženi model upornjaka koji su razvili Aviram i sur. [36]. U tom je modelu umjesto upornjaka primijenjen element krutog elastičnog okvira i skup translacijskih opruga u uzdužnom, poprečnom i okomitom smjeru. Osim toga, duljina elementa krutog elastičnog okvira bila je jednaka širini rasponskog sklopa. Na krajevima elementa krutog okvira nalaze se po tri translacijske opruge.

Upornjak je pretpostavljen kao savršeno elastičan. Krutost upornjaka izražena je izrazom (9) [37]:

$$K_{abut} = K_w(h_{bw}/1,7) \quad (9)$$

pri čemu je K_{abut} početna krutost upornjaka prilagođena visini zida upornjaka, K_i je početna krutost upornjaka temeljena na rezultatima ispitivanja (11,5 kN/mm/m) (dokument "Caltrans Seismic Design Criteria" preporučuje vrijednost od 14,35 kN za K_i [38]), w je širina, a h_{bw} je visina zida upornjaka. Linearni *gap/hook* element definiran u programu SeismoStruct [32] primijenjen je za modeliranje razmaka između rasponskog sklopa i upornjaka. Protuseizmički blokovi projektirani su na način da ostanu elastični pri seizmičkim pobudama. Pretpostavka je bila da protuseizmički blokovi doprinose krutosti u poprečnom smjeru nakon što poprečni pomak dosegne vrijednost razmaka nosača i bloka. Time se sprječava pretjerano poprečno pomicanje kolničke ploče. Na svakom upornjaku nalaze se po dva protuseizmička bloka. Primijenjen je element opruge, a vrijednost krutosti protupotresnih blokova na stupu iznosi K_{skkey} je 500000 kN/m, a za upornjake je jednaka polovici krutosti blokova na stupu.

Na naglavnoj gredi stupišta nalaze se dvije linije oslanjanja sa po sedam ležajeva. Stoga je uzeto da je ukupna krutost četrnaest puta veća od krutosti pojedinačnog ležaja. Osim toga, u svakom pravcu postoje dva protuseizmička bloka, tj. ukupno ih je četiri. Dva pravca ležajeva pojednostavljena su u jedan. Slika 3. prikazuje analitički model tipskog mosta.



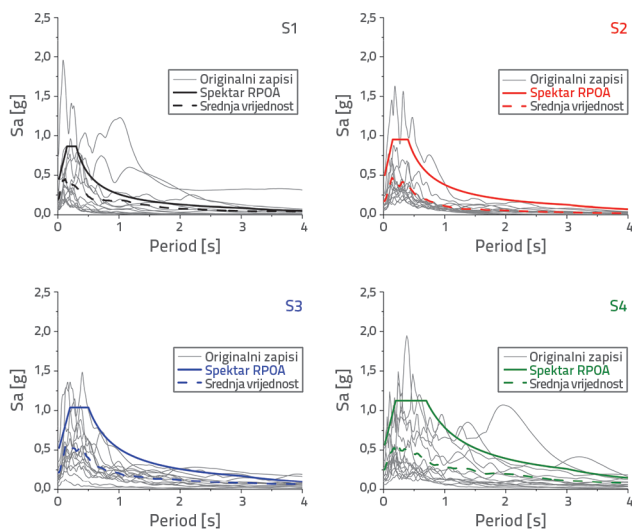
Slika 3. Numerički model mosta

5.3. Odabir gibanja tla

Nužno je odabrati odgovarajuće gibanje tla kako bi se razvile krivulje i plohe ranjivosti za AB stupove mostova. U ovom su istraživanju projektiranje i proračun mostova izvedeni prema alžirskim seizmičkim propisima za projektiranje mostova RPOA 2008 [6].

U Alžiru su seizmičke zone klasificirane kao I, IIa, IIb i III. Nadalje, definirana su četiri tipa tla: S1 (tvrda stijena), S2 (gusto tlo), S3 (meko tlo) i S4 (vrlo meko tlo). Ove se klasifikacije temelje na brzini posmičnog vala V_{s30} .

Šezdeset gibanja tla odabrano je iz baze podataka o potresima NGA-West2 [39] i podijeljeno u četiri skupa (vidjeti sliku 4.).

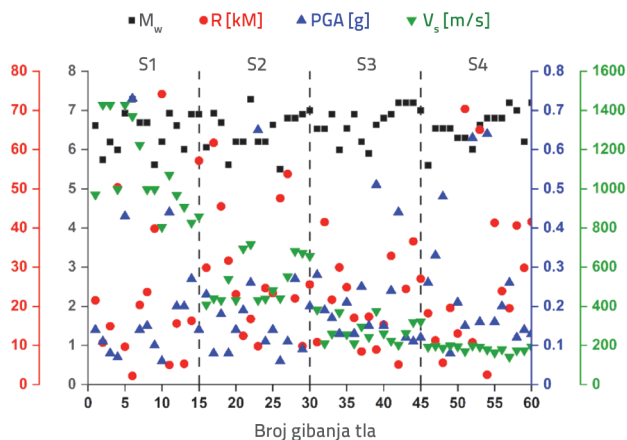


Slika 4. Klasifikacija gibanja tla prema spektru RPOA 2008

Svaki skup sadrži 15 zapisa gibanja tla. Ta gibanja tla odabrana su na temelju:

- brzine posmičnih valova sloja tla od 30 m (V_{s30}): $V_{s30} > 800$ m/s za S1, $400 \text{ m/s} < V_{s30} < 800$ m/s za S2, $200 \text{ m/s} < V_{s30} < 400$ m/s za S3 i $100 \text{ m/s} < V_{s30} < 200$ m/s za S4
- magnitude (M_w): $5 < M_w < 8$
- hipocentralne udaljenosti (R): $5 < R < 100$ km.

Pojedinosti odabranog gibanja tla u smislu veličine M_w , udaljenosti R, PGA i brzine posmičnog vala V_s prikazane su na slici 5.



Slika 5. Klasifikacija gibanja tla prema M_w , R, PGA i V_s

Značajan korak u razvoju krivulja ranjivosti je usklađivanje odabranih zapisa gibanja u smislu spektralnih karakteristika kako bi se osigurao točan prikaz seizmičke opasnosti u odabranim zapisima. Nadalje, ovo spektralno usklađivanje pruža vrlo učinkovit alat za osiguravanje da faktori skaliranja ostanu dosljedni tijekom IDA-e. Za provođenje ovog procesa primijenjen je računalni program SeismoMatch [40]. U tom postupku usklađivanja svaki je akcelerogram prilagođen prema specifičnom ciljanom spektru odgovora bez značajne varijacije u frekvenciji.

Usklađivanje je provedeno u rasponu perioda za koje je usvojeno da je od T_1 do T_2 kako je navedeno u RPOA 2008 [6]. T_1 je donja granica, a T_2 je gornja granica perioda stalnog spektralnog ubrzanja. Periodi T_1 i T_2 ovisno o karakteristikama tla prikazani su u tablici 2. U odjeljcima 4.3.3.2 i 4.3.3.3 (proračun upotrebom vremenskog zapisa i nelinearni proračun upotrebom vremenskog zapisa) RPOA 2008 [6] nisu navedeni nikakvi zahtjevi za scenarij u kojem osnovni period premašuje T_2 vrijednost spektra seizmičkog odziva.

Tablica 2. Vrijednosti T_1 i T_2 u RPOA 2008

Period \ Tip temeljnog tla	S1	S2	S3	S4
T_1 [s]	0,15	0,15	0,20	0,20
T_2 [s]	0,3	0,4	0,5	0,7

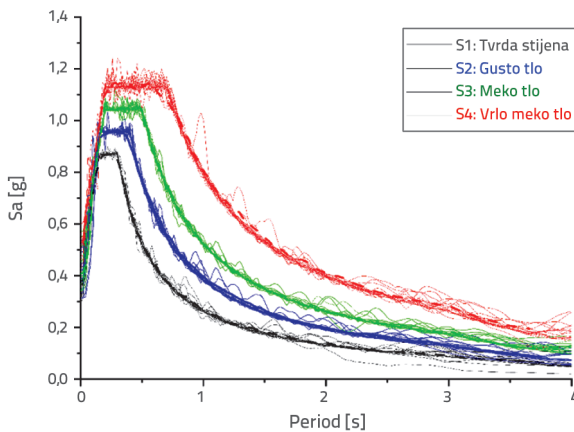
Prema RPOA 2008 [6], normalizirani spektr ubrzanja dan je izrazom (10):

$$S_{ae}(T, \xi)_{(m/s^2)} = \begin{cases} AgS[1 + (T / T_1)(2.5\eta - 1)] & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta AgS & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta AgS(T_2 / T) & T_2 \leq T \leq 3,0 \\ 2,5\eta AgS(3T_2 / T^2) & 3,0 \leq T \end{cases} \quad (10)$$

pri čemu je:

- $S_{ae}(T)$ - elastično spektralno ubrzanje
- T - period vibriranja
- g - gravitacijsko ubrzanje (= 9,81 m/s²)
- A - koeficijent ubrzanja zone
- S - faktor tla
- η - korekcijski faktor za omjer prigušenja ζ .

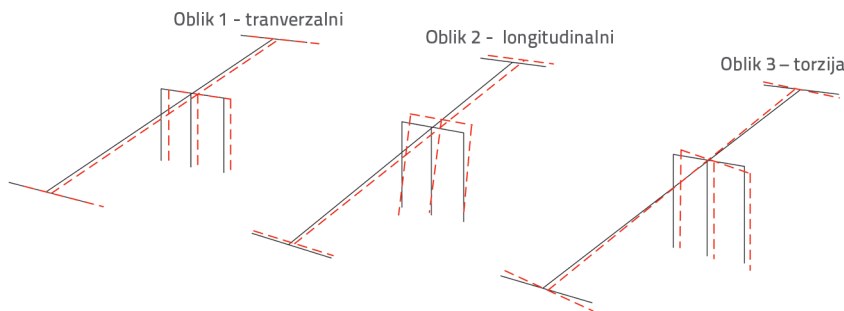
Srednji spektr odziva usklađenih zapisa gibanja tla i ciljni spektr odziva prikazani su na slici 6.



Slika 6. Srednji spektri odziva podudaraju se sa spektrom RPOA 2008

5.4. Modalna analiza

Na modelu mosta provedena je modalna analiza kako bi se ispitale njegove dinamičke značajke. Rezultati modalnog odziva, uključujući modalne periode, poslužili su kao glavni



Slika 7. Vlastiti oblici odabranog mosta

parametri u proračunu upotrebom spektra odziva i proračunu upotrebom vremenskog zapisa. Stoga se seizmički zahtjevi i odziv konstrukcije mosta mogu učinkovito procijeniti.

Slika 7. pokazuje da glavni vlastiti oblici na ispitivanom primjeru uključuju poprečnu i uzdužnu translaciju i globalnu torziju (engl. *global torsion*) mosta. Tablica 3. sažima rezultate modalne analize uključujući periode i frekvencije. Tablica 3. prikazuje vrijednosti perioda za modalnu analizu.

Tablica 3. Rezultati modalne analize

Modalni oblik	Oblik 1	Oblik 2	Oblik 3
Period [s]	1,182	0,743	0,587
Frekvencija [Hz]	0,846	1,346	1,703

6. Analiza ranjivosti

6.1. Skalarnе funkcije ranjivosti

6.1.1. Odabir ispitivanih mjera seizmičkog intenziteta

Ispitani su različiti potencijalni IM-ovi te je odabran prikladniji za analizu kako bi se predvidio odziv AB stupova mostova. Potom je istražen utjecaj optimalnog IM-a na razvoj krivulje ranjivosti. U ovom je istraživanju primijenjen skup od deset najčešće primjenjivanih IM-ova, uključujući parametre amplitude i spektra, kako bi se istražili i odabrali najprikladniji IM-ovi (tablica 4.). IM-ovi se klasificiraju u vrste ubrzanja, brzine i pomake na temelju fizikalnih svojstava. PGA, ASI, $Sa(T_1)$, $Sa_{0,2}$, $Sa_{1,0}$ i la kategorizirani su kao vrsta ubrzanja; PGV, VSI i CAV kategorizirani su kao vrsta brzine, a PGD je kategoriziran kao vrsta pomaka.

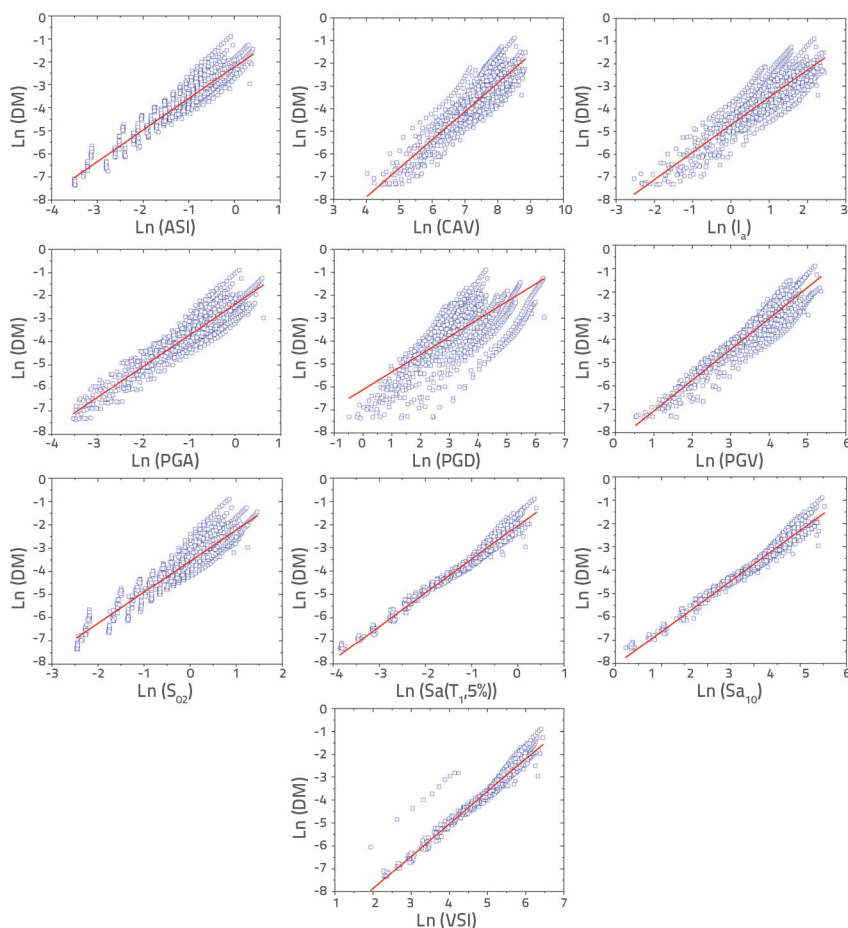
6.1.2. Analiza korelacije

Korelacija razmatranih IM-ova analizirana je linearnom regresijom između ln (DM) i ln (IM). R^2 predstavlja koeficijent korelacije koji pokazuje točnost regresije u jednadžbi (2) i odgovara izračunanom seizmičkom zahtjevu za AB stupove mosta. Slika 8. prikazuje regresijsku analizu između deset odabranih seizmičkih IM-ova i DM-ova.

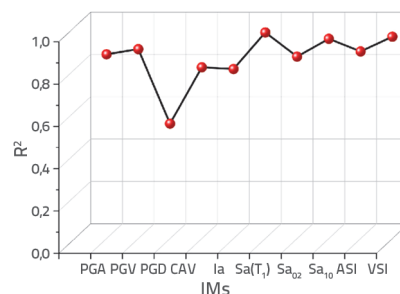
Pretpostavljeno je da optimalni IM ima veće R^2 vrijednosti od ostalih IM-ova. Za 10 IM-ova navedenih u tablici 4, izračunane R^2 vrijednosti za DM prikazane su na slici 9. $Sa(T_{1, 5\%})$ je najkoreliraniji IM među ispitanim. Slijede VSI i ASI. Odgovarajuće R^2 vrijednosti su 0,974, 0,954, odnosno 0,944. Utvrđeno je da su R^2 vrijednosti približno jednake. Nadalje, najniža korelacija IM-a s DM-om (vidi sliku 9.) za PGD je s $R^2 = 0,543$. Slijedi ga I_a i CAV ($R^2 = 0,8$ odnosno 0,81).

Tablica 4. Mjere intenziteta primijenjene u analizi

Br.	Simbol	Jednadžba	Jedinica	Opis
1	PGA	$\max(\ddot{u}(t))$	g	Vršno ubrzanje tla [41]
2	PGV	$\max(\dot{u}(t))$	m/s	Vršna brzina tla [41]
3	PGD	$\max(u(t))$	m	Vršno pomicanje tla [41]
4	CAV	$\int_0^{t_0} (\ddot{u}(t)) dt$	m/s	Kumulativna apsolutna brzina [41]
5	I_a	$\frac{\cos^{-1} \xi}{g\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^{t_0} (\ddot{u}(t)) dt$	m/s	Ariasov intenzitet [42]
6	$Sa(T_1, 5\%)$	$S_o(T_1, \xi)$	g	Spektralno ubrzanje u prvom periodu
7	$Sa_{0.2}$	$S_o(T_{0.2}, \xi)$	g	Spektralno ubrzanje za 0,2 s
8	$Sa_{1.0}$	$S_o(T_{1.0}, \xi)$	g	Spektralno ubrzanje za 1,0 s
9	ASI	$VSI = \int_{0.1}^{0.5} S_o(T, \xi = 5\%) dT$	$g*s$	Intenzitet spektra ubrzanja [43]
10	VSI	$VSI = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi = 5\%) dT$	m	Intenzitet spektra brzine [43]



Slika 8. Regresijska analiza za 10 IM-ova



Slika 9. Regresijski parametar R² za 10 IM-ova

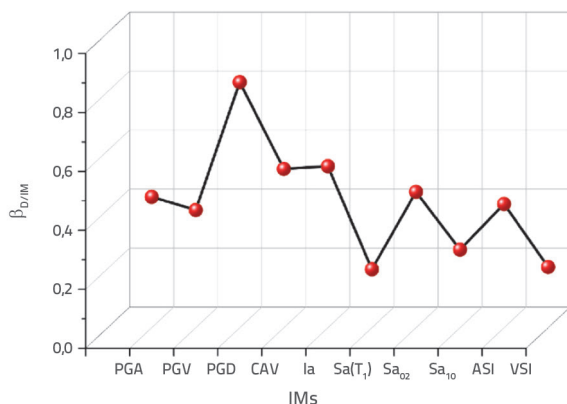
6.1.3. Analiza učinkovitosti

Učinkovit IM za dani DM za određenu svrhu ima potencijal smanjiti varijacije u ocjeni seizmičkog zahtjeva. Niža standardna devijacija $\beta_{D/IM}$ (vidi jednadžbu (11)) označava učinkovitiji IM:

$$\beta_{D/IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\ln(DM_i) - \ln(aIM_i^b)]^2}{N-2}} \quad (11)$$

Izračunane standardne devijacije $\beta_{D/IM}$ za 10 IM-ova prikazane su na slici 10. Iz navedenog se zaključuje da je $Sa(T_1, 5\%)$ najučinkovitiji IM s najnižom standardnom devijacijom (0,198). Osim toga, VSI i $Sa_{1.0}$ su slijedeći najučinkovitiji

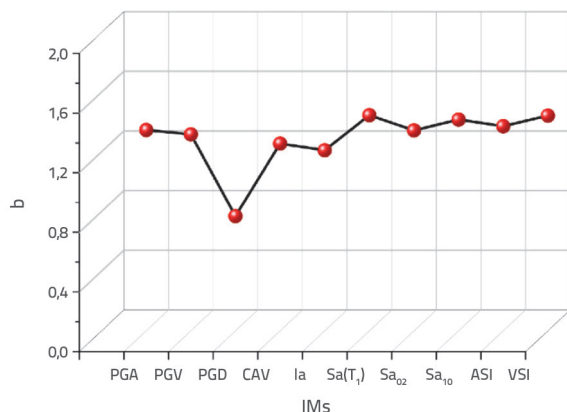
IM-ovi među ocijenjenima. Za druge IM-ove, $\beta_{D/IM}$ vrijednosti su 0,206 odnosno 0,399. PGD ima najnižu učinkovitost s najvećom standardnom devijacijom (0,832) među ispitanim IM-ovima. Slijede ga I_a i CAV (0,547 odnosno 0,538).



Slika 10. Parametar regresije $\beta_{D/IM}$ za 10 IM-ova

6.1.4. Analiza praktičnosti

Mjera ovisnosti zahtjeva za odziv konstrukcije (DM) na IM je praktičnost. Nagib b u jednadžbi (2) primjenjuje se za prikaz te ovisnosti. Većinom odgovara samo modelu linearne regresije. Viša vrijednost b označava da ispitivani IM značajnije pridonosi zahtjevu za odzivom konstrukcije. Stoga je ovaj IM praktičniji. Izračunani nagibi b za ispitane IM-ove prikazani su na slici 11. Slika pokazuje da su $Sa(T_1, 5\%)$, VSI i Sa_{10} najpraktičniji IM-ovi. Njihove vrijednosti b su 1,445, 1,442, odnosno 1,346. PGD, I_a i CAV su najmanje praktični od ispitanih IM-ova, s vrijednostima b od 0,769, 1,211, odnosno 1,255.



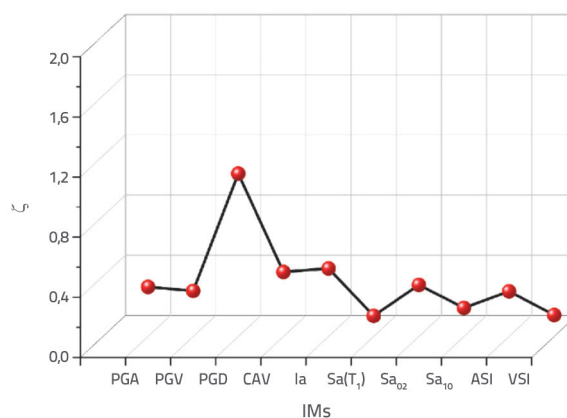
Slika 11. Parametar regresije b za 10 IM-ova

6.1.5. Analiza sposobnosti

Prema izrazu (12), sposobnost ζ predstavlja složenu mjeru praktičnosti i učinkovitosti. Niža vrijednost ζ obično se osigurava s učinkovitijim IM-om.

$$\zeta = \frac{\beta_{D/IM}}{b} \quad (12)$$

Rezultirajući izračun deset ispitanih IM-ova prikazan je na slici 12. Može se zaključiti da je $Sa(T_1, 5\%)$ najspособniji IM, što potvrđuje najniža vrijednost od 0,137. Slijede VSI i Sa_{10} s vrijednostima od 0,143 odnosno 0,303. PGD je mjera s najmanjom vrijednošću sposobnosti (1,082) među ispitanim IM-ovima. Slijede ga I_a i CAV (0,452 odnosno 0,428).



Slika 12. Parametar regresije ζ za 10 IM-ova

6.1.6. Odabir optimalnih mjera intenziteta

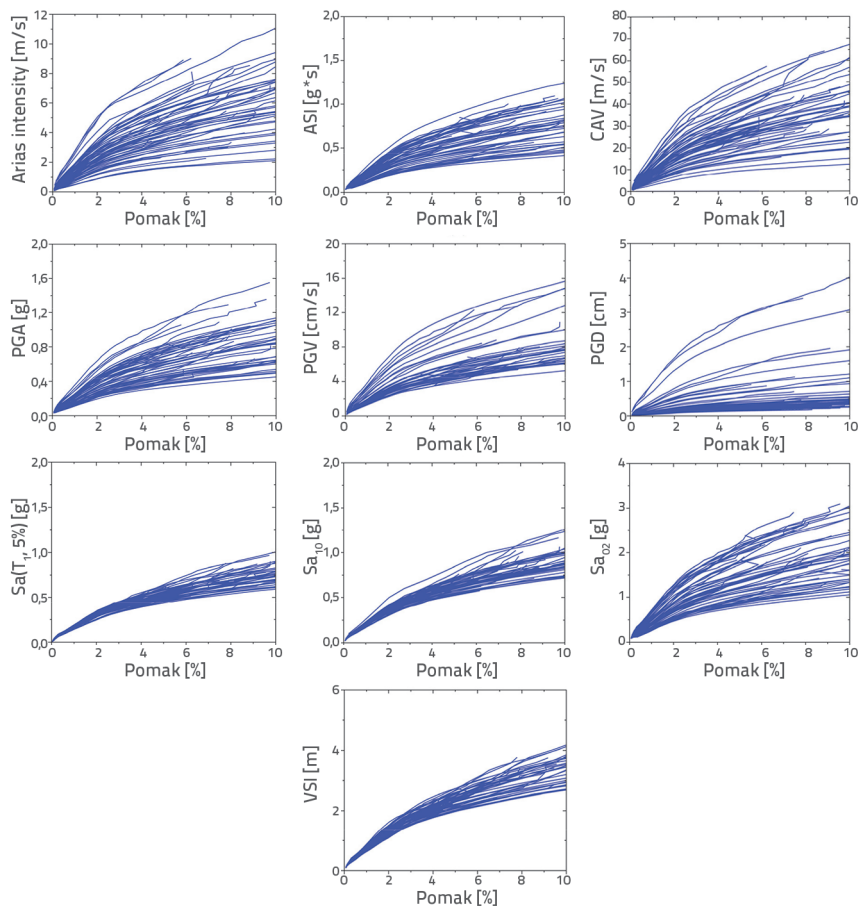
Tablica 5 otkriva da su tri IM-a najkoreliranija, najučinkovitija, najpraktičnija i najspособnija na temelju prethodnih analiza. $Sa(T_1, 5\%)$, VSI i Sa_{10} pokazali su se najboljim seizmičkim IM-ovima za analizu ranjivosti odabranih AB stupova mostova. U ovom je istraživanju optimalni IM bio $Sa(T_1, 5\%)$. Imao je najveću korelaciju, učinkovitost, praktičnost i sposobnost.

Tablica 5. Parametri regresije

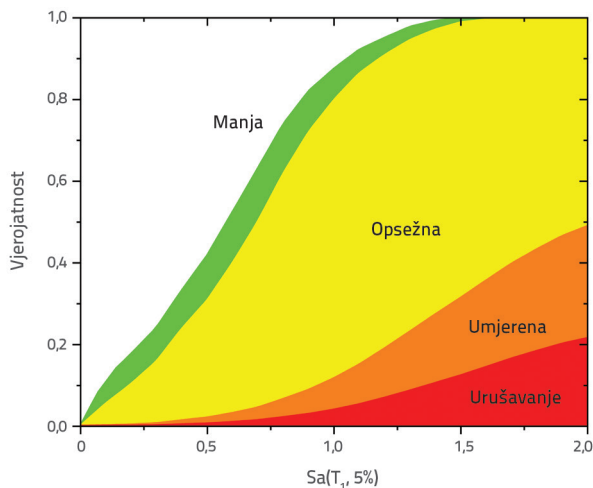
IM	A	b	R ²
PGA	2,382	1,346	0,871
PGV	8,391	1,317	0,9
PGD	6,120	0,769	0,543
CAV	12,908	1,255	0,809
I_a	4,702	1,211	0,801
$Sa(T_1, 5\%)$	2,046	1,445	0,974
Sa_{02}	3,583	1,343	0,86
Sa_{10}	2,304	1,416	0,884
ASI	2,225	1,371	0,944
VSI	10,702	1,442	0,954

6.1.7. Predložene skalarne funkcije ranjivosti

U skladu s tablicom 4, provedena je seizmička analiza ranjivosti i ocjena štete uzrokovane potresom tipskih AB stupova mostova



Slika 13. IDA krivulja odabranih AB stupova mostova za 10 IM-ova



Slika 14. Skalarnе krivulje ranjivosti za AB stupove mostova za Sa(T_r, 5%)

implementacijom IDA [22]. IDA se primjenjuje za ocjenu ponašanja mostova i elemenata izloženih potresima [29, 44, 45]. Niz podataka o gibanju tla unosi se u model s rastućim intenzitetom dok se ne identificira oštećenje konstrukcije. Odnos između IM-a i DM pokazatelja oštećenja konstrukcije

može se uočiti na IDA krivuljama. Ukupna duljina koraka (engl. *step size*) odabranog gibanja tla u ovom radu bila je 2 g, inkrement koraka 0,1 g. Na slici 13 prikazane su IDA krivulje odabranih AB stupova mosta prema IDA proračunu 10 ispitanih IM-ova.

Na temelju slike 13. i tablice 5. može se zaključiti da je Sa(T_r, 5%) najprikladniji za skalarnu funkciju ranjivosti.

Srednja vrijednost i standardna devijacija funkcija ranjivosti za stupove mosta u četiri granična stanja/stanja oštećenja prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Srednja vrijednost i standardna devijacija funkcija ranjivosti

Oštećenje	Srednja vrijednost (λ)	Standardna devijacija (σ)
Malo	0,58	0,198
Umjereno	0,62	0,198
Vrlo teško	1,02	0,195
Urušavanje	2,65	0,191

Krivulje ranjivosti za manja, umjerena, vrlo teška oštećenja i urušavanje u smislu skalarnog IM-a Sa(T_r, 5%) prikazane su na slici 14.

6.2. Vektorske funkcije ranjivosti

Pretpostavimo da se IM vektor sastoji od IM₁ i IM₂ te da ln (IM) slijedi linearni odnos s ln (EDP). Stoga se ovaj odnos može prikazati kao višestruki linearni regresijski model:

$$\ln(EDP) = b_0 + b_1(IM_1) + b_2(IM_2) \tag{13}$$

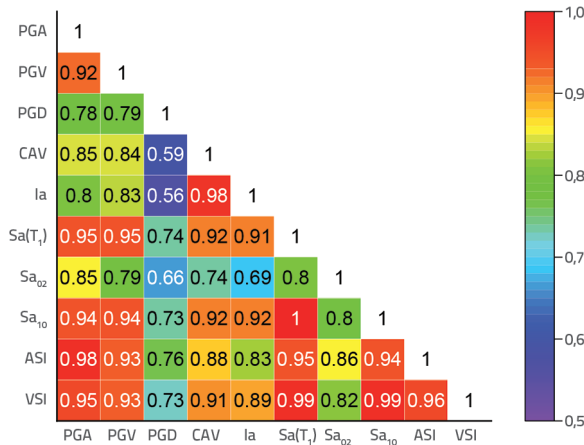
Pearsonovi koeficijenti korelacije između različitih IM-ova određeni su pomoću jednadžbe (14). R² je statistička mjera koja odražava snagu predviđanja regresijske jednadžbe i mjeri njezin uspjeh:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum [\ln(EDP_i) - \ln(\hat{EDP})]^2}{\sum [\ln(EDP_i) - \ln(\hat{EDP})]^2} \tag{14}$$

pri čemu je ln(\hat{EDP}) srednja vrijednost logaritamske regresije EDP-a; ln (EDP_i) je logaritamska vrijednost uzorka EDP-a; a b₀, b₁ i b₂ predstavljaju koeficijente regresije.

Korelacije dobivene analizom višestruke linearne regresije prikazane su na slici 15. Slika prikazuje različite boje koje odgovaraju koeficijentima korelacije. IM-ovi čije su vrijednosti

približne jedan, odabrani su kao vektori. Parovi $Sa(T_1)$ – Sa_{10} , $Sa(T_1)$ – VSI , i Sa_{10} – VSI pokazuju visoke korelacije (1, 0,99, odnosno 0,99). Parovi $PGD-I_a$, $PGD-CAV$ i $PGD-Sa_{02}$ pokazuju slabe korelacije (0,56, 0,59, odnosno 0,66).



Slika 15. Pearsonov koeficijent višestruke korelacije

Načelo odabira dva IM-a je osigurati da su oba u snažnoj korelaciji s faktorom sigurnosti. Suprotno tome, korelacija između dviju mjera trebala bi biti minimalna. Ova dva uvjeta većinom se ne mogu zadovoljiti istovremeno [19].

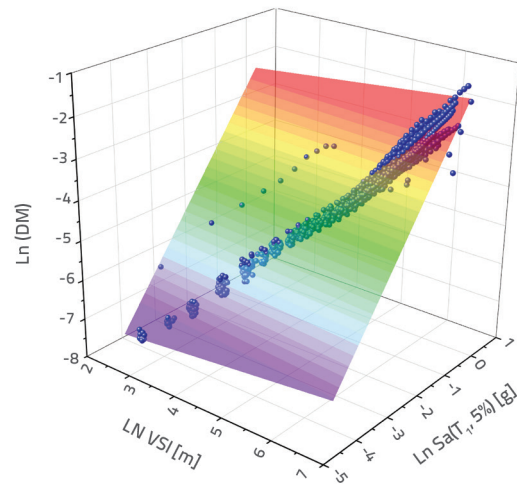
Za ovo istraživanje, na temelju navedenog i uzimajući u obzir ova dva zahtjeva na sintetički način, $Sa(T_1, 5\%)$ i VSI određeni su kao spektar IM-a odnosno brzina IM-a. Stoga su $Sa(T_1, 5\%)$ i VSI odabrani kao vektorske vrijednosti prema navedenom principu odabira dva IM-a.

Mjerenje napretka oštećenja DM -a sa $Sa(T_1, 5\%)$ i VSI za ispitivane AB stupove mosta prikazana je na slici 16.

Točke raspršenja prikazuju odgovarajuće vrijednosti DM -a pod rastućim intenzitetom za tipске AB stupove mosta koji su ispitani pomoću odabranih gibanja tla. Konturni prikaz pokazuje regresijsku plohu za vrijednosti DM -a. To je izraženo u jednadžbi (15) s $R^2 = 0,991$ i standardnom devijacijom $\beta_{DIM} = 0,154$:

$$\ln DM = 2,582 + 1,32 \ln Sa(T_1, 5\%) + 1,311 \ln VSI \quad (15)$$

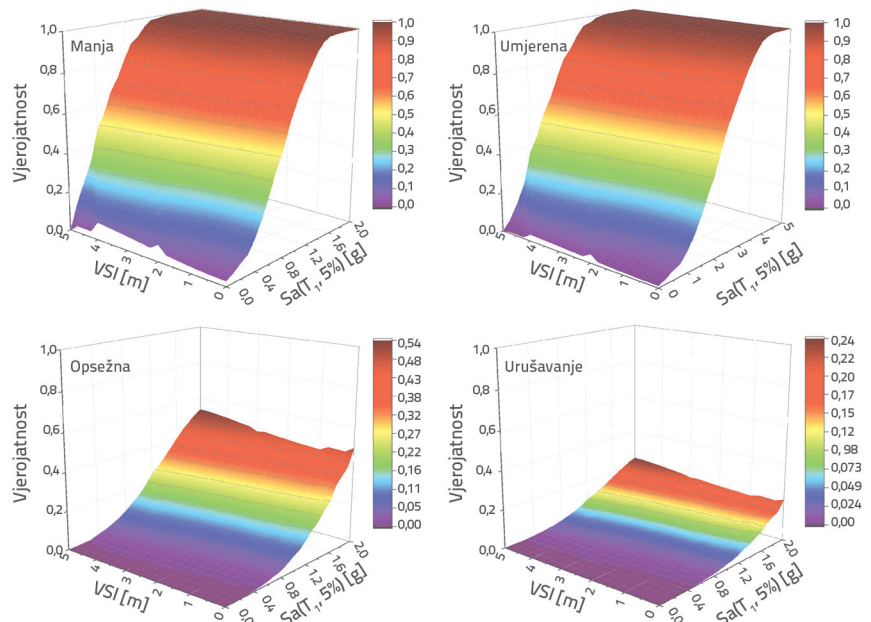
R^2 vrijednosti u slučaju vektorskog IM-a ($Sa(T_1, 5\%), VSI$) neznatno su više od onih u slučaju skalarnog IM-a (tj. 0,974 za $Sa(T_1, 5\%)$ ili 0,954 za VSI). To pokazuje da vektorski IM $Sa(T_1, 5\%), VSI$ ima bolji korelacijski odnos s DM -om.



Slika 16. Evolucija mjere oštećenja (DM) sa $Sa(T_1, 5\%)$ i VSI

6.2.1 Predložene vektorske funkcije ranjivosti

Postoje razne prednosti vektorskih IM-ova u usporedbi sa skalarnim IM-ovima za ocjenu seizmičkog zahtjeva primjenom probabilističkog pristupa. Jedan od njih je da vektorski IM značajno smanjuje disperziju funkcije ranjivosti. Suprotno tome, uzimanje u obzir samo parametre intenziteta i skalarnih krivulja ranjivosti može pružiti različite vjerojatnosti prekoračenja koje ovise o odabranom IM-u. Spajanje dvaju IM-ova pruža priliku za razvoj prikladne funkcije ranjivosti u smislu standardnih krivulja ranjivosti koje se mogu uključiti u procjenu seizmičkog rizika. Plohe ranjivosti za mala, umjerena, vrlo teška oštećenja i urušavanje za vektorski IM ($Sa(T_1, 5\%), VSI$) prikazane su na slici 17.



Slika 17. Vektorske plohe ranjivosti za tipске AB stupove mostova temeljene na $Sa(T_1, 5\%)$ i VSI

6.2.2. Usporedbe skalarnih i vektorskih funkcija ranjivosti

U ovom je radu učinak drugog IM-a ispitivan na temelju ploha ranjivosti. Jednovarijatne krivulje ranjivosti izrađene su s konstantnim drugim IM-om (VSI). Osim toga, uspoređene su rezultatna i skalarna krivulja ranjivosti (konstruirana prema prvom IM (Sa(T₁), 5 %)).

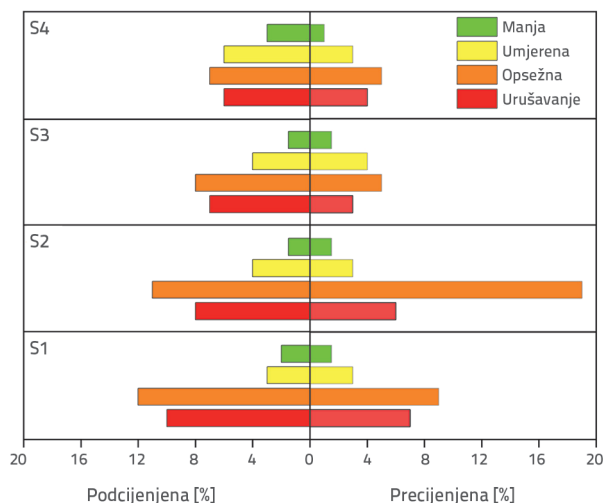
Na slici 18 prikazana je usporedba ploha ranjivosti i krivulja ranjivosti za manja, umjerena i vrlo teška oštećenja te urušavanje. U ovom je slučaju VSI konstanta postavljena na 1, 2, 3, 4, odnosno 5 m. Okomite crte predstavljaju vrijednosti Sa(T₁) s donjom granicom konstantnog spektralnog perioda ubrzanja T₁ što odgovara četirima klasama tla S1, S2, S3 i S4 navedenim u RPOA 2008 [6].

Značajan učinak drugog IM-a na vjerojatnost oštećenja numerički je prikazan u rezultatima. Osim toga, krivulje ranjivosti dobivene skalarnom analizom mogu podcijeniti ili precijeniti vjerojatnost oštećenja (kao što je prikazano na slici 18).

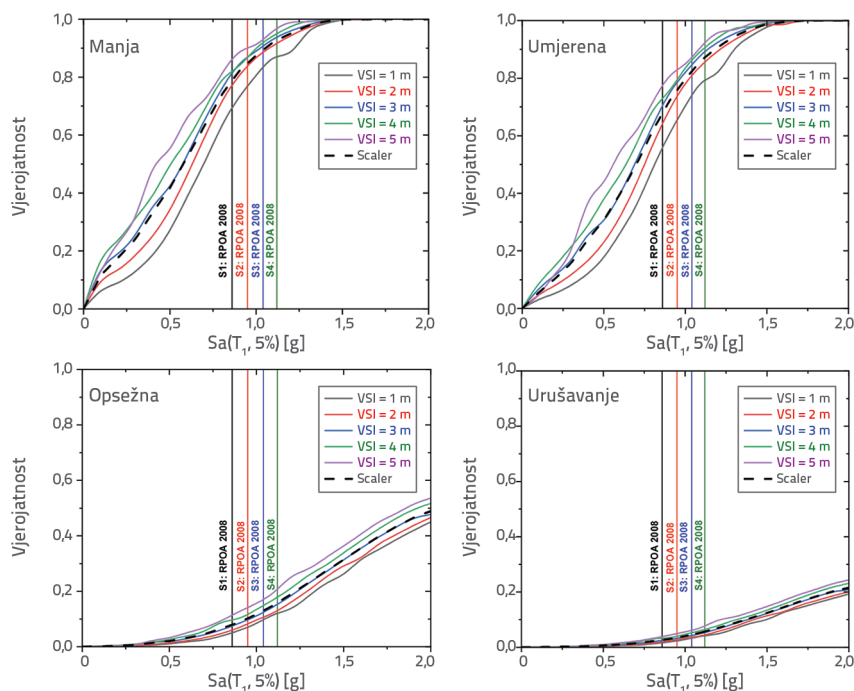
Krivulje ranjivosti mogu pokazati podcijenenu vjerojatnost oštećenja u slučaju potresa s VSI > 3 m. Također generiraju precijenenu vjerojatnost oštećenja pri seizmičkim aktivnostima s VSI < 3 m za AB stup mosta.

Istraživanje AB stupova mostova također je pokazalo da vektorske krivulje ranjivosti sadrže bolje i relevantnije informacije za ocjenu seizmičkog ponašanja u usporedbi sa skalarnim krivuljama ranjivosti.

Slika 19. sažima podcjenjivanje i precjenjivanje vjerojatnosti četiriju stanja oštećenosti između skalarnu krivulju ranjivosti i vektorske plohe ranjivosti za četiri klase tla S1, S2, S3 i S4 navedene u propisima RPOA 2008 [6]. Visoko precijenjena vrijednost od 19 % uočena je kod vrlo teških oštećenja koja odgovaraju tlu S2, a visoko podcijenjena vrijednost od 12 % uočena je kod vrlo teških oštećenja koja odgovaraju tlu S1.



Slika 19. Podcjenjivanje i precjenjivanje vjerojatnosti četiriju stanja oštećenosti



Slika 18. Usporedba plohe ranjivosti i krivulje ranjivosti

7. Zaključak

U ovom je istraživanju ispitana ranjivost tipskih alžirskih AB stupova mostova. Seizmički zahtjevi izračunani su numeričkom analizom na temelju 60 gibanja tla. Oni su naknadno skalirani kako bi odgovarali spektru RPOA 2008.

Odabran je skup od 10 IM-ova (mjera intenziteta) i procijenjen za više mjera uključujući korelaciju, učinkovitost, praktičnost i sposobnost izvođenjem velikog broja regresijskih analiza između IM-ova i DM-ova.

Primjenom ovog pristupa preporučeno je optimalni IM za analizu seizmičke ranjivosti AB stupova mostova. Zatim su izvedene vektorske funkcije ranjivosti. To je pokazalo relevantnost drugog IM-a u analizi ranjivosti mosta. Iz ovog istraživanja mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Korelacija, učinkovitost, praktičnost i sposobnost ispitani su na temelju 10 odabranih IM-ova za tipski AB stup

- mosta. Utvrđeno je da su $Sa(T_1, 5\%)$, VSI i Sa_{10} bolji IM-ovi za skalarnu analizu ranjivosti. Osim toga, $Sa(T_1, 5\%)$ utvrđen je kao optimalni IM na temelju njegove visoke korelacije, učinkovitosti, praktičnosti i sposobnosti u usporedbi s drugim IM-ovima.
- Razvijene su krivulje ranjivosti pomoću skalarnih vrijednosti za optimalni IM $Sa(T_1, 5\%)$. Vektorski IM-ovi temeljeni na funkcijama ranjivosti razvijeni su za AB stupove mostova kako bi se odredila vjerojatnost prekoračenja različitih stanja oštećenosti kao funkcija dva IM-a ($Sa(T_1, 5\%)$, VSI). Za razliku od skalarnog IM-a, vektorski IM koji sadržava dva IM-a, $Sa(T_1, 5\%)$ i VSI, pokazao je bolju korelaciju i učinkovitost prema seizmičkom zahtjevu.
 - Učinak na seizmičko ponašanje zbog drugog IM-a ne odražava se u potpunosti skalarnom krivuljom ranjivosti. Stoga vjerojatnosti oštećenja mogu biti podcijenjene ili precijenjene. Iako se ovo istraživanje može smatrati univerzalno primjenjivim, model koji je u istraživanju korišten za dobivanje seizmičkih zahtjeva najprimjenjiviji je za ispitivani most. U usporedbi sa skalarnim IM-om, izvedeni vektorski IM-ovi osiguravaju veću korelaciju između IM-ova i DM-a i minimiziraju multikolinearnost među vektorskim IM-ovima.

Zahvala

Ovo je istraživanje podržao Nacionalni istraživački centar za potresno inženjerstvo, CGS, Alžir.

LITERATURA

- [1] Zhou, X., Zhang, R., Zhao, K., Zhang, G., Wu, B.: An experimental study of impact performance of RC piers with different reinforcement ratios, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 6, pp. 465-479, <https://doi.org/10.14256/JCE.2305.2018>
- [2] Milić, I., Ivanković, A. M., Syrkov, A., Skokandić, D.: Bridge failures, forensic structural engineering and recommendations for design of robust structures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 7, pp. 717-736, <https://doi.org/10.14256/JCE.3234.2021>
- [3] Yilmaz, M., Calamak, M., Yanmaz, A. M.: Reliability-based evaluation of scour around dual bridge piers, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 9, pp. 739-747, <https://doi.org/10.14256/JCE.2363.2018>
- [4] Kovačević, M., Ivanišević, N., Petronijević, P., Despotović, V.: Construction cost estimation of reinforced and prestressed concrete bridges using machine learning, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 1, pp. 1-13, <https://doi.org/10.14256/JCE.2738.2019>
- [5] Wang, C.: Overview of integrated health monitoring system installed on cable-stayed bridge and preliminary analysis of results, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 6, pp. 591-604, <https://doi.org/10.14256/JCE.2940.2020>
- [6] RPOA: Règles Parasismiques Applicables au Domaine des Ouvrages d'Art. Document Technique Règlementaire. Ministère des Travaux Publics, Algiers. Alegria, 2008
- [7] Zelaschi, C., Monteiro, R., Pinho, R.: Critical Assessment of Intensity Measures for Seismic Response of Italian RC Bridge Portfolios, *Journal of Earthquake Engineering*, 23 (2019) 6, pp. 980-1000, <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1342293>
- [8] Padgett, J.E., Nielson, B.G., DesRoches, R.: Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37 (2008) 5, pp. 711-725, <https://doi.org/10.1002/eqe.782>
- [9] Wei, B., Yang, T., Jiang, L., He, X.: Effects of uncertain characteristic periods of ground motions on seismic vulnerabilities of a continuous track-bridge system of high-speed railway, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16 (2018) 9, pp. 3739-3769, <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0326-8>
- [10] Wei, B., Li, C., He, X.: The Applicability of Different Earthquake Intensity Measures to the Seismic Vulnerability of a High-Speed Railway Continuous Bridge, *International Journal of Civil Engineering*, 17 (2019) 7, pp. 981-997, <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0347-3>
- [11] Zhong, J., Jeon, J.S., Shao, Y.H., Chen, L.: Optimal Intensity Measures in Probabilistic Seismic Demand Models of Cable-Stayed Bridges Subjected to Pulse-Like Ground Motions, *Journal of Bridge Engineering*, 24 (2019) 2, pp. 4018118, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001329](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001329)
- [12] Jiang, L., Zhong, J., He, M., Yuan, W.: Optimal Seismic Intensity Measure Selection for Isolated Bridges under Pulse-Like Ground Motions, *Advances in Civil Engineering*, (2019) 3, pp. 1-22, <https://doi.org/10.1155/2019/3858457>
- [13] Chen, X.: System Fragility Assessment of Tall-Pier Bridges Subjected to Near-Fault Ground Motions, *Journal of Bridge Engineering*, 25 (2020) 3, pp. 4019143, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001526](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001526)
- [14] Kehila, F., Remki, M., Zourgui, N.H., Kibboua, A.: Bechtoula H. Optimal intensity measure of post-tensioned girder highway bridge using fragility curves, *Earthquakes and Structures*, 20 (2021) 6, pp. 681-696, <https://doi.org/10.12989/eas.2021.20.6.681>
- [15] Bayat, M., Daneshjoo, F., Nistico, N.: A novel proficient and sufficient intensity measure for probabilistic analysis of skewed highway bridges, *Structural Engineering and Mechanics*, 55 (2015) 6, pp. 1177-1202, <https://doi.org/10.12989/SEM.2015.55.6.1177>
- [16] Bayat, M., Ahmadi, H.R., Kia, M., Cao, M.: Probabilistic seismic demand of isolated straight concrete girder highway bridges using fragility functions, *Advances in concrete construction*, 7 (2019) 3, pp. 183-189, <https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.3.183>
- [17] Seyedi, D.M., Gehl, P., Douglas, J., Davenne, L., Mezher, N., Ghavamian, S.: Development of seismic fragility surfaces for reinforced concrete buildings by means of nonlinear time-history analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39 (2010), pp. 91-108, <https://doi.org/10.1002/eqe.939>
- [18] Gehl, P., Seyedi, D.M., Douglas, J.: Vector-valued fragility functions for seismic risk evaluation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11 (2013) 2, pp. 365-384, <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9402-7>
- [19] Li, Z., Li, Y., Li, N.: Vector-intensity measure based seismic vulnerability analysis of bridge structures, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13 (2014) 4, pp. 695-705, <https://doi.org/10.1007/s11803-014-0273-6>

- [20] Baker, J.W., Cornell, C.A.: Vector-valued Intensity Measures Incorporating Spectral Shape for Prediction of Structural Response, *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (2008) 4, pp. 534-554, <https://doi.org/10.1080/13632460701673076>
- [21] Tothong, P., Luco, N.: Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36 (2007) 13, pp. 1837-1860, <https://doi.org/10.1002/eqe.696>
- [22] Vamvatsikos, D., Cornell, C.A.: Incremental dynamic analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31 (2002) 3, pp. 491-514, <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- [23] Choi, E., DesRoches, R., Nielson, B.: Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones, *Engineering Structures*, 26 (2004) 2, pp.187-199, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.09.006>
- [24] Pan, Y., Agrawal, A.K., Ghosn, M., Alampalli, S.: Seismic Fragility of Multispan Simply Supported Steel Highway Bridges in New York State. II: Fragility Analysis, Fragility Curves, and Fragility Surfaces, *Journal of Bridge Engineering*, 15 (2010) 5, pp. 462-472, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000055)
- [25] Ramanathan, K., DesRoches, R., Padgett, J.E.: A comparison of pre- and post-seismic design considerations in moderate seismic zones through the fragility assessment of multispan bridge classes, *Engineering Structures*, 45 (2012), pp. 559-573, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.004>
- [26] Jara, J.M., Galván, A., Jara, M., Olmos, B.: Procedure for determining the seismic vulnerability of an irregular isolated bridge, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9 (2013) 6, pp.516-528, <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.576255>
- [27] 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>
- [28] 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, <https://doi.org/10.1193/112512EQS337M>
- [29] Kehila, F., Kibboua, A., Bechtoula, H., Remki, M.: Seismic performance assessment of R.C. bridge piers designed with the Algerian seismic bridges regulation, *Earthquakes and Structures*, 15 (2018) 6, pp. 701-713, <https://doi.org/10.12989/eas.2018.15.6.701>
- [30] 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. 804-832, <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.912243>
- [31] Dutta, A., Mander, J.B.: Seismic fragility analysis of highway bridges, *Proceedings of the center-to-center project workshop on earthquake engineering in transportation systems*, 1999.
- [32] SeismoStruct: A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures. Available from <http://www.seissoft.com>. Last accessed August 2022.
- [33] 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, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [34] 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.
- [35] Filippou, F.C., Popov, E.P., Bertero, V.V.: Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints, *Earthquake Engineering Research Center, University of California*, 1983.
- [36] 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, <https://doi.org/10.1007/s11803-008-1008-3>
- [37] Hemaidi Zourgui, N., Kibboua, A., Taki, M.: Using full bridge model to develop analytical fragility curves for typical concrete bridge piers, *GRADEVINAR*, 70 (2018) 6, pp. 519-530, <https://doi.org/10.14256/JCE.2137.2017>
- [38] Caltrans, SDC: *Caltrans Seismic Design Criteria version 1.4*. California Department of Transportation. Sacramento, California, 2006.
- [39] PEER - Pacific Earthquake Engineering Research Center.: *PEER NGA-West2 Database*. Report 2013/03. Berkeley. California, 2013.
- [40] SeismoMatch: A computer program for spectrum matching of earthquake records, Available from <http://www.seissoft.com>. Last accessed August 2022.
- [41] Kramer, S.L.: *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1996.
- [42] Arias, A.: A measure of earthquake intensity, in: *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, edited by: Hansen, R. J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 438-483, 1970.
- [43] Housner G.W. *Proceedings of the Symposium on Earthquakes and Blast Effects on Structures 1952*.
- [44] Tehrani P, Mitchell D. Seismic Response of Bridges Subjected to Different Earthquake Types Using IDA. *Journal of Earthquake Engineering*, 17 (2013) 3, pp.423-448, <https://doi.org/10.1080/13632469.2012.760500>
- [45] Mosleh, A., Jara, J., Razzaghi, M.S., Varum, H.: Probabilistic Seismic Performance Analysis of RC Bridges, *Journal of Earthquake Engineering*, 24 (2018) 11, pp.1704-1728, <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1477637>