

Primljen / Received: 22.9.2024.

Ispravljen / Corrected: 21.6.2025.

Prihvaćen / Accepted: 15.7.2025.

Dostupno online / Available online: 10.10.2025.

Faktori modifikacije seizmičkog odziva za sandučaste gredne mostove primjenom metode postupnog guranja koja uključuje torzijske oblike titranja

Autori:



¹Mr.sc. **Soumia Aouissi**, dipl.ing.građ.
s.aouissi@univ-djelfa.dz



¹Doc.dr.sc. **Mouloud Ouanani**, dipl.ing.građ.
m.ouanani@univ-djelfa.dz
Autor za korespondenciju



²Doc.dr.sc. **Khaled Sandjak**, dipl.ing.građ.
k.sandjak@univ-boumerdes.dz



³Doc.dr.sc. **Amar Louzai**, dipl.ing.građ.
Amar.louzai@yahoo.fr

¹ Sveučilište Ziane Achour, Alžir
Odjel za građevinarstvo
Laboratorij za razvoj mehanike i materijala (LDMM)

² Sveučilište M'Hamed Bougara Boumerdes, Alžir
Tehnološki fakultet, Odjel za građevinarstvo
Laboratorij za seizmičko inženjerstvo i strukturnu dinamiku, E.N.P.

³ Sveučilište Mouloud Mammeri iz Tizi-Ouzoua, Alžir
Građevinski fakultet, Odjel za građevinarstvo
Laboratorij za okoliš i razvoj (LGEA)

Prethodno priopćenje

Soumia Aouissi, Mouloud Ouanani, Khaled Sandjak, Amar Louzai

Faktori modifikacije seizmičkog odziva za sandučaste gredne mostove primjenom metode postupnog guranja koja uključuje torzijske oblike titranja

U ovom su radu predstavljeni rezultati numeričkih istraživanja faktora modifikacije seizmičkog odziva (R) za alžirske sandučaste gredne mostove sa stupovima jednakih i nejednakih visina primjenom predložene metode postupnog guranja, koja uključuje torzijske oblike titranja. U prvom je dijelu odabran SGM u sklopu projekta Alžirske nacionalne agencije za autoceste radi procjene komponenti R-faktora u poprečnome smjeru. Provedena je konvencionalna metoda postupnog guranja (CPA), pri čemu je primijenjena modalna raspodjela bočnih opterećenja uporabom prvog vlastitog oblika elastičnog sustava, jednolika raspodjela bočnih opterećenja i gornja granična raspodjela bočnih opterećenja, kao i predložena metoda postupnog guranja. Rezultati CPA-e i predložene metode postupnog guranja za referentni SGM ispitani su u odnosu na komponente R-faktora, uključujući povećanu nosivost (Ω) i globalnu duktilnost ($R-\mu$), te su uspoređeni s rezultatima dobivenima primjenom inkrementalne dinamičke analize (IDA). Rezultati upućuju na znatno podudaranje između predložene metode postupnog guranja i inkrementalne dinamičke analize.

Ključne riječi:

sandučasti gredni mostovi (SGM), torzijske vibracije, predložene metode postupnog guranja i inkrementalne dinamičke analize (IDA), R-faktor, povećana čvrstoća (Ω), globalna duktilnost ($R-\mu$)

Research Paper

Soumia Aouissi, Mouloud Ouanani, Khaled Sandjak, Amar Louzai

Seismic modification factors for box girder bridges using a proposed pushover technique incorporating torsional vibration modes

This paper presents the results of numerical investigations on seismic modification factors (R) for algerian box girder bridges (BGBs) with both equal and unequal pier heights, using a proposed pushover technique that incorporates torsional vibration modes. In the first part, the BGB referenced in a project by the Algerian Highway National Agency is selected to evaluate the components of the R-factor in the transverse direction. Conventional pushover analysis (CPA), employing the elastic first mode, uniform, and upper-bound lateral load patterns, as well as the proposed pushover technique, is conducted. The results of CPA and the proposed pushover technique for the reference BGB are examined in terms of R-factor components, including overstrength (Ω) and global ductility ($R-\mu$), and are compared with those obtained using the incremental dynamic analysis (IDA) technique. The findings indicate strong agreement between the proposed pushover technique and the IDA technique.

Key words:

box girder bridges (BGBs), torsional vibration modes, the proposed pushover and IDA techniques, R-factor, over-strength (Ω), global ductility ($R-\mu$)

1. Uvod

Dugi sandučasti gredni mostovi ključni su elementi nacionalnih prometnih mreža, a njihova uporabivost tijekom znatnih gibanja tla uslijed potresa ključna je za sigurnost putnika. U Alžiru, gdje postoji velika potreba za prometnom infrastrukturom [1, 2], ti su se tipovi mostova brzo proširili zahvaljujući svojoj estetskoj privlačnosti i ekonomskoj isplativosti. Taj razvoj potaknut je nizom čimbenika, uključujući stručnost u primjeni metode konzolne gradnje, potrebu za premošćivanjem većih raspona, učinkovitost građevnih tehnologija te jednostavnost održavanja. Faktor modifikacije odziva (R-faktor) ključni je element u seizmičkome projektiranju mostova i služi za procjenu proračunskih potresnih sila koje djeluju na mostovne konstrukcije. Taj faktor odražava sposobnost konstrukcije da podnese neelastične deformacije uz očuvanje nosivosti. Trošenjem energije smanjuju se seizmičke sile uzete u obzir tijekom projektiranja, čime se povećava otpornost na potrese i smanjuju troškovi gradnje. U mostovnim konstrukcijama R-faktor ovisi o nosivom sustavu. Naprimjer, kod kontinuiranih sandučastih grednih mostova kontinuitet konstrukcije i visoka torzijska krutost povećavaju trošenje energije, što rezultira višim vrijednostima R-faktora. Suprotno tome mostovi sa slobodno oslonjenim gredama pokazuju manju duktilnost i povećanu čvrstoću, što dovodi do nižih vrijednosti R-faktora. Mostovi s izolacijom, koji primjenjuju izolacijske uređaje za poboljšanje trošenja energije, postižu znatno veće vrijednosti R-faktora. R-faktor, koji izražava omjer sile koju bi most razvio kada bi ostao u elastičnom području za proračunsko seizmičko djelovanje i ukupne bočne sile, predstavlja ključni parametar u projektiranju. Označen je kao (q) u Europskoj normi Eurokod EC8 [3], a naziva se faktorom modifikacije odziva (R) u američkoj normi UBC-u [4] i alžirskoj normi za seizmičko projektiranje mostova [5]. Procjena tog parametra ima ključnu ulogu u seizmičkome projektiranju sandučastih grednih mostova te u provjeri i kalibraciji seizmičkih propisa za projektiranje. Zato je njegova procjena ključna ne samo za osiguranje sigurnosti i pouzdanosti mostova te vrste u praksi, već i za unaprjeđenje inženjerskih normi te za razvoj učinkovitijih propisa za seizmičko projektiranje.

Analitička procjena R-faktora obično se provodi primjenom nelinearne statičke metode postupnog guranja (eng. *Nonlinear Static Pushover Analysis* - NLSPA) cijele mostovne konstrukcije. Riječ je o nelinearnoj statičkoj analizi kojom se obuhvaćaju dinamički učinci. Ta se metoda široko primjenjuje za procjenu seizmičkog ponašanja mostova [6-8] jer predstavlja računalno učinkovitiji pristup u odnosu na inkrementalnu dinamičku analizu (IDA), koja zahtijeva velike računalne resurse i reprezentativni skup seizmičkih zapisa za događaje visokog intenziteta [9-11]. Brojni su istraživači procjenjivali komponente R-faktora za mostovne konstrukcije poput povećane čvrstoće i globalne duktilnosti primjenom NLSPA metoda [12-14]. Naprimjer, Sai i sur. [13] ispitivali su R-faktor pod različitim uvjetima seizmičkih zona za mostove sa stupovima nejednakih visina te su utvrdili

da se i duktilnost i povećana čvrstoća smanjuju s rastom faktora seizmičke zone.

Osim toga Muhammad i sur. [14] odredili su R-faktor za tri mosta primjenom metode NLSPA i izvijestili o vrijednostima u rasponu od 4,5 do 5 u uzdužnome i poprečnome smjeru. Michael i sur. [15] istraživali su seizmički odziv izoliranih mostova i zaključili da je, u usporedbi s vrijednostima navedenima u normi AASHTO, R-faktor niži za neizolirane mostove.

Međutim, nekoliko istraživanja [16, 17] pokazalo je da se doprinos viših oblika titranja može primijeniti za kvantificiranje R-faktora mostovnih konstrukcija. Naprimjer, Ehsan i Shoostari [16] predložili su novu prilagođenu metodu postupnog guranja kako bi se u obzir uzeli učinci viših oblika titranja u točnoj procjeni seizmičkog odziva mostova. Preporučili su primjenu metode pri ocjenjivanju seizmičke otpornosti mostova u inženjerske svrhe. Alessandro i sur. [17] uveli su inkrementalnu metodu postupnog guranja za normalne i nepravilne mostove, uključujući više oblike titranja putem multimodalne (MPA) i jednoličke (UPA) raspodjele opterećenja, zajedno s metodom IDA. Utvrdili su da MPA generira krivulju sposobnosti nosivosti koja se gotovo u cijelosti podudara s krivuljom dobivenom primjenom IDA metode. Zato NLSPA metoda mora biti posebno prilagođena i za pravilne i za nepravilne mostove kako bi se uzeli u obzir viši oblici titranja, osobito torzijski, omogućujući preciznije određivanje R-faktora i ukupnoga dinamičkog ponašanja mostova.

Kao što je istaknuto u prethodnim istraživanjima, torzijski oblici titranja općenito su isključeni iz analiza primjenom metode postupnog guranja koje se primjenjuju za procjenu R-faktora za mostove. To je pitanje osobito važno za sandučaste gredne mostove sa stupovima nejednakih visina, gdje je doprinos torzijskih oblika titranja značajan. Osim toga postojeći propisi za seizmičko projektiranje ne sadržavaju posebne odredbe koje bi se odnosile na R-faktor za mostove te kategorije. Taj jaz stvara nesigurnost i u projektiranju i u ocjeni postojećih mostova, jer inženjeri konstruktori nemaju standardizirani pristup za uključivanje R-faktora u svoje proračune. Nedostatak takvih smjernica može dovesti do nedosljednih praksi i potencijalno ugroziti sigurnost i pouzdanost tih konstrukcija.

U prvome dijelu rada prikazani su glavni rezultati numeričkog istraživanja komponenti R-faktora, uključujući faktor povećane čvrstoće i globalnu duktilnost, za referentni sandučasti gredni most. Primijenjena je metoda NLSPA, koja uključuje uobičajenu metodu postupnog guranja (eng. *Conventional Pushover Analysis* - CPA) te predloženu metodu postupnog guranja. Rezultati tih metoda uspoređeni su s rezultatima dobivenima nelinearnom IDA metodom, temeljeno na skupu od osam povijesnih zapisa potresa s intenzitetima u rasponu od 0,22 g do 0,60 g.

U drugome dijelu provedena je analiza osamnaest prednapetih sandučastih grednih mostova s kontinuiranim sustavom, sa stupovima jednakih i nejednakih visina, koji predstavljaju pravilne i nepravilne konfiguracije, radi procjene R-faktora u poprečnome smjeru primjenom predložene metode postupnog guranja. Dobivene vrijednosti R-faktora zatim su uspoređene s preporučenim vrijednostima iz Alžirskog propisa za seizmičko

projektiranje cestovnih mostova (RPOA). Preporuke za revidiranje tog faktora bit će dostavljene alžirskome ministarstvu javnih radova radi daljnjeg razmatranja i moguće implementacije.

2. Opis referentnoga sandučastog grednog mosta

Referentni sandučasti gredni most, projektiran pod okriljem Alžirske nacionalne agencije za autoceste, upotrebljava se za procjenu komponenti faktora modifikacije odziva (R-faktora) za autocestovne SGM-ove primjenom NLSPA metode, uključujući CPA, predložene metode postupnog guranja i IDA metodu. Kontinuirani sandučasti most, koji je predmet istraživanja, povezuje dva velika gospodarska središta, gradove Tizi-Ouzou i Bejaiu, u sjevernome Alžiru.

Most ima ukupnu duljinu od 248,80 m i sastoji se od kontinuiranog sandučastog nosača preko četiri raspona, s dvama srednjim rasponima od 81,80 m i dvama krajnjim rasponima od 42,60 m, a kao što je to prikazano na slici 1.a. Taj strateški most (kategorija važnosti 1.) smješten je na čvrstome tlu (S2), s vršnim ubrzanjem tla (PGA) od 0,33 g u skladu sa seizmičkim propisima za projektiranje mostova na autocestama [5]. Rasponska konstrukcija mosta ima ravnu tlocrtnu konfiguraciju, ukupne širine 13,80 m i stalne visine 3,32 m (slika 1.b). Momenti inercije poprečnog presjeka kolnika oko dviju osi u ravnini i torzijski moment inercije oko uzdužne osi prikazani su na slici 1.b.

Uzdužno prednapeti betonski (PB) rasponski sklop oslanja se na dva armiranobetonska (AB) stupa nejednake visine, 15,95 m i 26,65 m, te na središnji stup visine 50,35 m. Rasponski sklop dodatno je poduprt elastomernim ležajevima postavljenima na

svaki od dvaju upornjaka koji se preko ležajne klupe oslanjaju na pilote.

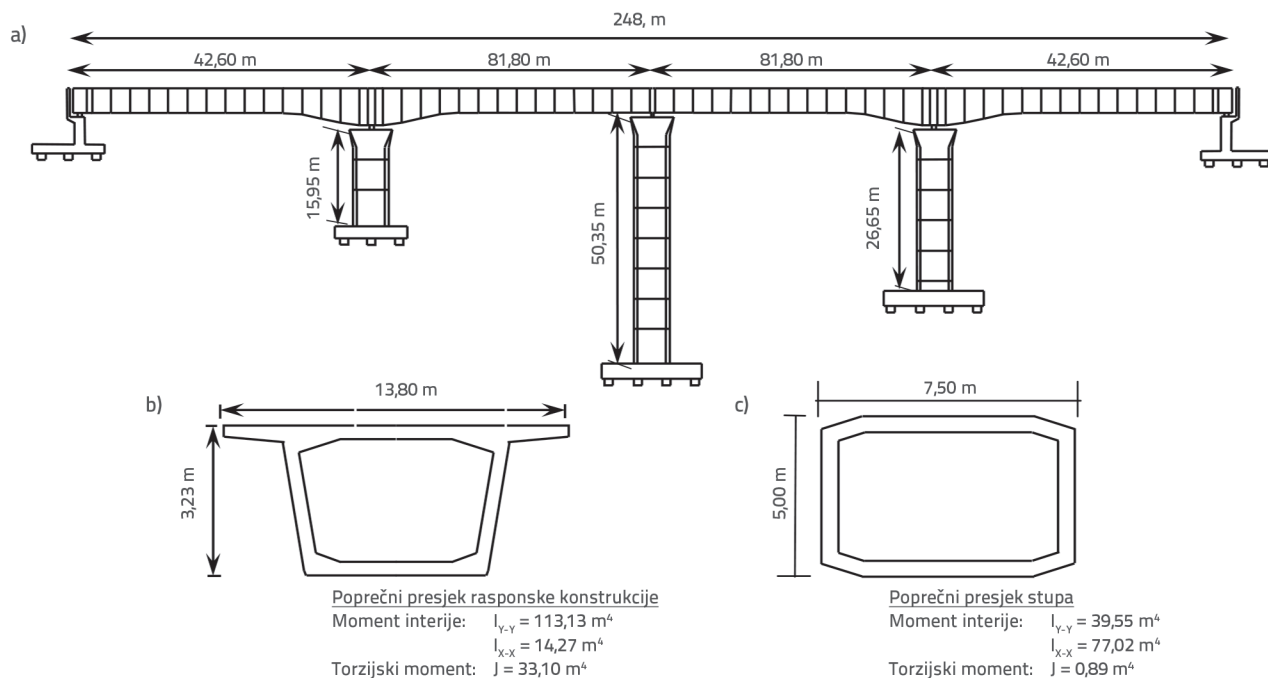
Stupovi imaju istovjetne šuplje poprečne presjeke dimenzija 5,00 × 7,50 m, s debljinom stijenke od 0,30 m (vidi sliku 1.c). Izvedeni su na betonskim pilotima i čine monolitnu cjelinu s rasponskom konstrukcijom. Zbog krutosti sustava temelja interakcija tla i konstrukcije (SSI) nije uzeta u obzir u ovome istraživanju.

3. Modeliranje referentnog SGM-a

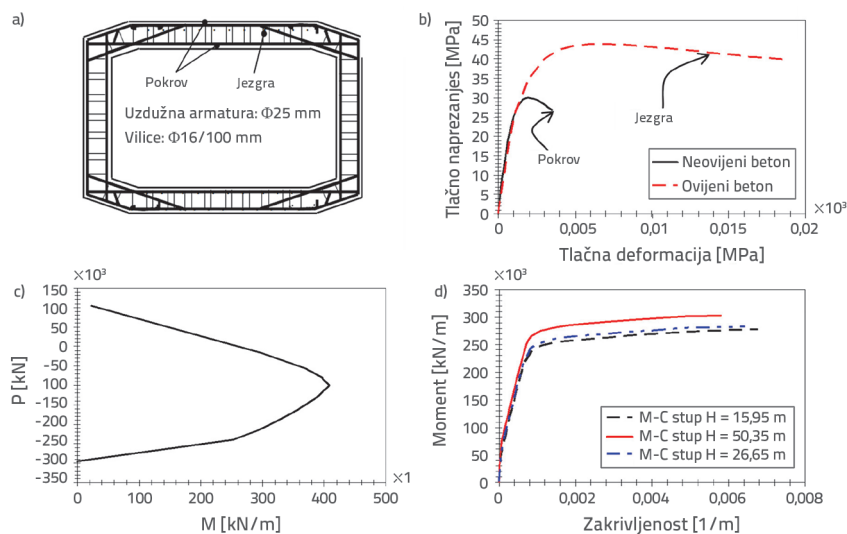
Za referentni sandučasti gredni most (SGM), koji je prikazan na slici 1., primjenom proračunskog programskog paketa CSI Bridge napravljen je nelinearni numerički model s koncentriranim masama i štapnim elementima [18]. Rasponska konstrukcija mosta modelirana je elastičnim štapnim elementima, jer se očekivalo da će se tijekom seizmičkog opterećenja ostati u elastičnom području, a stupovi su modelirani nelinearnim štapnim elementima s materijalnim svojstvima koja odgovaraju armiranom betonu u raspucalom stanju. Stupovi, koji se smatraju najkritičnijim elementima mosta tog tipa, modelirani su s elastičnim ponašanjem uz predviđanje dvaju plastičnih zglobova koncentriranih na vrhu stupa i pri njegovu dnu. Područja plastičnih zglobova određena su krivuljama odnosa momenta i zakrivljenosti na temelju Caltransova modela [19]. Duljina plastičnog zgloba (L_p) izračunana je prema izrazima navedenima u [20].

$$L_p = 0,08 \cdot L + 0,022 \cdot f_y \cdot d_{bl} \geq 0,044 \cdot f_y \cdot d_{bl} \quad [\text{mm, MPa}] \quad (1)$$

gdje L predstavlja duljinu stupova, a f_y i d_{bl} označavaju granicu popuštanja odnosno promjer uzdužnih armaturnih šipki.



Slika 1. Opis referentnog sandučastog grednog mosta (SGM): a) shematski prikaz referentnog SGM-a; b) tipični poprečni presjek rasponske konstrukcije SGM-a; c) tipični poprečni presjek SGM-ovih stupova



Slika 2. Rezultati analize presjeka stupa: a) geometrija poprečnog presjeka stupa; b) odnos naprežanja i deformacije neovijenog i ovijenog betona; c) dijagram interakcije uzdužne sile i momenta savijanja (P-M); d) dijagram odnosa momenta i zakrivljenosti (M-C)

Tlačne čvrstoće betona primijenjenog u ovome istraživanju za seizmičko projektiranje iznosile su 30 MPa za AB stupove i 35 MPa za PB rasponski sklop mosta nakon 28 dana. Projektni parametri uzdužnih armaturnih šipki (Ø25) jesu sljedeći: granica popuštanja $f_y = 500$ MPa, modul elastičnosti $E_s = 200000$ MPa i vlačna čvrstoća $F_u = 550$ MPa. Pretpostavljeno je da se poprečna armatura (vilice) sastoji od šipki promjera 16 mm (Ø16) postavljenih na razmaku od 100 mm u oba stupa. U analizu uključena su vertikalna opterećenja, koja uključuju stalna opterećenja i 20 % pokretnih opterećenja [3, 5].

Nelinearnost armiranobetonskih (AB) stupova prikazana je plastičnim zglobovima na krajevima stupova mosta, uzimajući u obzir P-Δ efekt. Pripadajući čelični armaturni profili bili su podijeljeni u dvije zone:

- područje zaštitnog sloja
- područje betonske jezgre (slika 2.a).

Za analizu presjeka stupova mosta usvojen je Manderov model betona [21] (slika 2.b). Oba kraja stupova mosta modelirana su primjenom momentnih (P-M) zglobova u plastičnim područjima kako bi se prikazao nelinearni seizmički odziv AB mostova pri snažnim seizmičkim djelovanjima (slika 2.c).

Prema EC8 [3], dominantan način otkazivanja u konstrukcijama otpornima na potrese jest savijanje, što osigurava duktilno ponašanje i poboljšanu otpornost na potrese, za razliku od otkazivanja uslijed smicanja ili izvijanja, koji je obično nagliji i teže ga je kontrolirati. Međutim, način sloma smicanjem može znatno utjecati na ukupni seizmički odziv kratkih stupova. Ti su stupovi posebno osjetljivi na lom uslijed smicanja u podnožju, gdje posmično naprežanje može premašiti posmičnu nosivost materijala. Posmična nosivost kratkog stupa općenito ovisi o geometriji njegova poprečnog presjeka, tlačnoj čvrstoći betona i količini ugrađene armature.

Iako su niski stupovi obično projektirani tako da se slome pri savijanju, ne treba zanemariti ulogu posmičnog ponašanja. Proračunom se mora osigurati da je posmična nosivost dovoljna za podnošenje seizmičkih djelovanja. Odgovarajuća poprečna armatura i detaljna analiza raspodjele posmičnih naprežanja ključne su za sprječavanje loma smicanjem uslijed seizmičkih djelovanja.

Za simulaciju ponašanja naprežanja, deformacije ovijenog i neovijenog betona te dijagrama P-M interakcije i momenta te zakrivljenosti (M-C) (slika 2.d) primijenjen je opći programski paket za proračun konstrukcija *CSI Bridge* [18]. Rezultati analize presjeka stupa prikazani su na slici 2.

Rasponski sklop mosta je u bočnome i vertikalnome smjeru učvršćen na

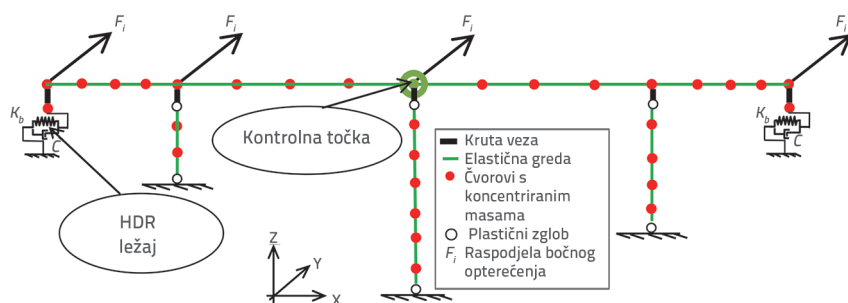
svakome od dvaju upornjaka koji su preko ležajne klupe oslonjeni na pilote, dok je njegovo uzdužno kretanje regulirano fleksibilnošću uređaja s gumenim ležajevima s visokim prigušenjem (eng. *high-damping rubber bearing* - HDRB) ugrađenih na svaki upornjak. Mehanička svojstva HDRB uređaja, odnosno početna krutost, granica popuštanja i krutost nakon popuštanja, određuju se u skladu s postupcima navedenima u smjernicama za projektiranje [22, 23] za nelinearnu analizu.

Translacijske mase (m) u trima globalnim smjerovima mosta, koji odgovaraju X, Y i Z osi, dodijeljene su svakome čvoru nelinearnoga numeričkog modela referentnog SGM-a. Treba istaknuti da torzijski oblici titranja i rezultati analize primjenom metode postupnog guranja u poprečnome smjeru mosta također ovise o torzijskim masama oko uzdužne osi mosta, što je iskazano sljedećim izrazom:

$$m_{x,i} = \frac{L_{trib} \cdot d_w^2}{12} \quad (2)$$

gdje m_i predstavlja translacijsku masu rasponskog sklopa i stupova pridruženih čvoru (i), L_{trib} pridruženu duljinu dodijeljenu razmatranome čvoru, a d_w^2 kvadrat širine rasponskog sklopa mosta.

Nelinearni proračunski model referentnoga sandučastog grednog mosta (SGM), uključujući i raspodjelu bočnog opterećenja za analizu primjenom metode postupnog guranja i praćenu kontrolnu točku, razvijen je primjenom metode konačnih elemenata (FEM), a kako je to prikazano na slici 3. Metoda postupnog guranja mosta provedena je metodom kontroliranih pomaka, pri čemu je konstrukcija mosta postupno pomicala sve dok nije postignuta unaprijed zadana granica. Taj pristup omogućuje praćenje nelinearnoga omekšavanja konstrukcije praćenjem pomaka na referentnim točkama kao što su gornji čvor ili sredina rasponskog



Slika 3. Shematski prikaz nelinearnoga numeričkog modela s raspodjelom bočnog opterećenja za metodu postupnog guranja referentnoga sandučastog grednog mosta (SGM)

sklopa, što olakšava identifikaciju promjena u konstrukciji i potencijalnih točaka loma.

U ovome istraživanju srednji rasponski sklop povezan sa središnjim stupom odabran je kao kontrolna točka praćenja u metodi postupnog guranja. Ta je lokacija smatrana kritičnom za određivanje faktora seizmičke modifikacije (R) sandučastih grednih mostova. Praćenje te točke omogućilo je precizniju procjenu odziva konstrukcije, omogućujući identifikaciju zone maksimalne oštećljivosti i praćenje napredovanja oštećenja tijekom analize.

4. Nelinearna statička analiza postupnim guranjem (NLSPA)

4.1. Uobičajena metoda postupnog guranja

Uobičajena metoda postupnog guranja, a kao što je to prikazano u literaturi [11, 24], predstavlja statički nelinearni postupak u kojemu se intenzitet opterećenja konstrukcije jednolično povećava prema unaprijed definiranoj referentnoj raspodjeli opterećenja. Ta metoda olakšava identifikaciju uzastopnog nastajanja oštećenja u graničnim stanjima, uključujući pukotine, plastične zglobove i lom konstrukcijskih elemenata.

U ovome istraživanju nelinearna statička analiza postupnim guranjem (NSPA) provedena je primjenom triju unaprijed definiranih raspodjela bočnog opterećenja za procjenu komponenti R-faktora.

4.1.1. Modalna raspodjela bočnih opterećenja uporabom prvog vlastitog oblika elastičnog sustava

Ta metoda pretpostavlja da je odziv konstrukcije u cijelosti određen prvim vlastitim oblikom i primjenjiva je kada omjer sudjelujuće mase premašuje 80 % ukupne mase. U tome modelu primijenjene poprečne sile proporcionalne su umnošku mase i oblika prvog oblika titranja [25, 26], što se izražava kao

$$F_i = M \cdot \Phi_n^1 \quad (3)$$

gdje M predstavlja matricu mase, a Φ_n^1 oblik prvog vlastitog oblika u danome smjeru.

4.1.2. Jednolika raspodjela bočnog opterećenja

Taj model temelji se na jednolikoj raspodjeli bočnih sila razmjerno pripadnoj masi u svakoj točki te se može izraziti na sljedeći način [22]:

$$f_i = m_i = \rho_{RC} \cdot A \cdot L_{trib} \quad (4)$$

gdje ρ_{RC} označava gustoću betona, A površinu poprečnog presjeka nosive konstrukcije, a L_{trib} je prethodno definiran u izrazu (2).

4.1.3. Gornja granična raspodjela bočnih opterećenja

U ovoj metodi postupnog guranja samo prva dva oblika titranja utječu na seizmički odziv konstrukcije [27]. Vektor raspodjele bočnih opterećenja u bočnome smjeru rasponskog sklopa primjenom gornje granične raspodjele opterećenja $F_{i,UB}$ izražen je na sljedeći način:

$$F_{i,UB} = \omega_1^2 m_i \Phi_{i1} + \omega_2^2 m_i \Phi_{i2} \cdot \left(\frac{q_2}{q_1} \right) \quad (5)$$

gdje ω_i i Φ_i ($i = 1$ i 2) označavaju vlastite frekvencije i odgovarajuće oblike titranja za prvi i drugi vlastiti oblik, izraz (q_2/q_1) gornju granicu omjera doprinosa drugog vlastitog oblika, danog sljedećim izrazom:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\Gamma_2 \cdot D_2}{\Gamma_1 \cdot D_1} \quad (6)$$

gdje Γ_n ($n = 1, 2$) i D_n ($n = 1, 2$) predstavljaju modalne faktore doprinosa i spektralne pomake, izvedene iz spektra odziva elastičnog pomaka.

4.2. Predložena metoda postupnog guranja

Ta metoda uključuje torzijske oblike titranja u nelinearnu statičku metodu postupnog guranja, koje se obično zanemaruju u uobičajenim metodama postupnog guranja. To se postiže kombiniranjem modalnih sila rasponskog sklopa u poprečnome smjeru (f_{yij}) i torzijskih momenata ($M_{\theta ij}$) oko uzdužne osi. Na temelju spektralne dinamičke analize [28] modalna bočna sila i torzijski moment u svakome čvoru nelinearnoga analitičkog modela mosta za razmatrane modove izraženi su na sljedeći način:

$$f_{yij} = \Gamma_{yij} \cdot \Phi_{yij} \cdot m_{yij} \cdot S_{ayij} \quad (7)$$

$$M_{\theta ij} = \Gamma_{\theta ij} \cdot \Phi_{\theta ij} \cdot I_{\theta ij} \cdot S_{ayij} \quad (8)$$

gdje su Γ_{y_j} modalni faktor doprinosa j^{tog} moda za pobudu u poprečnome smjeru (tj. po Y-osi), Φ_{yij} i $\Phi_{\theta ij}$ vektori oblika j -tog oblika titranja u bočnome smjeru i pri torziji oko uzdužne osi (tj. po X-osi), S_{ayj} spektralno ubrzanje povezano s j -tim oblikom titranja uslijed pobude u poprečnome smjeru, a $I_{\theta i}$ torzijska masa i-tog čvora rasponskog sklopa mosta.

Modalna poprečna sila (SS_{yij}) u bočnome smjeru i ukupni torzijski moment ($SM_{\theta ij}$) na svakome i-tome čvoru nosive konstrukcije mosta, koji odgovaraju svakome obliku titranja, određuju se pomoću izraza (9) i (10).

$$SS_{yij} = \sum_{k=i}^N f_{y_{kj}} \quad (9)$$

$$SM_{\theta ij} = \sum_{k=i}^N M_{\theta_{kj}} \quad (10)$$

$f_{y_{kj}}$ i $M_{\theta_{kj}}$ označavaju sile u poprečnome smjeru i torzijske momente k -tog čvora rasponskog sklopa mosta, odnosno povezane sa svakim j -tim oblikom titranja, pri čemu je N broj čvorova rasponskog sklopa mosta.

Kombinirani modalni posmik (CSS_{y_i}) na svakome i-tom čvoru raspona u bočnome translacijskom smjeru i kombinirani modalni ukupni torzijski moment (CSM_{θ_i}) i-tog čvora oko uzdužne osi mosta procjenjuju se primjenom pravila korijena iz zbroja kvadrata (engl. *Square Root of the Sum of the Squares* - SRSS) prema izrazima (11) i (12).

$$CSS_{y_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m SS_{y_{ij}}^2} \quad (11)$$

$$CSM_{\theta_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m SM_{\theta_{ij}}^2} \quad (12)$$

gdje je m broj modova primijenjenih za procjenu ukupnog odziva.

Komponente vektora opterećenja u pojedinim čvorovima mosta u izrazima (13) i (14) određene su oduzimanjem ukupne poprečne sile i ukupnoga torzijskog momenta susjednih čvorova rasponskog sklopa, prema izrazima (13) i (14):

$$\begin{cases} F_{y_i} = CSS_{y_i} - CSS_{y_{i+1}} & i < N \\ F_{y_i} = CSS_{y_i} & i = N \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} M_{\theta_i} = CSM_{\theta_i} - CSM_{\theta_{i+1}} & i < N \\ M_{\theta_i} = CSM_{\theta_i} & i = N \end{cases} \quad (14)$$

Komponente uzorka opterećenja i uzduž bočnog smjera pobude (Y-os) procjenjuju se pomoću izraza (15) i (16).

$$\bar{F}_{y_i} = F_{y_i} \cdot \frac{\Delta V_{by}}{\sum F_{y_i}} \quad (15)$$

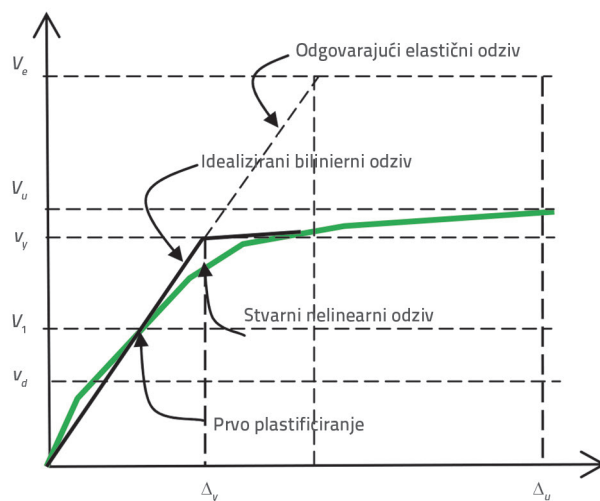
$$\bar{M}_{\theta_i} = M_{\theta_i} \cdot \frac{\Delta V_{by}}{\sum F_{y_i}} \quad (16)$$

U tim izrazima ΔV_{by} predstavlja inkrementalnu poprečnu silu u bočnome smjeru seizmičkog djelovanja, $\sum F_{y_i}$ zbroj poprečnih sila, a $(F_{y_i})M_{\theta_i}$ prethodno definirano.

Predložena metoda postupnog guranja, koja uzima u obzir bočna opterećenja ($\bar{F}_{y_i}$) i torzijske momente $\bar{M}_{\theta_i}$, može se lako primijeniti u standardnim programskim paketima za proračun konstrukcija [18].

5. Proračun komponenti faktora modifikacije seizmičkog odziva

Faktor modifikacije seizmičkog odziva, označen s R u normama [4, 5] i s q u Eurokodu 8 [3], uobičajeno se primjenjuje u propisima za seizmičko projektiranje cestovnih mostova kako bi se procijenila proračunska sila konstrukcije analizirane linearnim metodama, a koja pokazuje nelinearni odziv. Osim toga R -faktor izravno ovisi o komponentama koje utječu na sposobnost trošenja energije konstrukcije kao što su duktilnost, dodano viskozno prigušenje i rezerve čvrstoće koje proizlaze iz prekobrojnosti i povećane nosivosti pojedinih elemenata. Krivulja sposobnosti nosivosti idealizirana je primjenom bilinearne krivulje odziva (slika 4.).



Slika 4. Shematski prikaz odnosa između ukupne poprečne sile u razini temelja i pomaka u sredini raspona mosta

R -faktor može se izraziti na sljedeći način:

$$R = \frac{V_e}{V_d} \quad (17)$$

gdje V_e i V_d predstavljaju najveće elastične i proračunske sile.

5.1. Faktor povećane čvrstoće

Konstrukcije često posjeduju znatnu rezervu čvrstoće, koja odražava koliko stvarni kapacitet nadmašuje proračunski kapacitet, uzimajući u obzir svojstva materijala i prekobrojnost elemenata konstrukcije. Na temelju literature [29, 30], faktor povećane čvrstoće, označen kao (Ω), izražava se kao omjer krajnje poprečne sile u razini temelja (V_u) na osloncima mosta (stupovima i upornjacima) i proračunske sile (V_d). U ovome istraživanju V_d se određuje na temelju elastičnoga proračunskog spektra [5].

$$\Omega = \frac{V_u}{V_d} \quad (18)$$

gdje V_u predstavlja krajnju poprečnu silu u razini temelja, odnosno nosivost, koja označava maksimalnu poprečnu silu koju konstrukcija može podnijeti prije loma. Primjenom elastičnoga proračunskog spektra projektna posmična sila u razini temelja (može se izračunati na sljedeći način:

$$V_d = M \cdot S_{a,d} \quad (19)$$

pri čemu je (M) ukupna masa mosta, a $S_{a,d}$ (T) pseudo ubrzanje koje odgovara osnovnom periodu titranja mosta [5].

5.2. Faktor duktilnosti

Faktor duktilnosti, označen kao (R_μ), izravno je povezan s intrinzičnim svojstvima konstrukcije, uključujući osnovni period titranja (T), prigušenje, duktilnost i karakteristike seizmičke pobude. Nekoliko izraza za (R_μ) predloženo je u prethodnim istraživanjima [31, 32].

U ovome istraživanju za procjenu faktora kinematičke duktilnosti (R_μ) predložen je izraz iz [31] zbog njegove praktičnosti i jednostavnosti primjene:

$$R_\mu = 1 \quad \text{za } T < 0,2 \text{ s} \quad (20.a)$$

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad \text{za } 0,2 \text{ s} < T < 0,5 \text{ s} \quad (20.b)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{za } T > 0,5 \text{ s} \quad (20.c)$$

gdje (μ) predstavlja globalni koeficijent duktilnosti, definiran kao omjer pomaka u graničnome stanju nosivosti (δ_u) u sredini središnjeg raspona mosta i pomaka pri tečenju (δ_y), izražen sljedećim izrazom:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (21)$$

U većini SGM-ova osnovni period titranja (T) prelazi 0,5 sekundi. Unutar tog raspona izraz (20) pojednostavljuje se u $R_\mu = \mu$.

5.3. Faktor modifikacije seizmičkog odziva

Kao što je to prikazano na slici 4., proračunski faktor ponašanja za određenu konstrukciju izražava se kao:

$$R = \frac{V_e}{V_d} = \frac{V_e}{V_u} \cdot \frac{V_u}{V_d} = R_\mu \cdot \Omega \quad (22)$$

Sljedeći pojednostavljeni postupak predložen u [24], R-faktor procjenjuje se kao umnožak faktora duktilnosti (R_μ), faktora povećane čvrstoće (Ω) i faktora prekobrojnosti (R_R) [33].

$$R = R_\mu \cdot \Omega \cdot R_R \quad (23)$$

Prema tablici iz [3], pretpostavlja se da je faktor prekobrojnosti (R_R) jednak jedinici.

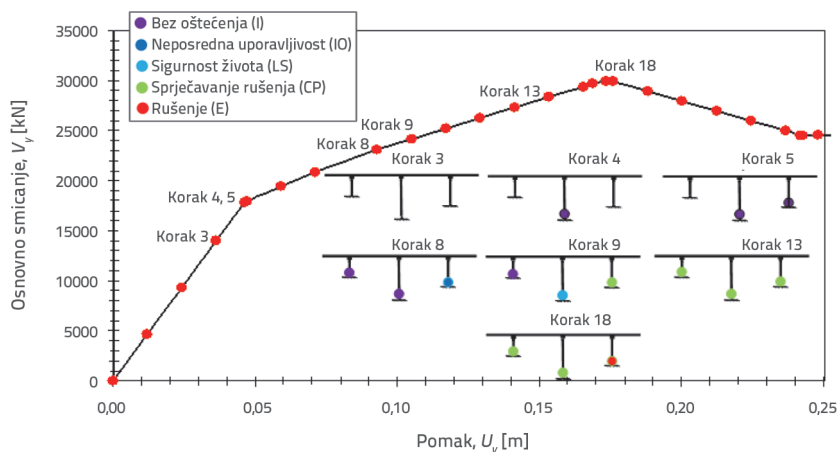
Zato se R-faktor pojednostavljuje na:

$$R = R_\mu \cdot \Omega \quad (24)$$

6. Kriteriji loma

Rezultati numeričkih proračuna faktora seizmičkog ponašanja analizirani su primjenom dvaju graničnih stanja rušenja, pri čemu ukupno rušenje mosta nastupa kada je prekoračeno jedno od tih dvaju graničnih stanja.

- Nastajanje plastičnih zglobova: Kriterij oštećenja uslijed rušenja mosta povezan je s formiranjem plastičnih zglobova na kritičnim dijelovima mosta. Nastajanje tih zglobova praćeno je u metodi postupnog guranja, a definirane su i granične vrijednosti koje označuju trenutak kada konstrukcija dosegne stanje loma. Taj kriterij utvrđen je ograničavanjem zahtjeva za rotacijsku duktilnost θ/θ_u na krajevima stupova mosta, pri čemu je osigurano da ostanu unutar dopuštenih granica rotacijske duktilnosti (θ_u), to jest kada je omjer (θ/θ_u) = 1
- Prema seizmičkim propisima RPOA [5] i EC8 [3], ograničenje relativnog pomaka postavljeno je na 2,5 %.



Slika 5. Predložena krivulja sposobnosti nosivosti i napredovanja razvoja plastičnih zglobova na referentnim stupovima sandučastoga grednog mosta

Predložena krivulja sposobnosti nosivosti i napredovanje razvoja plastičnih zglobova na stupovima mosta prikazani su na slici 5. U skladu s propisima o seizmičkom projektiranju [11, 22], razine izvedbe i odgovarajuća stanja oštećenja definirani su na sljedeći način:

Razina ponašanja	Opis oštećenja
Nema oštećenja (ND)	Gotovo bez oštećenja
Neposredna uporabljivost (IO)	Vrlo mala oštećenja
Sigurnost života (LS)	Umjerena oštećenja
Sprječavanje rušenja (CP)	Ozbiljna oštećenja
Rušenje (E)	Potpuni slom

7. Odabir potresnih zapisa

Za ovo istraživanje odabran je skup od osam povijesnih zapisa potresa s različitim karakteristikama, u rasponu od 0,22 g do 0,60 g (gdje g označava ubrzanje uslijed gravitacije), iz baze podataka PEER (<https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>). Ti su zapisi upotrijebljeni za procjenu komponenti R-faktora referentnog SGM-a metodom IDA. Svaki odabrani zapis seizmičkog djelovanja tla prilagođen je tako da PGA iznosi između 0,1 g i 2 g, čime se pokriva cijeli spektar odziva konstrukcije, od početnog popuštanja do konačnog rušenja.

Tablica 1. Povijesni potresi razmatrani u ovome istraživanju

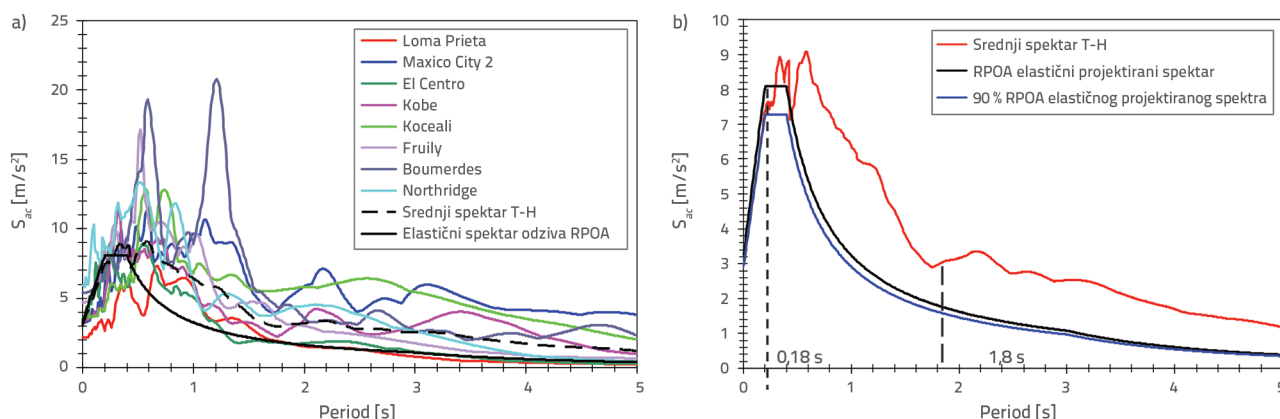
ID potresa	Naziv potresa i država u kojoj se dogodio	Naziv stanice	Magnituda (Mw)	PGA [g]
1	Loma Prieta, SAD, 1989.	Most Golden Gate Bridge	6,93	0,22
2	Meksiko, 1985.	Mexico City	8,10	0,33
3	Imperial Valley, SAD, 1940.	El Centro, Kalifornija – Array Sta 9	6,70	0,35
4	Kobe, Japan, 1995.	Kakogawa	6,90	0,34
5	Kocaeli, Turska, 1999.	Düzce	7,51	0,36
6	Furlanija, Italija, 1976.	Južne Alpe	6,50	0,48
7	Boumerdes, Alžir, 2003.	Dar El Beida	6,80	0,50
8	Northridge, SAD, 1994.	Okružna bolnica Sylmar	6,80	0,60

PGA - vršno ubrzanje tla (eng. *Peak Ground Acceleration* - PGA)

U ovome istraživanju primijenjene su smjernice preporučene u odredbama Eurokoda 8 za odabir zabilježenih vremenskih zapisa [3]:

- Treba upotrijebiti odgovarajući broj zapisa (obično tri do sedam).
- Srednje vrijednosti spektralnog odziva pri nultome periodu ne smiju biti manje od $a_g \cdot S$, pri čemu je S faktor tla, a a_g proračunsko ubrzanje tla.
- U rasponu perioda $[0,2T, 2T]$ gdje je T vlastiti period titranja konstrukcije u smjeru primijenjenog akceleroograma, srednji elastični spektar prigušenja od 5 %, izračunan na temelju svih vremenskih zapisa, ne bi trebao biti manji od 90 % odgovarajućega elastičnog spektra s 5 % prigušenja.

U tablici 1. prikazane su glavne karakteristike povijesnih potresa razmatranih u ovome istraživanju. Ilustracije radi, na slici 6. prikazani su elastični spektri odziva odabranih povijesnih potresa za 5 % prigušenja zajedno sa srednjim spektrom vremenske analize (T-H) prilagođenim referentnome PGA-u. Također je prikazan proračunski spektar naveden u [26]. Lokaciju studije slučaja, sandučastoga grednog mosta, karakteriziraju čvrsti uvjeti tla (gusto tlo i šljunak), što odgovara faktoru tla $S = 1,1$ i karakterističnim periodima $T_1 = 0,15$ i $T_2 = 0,40$ s. Pretpostavlja se da se most nalazi u zoni visoke seizmičke aktivnosti s PGA-om od 0,33 g.



Slika 6. a) Elastični spektri pseudoubrzanja odabranih povijesnih potresa za 5 % prigušenja i srednji spektar pseudoubrzanja prilagođen referentnome PGA; elastični spektar prema RPOA (2008.); b) Srednje vrijednosti svih spektara

Tablica 2. Dinamička svojstva referentnog SGM-a

Redoslijed vlastitih oblika	Period [s]	Modalni faktori doprinosa mase (U)		Modalni faktori doprinosa (Γ)	
		Bočni smjer (U_y)	Oko uzdužne osi (R_x)	Bočni smjer (Γ_y)	Oko uzdužne osi (Γ_{Rx})
1	0,904	0,540	0,026	-2,356	-6,977
2	0,463	0,011	0,000	0,329	-0,202
3	0,302	0,152	0,004	1,249	-2,576
4	0,218	0,001	0,032	-0,083	7,683
5	0,216	0,000	0,000	-0,020	0,509
6	0,202	0,000	0,000	0,011	0,280
7	0,183	0,135	0,079	-1,177	-12,066
8	0,168	0,005	0,004	0,220	2,874
9	0,166	0,008	0,012	-0,287	4,716
10	0,125	0,000	0,000	-0,022	-0,019
11	0,120	0,005	0,167	0,218	17,511

8. Rezultati i rasprave prvog dijela

8.1. Modalna analiza referentnog SGM-a

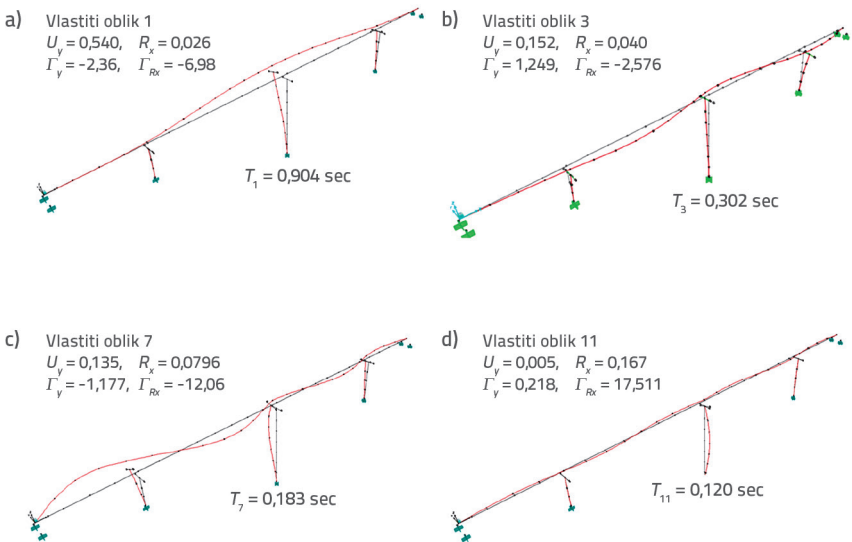
Primijenjeni su Ritzovi ortogonalni vektori (eng. *Load-dependent Ritz* - LDR) ovisni o opterećenju [28, 34] zbog njihove prednosti pri izvođenju statičkih nelinearnih analiza prema modelima raspodjele sila primijenjenima u bočnome smjeru referentnog SGM-a. U tablici 2. prikazano je prvih 11 prirodnih perioda oscilacija zajedno s pripadajućim modalnim faktorima doprinosa mase i modalnim faktorima doprinosa u bočnome (Y-os) i uzdužnome (X-os) smjeru.

Kao što je to prikazano u tablici 2. i oblicima titranja prikazanima na slici 7., dominantni vlastiti oblik titranja javljao se u poprečnome smjeru (tj. najfleksibilniji) s periodom prvog oblika od 0,904 s. Sedmi bočni vlastiti oblik bio je znatno povezan s

torzijom ($U_y = 0,135$, $R_x = 0,079$) zbog nepravilnosti analiziranog mosta. Međutim, jedanaesti vlastiti oblik titranja ponajprije se sastojao od torzije ($U_y = 0,005$, $R_x = 0,167$) oko uzdužne osi mosta. U tablici 2. također je pokazano da je udio modalne mase u poprečnome smjeru za dominantni vlastiti oblik iznosio tek 54 %. Posljedično, viši vlastiti oblici znatno su doprinijeli seizmičkome odzivu u bočnome smjeru (otprilike 46 %). Zato prvi elastični vlastiti oblik nije bio dovoljan za izvođenje nelinearne statičke metode postupnog guranja u poprečnome smjeru za promatrani most. Metoda postupnog guranja koja se temelji samo na osnovnome obliku titranja ne može adekvatno prikazati seizmičke učinke zbog znatnog utjecaja viših oblika titranja.

Zaključno, osnovni oblik titranja doprinosi poprečnome odzivu, ali ne dominira u cijelosti seizmičkim ponašanjem mosta. Viši modovi (posebno oblici 3, 7 i 11) odigrali su ključnu ulogu zbog svojega znatnog modalnog doprinosa. Za preciznu seizmičku

procjenu potrebna je naprednija metoda poput višemodalne metode postupnog guranja ili nelinearne dinamičke analize. Grafički prikaz oblika titranja mosta pokazao je da je prvi mod bio pretežno translacijski u Y-Y bočnome smjeru (što upućuje na veću fleksibilnost u tome smjeru). Sedmi oblik titranja dominantan je u bočnome smjeru Y-Y i povezan s torzijom, a jedanaesti je oblik titranja uglavnom torzijski i slabo povezan s translacijskim poprečnim oblikom titranja.



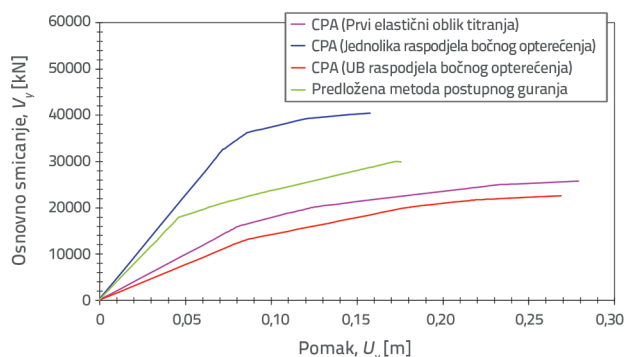
Slika 7. Oblici titranja mosta i pripadajući dinamički parametri: a) prvi lateralni oblik titranja; b) treći lateralni oblik titranja; c) lateralni oblik titranja povezan s torzijom; d) čisti torzijski oblik titranja

8.2. Razvoj krivulja sposobnosti nosivosti primjenom nelinearnih statičkih metoda

Radi usporedbe, globalne krivulje sposobnosti nosivosti za referentni SGM u poprečnome smjeru (tj. fleksibilnijemu smjeru), dobivene konvencionalnom

metodom postupnog guranja (CPA) primjenom prvog oblika titranja elastičnog sustava, jednolike i gornje granične raspodjele bočnog opterećenja te predloženom metodom postupnog guranja, koja uključuje torzijske oblike titranja, prikazane su na slici 8. U ovome istraživanju nelinearnim statičkim analizama primjenom metode postupnog guranja uzeti su u obzir P-delta učinci i vertikalna opterećenja.

Također treba napomenuti da nisu razmatrani mogući slomovi upornjaka sustava i elastomernih ležajeva.



Slika 8. Usporedba globalnih krivulja sposobnosti nosivosti za referentni SGM u bočnom smjeru, dobivenih uobičajenom metodom postupnog guranja i predloženom metodom postupnog guranja

Iz krivulja sposobnosti nosivosti prikazanih na slici 8. vidljivo je da za referentni SGM, konvencionalna metoda postupnog guranja (CPA) s jednolikom raspodjelom bočnog opterećenja rezultirala najvećom nosivost u usporedbi s CPA provedenom primjenom drugih raspodjela bočnog opterećenja. Međutim, kada je srednji dio rasponskog sklopa mosta bio pomaknut duboko u nelinearno područje pod utjecajem prvoga elastičnog oblika i gornje granične (eng. *upper bound* - UB) raspodjele bočnih opterećenja, pripadajuća posmična sila u razini temelja bila je najniža, dok je procijenjena duktilnost bila veća. Nasuprot tome predložena metoda postupnog guranja, koja uključuje torzijske učinke, pruža rezultate između drugih krivulja, postižući ravnotežu između nosivosti i sposobnosti deformacije u usporedbi s jednolikim, prvim elastičnim i gornjim graničnim raspodjelama bočnog opterećenja.

Zaključno, usporedba krivulja sposobnosti nosivosti pokazuje da konvencionalna metoda postupnog guranja (prvi vlastiti oblik i UB raspodjele bočnog opterećenja) podcjenjuje kapacitet ukupne poprečne sile u razini temelja, a istodobno pruža veće procjene duktilnosti. Predložena metoda postupnog guranja, koja

uključuje torzijske učinke, nudi precizniji prikaz nelinearnog odziva referentnog SGM-a u skladu s odredbama Eurokoda 8 (npr. članci 4.3.3.4.2. [razmatranje oblika titranja] i 4.2.2. [torzijski učinci]). Ti članci ističu važnost uzimanja u obzir utjecaja viših oblika titranja i doprinosa torzijskih učinaka koji proizlaze iz neuravnoteženosti mase i drugih konstrukcijskih nepravilnosti, a to je ključno za seizmičku procjenu složenih geometrija poput SGM-ova.

Osim toga u tablici 3. sažeti su nosivost na poprečnu silu (V_u) i komponente faktora modifikacije odziva (R-faktor), uključujući faktor povećane čvrstoće (Ω) i kinematičke duktilnosti (R_μ), za referentni sandučasti gredni most (SGM).

Kao što je to prethodno navedeno, nosivost na poprečnu silu na osloncima mosta najveća je kod jednolike raspodjele opterećenja, što također odgovara većem faktoru povećane čvrstoće (Ω). Nadalje, treba napomenuti da faktori duktilnosti (R_μ) ostaju relativno niski i pokazuju minimalne razlike između modela jednolikog opterećenja i predložene metode postupnog guranja u ovoj analizi. Prema vrijednostima R-faktora prikazanim u tablici 2., R-faktor dobiven predloženom metodom postupnog guranja niži je od onog dobivenog uobičajenom metodom postupnog guranja (CPA). Ta je razlika ponajprije posljedica znatnog doprinosa torzijskih oblika titranja ukupnome kapacitetu referentnog SGM-a pri primjeni predložene metode. Zaključno, predložena metoda postupnog guranja nudi najrealističniji i najopsežniji pristup jer uzima u obzir torzijske učinke. Preporučuje se u odnosu na konvencionalne metode CPA za precizniju nelinearnu seizmičku procjenu SGM-ova. U sljedećemu poglavlju procjenjuju se ponašanje i točnost uobičajene metode postupnog guranja i predložene metode postupnog guranja koja uzima u obzir torzijske učinke za referentni sandučasti gredni most kako bi se utvrdilo koji pristup točnije predviđa ponašanje konstrukcije u usporedbi s metodom IDA.

8.3. Razvoj krivulja sposobnosti nosivosti primjenom inkrementalnih dinamičkih analiza

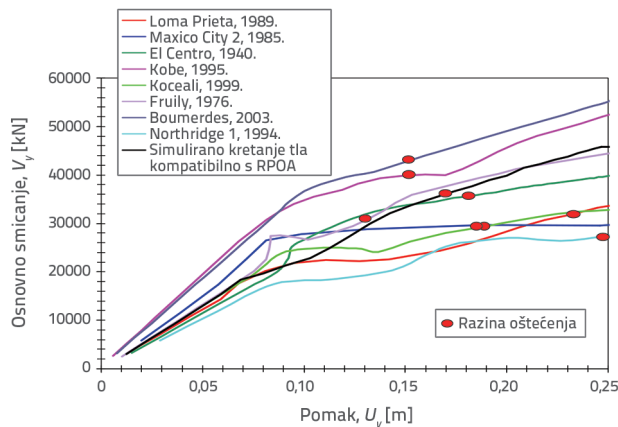
IDA je jedan od najučinkovitijih pristupa predloženih u raznim istraživanjima za procjenu seizmičkog kapaciteta konstrukcija [9, 35, 36]. Međutim, generiranje krivulje sposobnosti nosivosti pomoću IDA-e računski je zahtjevno, oduzima puno vremena i nije isplativo. Taj pristup uključuje analizu konstrukcije pod djelovanjem višestrukih stvarnih ili simuliranih potresnih zapisa, prilagođenima različitim razinama intenziteta. Višestruko inkrementalna dinamička krivulja kapaciteta nosivosti dobivena je prikazivanjem maksimalnih poprečnih sila na osloncima

Tablica 3. Krajnja posmična čvrstoća i komponente R-faktora za proučavani SGM

Nelinearne statičke metode postupnog guranja	V_u [kN]	Ω	R_μ	R
CPA (prvi elastični oblik titranja)	25823	2,49	3,05	7,59
CPA (gornja granična raspodjela bočnog opterećenja)	22561	2,17	2,76	5,99
CPA (jednolika raspodjela bočnog opterećenja)	40500	3,90	1,97	7,68
Predložena metoda postupnog guranja	29693	2,86	1,92	5,49

mosta u odnosu na maksimalni pomak u kontrolnoj točki mosta. U prvome koraku razvijene su krivulje sposobnosti nosivosti iz inkrementalne dinamičke analize (IDA) u poprečnome smjeru sandučastog mosta, pri čemu je most podvrgnut nizu od osam povijesnih potresa s različitim karakteristikama seizmičkog djelovanja tla, u rasponu od 0,22 g do 0,60 g. Za nelinearnu analizu vremenskog zapisa primijenjena je Newmarkova metoda prosječnog ubrzanja. Razmatrano je Rayleighovo prigušenje, a koeficijenti proporcionalni masi i krutosti procijenjeni su za 5 % prigušenja, u prva dva oblika titranja modela mosta.

Na slici 9. prikazane su razvijene krivulje sposobnosti nosivosti iz inkrementalne dinamičke analize (IDA), koje ilustriraju odnos između poprečne sile u razini temelja na osloncima mosta i maksimalnog pomaka u kontrolnoj točki u kritičnome bočnom smjeru (Y os) promatranog SGM-a pod utjecajem osam povijesnih zapisa potresa, te potresnog zapisa simuliranog u skladu s proračunskim spektrom RPOA [5].



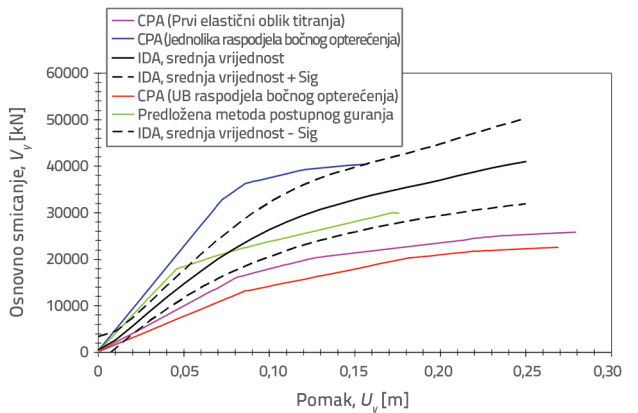
Slika 9. Krivulje sposobnosti nosivosti iz inkrementalne dinamičke analize promatranog SGM-a podvrgnutog osam povijesnih zapisa potresa

Na slici crvene točke prikazuju razinu oštećenja pri rušenju za svaki od povijesnih zapisa potresa i za simulirani zapis u skladu s proračunskim spektrom RPOA [5]. Te točke odgovaraju graničnim vrijednostima pomaka u kontrolnoj točki i poprečnoj

sili u razni temelja na osloncima mosta. Ključne su za određivanje seizmičkih parametara kao što su granična poprečna sila (V_y), faktor povećane čvrstoće (Ω), faktor kinematičke duktilnosti (R_μ) i R-faktor. Ti parametri igraju važnu ulogu u procjeni duktilnog odziva konstrukcije i imaju znatan utjecaj na krhke načine loma. Rezultati dobiveni metodom IDA navedeni su u tablici 4.

8.4. Usporedba globalnih krivulja naguravanja i inkrementalnih dinamičkih krivulja

U ovome poglavlju rezultati globalnih sposobnosti nosivosti za referentni SGM u bočnome smjeru dobiveni uobičajenom metodom postupnog guranja i u ovome radu predloženom metodom postupnog guranja uspoređuju se s rezultatima srednjih dinamičkih krivulja nosivosti dobivenih metodom IDA. Također, na slici 10. prikazane su srednje vrijednosti metode IDA, zajedno s vrijednostima plus i minus jedne standardne devijacije (σ).



Slika 10. Usporedba krivulja sposobnosti nosivosti i inkrementalne dinamičke analize (IDA)

Na temelju slike 10. treba istaknuti da su krivulje sposobnosti nosivosti za promatrani SGM podcijenjene pri upotrebi raspodjele opterećenja prema prvom vlastitom obliku elastičnog sustava i gornje granične raspodjele, odnosno precijenjene

Tablica 4. Nosivosti na poprečnu silu i komponente R-faktora za proučavani SGM

Kretanje tla	V_u [kN]	Ω	R_μ	R
Loma Prieta, SAD, 1989.	30702	2,96	1,78	5,27
Meksiko, 1985.	29509	2,84	2,15	6,11
Imperial Valley, SAD, 1940.	35215	3,39	1,81	6,14
Kobe, Japan, 1995.	40057	3,86	1,34	5,17
Kocaeli, Turska, 1999.	30837	2,97	1,62	4,81
Furlanija, Italija, 1976.	30993	2,99	1,20	3,59
Boumerdes, Alžir, 2003.	47602	4,40	1,35	5,94
Northridge, SAD, 1994.	27580	2,66	1,75	4,66
Simulirano kretanje tla u skladu s RPOA	37703	3,63	1,62	5,88
Srednja vrijednost	34466	3,30	1,62	5,36

Tablica 5. Usporedba vremena procesora, komponenti R-faktora i stope pogreške

Nelinearne statičke metode postupnog guranja	Vrijeme proračuna [s]	Ω	R_{μ}	R
CPA (prvi elastični oblik titranja)	31	2,49 (-25 %)	3,05 (+88 %)	7,59 (+42 %)
CPA (UB raspodjela bočnog opterećenja)	80	2,17 (-34 %)	2,76 (+70 %)	5,99 (+12 %)
CPA (jednolika raspodjela bočnog opterećenja)	79	3,90 (+18 %)	1,97 (+22 %)	7,68 (+43 %)
Predložena metoda postupnog guranja	104	2,86 (-13 %)	1,92 (+19 %)	5,49 (+2 %)
IDA (Referentna vrijednost)	6174	3,30	1,62	5,36
(%): Relativne stope pogreške u usporedbi s rezultatima dobivenima metodom IDA				

kada se primjenjuje jednolika raspodjela bočnog opterećenja. Razlog je što krivulje sposobnosti nosivosti za te slučajeve daju rezultate izvan raspona (srednja vrijednost - σ) i (srednja vrijednost σ) vrijednosti dobivenih metodom IDA. Nasuprot tome predložena krivulja sposobnosti nosivosti, dobivena primjenom predloženog modela koji uključuje torzijske oblike titranja, nalazi se unutar raspona između (srednja vrijednost - σ) i (srednja vrijednost σ) IDA krivulja, čime pruža realističniji prikaz ponašanja mosta uslijed potresa.

Može se zaključiti da je predložena metoda postupnog guranja, koja uključuje torzijske oblike titranja, blisko usklađena sa srednjom krivuljom IDA-e te pouzdanija i realističnija metoda za nelinearnu seizmičku procjenu SGM-a u usporedbi s konvencionalnim metodama postupnog guranja.

U ovome istraživanju komponente R-faktora iz tablice 3., procijenjene u skladu s metodologijama iz poglavlja 4., uspoređene su sa srednjim vrijednostima dobivenima nelinearnom inkrementalnom dinamičkom analizom. Cilj je tog koraka procijeniti učinkovitost i preciznost predložene metode postupnog guranja koja uključuje torziju.

Rezultati komponenti R-faktora, dobiveni konvencionalnom metodom postupnog guranja (CPA) i predloženom metodom postupnog guranja te metodom IDA, prikazani su u tablici 5. Vrijeme potrebno za proračun komponenti R-faktora navedeno je u istoj tablici.

Iz tablice 5. vidljivo je da su za konvencionalnu metodu postupnog guranja (CPA), osim uz primjenu jednolikog oblika opterećenja, dobiveni parametri povećane čvrstoće bili općenito niži od onih dobivenih primjenom metode IDA, koja se smatra referentnom vrijednošću. Nadalje, u usporedbi s rezultatima IDA-e, globalne vrijednosti duktilnosti procijenjene pomoću metode CPA bile su znatno više za prvi oblik titranja elastičnog sustava (88 %) i za gornju graničnu raspodjelu (70 %). Te su razlike ponajprije proizašle iz zanemarivanja doprinosa viših oblika titranja u procjeni seizmičkih odziva pri primjeni dvaju modela bočnog opterećenja u metodi CPA.

Nadalje, zahtjevi globalne duktilnosti procijenjeni CPA metodom s jednolikim opterećenjem i predloženom metodom postupnog guranja pokazali su slične vrijednosti, s razlikama od 22 % za jednoliki uzorak i 19 % za predloženi model. Predložena metoda postupnog guranja uzima u obzir torzijske oblike titranja proučavanog mosta, čime se povećava preciznost procjene faktora seizmičkog ponašanja. Kao što je to naznačeno u tablici

5., predložena metoda naguravanja dala je vrijednost R 5,49, što je najbliže vrijednosti dobivenoj IDA metodom postupnog guranja (5,36, razlika od 2 %), što potvrđuje njezinu preciznost u procjeni ukupnoga seizmičkog ponašanja. Osim toga i CPA i predložena metoda postupnog guranja pokazale su se znatno učinkovitijima u pogledu vremena proračuna jer je ono smanjeno za približno 99 % (31 - 104 s u usporedbi s 6174 s za IDA-u).

Predložena metoda postupnog guranja pokazala je dobro slaganje s vrijednostima R-faktora, dobivenima metodom IDA, uz blago povećanje od približno 2 %.

Važno je istaknuti da je vrijeme procesora potrebno za procjenu R-faktora primjenom IDA tehnike (6174 s) bilo približno 60 puta veće nego što je to potrebno za predloženu metodu postupnog guranja (104 s). Ta znatna razlika u vremenu obrade uočena je pri upotrebi prijenosnog računala sa sljedećim specifikacijama: procesor Intel® Core™ i3-5005U koji radi na 2,00 GHz. Ta usporedba naglašava računalnu učinkovitost predložene metode postupnog guranja, koja pruža znatno bržu alternativu za procjenu R-faktora i dokazuje da je računalno učinkovitija u odnosu na metodu IDA.

9. Rezultati i rasprave drugog dijela

9.1. Varijante referentnog SGM-a

Ovo istraživanje obuhvaća analizu osamnaest kontinuiranih prednapetih sandučastih mostova (SGM), sa stupovima jednakih i različitih visina, kako bi se procijenili faktori modifikacije seizmičkog odziva (R) za tu kategoriju mostova. Ti su mostovi izvedeni kao varijante referentnog mosta, a svaka varijanta (V) označena je oznakom V_j - κ , pri čemu j predstavlja broj raspona (03, 04, 05), κ označava broj stupova (02, 03, 04), a κ klasifikaciju visine stupova: kratki (S), srednji (M) ili visoki (T). Visine kratkih, srednjih i visokih stupova iznosile su 15,95 m, 26,65 m, odnosno 50,35 m.

Naprimjer, referentni most prikazan na slici 1. obilježen je oznakom V43-STM, koja se odnosi na most s četirima rasponima, trima stupovima i kratkim, visokim i srednjim stupovima (tim redoslijedom). Ključni parametri primijenjeni za klasifikaciju bili su broj raspona, broj stupova i visina stupova. Varijante su raspoređene na temelju modifikacija tih parametara, što omogućuje sveobuhvatno istraživanje utjecaja geometrijskih promjena na seizmičko ponašanje. Osnovna svojstva različitih varijanti referentnoga sandučastog grednog mosta (V43-STM) analizirana u ovome istraživanju navedena su u tablici 6.

Tablica 6. Svojstva varijanti referentnog SGM-a (V43-STM)

Varijante mosta V43-STM	Broj raspona	Duljina raspona [m]	Broj stupova	Visina stupova [m]	Ukupna duljina [m]
Varijante referentnog mosta V43-STM sa stupovima jednakih visina					
V32-S	3	42,6 + 81,8 + 42,6	2	15,95	167
V32-M	3	42,6 + 81,8 + 42,6	2	26,65	167
V32-T	3	42,6 + 81,8 + 42,6	2	50,35	167
V43-S	4	42,6 + 2 × 81,8 + 42,6	3	15,95	248,8
V43-M	4	42,6 + 2 × 81,8 + 42,6	3	26,65	248,8
V43-T	4	42,6 + 2 × 81,8 + 42,6	3	50,35	248,8
V54-S	5	42,6 + 3 × 81,8 + 42,6	4	15,95	330,6
V54-M	5	42,6 + 3 × 81,8 + 42,6	4	26,65	330,6
V54-T	5	42,6 + 3 × 81,8 + 42,6	4	50,35	330,6
Varijante referentnog mosta V43-STM sa stupovima nejednakih visina					
V32-TS	3	42,6 + 81,8 + 42,6	2	50,35, 15,95	167
V32-SM	3	42,6 + 81,8 + 42,6	2	15,95, 26,65	167
V32-TM	3	42,6 + 81,8 + 42,6	2	50,35, 26,65	167
V43-STM	4	42,6 + 2 × 81,8 + 42,6	3	15,95, 50,35, 26,65	248,8
V43-MST	4	42,6 + 2 × 81,8 + 42,6	3	26,65, 15,95, 50,35	248,8
V43-TMS	4	42,6 + 2 × 81,8 + 42,6	3	50,35, 26,65, 15,95	248,8
V54-MTTS	5	42,6 + 3 × 81,8 + 42,6	4	26,65, 50,35, 50,35, 15,95	330,6
V54-STTS	5	42,6 + 3 × 81,8 + 42,6	4	15,95, 50,35, 50,35, 15,95	330,6
V54-MTTM	5	42,6 + 3 × 81,8 + 42,6	4	26,65, 50,35, 50,35, 26,65	330,6

9.2. Ocjena R-faktora za različite varijante stvarnih SGM-ova

Komponente R-faktora za svaku varijantu referentnog SGM-a određene su u krajnjemu graničnom stanju nosivosti primjenom predložene metode postupnog guranja, opisane u poglavlju 4.2., koja je računalno učinkovitija od konvencionalne metode IDA.

9.2.1. Usporedba komponenti R-faktora za varijante referentnog mosta V43-STM sa stupovima jednakih visina

Komponente R-faktora, uključujući faktore povećane čvrstoće (Ω) i povezani faktori duktilnosti (R_p) za različite varijante

navedenog SGM-a (V43-STM) prikazani su u tablici 7. R-faktor određuje kao umnožak dviju komponenti Ω i R_p , nakon čega proizlazi $R = \Omega \times R_p$. Iz tablice 7. može se vidjeti da varijanta mosta V32-S s stupovima jednakih visina ima najveću povećanu čvrstoću ($\Omega = 3,80$), što upućuje na najveću rezervu nosivosti u odnosu na proračunsku poprečnu silu u razini temelja. Nasuprot tome varijante mostova V54-M i V54-T imale su najmanje vrijednosti povećane čvrstoće, jednake 1,98 odnosno 1,99, što upućuje na to da te konstrukcije djeluju bliže svojim proračunskim granicama, s minimalnom rezervom kapaciteta, povećavajući oštetljivost pri ekstremnim seizmičkim opterećenjima. Nasuprot tome uočeno je da varijanta V32-S ima najniži faktor duktilnosti ($R_p = 1,10$), a varijanta V54-T pokazuje najviše vrijednosti (R_p

Tablica 7. Komponente R-faktora za varijante referentnog SGM-a (V43-STM) sa stupovima jednakih visina

Varijante mosta V43-STM	Povećana čvrstoća (Ω)	Duktilnost (R_p)	R-faktor (R)
V32-S	3,80	1,10	4,18
V32-M	2,51	1,47	3,69
V32-T	2,69	1,58	4,25
V43-S	2,83	1,65	4,67
V43-M	2,02	2,31	4,67
V43-T	2,01	2,09	4,20
V54-S	3,23	1,31	4,23
V54-M	1,98	2,31	4,57
V54-T	1,99	2,67	5,31

= 2,67 i $R = 5,31$), što upućuje na veći kapacitet potonjeg za trošenje seizmičke energije putem neelastične deformacije i bolje seizmičke performanse (više R -vrijednosti).

Općenito, krute konstrukcije mostova sa stupovima jednakih visina, posebno mostovi s kraćim stupovima (npr. V32-S, V43-S i V54-S), imaju tendenciju pokazivanja veće povećane čvrstoće (Ω) zbog povećane krutosti. To upućuje na znatnu granicu sigurnosti, što znači da takve konstrukcije mogu podnijeti znatno veća seizmička opterećenja od onih proračunskih. Istodobno fleksibilnije varijante jednake visine (npr. V54-T) općenito pružaju veću duktilnost i bolje seizmičko ponašanje (više R -vrijednosti), ali pokazuju nižu povećanu čvrstoću zbog povećane fleksibilnosti i deformacijskog kapaciteta.

9.2.2. Usporedba komponenti R-faktora za varijante referentnog V43-STM-a sa stupovima nejednakih visina

U tablici 8. prikazane su komponente R-faktora za različite varijante referentnog SGM-a (V43-STM) sa stupova nejednakih visina

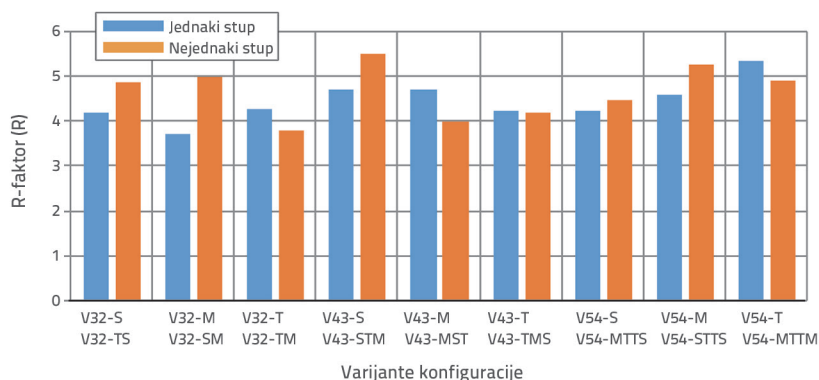
Iz tablice 8. vidljivo je da referentni SGM (V43-STM) pokazuje umjerenu povećanu čvrstoću ($\Omega = 2,86$) i najveću duktilnost ($R_\mu = 1,92$), što dovodi do boljeg seizmičkog ponašanja s R-faktorom od 5,49. Također se napominje da varijanta V32-TM pokazuje najmanje vrijednosti povećane čvrstoće ($\Omega = 2,69$) i R-faktora ($R = 3,79$), što upućuje na smanjeni seizmički kapacitet.

Usporedba varijanti s jednakim (npr. V54-T) i različitim (npr. V54-MTTM) visinama stupova pokazala je da varijante sa stupovima nejednakih visina općenito zahtijevaju povećanu čvrstoću te imaju smanjenu globalnu duktilnost. To ističe potrebu za prilagođenim procjenama R-faktora kako bi se uzele u obzir geometrijske nepravilnosti i njihov utjecaj na seizmičko ponašanje.

Odabir odgovarajućih konfiguracija visine stupova i optimiranje faktora povećane čvrstoće i duktilnosti ključni su za povećanje seizmičke otpornosti sandučastih mostova. Varijacije u visini stupova mogu znatno utjecati na odziv konstrukcije tijekom seizmičkih događaja, pri čemu se mijenjaju raspodjela seizmičkih sila i deformacijski kapacitet. Precizna procjena tih parametara omogućuje poboljšane strategije projektiranja koje ublažavaju negativne učinke geometrijskih nepravilnosti i osiguravaju bolje trošenje energije i stabilnost konstrukcije pod seizmičkim opterećenjima.

Grafikonom je prikazana usporedba R-faktora za različite konfiguracije SGM-a. Plave trake predstavljaju varijante sa stupovima jednakih visina, dok narančaste trake označavaju varijante sa stupovima nejednakih visina. X-os označava konfiguracije za varijante, a y-os prikazuje odgovarajuće vrijednosti R-faktora.

Kao što je to prikazano na slici 11, stupčasti grafikon pokazuje da varijante sa stupovima nejednakih visina općenito imaju veće R-faktore od onih sa stupovima jednakih visina (npr. referentni SGM, V43-STM). Međutim, u određenim slučajevima konfiguracije sa stupovima jednakih visina imale su bolje vrijednosti R-faktora (npr. V54-T) ili su dale usporedive rezultate u određenim modelima (npr. V43-T).



Slika 11. Usporedba R-faktora varijanti SGM-a sa stupovima jednakih i raznih visina

Tablica 8. Komponente R-faktora za varijante referentnog SGM-a (V43-STM) sa stupovima nejednakih visina

Varijante mosta V43-STM	Povećana čvrstoća (Ω)	Duktilnost (R_μ)	R-faktor (R)
V32-TS	3,46	1,40	4,84
V32-SM	3,18	1,56	4,96
V32-TM	2,69	1,41	3,79
V43-STM	2,86	1,92	5,49
V43-MST	3,09	1,29	3,99
V43-TMS	2,87	1,45	4,16
V54-MTTs	3,05	1,46	4,45
V54-STTS	3,33	1,57	5,23
V54-MTTM	2,80	1,75	4,90

9.3. Predviđanje R-faktora SGM-a i usporedba sa seizmičkim propisima za projektiranje mostova na alžirskoj autocesti

Izračunane vrijednosti R-faktora za sandučaste gredne mostove (SGM) u poprečnome smjeru kreću se od 3,69 do 5,49, s prosječnom vrijednošću od 4,53 i standardnom devijacijom od 0,52. Ti rezultati upućuju na veće trošenje energije i duktilnost konstrukcije u usporedbi s vrijednostima propisanim alžirskim seizmičkim propisima za projektiranje mostova na autocestama RPOA [5], koji predviđaju raspon R-faktora između 1,5 i 3,5. Ta razlika upućuje na mogućnost da propisi RPOA podcjenjuju stvarni kapacitet neelastičnih deformacija kod sandučastih grednih mostova, što može dovesti do konzervativnih zahtjeva u projektiranju seizmičkih konstrukcija.

Prema RPOA-u [5], vrijednosti R-faktora utvrđene su za mostove svih kategorija izgrađenih u Alžiru od 2008., kada je sektor javnih radova donio Propise za sigurnost građevina od potresa (RPOA-2008), prve propise takve vrste nakon stjecanja neovisnosti.

Međutim, na temelju rezultata ovog istraživanja preporučuje se u područjima visoke seizmičke aktivnosti projektirati mostove sposobne za razvoj velikih plastičnih deformacija uz održavanje stabilnosti konstrukcije. To odgovara konstrukcijama koje spadaju u klasu visoke duktilnosti (DCH) poput sandučastih grednih mostova, koji općenito pokazuju vrijednosti faktora ponašanja veće od 3,5, ovisno o usvojenome konstrukcijskom sustavu. Povećanje sposobnosti trošenja energije povećava otpornost na ekstremne seizmičke zahtjeve.

Na temelju rezultata ovog istraživanja preporučuje se da prilikom sljedeće revizije propisa Ministarstvo javnih radova razmotri primjenu faktora ponašanja u rasponu od 3,5 do 5,5 za konstrukcije unutar klase DCH, s težištem na sandučastim grednim mostovima (SGM).

10. Zaključak

Prvi dio ovog istraživanja prikazuje numeričku analizu komponenti R-faktora, uključujući faktor povećane čvrstoće i globalnu duktilnost, za referentni SGM primjenom konvencionalne metode postupnog guranja te predložene metode postupnog guranja koja uzima u obzir torzijske učinke. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima nelinearne metode IDA, na temelju skupa od osam povijesnih potresnih zapisa s vršnim ubrzanjima u rasponu od 0,22 g do 0,60 g, te simuliranog potresnog zapisa u skladu s proračunskim spektrom RPOA. U drugome dijelu analize ispitano je osamnaest kontinuiranih prednapetih SGM-ova sa stupovima jednakih i različitih visina, koji predstavljaju pravilne i nepravilne konfiguracije, kako bi se R-faktor u poprečnome smjeru procijenio primjenom predložene metode postupnog guranja. Dobivene vrijednosti R-faktora potom su uspoređene s RPOA-ovim odredbama. Iz rezultata ovog istraživanja mogu se izvući sljedeći ključni zaključci vezano za oba dijela istraživanja.

U vezi s prvim dijelom ovog istraživanja:

- Za referentni SGM prvi oblik titranja pokazuje najveći faktor doprinosa modalne mase (u bočnome smjeru, no ne određuje u cijelosti seizmičko ponašanje mosta. Raspodjela faktora doprinosa modalne mase u višim oblicima titranja pokazuje da i oni, osobito oni povezani s rotacijskim efektima oko uzdužne osi, igraju ključnu ulogu u seizmičkome odgovoru proučavanog SGM-a.
- Primjena CPA metode uz modalnu raspodjelu bočnih opterećenja uporabom prvog vlastitog oblika elastičnog sustava nije prikladna za referentni most pri izvođenju nelinearne statičke analize primjenom metode postupnog guranja. Za preciznu seizmičku procjenu potrebna je naprednija metoda poput višemodalne metode postupnog guranja, uključujući torzijske oblike titranja ili metodu IDA.
- Metoda CPA, uz modalnu raspodjelu bočnih opterećenja uporabom prvog vlastitog oblika elastičnog sustava i gornju graničnu raspodjelu bočnih opterećenja, podcjenjuje osnovni kapacitet nosivosti na poprečnu silu, podcjenjuje osnovni kapacitet nosivosti na porečnu silu, a precjenjuje duktilnost. Nasuprot tome predložena metoda postupnog guranja, koja uzima u obzir torzijske oblike titranja, pruža precizniju procjenu nelinearnog odziva mosta, osobito za nepravilne i složene geometrije poput SGM-a, a u skladu s odredbama Eurokoda 8. To ističe potrebu uzimanja u obzir viših oblika titranja i torzijskog ponašanja pri procjeni seizmičkog ponašanja SGM-ova.
- Predložena krivulja sposobnosti nosivosti (*pushover* krivulja), koja blisko odgovara IDA prosječnoj krivulji, nudi realniji i sveobuhvatniji pristup. Poželjnija je od konvencionalnih CPA metoda (modalna raspodjela bočnih opterećenja uporabom prvog vlastitog oblika elastičnog sustava, jednolika raspodjela bočnih opterećenja i gornja granična raspodjela bočnih opterećenja) za točniju nelinearnu seizmičku procjenu SGM-ova.

Za gotovo istu razinu točnosti predložena metoda postupnog guranja omogućuje procjenu R-faktora proučavanog SGM-a uz znatno manji računalni napor u usporedbi s IDA metodom, pri čemu je razlika u rezultatima minimalna i iznosi približno 2 %.

U vezi s drugim dijelom ovog istraživanja:

- Općenito, krute konstrukcije mostova sa stupovima jednake visine, osobito one s kraćim stupovima (npr. V32-S, V43-S i V54-S), pokazuju veću povećanu čvrstoću (Ω) zahvaljujući povećanoj krutosti. To otkriva znatne razine sigurnosti, upozoravaju na to da takve konstrukcije mogu izdržati seizmičke sile znatno veće od onih predviđenih projektom.
- U usporedbi s krutim varijantama, fleksibilne konstrukcije mostova sa stupovima jednake visine (npr. V54-T) pružaju veću duktilnost i poboljšane seizmičke performanse (više vrijednosti R faktora), ali nižu povećanu čvrstoću zbog veće fleksibilnosti i deformacijskoga kapaciteta.

- U područjima visoke seizmičke aktivnosti fleksibilni sandučasti gredni mostovi često su najpogodniji zbog veće duktilnosti i viših vrijednosti R-faktora. Nasuprot tome kruti sandučasti gredni mostovi prikladniji su u područjima gdje su potrebni povećana čvrstoća i krutost, jer pružaju granicu sigurnosti pri umjerenim seizmičkim opterećenjima.
- Broj raspona, visine stupova i njihova konfiguracija znatno utječu na seizmičko ponašanje SGM-ova. Mostovi sa stupovima nejednakih visina uvode geometrijske nepravilnosti, koje mogu pojačati seizmička opterećenja

i smanjiti ukupnu otpornost. Ta razlika ističe potrebu za pozornim planiranjem i prilagođenim projektiranjem kako bi se osiguralo pouzdano ponašanje tijekom potresa.

- Na temelju rezultata ovog istraživanja preporučuje se da Ministarstvo javnih radova prilikom sljedeće revizije propisa razmotri primjenu faktora ponašanja u rasponu od 3,5 do 5,5 za mostovne konstrukcije klasificirane u sklopu DCH-a, s posebnim težištem na sandučastim grednim mostovima. Ta bi prilagodba pružila točniji prikaz seizmičkog ponašanja takvih konstrukcija.

LITERATURA

- [1] Ouanani, M., Tiliouine, B.: Effects of foundation soil stiffness on the 3-D modal characteristics and seismic response of a highway bridge, *KSCE J Civ Eng.*, 19 (2015), pp. 1009-1023, <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0435-5>
- [2] Kehila, F., Khelifi, M., Belkacem, M.A.: Scalar and vector-valued fragility analysis of typical Algerian RC bridge piers, *Građevinar*, 75 (2023) 6, pp. 577-590, <https://doi.org/10.14256/JCE.3630.2022>
- [3] European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 8. design for earthquake resistance - Part 1: General rules: seismic actions and rules for buildings: European Standard EN 1998-1, Brussels: CEN; 2004.
- [4] International Conference of Building Officials: Uniform building code. Whittier, CA, USA: International Conference of Building Officials, 1994.
- [5] RPOA Part 1: Ponts, Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'arts, Algeria; 2008.
- [6] Isakovic, T., Fischinger, M.: Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 35 (2006) 1, pp. 95-114, <https://doi.org/10.1002/eqe.535>
- [7] Paraskeva, T.S., Kappos, A.J., Sextos, A.G.: Extension of modal pushover to seismic assessment of bridges, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 35 (2006) 11, pp. 1269-1293, <https://doi.org/10.1002/eqe.582>
- [8] Di Re, P., Bernardin, D., Ruta, D., Paolone, D.: Pushover analyses of slender cantilever bridge piers with strength and ductility degradation, *KSCE J Civ Eng.*, 28 (2024), pp. 836-848, <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0940-8>
- [9] Ganjehei, H., Zarfam, P., Ghafory-Ashtiany, M.: Innovative method for incremental dynamic analysis curves in semi-isolated bridges, *Građevinar*, 75 (2023) 4, pp. 343-354, <https://doi.org/10.14256/JCE.3065>
- [10] Vamvatisikos, D., Cornell, C.A.: Direct estimation of seismic demand and capacity of multi-degree of freedom systems through incremental dynamic analysis of single degree of freedom approximation, *J Struct Eng.*, 131 (2005) 4, pp. 589-599, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:4\(589\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(589))
- [11] Federal Emergency Management Agency; FEMA 440. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Washington, DC, USA: FEMA, 2005.
- [12] Ranjit, S.A., Evgenia, G., Marco, R., Theodoros, T.: Pushover analysis of inelastic seismic behaviour of greveniotikos bridge, *J Bridg Eng.*, 7 (2002) 2, pp. 115-126, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2002\)7:2\(115\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2002)7:2(115))
- [13] Sai, B.E.V., Samba, M.S., Mohan, G.G.: A study on behaviour of bridge piers in various seismic zonal conditions, *Int J Eng Trends Technol*, 11 (2020) 1, pp. 129-138.
- [14] Muhammad, J.B., Muhammad, W., Muhammad, A.S., Bakht, Z., Mahmood, A., Mohanad, M.S.S.: Response modification factors for multi-span reinforced concrete bridges in Pakistan, *Buildings*, 12 (2022) 7, Paper 921, <https://doi.org/10.3390/buildings1207092>
- [15] Michael, C.C., Joseph, K.Q.: Response modification factors for seismically isolated bridges, *Tech Rep MCEER*, 1998.
- [16] Ehsan, M., Shooshtari, A.: A multimode adaptive pushover procedure for seismic assessment of integral bridges, *Adv Civ Eng.*, (2013), pp. 1-13, <https://doi.org/10.1155/2013/941905>
- [17] Alessandro, V.B., Camillo, N., Davide, L., Gabriele, F., Bruno, B.: IMPA, incremental modal pushover analysis for bridges, *Applied Sci.*, 10 (2020) 12, Paper 4287, <https://doi.org/10.3390/app10124287>
- [18] Computers and Structures Incorporation: SAP2000 nonlinear computer software version 2014. Berkeley, California, CSI, 2014.
- [19] California Department of Transportation: Seismic design criteria: design manual, Version 1.6. Sacramento, CA, USA: Caltrans, 2010.
- [20] Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.: Seismic design and retrofit of bridges, Wiley, 1995.
- [21] Mander, J.B., Priestley, M.J.N.: Observed stress-strain behavior of confined concrete, *J Struct Eng.*, 114 (1988) 8, pp. 1827-1849, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1827\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1827))
- [22] Federal Emergency Management Agency. FEMA 356/ASCE. Seismic rehabilitation prestandard. Washington, DC, USA: FEMA; 2000.
- [23] Ouanani, M., Sandjak, K., Khelafi, A.M.: Performance sismique des systèmes d'isolation dans le comportement dynamique d'un pont caisson type, *Algérie Equipement*, 2021.
- [24] Applied Technology Council: ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood City, CA, USA, ATC, 1996.
- [25] Saiidi, M., Sozen, M.A.: Simple non-linear seismic analysis of RC structures, *J Struct Div.*, 107 (1981) 5, pp. 937-951, <https://doi.org/10.1061/JSDAG.0005714>
- [26] Krawinkler, H., Seneviratna, G.: Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, *Eng Struct.*, 20 (1998) 4-6, pp. 452-464, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)

- [27] Jan, T.S., Liu, M.W., Kao, Y.C.: An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings, *Eng Struct.*, 26 (2004) 1, pp. 117-128, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.09.003>
- [28] Chopra, A.K.: *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, 6th ed. Pearson, 2023.
- [29] Mitchell, D., Paultre, P.: Ductility and overstrength in seismic design of reinforced concrete structures, *Can J Civ Eng.*, 21 (1994) 6, pp. 1049-1060, <https://doi.org/10.1139/l94-109>
- [30] Kappos, A.J.: Evaluation of behavior factors on the basis of ductility and overstrength studies, *Eng Struct.*, 21 (1999) 9, pp. 823-835, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(98\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(98)00050-9)
- [31] Veletsos, A., Newmark, N.: Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions, In: *Proceedings, Second World Conference on Earthquake Engineering*, (1960), pp. 895-912, Japan.
- [32] Fajfar, P.: A nonlinear analysis method for performance based seismic design, *Earthq Spectra*, 16 (2000) 3, pp. 573-592, <https://doi.org/10.1193/1.1586128>
- [33] Itani, A., Gaspersic, P., Saiidi, M.: Response modification factors for seismic design of circular reinforced concrete bridge columns, *ACI Struct J.*, 94 (1997) 1, pp. 23-30.
- [34] Wilson, E.L., Yuan, M.W., Dicken, J.M.: Dynamic analysis by direct superposition of ritz vectors, *Earthq Eng Struct Dyn.*, 10 (1982) 6, pp. 813-821.
- [35] Gerami, M., Mashayekhi, A.H., Siahpolo, N.: Computation of R factor for steel moment frames by using conventional and adaptive pushover methods, *Arab J Sci Eng.*, 42 (2017) 3, pp. 1025-1037, <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2257-5>
- [36] Mwafy, A.M., Elnashai, A.S.: Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings, *J Eng Struct.*, 23 (2001) 5, pp. 407-424, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00068-7)