

Primljen / Received: 10.11.2017.

Ispravljen / Corrected: 25.9.2018.

Prihvaćen / Accepted: 5.1.2019.

Dostupno online / Available online: 10.5.2019.

Seizmičko poboljšanje mostova izoliranih uređajima SF-ED: analitičko istraživanje potvrđeno ispitivanjima na potresnom stolu

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Misin Misini**, dipl.ing.građ.
misin.misini@uni-pr.edu



²Doc.dr.sc. **Jelena Ristić**, dipl.ing.građ.
jelena.ristic.ibu@gmail.com



³Prof.dr.sc. **Danilo Ristić**, dipl.ing.građ.
danilo.ristic@gmail.com



¹Mr.sc. **Zijadin Guri**, dipl.ing.građ.
guri.zijadin@gmail.com



⁴Dr.sc. **Nebi Pllana**, dipl.ing.građ.
nplana@ipe-proing.com

¹Sveučilište u Prištini, Fakultet građevinarstva i arhitekture, Priština, Kosovo

²IBU, Tehnički fakultet, Odjel za građevinarstvo, Skoplje

³Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (ZIS), Skoplje, Makedonija

⁴IPE-Proing, Priština, Kosovo

Izvorni znanstveni rad

Misin Misini, Jelena Ristic, Danilo Ristic, Zijadin Guri, Nebi Pllana

Seizmičko poboljšanje mostova izoliranih uređajima SF-ED: analitičko istraživanje potvrđeno ispitivanjima na potresnom stolu

U radu je prikazan nelinearni trodimenzionalni analitički model eksperimentalno potvrđen ispitivanjima na potresnom stolu modela mosta u velikom mjerilu s poboljšanim sustavom za seizmičku izolaciju s prostornim pojasnicama, tj. s naprednim sustavom seizmičke zaštite tipa USI-SF. Prikazano je poboljšanje seizmičke zaštite pomoću sustava USI-SF usporednom analizom prototipa s predloženim novim sustavom. Tehnološke opcije za kvalitativno poboljšanje raznih tipova izoliranih mostova omogućene su konstrukcijskim poopćenjem uređaja SF-ED.

Ključne riječi:

most, seizmička izolacija, potresni stol, duktilnost, disipacija energije, seizmička sigurnost

Original scientific paper

Misin Misini, Jelena Ristic, Danilo Ristic, Zijadin Guri, Nebi Pllana

Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Analytical study validated by shaking table testing

A nonlinear 3D analytical model, experimentally validated by seismic shaking table tests of a large-scale bridge model constructed with upgraded seismically isolated system with space flange devices, representing an advanced USI-SF seismic protection system, is presented. Seismic protection advances of USI-SF system are demonstrated through comparative analysis of the model prototype with the proposed new system. Technological options for qualitative upgrading of various types of isolated bridges are made possible with structural generalization of SF-ED devices.

Key words:

bridge, seismic isolation, shaking table, ductility, energy dissipation, seismic safety

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Misin Misini, Jelena Ristic, Danilo Ristic, Zijadin Guri, Nebi Pllana

Seismische Verbesserung von Brücken, die durch SF-ED Geräte isoliert sind: analytische Untersuchung bestätigt durch Untersuchungen auf dem Erdbebentisch

In der Abhandlung ist das nicht lineare dreidimensionale analytische Modell dargestellt, das experimentell durch Untersuchungen am Erdbebentisch des Brückenmodells in einem großen Maßstab mit verbessertem System der seismischen Isolierung mit räumlichen Flanschen festgestellt wurde, d. h. mit einem fortschrittlichen seismischen Typ USI-SF. Dargestellt wird die Verbesserung des seismischen Schutzes mithilfe des Systems USI-SF im Vergleich zur Analyse des Prototyps mit dem empfohlenen neuen System. Die technologischen Optionen für eine hochwertige Verbesserung unterschiedlicher Typen isolierter Brücken werden durch die strukturelle Verallgemeinerung des SF-ED Gerätes ermöglicht.

Schlüsselwörter:

Brücke, seismische Isolierung, Erdbebentisch, Duktilität, Energiedissipation, seismische Sicherheit

1. Uvod

Iako se većina najznačajnijih istraživanja u području seizmičke izolacije mostova provode u poznatim istraživačkim centrima u Japanu, SAD-u, Italiji, Novom Zelandu itd., u novije se vrijeme uočava i sve veći doprinos mnogih drugih zemalja diljem svijeta, što je dovelo do razvoja velikog broja različitih ideja i koncepcija. Međutim, teorijska ili eksperimentalna istraživanja najčešće su usko usmjerena i koncentrirana na razvoj uređaja posebnog tipa kao što su: gumeni seizmički ležajevi, klizni seizmički ležajevi, kotrljajući seizmički ležajevi, uređaji za ograničavanje pomaka itd. Detaljan pregled koncepcija i postignuća u ovom uskom području dan je u velikom broju objavljenih istraživanja mnogih autora [1, 2]. Posebne karakteristike histereznog ponašanja običnih gumenih i olovno-gumenih seizmičkih ležajeva prikazane su u radovima [3, 4]. Specifično ponašanje kliznih seizmičkih ležajeva [5-7] i nedavno razvijenih jednostavnih seizmičkih pendli ležajeva [8, 9] detaljno se istražuje i eksperimentalno provjerava [10, 11] te se ti uređaji postupno uvode u praksu. Uvodi se i koncept primjene predloženih dodatnih uređaja za disipaciju seizmičke energije [12-17], zajedno s uređajima za ograničavanje velikih pomaka. U novije se vrijeme bilježi uzlazni trend u ovom inovativnom području potresnog inženjerstva, što uključuje i dodatna istraživanja raznih specifičnih srodnih pojava kao što su utjecaj udara [18], aksijalno ponašanje elastomernih izolatora [19] i utjecaj poluaktivnih prigušivača [20], a provode se i istraživanja koja su posvećena kvalitativnom poboljšanju postojećih tehnologija. Postupno se uvode i kontinuirano dopunjuju propisi [21] za projektiranje seizmički izoliranih mostova, naročito u državama koje se nalaze u seizmički aktivnim područjima [22]. U zaključcima svojih radova, mnogi autori daju preporuke za provođenje dodatnih istraživanja u ovom specifičnom znanstvenom području, što uključuje i stvaranje naprednih ideja za poboljšanje postojećih sustava za izolaciju mostova. Nedopuštena oštećenja i potpuna popuštanja mostovnih sustava, zabilježena u nedavnim jakim potresima, postala su itekako čvrst razlog za sveobuhvatno pokretanje, brz razvoj te praktičnu primjenu raznih sustava seizmičke izolacije za protupotresnu zaštitu mostova. Ovo razvojno istraživanje planirano je i provedeno kao odgovor na potencijalne buduće rizike i katastrofalna djelovanja kojima bi mogli biti izloženi klasični i uobičajeni izolirani mostovi u slučaju jakih potresa. U okviru ovog istraživanja razvijen je nov, eksperimentalno provjeren napredan sustav USI-SF, koji predstavlja kvalitativno seizmičko poboljšanje mostova izoliranih inovativnim uređajima SF za disipaciju energije. Analitičko istraživanje prikazano u ovom radu eksperimentalno je potvrđeno odgovarajućim kvazistatičkim ispitivanjima novoosmišljenih uređaja za seizmičku izolaciju i disipaciju energije, te složenim ispitivanjima na potresnom stolu prototipskih modela mosta u velikom mjerilu s novim naprednim sustavom USI-SF. Prikazana su poboljšanja sustava USI-SF u pogledu seizmičke zaštite, isto kao i razvoj novog klasično izoliranog prototipa te prototipskog modela klasičnog mosta. Konstrukcijskim poopćenjem uređaja SF-ED

proširena je mogućnost izbora kvalitativnog poboljšanja raznih tipova izoliranih mostova.

2. Obuhvat ovog istraživanja

U ovom su radu prikazani rezultati opsežnog istraživanja posvećenog razvoju napredne tehnologije za seizmičko poboljšanje mostova izoliranih uređajima SF-ED. Rad je podijeljen u dvije zasebne istraživačke cjeline. U prvoj cjelini, obrađenoj u prvom dijelu rada, prikazuju se rezultati dobiveni u okviru posebnih teorijskih istraživanja karakteristika histereznog ponašanja predloženih, konstrukcijski novih, tipova uređaja SF-ED (3. poglavlje). Poboljšani trodimenzionalni nelinearni analitički model primijenjen u ovom radu prethodno je eksperimentalno provjeren pomoću originalnih nelinearnih kvazistatičkih ispitivanja prototipskih modela SF-EN koji su podvrgnuti cikličnim opterećenjima do njihove inducirane duboke nelinearnosti. Drugi dio rada bazira se na rezultatima ranijeg opsežnog originalnog eksperimentalnog istraživanja, a uključuje rezultate nelinearnih kvazistatičkih ispitivanja novih uređaja SF-ED te rezultate uspješno provedenih jedinstvenih ispitivanja na potresnom stolu u okviru kojih je ispitivan prototipski model mosta USI-SF. Integralni rezultati sustavno su prezentirani, opisani, analizirani i objavljeni [23]. Analiza rezultata i određena opažanja koja su proizišla iz prethodno provedenog eksperimentalnog dijela istraživanja, omogućila su uspješnu provedbu izuzetno značajnih proširenih opomunskih istraživanja koja su prikazana u ovom radu. U drugom dijelu rada (poglavlja 5, 6, 7 i 8) prikazani su rezultati istraživanja s naglaskom na teorijsku analizu seizmičkog ponašanja mostova s novim sustavom USI-SF, te na usporedbu tog sustava s uobičajenim izoliranim sustavima i tradicionalnim (klasičnim) konstrukcijskim sustavom za slučaj jakog i vrlo jakog seizmičkog udara. Formulirani teorijski model uspješno je provjeren ispitivanjem prototipskog modela jednorasponskog mosta na potresnom stolu pri čemu je ispitivano ponašanje tijekom jakog potresa, s vrijednošću PGA (vršno ubrzanje tla) od približno 0,70 g. Provjereni model dodatno je korišten za teorijsku provjeru seizmičkog ponašanja sustava pod utjecajem vrlo jakih potresa s $PGA = 1,70$ g (poglavlje 5). U poglavlju 6 prikazan je način modeliranja. Osim toga, prikazani su usporedni rezultati analiza seizmičkog odziva prototipskog modela M1-A seizmički izoliranog (C-SI) uobičajenog jednorasponskog mosta, kako bi se istražio stvarni učinak instaliranih uređaja SF-ED. Zatim je na bazi eksperimentalno provjerenog koncepta formuliran prikladan nelinearni teorijski model odgovarajućeg prototipskog sustava trorasponskog mosta sa sustavom USI-SF i ispitano je njegovo stvarno seizmičko ponašanje pri jakim i vrlo jakim udarima potresa (poglavlje 7). Tim su istraživanjima stečena znanja o potencijalnim prednostima u smislu ostvarivanja vrlo značajnih poboljšanja protupotresne zaštite seizmički izoliranih mostova uslijed vrlo jakih potresa. I, na kraju, provedena je analiza seizmičkog ponašanja istog prototipskog modela trorasponskog mosta s tradicionalnim (klasičnim) konstrukcijskim sustavom, kako bi se dobili usporedni rezultati kojima se dokazuju prethodno navedene prednosti (poglavlje 8).

3. Poboljšano modeliranje trodimenzionalnog histereznog ponašanja novih tipova uređaja SF-ED

Sustav za disipaciju seizmičke energije, ugrađen u prototipskom modelu mosta sa sustavom USI-SF, sastavljen je od novorazvijenog osnovnog tipa uređaja SF za disipaciju energije [23]. U spomenutom su radu prikazani glavni razvojni koraci novog osnovnog uređaja SF-ED-L1R, a to su oblikovanje, proizvodnja, ispitivanje kao i konačni zaključci usvojeni na temelju eksperimentalnih ispitivanja histereznog ponašanja. Ključni ciljevi istraživanja su sljedeći:

- Potrebni uređaji SF-ED predloženog tipa SF-ED-L1R nisu prethodno istraženi te nisu dostupni na tržištu. Njihov prvobitni razvoj podrazumijevao je provedbu posebnog postupka koji je uključivao oblikovanje umanjениh prototipskih modela osnovnog tipa uređaja SF-ED-L1R u određenom mjerilu, proizvodnju i eksperimentalno ispitivanje prototipova radi definiranja njihovog stvarnog histereznog ponašanja uslijed potresa kao što su reverzna ciklična opterećenja, poput onih koji se javljaju tijekom seizmičkog udara.
- Razvoj prototipskih uređaja SF-ED nije ograničen na razvoj samo jednog osnovnog oblika uređaja. Postoji mogućnost njihove kreativne izmjene i stvaranje novih značajnih oblika uređaja koji bi se primjenjivali u posebnim slučajevima za seizmičko poboljšanje mostova s drugačijim izolacijskim sustavima.

U ovom se radu predlažu tri različita oblika ili tipa uređaja ili sustava SF-ED:

- uređaj SF-ED tip 1 kod kojeg širina komponente iznosi $L = 1R$ ili uređaj SF-ED-L1R, gdje je R polumjer zakrivljenosti komponente;
- uređaj SF-ED tip 2 kod kojeg širina komponente iznosi $L = 2R$ ili uređaj SF-ED-L2R;
- uređaj SF-ED tip 3 kod kojeg širina komponente iznosi $L = 3R$ ili uređaj SF-ED-L3R.

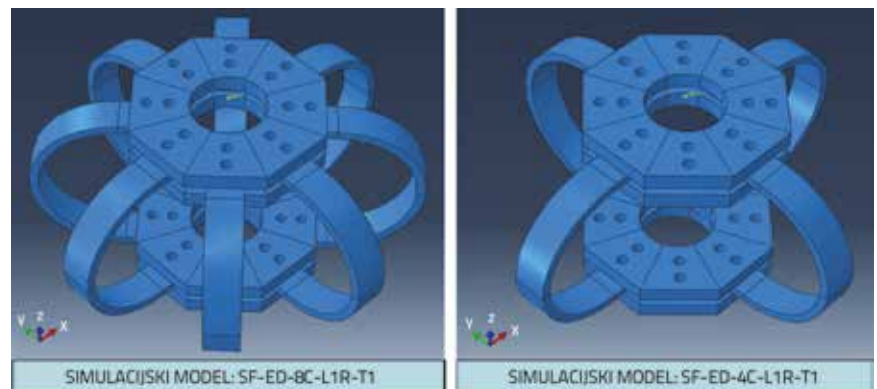
U okviru prethodnog osnovnog dijela istraživanja [23] - koji uključuje razvoj i ispitivanje uređaja SF-ED tip 1 - dobiveni su sljedeći značajni rezultati:

- potpuno svladavanje tehnologije oblikovanja, proizvodnje i ispitivanja uređaja SF-ED;
- definiranje stvarnog histereznog ponašanja pri formulaciji analitičkih modela;
- potvrđivanje pogodnosti za izravnu upotrebu na prototipskom modelu mosta u velikom mjerilu izrađenom za dinamičko ispitivanje na potresnom stolu;
- stvaranje uvjeta za eksperimentalnu provjeru osnovnog tipa uređaja USI-SF.

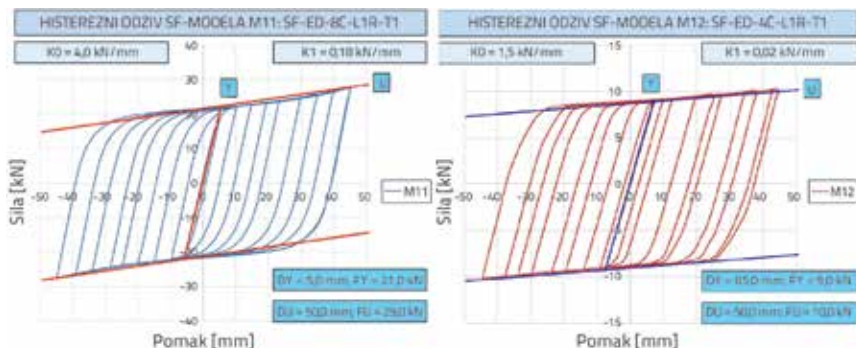
U ovom su radu prikazani novi rezultati dobiveni u okviru detaljnog komparativnog istraživanja, s naglaskom na poboljšano modeliranje histereznog ponašanja i analitičku histereznju analizu ponašanja triju predloženih tipova uređaja SF-ED koji omogućuju djelotvorno seizmičko poboljšanje izoliranih mostova izloženih najjačim potresima. Za numeričku simulaciju histereznog odziva novih vrsta uređaja SF-ED primijenjen je poboljšani trodimenzionalni analitički model formuliran u računalnom programu ANSYS [24]. Napredni, eksperimentalno provjereni i poboljšani nelinearni koncept za trodimenzionalno modeliranje, opisan u [23], konzistentno je i uspješno primijenjen u provedbi ovog proširenog istraživanja.

3.1. Modeliranje histereznog ponašanja osnovnog tipa 1 prototipskih modela M11 i M12 uređaja SF-ED

Za osnovni tip uređaja SF-ED karakteristično je specifično geometrijsko povećanje instaliranih komponenata ED, $L = 1R$, i to u horizontalnom smjeru računajući od fiksiranog poprečnog presjeka. Ako je vrijednost L tog horizontalnog povećanja komponente uređaja poznata, tada postoji dodatna mogućnost povezivanja uređaja u čitav uređaj koji uključuje svih osam komponenata, te u djelomičan uređaj koji sadrži četiri komponente. Međutim, postoji i dodatna mogućnost oblikovanja komponenata različitim svojstvima poprečnih presjeka i različite vrste duktilnog čeličnog materijala. U ovom je istraživanju geometrija poprečnog presjeka T1 jednaka kod svih komponenata, $b/h = 40 \text{ mm}/10 \text{ mm}$, za sva tri analizirana tipa novih uređaja SF-ED, kod kojih se koriste tri različita oblika komponenata ED u vidu prostornih pojasnica. U sva tri slučaja usporedno se analiziraju, osim čitavog uređaja, i djelomični uređaji sastavljeni od četiri komponente ED. Usvajanjem ovog koncepta, stvoreni su vrlo povoljni preduvjeti za usporednu analizu realnog histereznog ponašanja triju različitih tipova uređaja, od kojih je svaki sastavljen u dvije različite varijante, a pri simulaciji cikličnog opterećenja do njihove duboke nelinearnosti. Montirani osnovni tip 1 uređaja SF-ED prikazan je na slici 1. Prvi se uređaj sastoji od osam komponenata ED (model



Slika 1. Montirani osnovni tip 1 prototipskog uređaja SF-ED sastavljen od osam komponenata ED (model M11) i četiri komponente ED (model M12)



Slika 2. Izračunani histerezni odziv pri cikličnom opterećenju osnovnog tipa 1 prototipskog uređaja SF-ED sastavljenog od osam komponenata ED (model M11) i četiri komponente ED (model M12)

Tablica 1. Histerezna svojstva ponašanja uređaja SF-ED-M11 i SF-ED-M12 izračunana nelinearnim modelom konačnih elemenata te primjenom simuliranih cikličnih pomaka s povećavanjem amplituda

Br.	Uređaj SF-ED M11: SF-ED-8C-L1R-T1			Uređaj SF-ED M12: SF-ED-4C-L1R-T1		
	Oznaka	Model konačnih elemenata	[%]	Oznaka	Model konačnih elemenata	Δ [%]
1	DY [mm]	5,0	100,0	DY [mm]	6,0	120,0
2	FY [kN]	21,0	100,0	FY [kN]	9,0	42,8
3	KO [kN/mm]	4,0	100,0	KO [kN/mm]	1,5	37,5
4	K1 [kN/mm]	0,18	100,0	K1 [kN/mm]	0,02	11,1
5	K1/KO	0,045	100,0	K1/KO	0,013	28,8

M11), označen kao uređaj SF-ED-8C-L1R-T1, a drugi se uređaj sastoji od četiri komponente ED (model M12), označen kao uređaj SF-ED-4C-L1R-T1.

Primjenom eksperimentalno provjerenih i poboljšanih nelinearnih trodimenzionalnih analitičkih modela, uspješno su izračunani histerezni odzivi oba prototipska uređaja (modela) pri cikličnom opterećenju, kao što se to može vidjeti na slici 2.

Dobiveni rezultati jasno pokazuju da se usvojeni reprezentativni bilinearni analitički model može primijeniti za realistično modeliranje potpuno histereznog ponašanja uređaja. Definirani parametri reprezentativnih bilinearnih modela usporedno su prikazani u tablici 1. Usporedbom djelomičnog uređaja sastavljenog od četiri komponente ED i cjelovitog uređaja sastavljenog od osam komponenata ED, mogu se usvojiti sljedeći zaključci:

- pomak pri popuštanju bitno se ne razlikuje;
- sila pri popuštanju smanjuje se na 42,8 %, početna se krutost smanjuje na 37,5 %, a sekantna se krutost smanjuje na 11,1 %;

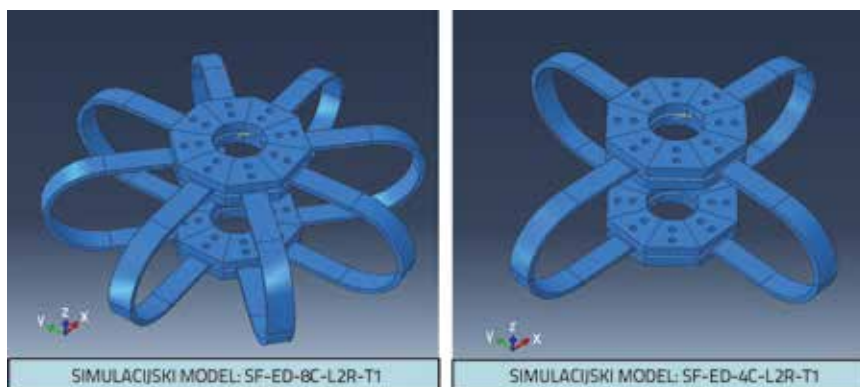
- vrijednosti reprezentativnog odnosa $K1/KO$ iznose 4,5 % i 1,3 %.

Ova analiza izravno potvrđuje da se kontrola histereznog ponašanja osnovnog uređaja tipa 1 može prethodno odrediti već tijekom postupka oblikovanja, uzimajući u obzir stvarne zahtjeve kod projektiranja.

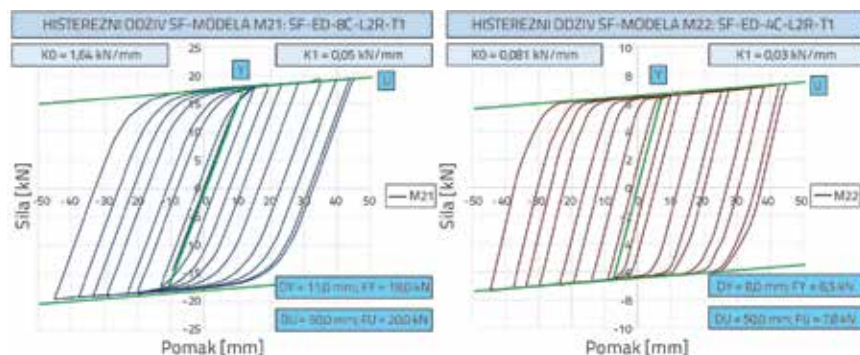
3.2. Modeliranje histereznog ponašanja tipa 2 prototipskih modela M21 i M22 uređaja SF-ED

Za izradu tip 2 uređaja SF-ED karakteristično je posebno geometrijsko povećanje instaliranih komponenata ED, $L = 2R$, i to u horizontalnom smjeru, uzimajući u obzir udaljenost između poprečnih presjeka učvršćenja komponente ED.

Na slici 3. prikazan je ugrađeni tip 2 uređaja SF-ED. Lijevo se prototip sastoji od osam komponenata ED, označen kao uređaj SF-ED-8C-L2R-T1 (model



Slika 3. Izrađeni tip 2 prototipskog uređaja SF-ED sastavljenog od osam komponenata ED (model M21) i četiri komponente ED (model M22)



Slika 4. Izračunani histerezni odziv pri cikličnom opterećenju osnovnog tipa 2 prototipskog uređaja SF-ED sastavljenog od osam komponenata ED (model M21) i četiri komponente ED (model M22)

Tablica 2. Histerezna svojstva uređaja SF-ED-M21 i SF-ED-M22 izračunana pomoću nelinearnog modela konačnih elemenata te primjenom simuliranih cikličnih pomaka s povećavanjem amplituda

Br.	Uređaj SF-ED M21: SF-ED-8C-L2R-T1			Uređaj SF-ED M22: SF-ED-4C-L2R-T1		
	Oznaka	Model konačnih elemenata	[%]	Oznaka	Model konačnih elemenata	Δ [%]
1	DY [mm]	11,0	100,0	DY [mm]	8,0	72,7
2	FY [kN]	18,0	100,0	FY [kN]	6,5	36,1
3	K0 [kN/mm]	1,64	100,0	K0 [kN/mm]	0,81	49,3
4	K1 [kN/mm]	0,05	100,0	K1 [kN/mm]	0,03	60,0
5	K1/K0	0,030	100,0	K1/K0	0,037	123,3

M21). Desni prototip sastoji se od četiri komponente ED, označen kao uređaj SF-ED-4C-L2R-T1 (model M22). Primjenom formuliranog poboljšanog nelinearnog analitičkog modela baziranog na istoj koncepciji modeliranja, dobivene su reprezentativne krivulje histereznog ponašanja pri simuliranom cikličnom opterećenju, s povećanjem amplituda do duboke nelinearnosti (slika 4.).

Definirani parametri reprezentativnih histereznih bilinearnih modela prikazani su u tablici 2. U usporedbi s prvim potpunim uređajem (prototip M21), za drugi su djelomični uređaj (prototip M22) dobiveni znatno drugačiji parametri histereznog odziva:

- pomak pri popuštanju smanjen je na 72,7 %;
- sila pri popuštanju smanjena je na 36,1 %;
- početna krutost K0 smanjena je na 49,3 %.

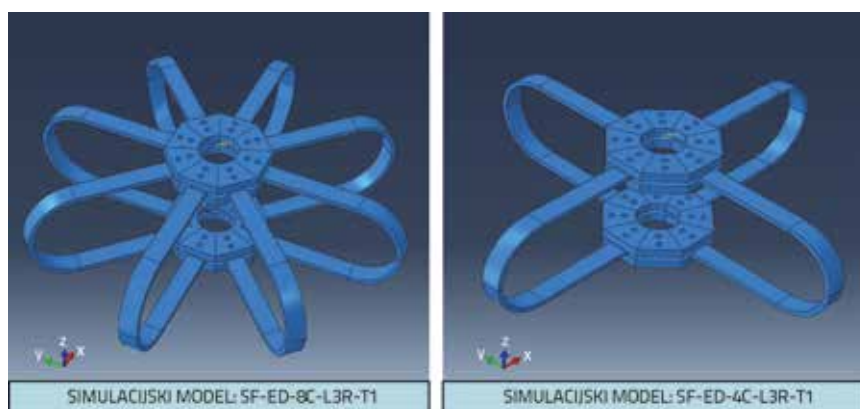
I, konačno, vrijednosti reprezentativnog odnosa K1/K0 iznose 3,0 % i 3,7 %. Ova analiza izravno potvrđuje da se potrebne histerezne karakteristike mogu postići tijekom poboljšanog analitičkog postupka u okviru projektiranja.

3.3. Modeliranje histereznog ponašanja tipa 3 prototipskih modela M31 i M32 uređaja SF-ED

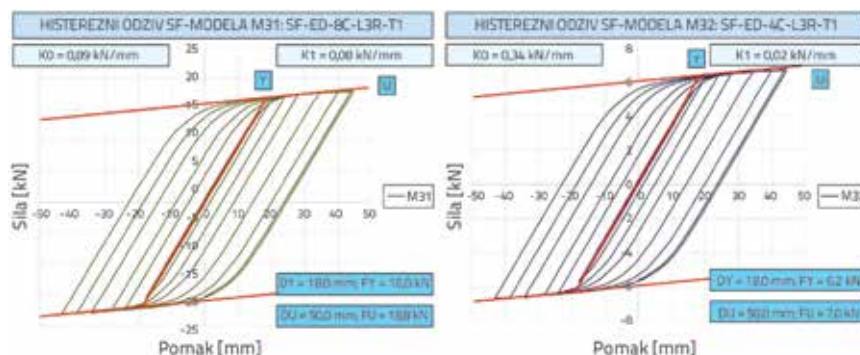
Za izrađeni tip 3 uređaja SF-ED karakteristično je posebno geometrijsko povećanje ugrađenih komponenata ED, $L = 3R$, i to u horizontalnom

smjeru, uzimajući u obzir udaljenost između poprečnih presjeka učvršćenja komponente ED.

Na slici 5. prikazan je montirani tip 3 uređaja SF-ED. Prvi (lijevi) prototip sastoji se od osam komponenata ED, označen kao uređaj SF-ED-8C-L3R-T1 (model M31). Drugi (desni) prototip sastoji se od četiri komponente ED, označen kao uređaj SF-ED-4C-L3R-T1 (model M32). Primjenom odgovarajućih formuliranih nelinearnih trodimenzionalnih analitičkih



Slika 5. Izrađeni tip 3 prototipskog uređaja SF-ED sastavljenog od osam komponenata ED (model M31) i četiri komponente ED (model M32)



Slika 6. Izračunani histerezni odziv pri cikličnom opterećenju osnovnog tipa 3 prototipskog uređaja SF-ED sastavljenog od osam komponenata ED (model M31) i četiri komponente ED (model M32)

Tablica 3. Histerezna svojstva uređaja SF-ED-M21 i SF-ED-M22 izračunana pomoću nelinearnog modela konačnih elemenata te primjenom simuliranih cikličnih pomaka s povećavanjem amplituda

Br.	Uređaj SF-ED M31: SF-ED-8C-L3R-T1			Uređaj SF-ED M32: SF-ED-4C-L3R-T1		
	Oznaka	Model konačnih elemenata	[%]	Oznaka	Model konačnih elemenata	Δ [%]
1	DY [mm]	18,0	100,0	DY [mm]	18,0	100,0
2	FY [kN]	16,0	100,0	FY [kN]	6,2	38,7
3	K0 [kN/mm]	0,89	100,0	K0 [kN/mm]	0,34	38,2
4	K1 [kN/mm]	0,08	100,0	K1 [kN/mm]	0,02	25,0
5	K1/K0	0,089	100,0	K1/K0	0,058	65,1

modela, dobivene su reprezentativne krivulje histereznog ponašanja pri simuliranom cikličnom opterećenju, s povećanjem amplituda do duboke nelinearnosti (slika 6.). Parametri reprezentativnih histereznih bilinearnih modela prikazani su u tablici 3.

U usporedbi s prvim čitavim uređajem (model M31), za drugi su djelomični uređaj (model M32) dobiveni znatno drugačiji parametri histereznog odziva:

- pomak pri popuštanju bio je isti;
- sila pri popuštanju smanjena je na 38,7 %;
- početna krutost KO smanjena je na 38,2 %;
- vrijednosti odnosa $K1/KO$ iznosile su 8,9 % i 5,8 %.

I, konačno, potvrđeno je da se karakteristike histereznog ponašanja ovog tipa uređaja mogu uspješno definirati tijekom formuliranog poboljšanog postupka proračuna.

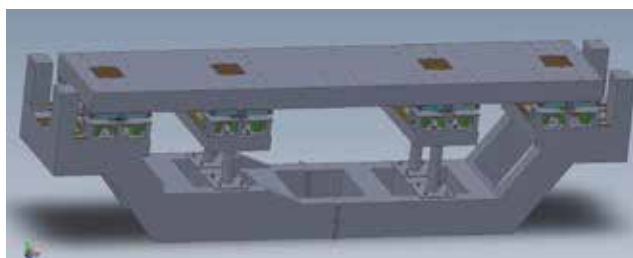
3.4. Završne napomene

Na temelju analize histereznog ponašanja triju vrsta inovativnih uređaja SF-ED može se zaključiti sljedeće:

- Osnovni tip 1 uređaja SF-ED, izrađen u dvije opcije: SF-ED-8C-L1R-T1 i SF-ED-4C-L1R-T1, s horizontalnim produženjem komponenata ED ($L = 1R$), može se djelotvorno koristiti za seizmičko poboljšanje izoliranih mostova, naročito kod mostova s velikom seizmičkom razdjelnicom;
- Dva novopredložena tipa uređaja SF-ED: tip 2 s dvije opcije SF-ED-8C-L2R-T1 i SF-ED-4C-L2R-T1 i tip 3 s dvije opcije SF-ED-8C-L3R-T1 i SF-ED-4C-L3R-T1, s geometrijskim svojstvima komponenata ED: $L = 2R$ i $L = 3R$, mogu se uspješno koristiti za seizmičko poboljšanje izoliranih mostova s relativno malim seizmičkim razdjelnicama.
- Uzimajući u obzir činjenicu da su poprečni presjeci komponenata ED jednaki, tri su različite sile popuštanja zabilježene za tri vrste potpunih uređaja SF-ED s osam komponenata, a te sile iznose: $FY1 = 21,0$ kN (tip 1), $FY2 = 18,0$ kN (85,7 %) (tip 2) i $FY3 = 16,0$ kN (76,2 %) (tip 3).
- Početna krutost triju tipova uređaja SF-ED također je bitno smanjena te iznosi: $KO1 = 4,0$ kN/mm, $KO2 = 1,64$ kN/mm (41,0 %) i $KO3 = 0,89$ kN/mm (22,2 %).
- S druge strane, stvaran pomak pri popuštanju bitno se povećao za tri tipa uređaja SF-ED te iznosi: $FY1 = 5,0$ mm, $FY2 = 11,0$ mm (220 %) i $FY3 = 18,0$ mm (360,0 %).
- Vrlo slična tendencija histereznog ponašanja zabilježena je kod analiziranih triju tipova djelomičnih uređaja SF-ED sastavljenih od četiri komponente ED.
- Konzistentno prikazani rezultati istraživanja pokazuju da se uvedeni novi tipovi uređaja SF-ED mogu primijeniti kao pouzdana, prilagodljiva i djelotvorna koncepcija za prikladno seizmičko poboljšanje izoliranih autocestovnih mostova, naročito u slučajevima kada se mogu očekivati vrlo jaki potresi.

4. Ispitivanje prototipskog modela mosta sa sustavom USI-SF na potresnom stolu

U postupku oblikovanja novokonstruiranog i ovdje ispitanog prototipskog modela mosta (slika 7.), u obzir su uzete dimenzije sastavnih elemenata prototipskog mosta i njihov doprinos stvarnom ponašanju mosta, zatim karakteristike osnovnih komponenata konstrukcije, tip primijenjenog sustava seizmičke izolacije te karakteristike ugrađenih originalnih uređaja SF-ED.



Slika 7. Projektirani prototipski model mosta sa sustavom USI-SF ispitan na potresnom stolu instituta IZIS u svrhu provjere predložene tehnologije i formuliranog nelinearnog analitičkog modela

Uzimajući u obzir dimenzije (5,0 m x 5,0 m) i nosivost potresnog stola, osnovni model ISUBRIDGE trebao se geometrijski umanjiti radi usklađenja s odabranim prototipom. U tu je svrhu usvojen geometrijski faktor mjerila od 1:9. Isti je faktor korišten za provjeru ograničenja u ovom analiziranom slučaju, ali prema usvojenoj koncepciji oblikovanja modela. Zbog smanjenja mjerila, odgovarajuća svojstva analizirana u dinamičkim ispitivanjima umanjena su u skladu sa zakonom sličnosti [25]. Uzimajući u obzir osnovne povezane faktore, usvojen je prikladan kombinirani realni simulacijski model umjetno replicirane mase. Za simuliranje krutog AB rasponskog sklopa usvojena je kruta ploča s dodanom masom i pritom je korišten isti materijal kao za prototipsku konstrukciju. Za simulaciju središnjih stupova korišten je čelični materijal. Uređaji za seizmičku izolaciju i disipaciju energije dimenzionirani su i izvedeni u umanjenom mjerilu. Zakon sličnosti podrazumijeva usvajanje odnosa između različitih parametara, a sve treba biti izraženo u vidu geometrijskog faktora mjerila ($1/n$). Za izradu AB segmenata modela mosta korišten je beton klase C25/30, a za izradu čeličnih uređaja SF-ED odabran je i korišten čelični materijal kvalitete S355. Uzimajući u obzir gornje parametre za dimenzioniranje, najprije je idejno osmišljen eksperimentalni model mosta kako bi se stvorili najbolji mogući realni uvjeti za uspješno ispunjenje osnovnih ciljeva ispitivanja definiranih i analiziranih u okviru ovog istraživanja [26-29]. Postupak uključuje i originalnu eksperimentalnu provjeru stvarnih seizmičkih svojstava ponašanja sustava USI-SF u uvjetima vrlo jakog potresa. Kako bi se postigli navedeni ciljevi, izrađen je fizikalni model tipičnog trorasponskog prototipskog mosta u velikom mjerilu, te je taj model korišten u ispitivanjima na potresnom stolu [23] (slike 8., 9. i 10.).



Slika 8. Izrada AB kontinuirane ploče koja predstavlja rasponsku konstrukciju mosta



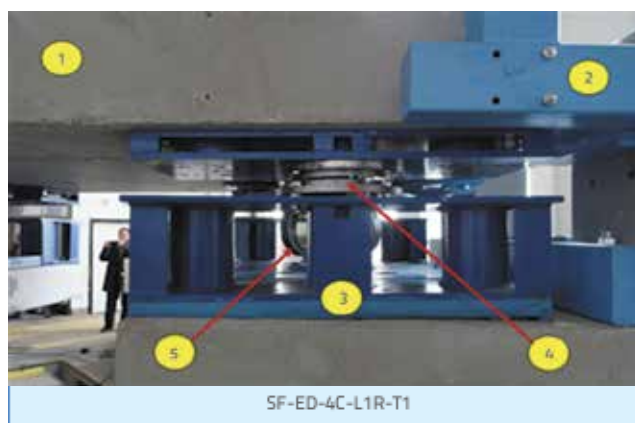
Slika 9. Betonirani lijevi segment donjeg ustroja oblikovanoga prototipskog modela mosta sa sustavom USI-SF



Slika 10. Prototipski model mosta u velikom mjerilu sa sustavom USI-SF koji je korišten za ispitivanja na potresnom stolu radi simuliranja djelovanja jakog potresa: (1) krajnji lijevi oslonac; (2) krajnji desni oslonac; (3) oslonac iznad kraćih središnjih stupova; (4) oslonac iznad dužih središnjih stupova

Donji ustroj eksperimentalnoga prototipskog modela mosta sastavljen je od dviju paralelnih krutih AB greda koje na oba kraja imaju odgovarajući nagib kako bi se omogućilo uzdignuto horizontalno pozicioniranje oslonaca upornjaka.

Horizontalni dijelovi obje paralelne AB grede služe za dijagonalno nalijeganje modela mosta na potresni stol. Ukupna dužina horizontalnog dijela AB greda iznosi $l_1 = 520,0$ cm. Dimenzije kosih dijelova na oba kraja, uključujući i njihove produžetke, jesu $l_2(\text{lijevo}) = l_2(\text{desno}) = 155,0$ cm. Ukupna dužina donjeg ustroja, uključujući i prije navedene dimenzije, iznosi $L_{\text{DS}} = 520,0 + 2 \cdot 155,0 = 830,0$ cm. Poprečni presjek dviju paralelnih greda iznosi $b/h = 25$ cm/50 cm. Međutim, na lijevoj je strani visina poprečnog presjeka povećana za 20,0 cm te iznosi $b/h = 25$ cm/70 cm. Na taj je način ispunjen uvjet za gradnju središnjih stupova različite visine. Objе paralelne AB grede povezane su sa šest poprečnih AB greda, po tri na svakoj polovici.



Slika 11. Detalj novih uređaja za ispitivanje: (1) rasponska konstrukcija; (2) čelični oslonac uređaja DL; (3) čelični oslonac uređaja DRSRB; (4) uređaj DRSRB; (5) uređaj SF-ED-4C-L1R-T1

Središnji stupovi izvedeni su u parovima od po dva čelična stupa kružnog šupljeg presjeka, promjera $D = 168$ mm i debljine stijenke 12,0 mm. Na gornjoj površini čelični stupovi imaju završne čelične spojne ploče koje nose AB ploče dimenzija 90 cm x 150 cm x 20 cm. Na tim AB pločama nalaze se dvije simetrične pozicije za eventualnu montažu para uređaja DRSRB, s uređajima SF-ED postavljenima između njih. Čitav donji ustroj je montažne izvedbe, a sastoji se od dva dijela jednake dužina (slike 7. i 10.).

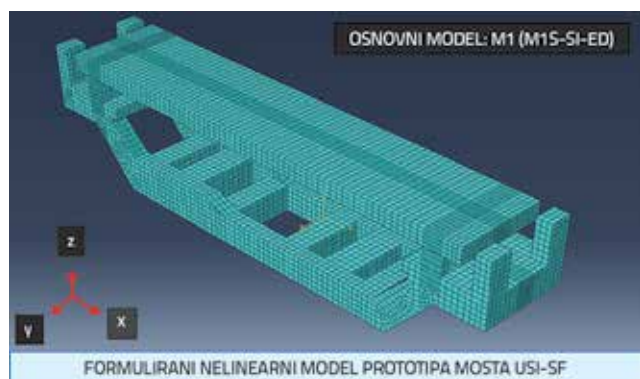
Gornji ustroj (rasponska konstrukcija) prototipskog modela mosta izveden je kao AB kolnička ploča mosta odgovarajuće težine (slike 7. i 10.). Kako bi se postigla ta težina, usvojene su poprečne dimenzije AB ploče od $b/d = 150/30$ cm. Ukupna dužina AB ploče iznosi $L = 740,0$ cm. Na svakom je kraju ostavljen slobodan prostor od $D_1 = D_2 = 20$ cm. Nešto se dalje nalaze vertikalni krajnji konzolni stupovi širine $b_1 = b_2 = 25,0$ cm. Uzimajući u obzir dimenzije na vrhu konstrukcije, ukupna dužina čitavog eksperimentalnog modela mosta iznosi $L = 740,0$ cm + $2 \cdot 20,0$ cm + $2 \cdot 25,0$ cm = 830,0 cm. AB ploča smještena je na visinskom razmaku od $h_g = 40,0$ cm iznad najvišeg lica AB donjeg ustroja. Taj prostor (seizmička razdjelnica) služi za smještaj dva (2) metalna odstoynjaka na svakom osloncu (predviđena su dva krajnja i dva središnja oslonca). Uređaji DRSRB postavljeni su na

spomenute metalne odstoynike. Između tih odstoynika nalazi se prostor za montažu novih uređaja SF-ED (slika 11.).

5. Modeliranje i seizmički odziv ispitanog jednorasponskog prototipskog modela mosta M1 sa sustavom USI-SF

Eksperimentalni rezultati, dobiveni na potresnom stolu tijekom ispitivanja jednorasponskog prototipskog modela mosta M1 opremljenog sustavom USI-SF, u ovom su istraživanju iskorišteni:

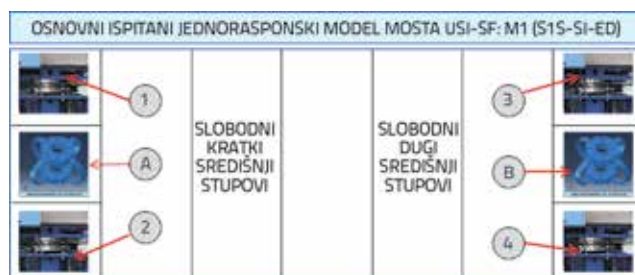
- za pouzdano provjeravanje analitičkog modela;
- za određivanje stvarnog ponašanja novog jednorasponskog sustava mosta USI-SF pri vrlo jakim potresima primjenom eksperimentalno provjerenog teorijskog modela;
- za usporedno određivanje stvarnog ponašanja istog umanjenog modela seizmički izoliranog uobičajenog sustava jednorasponskog mosta (C-SI) pri istim djelovanjima potresa primjenom eksperimentalno provjerenog teorijskog modela;
- za provjeru primjenjivosti analitičkog modela u analizi seizmičkog ponašanja montiranog trorasponskog sustava mosta opremljenog uređajem USI-SF.



Slika 12. Formulirani nelinearni analitički model ispitanog prototipskog modela mosta u velikom mjerilu opremljenog sustavom USI-SF, korišten u provođenju ovog analitičkog istraživanja

Analitički nelinearni model ispitanog jednorasponskog prototipskog modela mosta u velikom mjerilu M1 (slika 12.), opremljenog sustavom USI-SF, formuliran je primjenom iste geometrije i rezultata dobivenih iz prethodno provedenih eksperimentalnih istraživanja histereznog ponašanja glavnih nelinearnih komponenata mostovnog sustava (slika 13.). Dva identična seizmička ležaja tipa DRSRB, označena sa 1, 2 i 3, 4, ugrađena su na lijevom i desnom upornjaku, a između njih su ugrađeni novi uređaji tipa SF-ED za disipaciju seizmičke energije, svaki s po četiri komponente ED, a nose oznaku A i B. Kako bi se postigla odgovarajuća mehanička svojstva, za eksperimentalna ispitivanja potrebne su četiri komponente. Stoga su one prikladno uključene u formulirani analitički model. Eksperimentalnim je ispitivanjima dokazano da se histerežno

ponašanje uređaja DRSRB može vrlo uspješno simulirati pomoću bilinearnog histereznog modela definiranog s dvije točke, a to su točka popuštanja Y i točka U kojom je definirana kosina drugog dijela dijagrama. Eksperimentalnim su ispitivanjem definirane sljedeće deformacije i sile za odgovarajući bilinearni model uređaja DRSRB: $D_y = 1,0$ mm; $F_y = 0,3$ kN; $D_u = 50,0$ mm; $F_u = 0,9$ kN. Analogno je eksperimentalnim istraživanjima dokazano da se histerežno ponašanje novih uređaja SF-ED tipa 1 može također vrlo uspješno simulirati odgovarajućim bilinearnim modelom. Eksperimentalnim su istraživanjima definirani sljedeći parametri reprezentativnog bilinearnog modela uređaja SF-ED s četiri komponente ED: $D_y = 6,0$ mm; $F_y = 9,0$ kN; $D_u = 50,0$ mm; $F_u = 10,0$ kN. Realno ponašanje AB donjeg ustroja i gornjeg ustroja izvedenog i ispitanog prototipskog modela mosta M1 vrlo je precizno analitički simulirano u SAP2000 pomoću sitne mreže sastavljene od trodimenzionalnih krutih linearnih konačnih elemenata (ukupno 892), koji predstavljaju odgovarajuće vrlo krute AB segmente (slika 12.). Odgovarajuće nelinearno ponašanje ispitanih uređaja DRSRB i SF-ED vrlo je uspješno analitički simulirano pomoću postojećih nelinearnih spojnih elemenata. Početna provjera ostvarene razine sličnosti između projektiranog i izvedenog prototipskog modela mosta M1 provedena je usporedbom dinamičkih karakteristika djelomičnog sustava sa samo četiri uređaja DRSRB, pri čemu nisu uključeni uređaji SF-ED. Kod takvog djelomičnog mostovnog sustava, dva osnovna teorijski izračunana perioda vibracija iznosila su $T_1 = T_2 = 0,500$ s, dok su vrijednosti eksperimentalno definirane ispitivanjem harmonijskom pobudom promjenjive funkcije (eng. *sine sweep test*) vrlo bliske i iznose $T_1 = 0,522$ s i $T_2 = 0,521$ s (tablica 4.).



Slika 13. Položaji uređaja DRSRB i SF-ED na jednorasponskom prototipskom modelu mosta M1 u velikom mjerilu, sa sustavom USI-SF, tijekom ispitivanja na potresnom stolu

Uspješnost primjene formuliranog analitičkog modela za potrebe ovog istraživanja potvrđena je usporedbom dinamičkih karakteristika prototipskog modela čitavog mosta s ugrađenim uređajima DRSRB i SF-ED. Dinamičke karakteristike prototipskog modela čitavog mosta eksperimentalno definirane vibracijskim ispitivanjem harmonijskom pobudom promjenjive funkcije, i karakteristike dobivene teorijski pomoću formuliranog analitičkog modela, vrlo su slične i iznose $T_1 = 0,348$ s; $T_2 = 0,347$ s tj. $T_1 = 0,347$ s; $T_2 = 0,346$ s, što je uistinu zanemarivo (tablica 4.). Ustvari, dobivena razlika iznosi samo 0,3 %, što pokazuje da se formulirani analitički model može smatrati vrlo

Tablica 4. Provjera analitičkog modela sa sustavom USI-SF na bazi proračuna dinamičkih karakteristika

Osnovni periodi ispitivanog modela mosta M1 sa sustavom USI-SF (I. Model mosta s uređajima DSRSB, samo eksperimentalno: T1 = 0,522 s; T2 = 0,521 s)					
II. Model mosta s uređajima DSRSB i SF-ED					
Eksperimentalno (ispitivanje harmonijskom pobudom promjenjive funkcije)			Teorijsko (trodimenzionalni model)		
1	T1 = 0,348 s	100 %	1	T1 = 0,347 s	-0,3 %
2	T2 = 0,347 s	100 %	2	T2 = 0,346 s	-0,3 %

Tablica 5. Provjera analitičkog modela M1 s USI-SF na bazi ispitivanja na potresnom stolu

Seizmički odziv ispitivanog modela mosta M1 sa sustavom USI-SF (Relativni pomak gornjeg ustroja mosta u smjeru potresnog stola: vršni prosjek)					
Potres El Centro: PGA = 0,77 g					
Eksperimentalno (2 kanala)			Teorijsko (nelinearni trodimenzionalni model)		
1E	Dmax = 21,57 mm	100 %	1T	Dmax = 23,97 mm	+11,1 %
Potres Petrovac: PGA = 0,71 g					
Eksperimentalno (2 kanala)			Teorijsko (nelinearni trodimenzionalni model)		
2E	Dmax = 17,57 mm	100 %	2T	Dmax = 19,03 mm	+8,3 %

Tablica 6. Izračunane komponente pozitivnih i negativnih vrijednosti odabranih karakterističnih parametara mostovnog modela M1 s USI-SF za dvije razine intenziteta potresa El Centro i Petrovac

Br.	Razina potresa-1: El Centro PGA = 0,77 g			Razina potresa-2: El Centro PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	Max (+)	Max (-)
1	DYmax [mm]	17,0	15,0	DYmax [mm]	33,0	24,0
Br.	Razina potresa-1: Petrovac PGA = 0,71 g			Razina potresa-2: Petrovac PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	MaxD (+)	MaxD (-)
1	DYmax [mm]	16,0	11,0	DYmax [mm]	29,0	34,0

realnim sredstvom za određivanje inicijalnog stanja mostovnog sustava USI-SF, te da udovoljava uvjetima za realna simulacijska istraživanja.

Drugi najvažniji korak u provjeri formuliranog analitičkog modela proveden je rezultatima eksperimentalnog seizmičkog odziva zapisanim tijekom složenog seizmičkog ispitivanja na potresnom stolu čitavog jednorasponskog prototipskog modela mosta u velikom mjerilu, s uređajem USI-SF, simulacijom jakog potresa. Kao najvažniji kontrolni parametri, maksimalni pomaci gornjeg ustroja, zabilježeni tijekom eksperimentalnih ispitivanja, uspoređeni su s pomacima koji su izračunani teorijskom primjenom formuliranog nelinearnog analitičkog modela (tablica 5.). Tijekom simulacije jakog potresa El Centro s vršnim ubrzanjem tla (PGA) od 0,77 g, definirani prosječni vršni pomak baziran na četiri vršna zapisa zabilježena tijekom eksperimenta iznosio je Dmax = 21,57 mm, dok je isti pomak dobiven teorijskom analizom u istim uvjetima iznosio Dmax = 23,97 mm. Slično, simulacijom jakog potresa Petrovac s PGA = 0,71 g definiran je prosječni vršni pomak baziran na četiri vršna zapisa zabilježena tijekom eksperimenta iznosio Dmax = 17,57

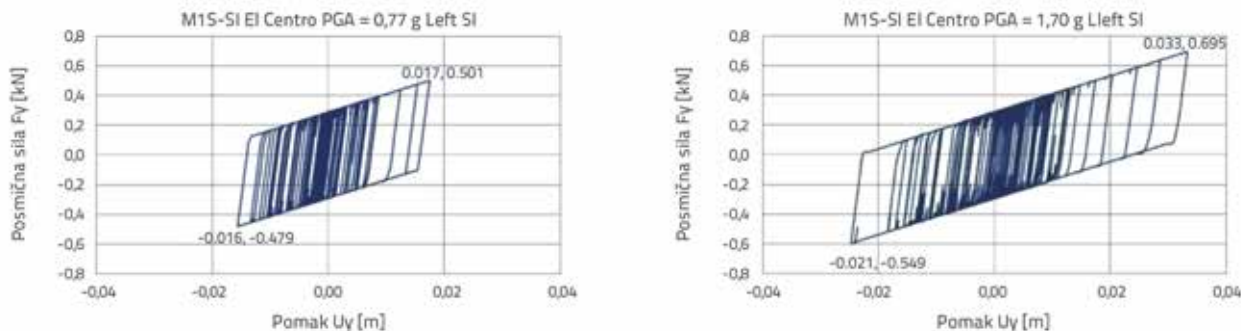
mm, dok je isti pomak dobiven teorijskom analizom iznosio Dmax = 19,03 mm. U prvom slučaju razlika iznosi samo 11,1 %, a u drugom je slučaju razlika još manja i iznosi samo 8,3 % (tablica 5.).

Prikazani usporedni rezultati dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem jednorasponskog prototipskog modela mosta u velikom mjerilu s USI-SF, te teorijski rezultati dobiveni primjenom formuliranog nelinearnog analitičkog modela, pokazuju da se primijenjeni analitički model formuliran na temelju eksperimentalno dokazanih parametara nelinearnog ponašanja ugrađenih uređaja može vrlo uspješno koristiti za realno simuliranje kompleksnog nelinearnog ponašanja složenih inovativnih mostovnih sustava opremljenih seizmičkim izolacijskim sustavima i novim uređajima SF-ED za disipaciju seizmičke energije. Zbog kapaciteta potresnog stola i velike težine izgrađenog prototipskog modela mosta s uređajem USI-SF, nije bilo moguće provesti simulacije potresa jačih od navedenih. Međutim, u okviru razmatranog istraživanja, veliko je zanimanje iskazano za istraživanje stvarnog ponašanja inovativnog sustava zaštite mostova s USI-SF pri djelovanju mnogo jačih potresa. Čitav i vrlo realan zapis simulacije prikazanog složenog problema dobiven je teorijskom analizom

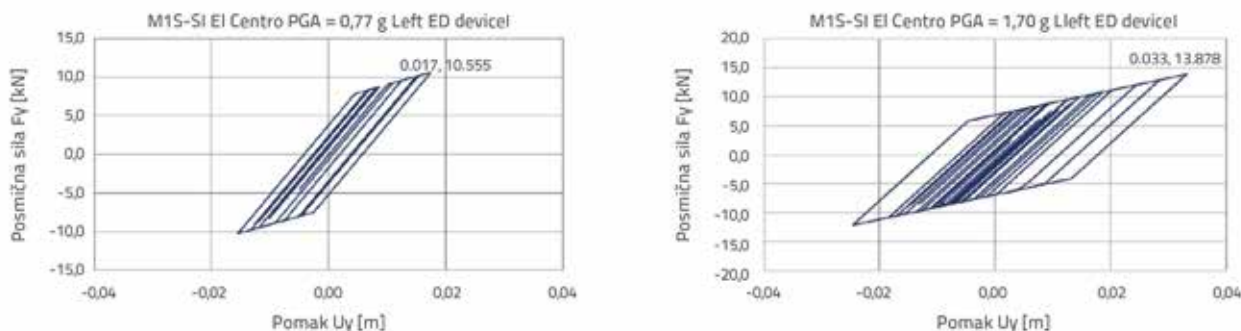
seizmičkog odziva čitavog sustava USI-SF tijekom simulacije mnogo jačih potresa El Centro i Petrovac s vršnim ubrzanjima od čak PGA = 1,70 g.

Očekivana analiza provedena je vrlo uspješno. Većina karakterističnih usporednih rezultata koji se odnose na djelovanje jakog ili vrlo jakog potresa prikazana je na slikama 14., 15. i 16, te u tablici 6. Na tim su slikama grafički prikazani najvažniji usporedni rezultati dobiveni u okviru dvije analize koje su provedene kako bi se simuliralo djelovanje jakog i vrlo jakog potresa El Centro. Slična svojstva odziva dobivena su i u sklopu dvije odgovarajuće analize u kojima su simulirane dvije jačine potresa Petrovac. Slika 14. prikazuje reprezentativni histerezni odziv u smjeru y za seizmički ležaj tipa DSRSB, smješten na lijevoj strani, pri djelovanju potresa El Centro, za ubrzanja PGA = 0,77 g i PGA = 1,70 g.

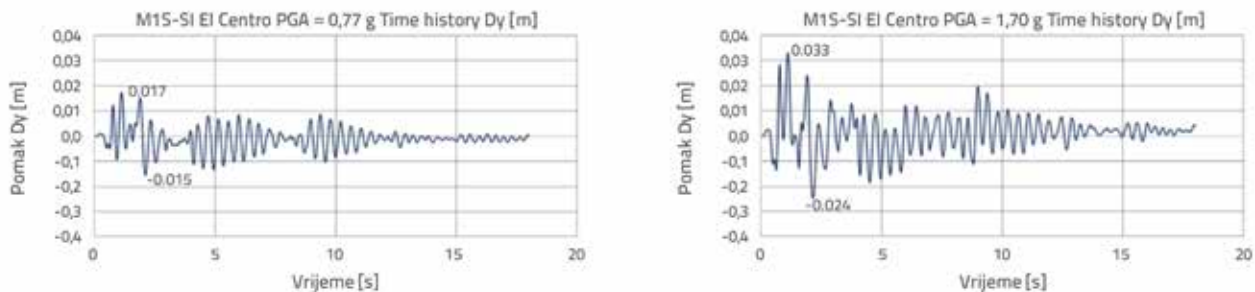
Na slici 15. usporedno su prikazani izračunani histerezni odzivi novog uređaja SF-ED-4C-L1R-T1 za disipaciju energije u smjeru y pri djelovanju simuliranog potresa El Centro podešenog na ubrzanja PGA = 0,77 g i PGA = 1,70 g. Analogno tome, na slici 16. usporedno su prikazani izračunani relativni odzivi u vidu



Slika 14. Model mosta M1 s uređajem USI-SF: Histerezni odziv F-D u smjeru y lijevo postavljenog uređaja DSRSB pri djelovanju potresa El Centro za ubrzanja PGA = 0,77 g i PGA = 1,70 g u smjeru potresnog stola



Slika 15. Model mosta M1 s uređajem USI-SF: Histerezni odziv F-D u smjeru y lijevo postavljenog uređaja SF-ED pri djelovanju potresa El Centro za ubrzanja PGA = 0,77 g i PGA = 1,70 g u smjeru potresnog stola



Slika 16. Model mosta M1 s uređajem USI-SF: Pomak u smjeru y DY pri djelovanju potresa El Centro podešenog na vrijednosti PGA = 0,77 g i PGA = 1,70 g, u smjeru potresnog stola

pomaka gornjeg stroja u smjeru y pri simuliranom djelovanju u realnom vremenu umanjena potresa El Centro podešenog na obje navedene vrijednosti koje predstavljaju jako i vrlo jako potresno djelovanje.

I konačno, u tablici 6. su za dvije jačine potresa usporedno prikazane izračunane komponente y pozitivnih i negativnih vršnih ili maksimalnih relativnih pomaka gornjeg stroja modela mosta. Rezultati tog proračuna - koji jasno upućuju na konzistentnost cjelokupnih karakteristika seizmičkog ponašanja novog prototipskog sustava jednorasponskog mosta s uređajem USI-SF - omogućuju izvođenje sljedećih zaključaka:

- Formulirani nelinearni analitički model novog mostovnog sustava USI-SF omogućuje vrlo uspješnu simulaciju stvarnog eksperimentalno određenog seizmičkog odziva prototipskog

modela u velikom mjerilu, ispitano pri simuliranom djelovanju jakog potresa na potresnom stolu.

- Gornja opažanja pokazuju da je novoformulirani eksperimentalno potvrđeni nelinearni analitički koncept modeliranja uspješna realizacija prikazanog vrlo važnog "analitičkog seizmičkog ispitivanja" novog prototipskog modela mosta USI-SF pri simuliranom vrlo jakom potresu s ubrzanjem od PGA = 1,70 g. Analiza nelinearnog ponašanja modela USI-SF, koja se trebala provesti u vrlo specifičnim uvjetima eksperimentalnog ispitivanja, nije se mogla uklopiti u kapacitet potresnog stola, pa se stoga ta analiza nije mogla provesti na potresnom stolu u laboratoriju.
- Rezultati dobiveni tijekom istraživanja pokazuju da predloženi novi sustav seizmičke zaštite USI-SF, namijenjen za seizmičko

poboljšanje izoliranih mostova, posjeduje izuzetnu stabilnost i funkcionalnu sposobnost čak i pri vrlo jakim ponavljajućim potresima.

Općenito, funkcionalnost sustava ovisi o učinkovitosti primijenjenog prethodno definiranog koncepta za izbjegavanje problema koji proizlaze iz trajnih deformacija. Moguće trajne deformacije mogu se riješiti ugrađivanjem dilatacijskih spojnica i/ili intervencijom nakon potresa kako bi se izbjegli trajni pomaci, a za to se koriste posebni upravo za to namijenjeni uređaji za nanošenje sile.

6. Modeliranje i usporedna analiza potresnog odziva uobičajenog seizmički izoliranog (C-SI) jednorasponskog prototipskog modela M1-A

Modeliranje i usporedna seizmička analiza odziva montiranog uobičajenog seizmički izoliranog (C-SI) prototipskog modela jednorasponskog mosta M1-A provedeni su izričito radi proučavanja mogućnosti poboljšanja ovdje prikazanih inovativnih uređaja SF-ED. Odgovarajući analitički nelinearni model M1-A formuliran je na temelju analognog već primijenjenog koncepta. Međutim, dva uređaja SF-ED su uklonjena. Na istim su položajima ostavljena samo četiri identična seizmička ležaja tipa DSRSB, tj. 1, 2 i 3, 4 na lijevom i desnom upornjaku (slika 17.). Ostali parametri analitičkog modela nisu mijenjani.



Slika 17. Položaji uređaja DSRSB na analiziranom uobičajenom seizmički izoliranom (C-SI) prototipskom modelu jednorasponskog mosta M1-A (samo M1S-SI)

S obzirom na definiranu konfiguraciju modela C-SI, seizmički je odziv analiziran na sva četiri odabrana reprezentativna slučaja, pri čemu su simulirane dvije iste jačine potresa El Centro podešene na $PGA = 0,77$ g i $PGA = 1,70$ g, te dvije jačine potresa Petrovac podešene na $PGA = 0,71$ g i $PGA = 1,70$ g. U usporednoj tablici 7. prikazane su izračunate komponente u pozitivnih i negativnih vršnih ili maksimalnih relativnih pomaka gornjeg ustroja modela mosta za dvije jačine potresa te za dvije različite konfiguracije modela mosta. Izračunani relativni vršni pomaci gornjeg stroja montiranog uobičajenog seizmički izoliranog (C-SI) prototipskog modela jednorasponskog mosta M1-A (bez uređaja SF-ED)

Tablica 7. Izračunate komponente pozitivnog i negativnog relativnog vršnog pomaka na gornjem ustroju montiranog uobičajenog seizmički izoliranog (C-SI) prototipskog modela mosta M1-A za dvije razine intenziteta potresa El Centro i Petrovac

Br.	Razina potresa-1: El Centro PGA = 0,77 g			Razina potresa-2: El Centro PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	Max (+)	Max (-)
1	DYmax [mm]	(17,0) / 13,6	(15,0) / 30,8	DYmax [mm]	(33,0) / 44,4	(24,0) / 67,1
Br.	Razina potresa-1: Petrovac PGA = 0,71 g			Razina potresa-2: Petrovac PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	MaxD (+)	MaxD (-)
1	DYmax [mm]	(16,0) / 20,7	(11,0) / 7,6	DYmax [mm]	(29,0) / 39,9	(34,0) / 18,3

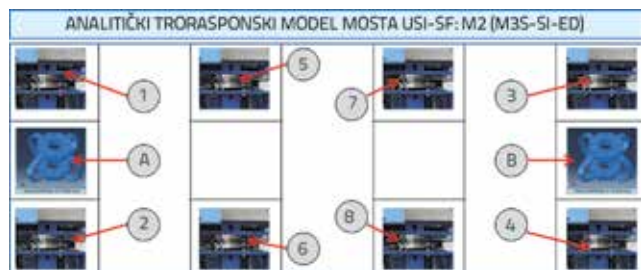
mного su veći od vršnih pomaka dobivenih za konfiguraciju montiranog novog prototipskog modela mosta USI-SF (prikazano usporedno u zagradama). Prikazani rezultati jasno pokazuju veliku važnost uređaja SF-ED korištenih za seizmičko poboljšanje izoliranih mostova. Na primjer, maksimalni relativni pomak iznosio je $D_{max} = 67,1$ mm pri simulaciji vrlo jakog potresa El Centro podešenog na $PGA = 1,70$ g.

Tako velik rezultirajući pomak smatra se kritičnim i uzrokuje potpuno popuštanje gornjeg ustroja prototipskog mosta jer granični pomak uređaja DSRSB iznosi $D_a = 40,0$ mm. Međutim, kada su korišteni uređaji SF-ED, maksimalni relativni pomak bitno je smanjen i to na $D_{max} = 33,0$ mm. Ipak, važno je naglasiti da je tako veliko smanjenje relativnog pomaka od 103,3 % zabilježeno u slučaju najvećeg intenziteta potresa. Rezultati ispitivanja dobiveni u ovom dijelu istraživanja pokazuju da predloženi novi sustav za seizmičku zaštitu USI-SF može u seizmičkom smislu bitno poboljšati ponašanje izoliranih mostova, što je posebno značajno kod budućih vrlo jakih potresa.

7. Modeliranje i karakteristike potresnog odziva montiranog prototipskog modela trorasponskog mosta M2 opremljenog sustavom USI-SF

Poboljšani nelinearni teorijski model za usporedbu montiranog prototipskog modela trorasponskog mosta M2 opremljenog sustavom USI-SF formuliran je u programu SAP2000 [30] i [31] primjenom znanja iz prije prikazanih istraživanja te znanja o mogućnostima eksperimentalno provjerenog koncepta modeliranja novog sustava. Primjenom formuliranog eksperimentalno provjerenog analitičkog modela, provedena je analiza seizmičkog ponašanja za usporedbu montiranog trorasponskog mostovnog sustava USI-SF na djelovanje jakog i vrlo jakog potresa, što ustvari predstavlja pouzdan "analitički eksperiment". Montirani trorasponski prototipski sustav mosta opremljen uređajem USI-SF sadrži karakterističnu varijantu raspodjele uređaja za seizmičku izolaciju i novih uređaja za disipaciju seizmičke energije (slika 18.). Isti seizmički ležajevi tipa DSRSB ugrađeni su na sva četiri oslonca, tj. dva seizmička ležaja na lijevi upornjak i dva seizmička ležaja na desni upornjak (oznake 1, 2 i 3, 4). Također su dva seizmička ležaja postavljena iznad lijevih (kraćih) središnjih stupova, a dva su seizmička ležaja

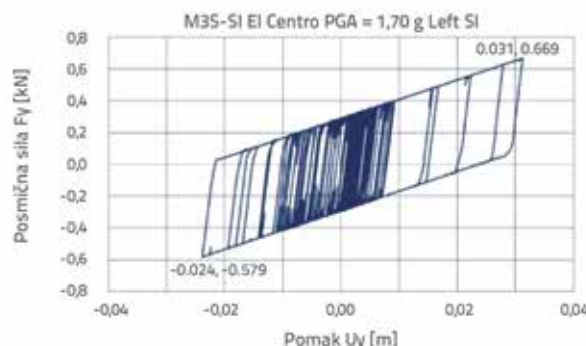
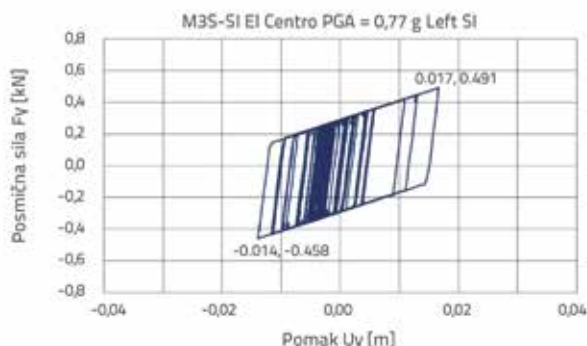
postavljena iznad desnih (dužih) središnjih stupova (oznake 5, 6 i 7, 8).



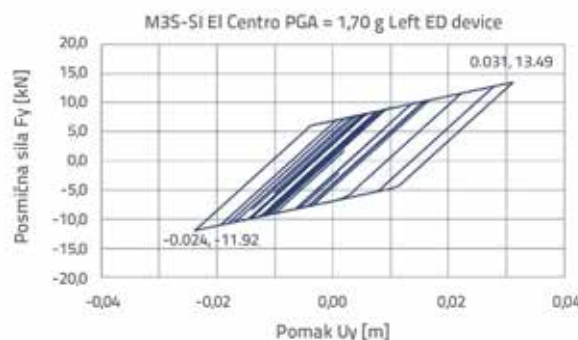
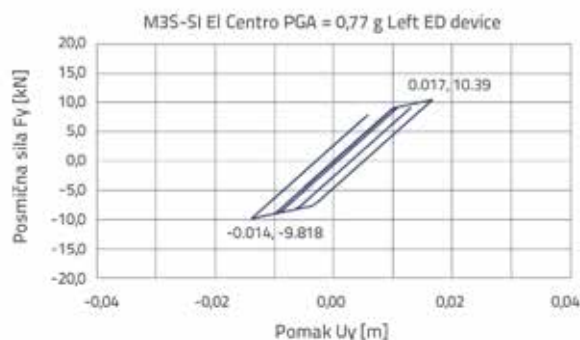
Slika 18. Pozicije uređaja DSRSB i SF-ED na montiranom trorasponskom prototipskom modelu mosta M2 u velikom mjerilu s uređajem USI-SF

Ispitani uređaji za disipaciju energije SF-ED-4C-L1R-T1 ugrađeni su samo na lijevom i desnom upornjaku, između seizmičkih ležaja, a označeni su s A i B. Histerezne karakteristike razmatranih seizmičkih ležajeva i uređaja za disipaciju seizmičke energije identične su onima koje su korištene u slučaju prethodno ispitivanog prototipskog modela jednorasponskog mosta M1 u velikom mjerilu, opremljenog uređajem USI-SF. Nelinearni analitički model novomontiranog prototipskog modela trorasponskog mosta M2, koji je primijenjen u razmatranim analizama, formuliran je na isti način kao i prethodni, tj. usvojene su 1893 čvorne točke. Međutim, u ovom su slučaju postojeći

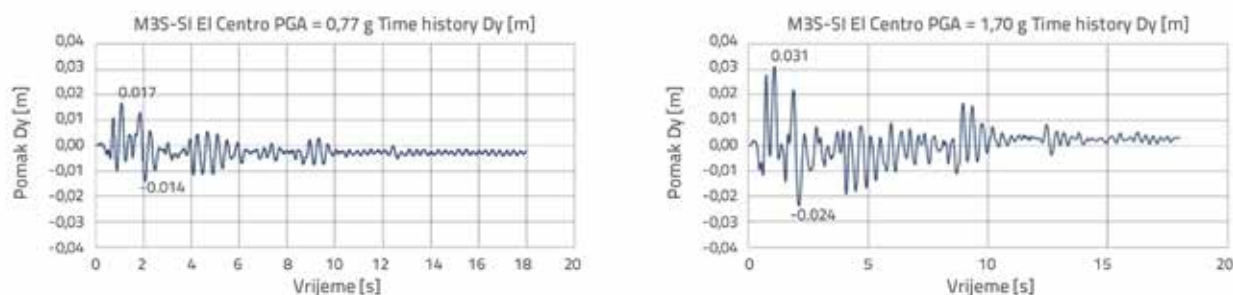
kraći i duži središnji stupovi, sastavljeni od metalnih cjevastih profila kružnog poprečnog presjeka, integrirani u model sa 104 okvirna elementa. Model uključuje 892 elastična kruta elementa, 40 elastičnih ljuskastih elemenata za modeliranje naglavica iznad kraćih i dužih stupova, 10 nelinearnih veznih elemenata i 136 ograničenja. Usvojen je beton klase C25/30 i čelik kvalitete S355. U analitičkom modelu središnji su stupovi tretirani kao linearni elementi kako bi se izravnim putem utvrdilo seizmičko ponašanje ugrađenih uređaja DSRSB i SF-ED. Provedene su analize seizmičkog odziva sustava na djelovanje oba potresa podešenih na razinu jakog ili vrlo jakog intenziteta udara. Podešeno vršno ubrzanje pri potresu El Centro za udar jakog i vrlo jakog potresa iznosilo je $PGA = 0,77$ g tj. $PGA = 1,70$ g, dok su u slučaju potresa Petrovac te vrijednosti iznosile $PGA = 0,71$ g tj. $PGA = 1,70$ g. Iz niza provedenih analiza odabrani su najkarakterističniji rezultati te su prikazani na slikama 19. do 23. Na slici 19. usporedno je prikazan histerezni odziv uređaja 1 DSRSB u smjeru y, na udar potresa El Centro podešenog na $PGA = 0,77$ g tj. $PGA = 1,70$ g. Na prikazanim se dijagramima u oba slučaja vidi vrlo stabilno ciklično ponašanje modeliranih uređaja DSRSB. Međutim, u drugom se slučaju uočavaju bitno veći relativni vršni pomaci na gornjem ustroju mosta. Na slici 20. usporedno su prikazani i histerezni odzivi uređaja A za disipaciju energije (uređaj SF-ED-4C-L1R-T1) u smjeru y. I u tom je slučaju zabilježeno intenzivnije aktiviranje uređaja SF-ED u slučaju simulacije jačeg potresa. Treba napomenuti da je maksimalna



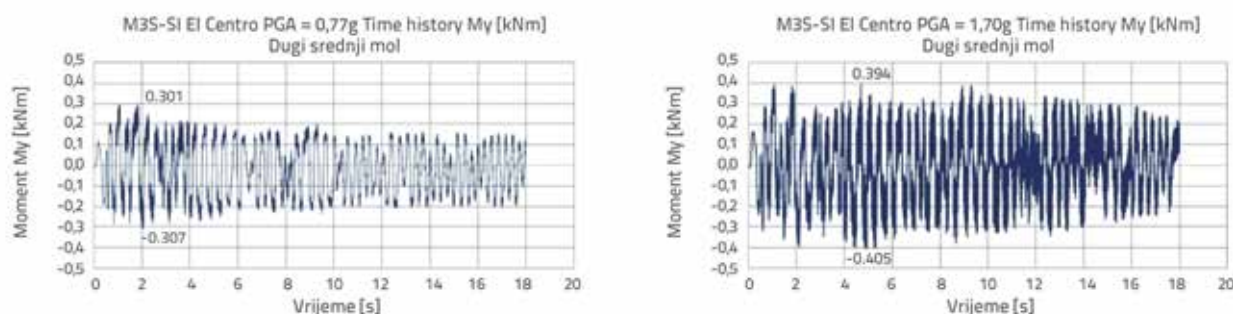
Slika 19. Model mosta M2 s uređajem USI-SF: Histerezni odziv F-D u smjeru y za lijevi uređaj DSRSB pod djelovanjem potresa El Centro podešenog na $PGA = 0,77$ g i $PGA = 1,70$ g u smjeru potresnog stola



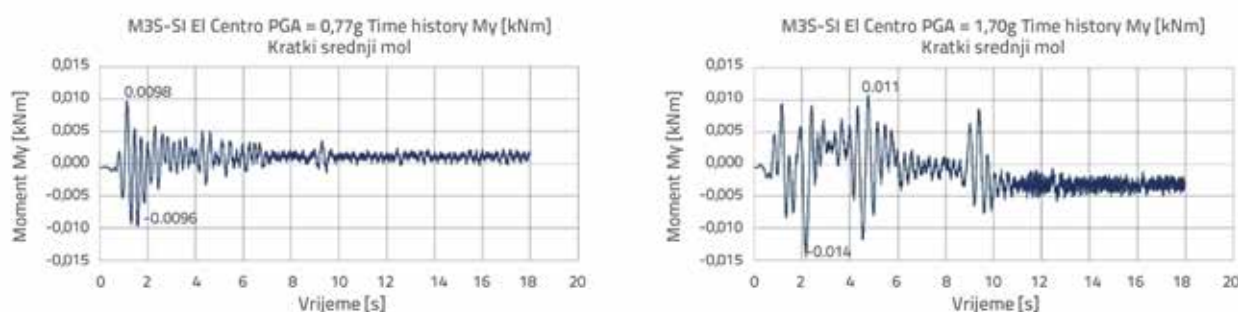
Slika 20. Model mosta M2 s uređajem USI-SF: Histerezni odziv F-D u smjeru y za lijevi uređaj SF-ED pod djelovanjem potresa El Centro podešenog na $PGA = 0,77$ g i $PGA = 1,70$ g u smjeru potresnog stola



Slika 21. Model mosta M2 s uređajem USI-SF: Odziv pomaka u smjeru y DY pri djelovanju potresa El Centro podešenog na PGA = 0,77 g, tj. PGA = 1,70 g u smjeru potresnog stola



Slika 22. Model mosta M2 s uređajem USI-SF: Odziv momenta MY na fiksnom dnu dugog središnjeg stupa pri djelovanju potresa El Centro podešenog na PGA = 0,77 g, tj. PGA = 1,70 g u smjeru potresnog stola



Slika 23. Model mosta M2 s uređajem USI-SF: Odziv momenta MY na fiksnom dnu kratkog središnjeg stupa pri djelovanju potresa El Centro podešenog na PGA = 0,77 g, tj. PGA = 1,70 g u smjeru potresnog stola

sila aktivirana na seizmičkom ležaju DSRB bila mnogo manja, te da je iznosila $\max F = 0,67$ kN. U slučaju uređaja za disipaciju seizmičke energije SF-ED-4C-L1R-T1 postignuta je vrijednost $\max F = 13,49$ kN. Ti rezultati upućuju na vrlo značajni doprinos novih uređaja SF-ED čija primjena dovodi do povoljne promjene globalnog seizmičkog odziva. S obzirom na visok stupanj disipacije seizmičke energije, uspješno je postignuto pozitivno smanjenje maksimalnih relativnih pomaka na razini gornjeg ustroja mosta. Ta se tendencija također može jasno uočiti na slici 21., gdje se daje usporedni prikaz vremenskih zapisa relativnih pomaka gornjeg ustroja u smjeru y pri djelovanju potresa El Centro. U slučaju jakog potresa podešenog na PGA = 0,77 g, ostvareni maksimalni pomak u smjeru y iznosio je $\max Dy = 17,0$ mm, dok je maksimalni pomak iznosio $Dy = 31,0$ mm pri vrlo jakom potresu podešenom na PGA = 1,70 g (tablica 8.). U

tablici 8. može se uočiti slična tendencija za djelovanje potresa Petrovac. Dakle, za potres Petrovac podešen na PGA = 0,71 g dobivena je vrijednost $\max Dx = 15,0$ mm, dok je za isti potres podešen na vrlo jak intenzitet od PGA = 1,70 g maksimalni pomak iznosio $\max D = 34,0$ mm. Kako je djelovanje potresa simulirano pod kutom od 45° u odnosu na uzdužnu os mosta, računski su dobiveni jednaki pomaci u smjerovima x i y ($Dx = Dy$), što predstavlja vrijednosti komponenta pomaka.

Maksimalni pomaci u smjeru djelovanja potresa su veći i iznose $\max D = \sqrt{2} \cdot Dx = \sqrt{2} \cdot Dy$. Isti odnos vrijedi i za sve ostale izračunane komponente fizikalnih veličina. Primijenjeni koncept prema kojem se seizmički ležajevi ugrađuju samo preko središnjih stupova u modelu M2, bez uređaja SF-ED-4C-L1R-T1, uvjetovan je (samo u ovom slučaju) s ciljem da se smanji prijenos velikih seizmičkih sila na vrh središnjih stupova i

Tablica 8. Izračunane komponente y pozitivnih i negativnih vrijednosti odabranih karakterističnih parametara modela mosta M2 s uređajem USI-SF za dvije razine intenziteta potresa El Centro i Petrovac

Br.	Razina potresa-1: El Centro PGA = 0,77 g			Razina potresa-2: El Centro PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	Max (+)	Max (-)
1	DYmax [mm]	17,0	14,0	DYmax [mm]	31,0	24,0
2	IpMYmax [kNm]	0,30	0,30	IpMYmax [kNm]	0,39	0,40
3	spMYmax [kNm]	0,01	0,01	spMYmax [kNm]	0,01	0,01

Br.	Razina potresa-1: Petrovac PGA = 0,71 g			Razina potresa-2: Petrovac PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	MaxD (+)	MaxD (-)
1	DYmax [mm]	15,0	12,0	DYmax [mm]	31,0	34,0
2	IpMYmax [kNm]	0,29	0,31	IpMYmax [kNm]	0,41	0,47
3	spMYmax [kNm]	0,00	0,00	spMYmax [kNm]	0,01	0,01

da se smanje ležajni momenti na točkama učvršćenja središnjih stupova. Međutim, primjena ostalih opcija nije ograničena. Na slici 22. daje se usporedni prikaz vremenskih zapisa ležajnih momenata M_y na dnu dužih stupova pri djelovanju jakog i vrlo jakog potresa El Centro. Vršne vrijednosti tih momenata vrlo su male i iznose $IpMY_{max} = 0,30$ kN tj. $IpMY_{max} = 0,40$ kN.

Na slici 23. usporedno su prikazani vremenski zapisi momenata M_y kraćih stupova koji su dobiveni tijekom jakog i vrlo jakog potresa El Centro. Ostvarene vrijednosti maksimalnih momenata čak su i niže te iznose $spMY_{max} = 0,011$ kN tj. $spMY_{max} = 0,015$ kN. I, konačno, u tablici 8. prikazani su najvažniji parametri odziva pri djelovanju oba potresa i njihove dvije jačine. Točnije, u tablici se vide pozitivne i negativne vršne vrijednosti pomaka u smjeru y i komponente momenta za središnje stupove M_y . Vršni pomaci ostvareni na modelu M2 istog su reda veličine kao i pomaci dobiveni u slučaju prethodno analiziranog modela M1. To je i logično jer su se u oba slučaja koristila dva identična uređaja SF-ED, te zato što utjecaj različitog broja seizmičkih izolatora nije značajan zbog njihove vrlo niske horizontalne krutosti.

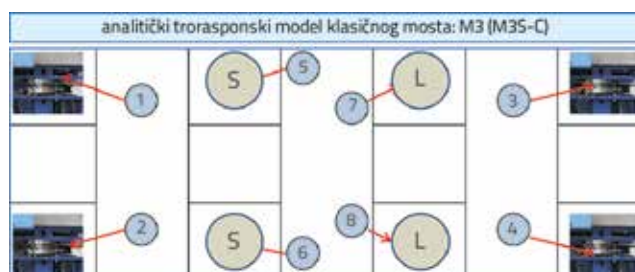
Na temelju analize seizmičkog odziva novog trorasponskog mostovnog sustava s uređajem USI-SF, tj. na temelju seizmičke pobude jakog i vrlo jakog intenziteta, mogu se usvojiti sljedeći vrlo važni zaključci:

- Učinak novih SF-ED uređaja u pogledu disipacije seizmičke energije može se vrlo uspješno projektirati i uskladiti sa stvarnim potrebama pojedinačnih građevina.
- Pod utjecajem raznih ponavljajućih dinamičkih ciklusa pozitivnih i negativnih pomaka, novi uređaji SF-ED pokazuju veliku razinu pouzdanosti, prilagodljivosti i stabilnosti osnovnih parametara koji su ključni za njihovo histerezno ponašanje.
- Ugrađivanje uređaja SF-ED predstavlja znatan doprinos poboljšanju seizmičkih karakteristika izoliranih mostova čak i u slučaju najjačih potresa.
- Što se tiče geometrijskih svojstava, novi uređaji SF-ED omogućuju prilagodbu mehaničkih svojstava, čime se otvara mogućnost njihove šire primjene.
- Ovo istraživanje pokazuje da je primjena uređaja SF-ED pouzdana i da se radi o naprednoj inženjerskoj koncepciji, tj. o

vrlo učinkovitim izboru seizmičke zaštite izoliranih mostova u slučaju jakih i vrlo jakih potresa.

8. Modeliranje i karakteristike seizmičkog odziva montiranog klasičnog prototipskog trorasponskog modela mosta M3

Seizmičko ponašanje usporednog prototipskog trorasponskog modela mosta montiranog primjenom konstrukcijskog sustava uobičajenog za klasične mostove, koji se u ovom tekstu spominje kao model 3, analizirano je uzimajući u obzir rezultate prethodnih istraživanja te kako bi se dobili usporedni rezultati radi dokazivanja prije spomenutih potencijalnih prednosti sustava USI-SF. Montirani prototipski trorasponski model mosta M3 predstavlja karakteristični klasični konstrukcijski izbor u izvođenju mostova. Pomični ležajevi simulirani su na lijevom i desnom upornjaku. U ovom slučaju, pomični ležajevi na dva upornjaka rasponske konstrukcije izrađeni su iz istih prethodno analiziranih uređaja DSRSB, tj. po dva su smještena na lijevom i desnom kraju konstrukcije, što je na slici 24. označeno brojkama 1 i 2 tj. 3 i 4. Zglobni spojevi 5 i 6 modelirani su preko dva kraća središnja stupa označena slovom S, dok su zglobni spojevi 7 i 8 predviđeni preko dužih središnjih stupova označeni slovom L.



Slika 24. Pozicije uređaja DSRSB i zglobnih spojeva na kratkim i dugim stupovima montiranog klasičnog prototipskog trorasponskog modela mosta M3 u velikom mjerilu

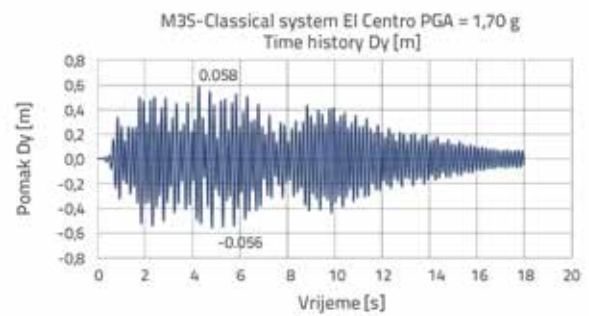
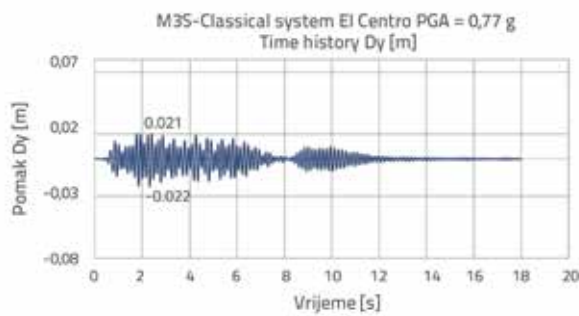
Primjenom eksperimentalno provjerenog analitičkog modela, analizirano je dinamičko ponašanje formuliranog klasičnog prototipskog trorasponskog modela mosta M3 kad je podvrgnut

djelovanju jakih i vrlo jakih potresa, što opet predstavlja neku vrstu "analitičkog eksperimenta". Osim toga, u ovom se slučaju središnji stupovi u analitičkom modelu tretiraju kao linearni elementi. Vršno ubrzanje potresa El Centro analogno je podešeno na $PGA = 0,77$ g tj. $PGA = 1,70$ g, dok je za potres Petrovac ubrzanje podešeno na $PGA = 0,71$ g tj. $PGA = 1,70$ g. Odabrani karakteristični rezultati svih provedenih analiza prikazani su na slikama 25., 26., 27. i u tablici 9.

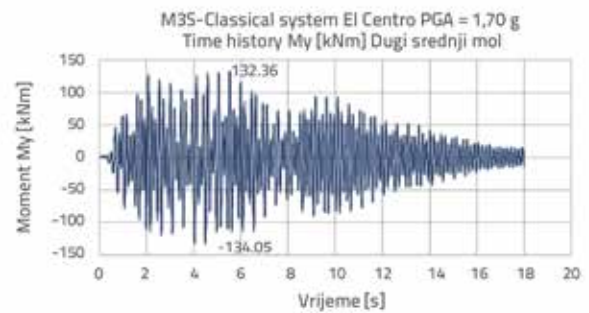
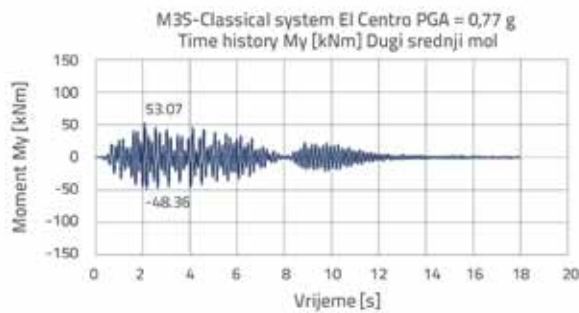
Na slici 25. usporedno su prikazani vremenski zapisi pomaka gornjeg ustroja mosta u smjeru y (DY) pri djelovanju potresa El Centro. U slučaju jakog potresa podešenog na $PGA = 0,77$ g, maksimalni pomak u smjeru y iznosi $maxDy = 22,0$ mm, dok za jaki potres podešen na $PGA = 1,70$ g maksimalni pomak iznosi $maxDy = 58,0$ mm (tablica 9.). Slična se tendencija može u tablici 9. uočiti i za potres Petrovac. Za taj potres podešen na $PGA =$

$0,71$ g, dobivena je vrijednost $maxDy = 49,0$ mm, dok je u slučaju istog potresa podešenog na vrlo jak intenzitet od $PGA = 1,70$ g maksimalni pomak iznosio $maxDy = 115,0$ mm. I u ovom slučaju, zbog simulacije u smjeru djelovanja potresa pod kutom od 45° u odnosu na uzdužnu os mosta, komponente pomaka DX i DY bile su identične, dok su njihove vrijednosti u smjeru potresa veće, a izračunane su množenjem komponenata faktorom $f = \sqrt{2}$.

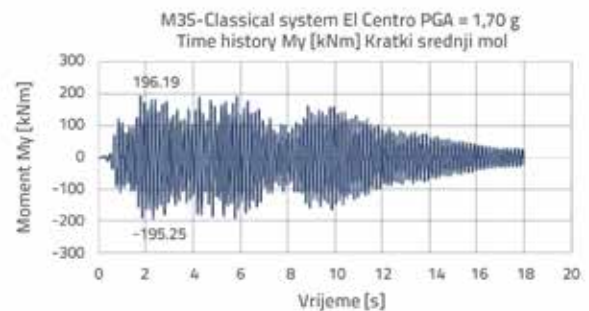
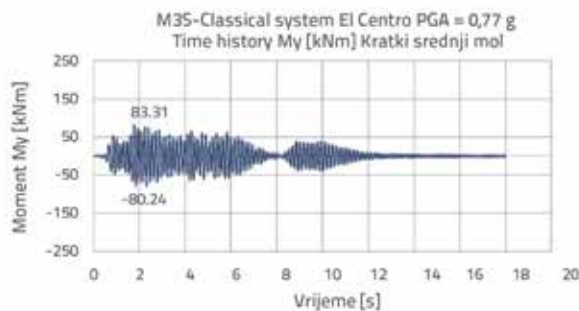
U ovom slučaju, kako su središnji stupovi zglobo vezani s rasponskom konstrukcijom, vrijednosti momenata savijanja u točkama učvršćenja na dnu bile su mnogo veće i vrlo kritične za tako visoke vrijednosti seizmičkog intenziteta. Na slici 26. daje se usporedni prikaz vremenskih zapisa odziva momenata MY dužih stupova pri jakom i vrlo jakom potresu El Centro. Vršne vrijednosti momenata bile su vrlo visoke i iznosile su $IpMymax = 53,1$ kN tj. $IpMymax = 134,0$ kN.



Slika 25. Model klasičnog mosta M3: Odziv pomaka u smjeru y (DY) pri djelovanju potresa El Centro podešenog na $PGA = 0,77$ g, tj. $PGA = 1,70$ g u smjeru potresnog stola



Slika 26. Model klasičnog mosta M3: Odziv momenta MY na učvršćenom dnu dugog središnjeg stupa pri potresu El Centro podešenom na $PGA = 0,77$ g i $PGA = 1,70$ g u smjeru potresnog stola



Slika 27. Model klasičnog mosta M3: Odziv momenta MY na učvršćenom dnu kratkog središnjeg stupa pri potresu El Centro podešenom na $PGA = 0,77$ g i $PGA = 1,70$ g u smjeru potresnog stola

Tablica 9. Izračunane komponente γ pozitivnih i negativnih vrijednosti odabranih karakterističnih parametara modela mosta M3 s uređajem USI-SF za dvije razine intenziteta potresa El Centro i Petrovac

Br.	Razina potresa-1: El Centro PGA = 0,77 g			Razina potresa-2: El Centro PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	Max (+)	Max (-)
1	DYmax [mm]	21,0	22,0	DYmax [mm]	58,0	56,0
2	IpMYmax [kNm]	53,1	48,4	IpMYmax [kNm]	132,4	134,0
3	spMYmax [kNm]	83,3	80,2	spMYmax [kNm]	196,2	195,2
Br.	Razina potresa-1: Petrovac PGA = 0,71 g			Razina potresa-2: Petrovac PGA = 1,7 g		
	Oznaka	Max (+)	Max (-)	Oznaka	MaxD (+)	MaxD (-)
1	DYmax [mm]	45,0	49,0	DYmax [mm]	106,0	115,0
2	IpMYmax [kNm]	112,1	102,5	IpMYmax [kNm]	256,9	227,0
3	spMYmax [kNm]	173,8	184,4	spMYmax [kNm]	399,5	421,1

Na slici 27. daje se usporedni prikaz vremenskih zapisa odziva momenata MY u točki učvršćenja na dnu kratkog središnjeg stupa pri istom jakom i vrlo jakom potresu El Centro. Ostvarene vrijednosti maksimalnih momenata savijanja bile su još veće, te su iznosile spMymax = 83,3 kNm tj. spMymax = 196,2 kNm. Analogno tome, u tablici 9. prikazani su reprezentativni parametri odziva za oba potresa i njihova dva intenziteta. Prikazane su i pozitivne i negativne komponente vršnog pomaka gornjeg ustroja mosta u smjeru γ , isto kao i momenti MY dobiveni za središnje stupove.

Na temelju rezultata dobivenih analizom seizmičkog odziva montiranog klasičnog sustava mosta u slučaju potresa jakog i vrlo jakog intenziteta, iskazuju slijedeće poznate činjenice:

- Klasični sustav mosta, koji nema dodatne uređaje za disipaciju seizmičke energije, može biti izložen silama potresa velikog intenziteta koje uzrokuju velike momente u središnjim stupovima, što uključuje i mogućnost pojave duboke nelinearnosti, velikih oštećenja ili potpunog rušenja.
- U slučaju jakog i vrlo jakog potresa, mogućnost pojave deformacija u kritičnim poprečnim presjecima može biti znatno veća na mjestima pojave plastičnih zglobova.
- Seizmička sigurnost klasičnih sustava autocestovnih mostova obično je osigurana primjenom seizmičkih propisa za projektiranje i klasičnih metoda projektiranja.

Međutim, ako su klasično projektirane građevine izložene djelovanju vrlo jakih potresa, to često može dovesti do neprihvatljivo ozbiljnih oštećenja ili do potpunog popuštanja građevine. Predloženi sustav USI-SF može se primijeniti u praksi za učinkovito i brzo seizmičko poboljšanje velikog broja postojećih autocestovnih mostova koji nemaju odgovarajuću potresnu sigurnost.

9. Zaključci

Na temelju opsežnih eksperimentalno provjerenih teorijskih istraživanja o razvoju napredne metode za seizmičko poboljšanje izoliranih mostova opremljenih novim uređajima SF-ED mogu se usvojiti sljedeći zaključci:

- Razina seizmičke zaštite može se bitno povećati kod izoliranih mostova s novim optimiziranim uređajima DSRSB, koji su ujedno i seizmički zaštićeni novooblikovani uređaji SF-ED, tako da se postigne veća sigurnost mostovnih konstrukcija u slučaju jakih i vrlo jakih potresa.
- Prikazani rezultati opsežnog istraživanja o seizmičkom ponašanju analiziranih jednorasponskih i trorasponskih inovativnih prototipskih modela mosta opremljenih uređajem USI-SF, postignuti simulacijom jakih i vrlo jakih potresa s ubrzanjem od PGA = 0,70 g (0,71 g do 0,77 g) tj. PGA = 1,70 g, pokazuju da novi sustav USI-SF omogućuje znatno kvalitativno poboljšanje seizmičke zaštite višerasponskih cestovnih mostova, uz optimalno raspoređivanje uređaja za seizmičku izolaciju SI i uređaja za disipaciju energije SF-ED.
- Novi sustav za seizmičku zaštitu USI-SF omogućuje vrlo značajno smanjenje vršnog pomaka rasponske konstrukcije mosta u slučaju znatnog povećanja intenziteta potresa. Konkretno, prema prikazanim rezultatima za povećanje ubrzanja PGA od PGA = 0,70 g do PGA = 1,70 g, što je povećanje od otprilike 240 %, dobiven je znatno manji porast pomaka približno od 95 % i 85 % u slučaju analiziranih jednorasponskih i trorasponskih prototipskih mostovnih sustava opremljenih uređajem USI-SF.
- Rezultati dobiveni usporednom analizom klasično projektiranog trorasponskog prototipnog modela mosta jasno upućuju na postojanje nekontroliranog utjecaja jakih sila potresa i na pojavu kritičnih momenata u središnjim stupovima, što često dovodi do ozbiljnih oštećenja ili potpunog rušenja građevine.
- Tri novorazvijena tipa prilagodljivih uređaja SF-ED pojedinačnih geometrijskih dimenzija L = 1R, L = 2R i L = 3R, iskazuju izvrsna histerezna svojstva pri ponavljajućim cikličnim opterećenjima. Predložene varijante čitave i djelomične montaže upućuju na vrlo povoljne mogućnosti njihovog tipskog projektiranja i proizvodnje, ovisno o stvarnim potrebama pojedinačnih građevina.
- Novorazvijena i eksperimentalno provjerena tehnologija seizmičkog poboljšanja izoliranih mostova, koja uključuje

instalaciju inovativnih uređaja SF-ED, omogućuje vrlo učinkovitu i pouzdanu seizmičku zaštitu cestovnih mostova potencijalno izloženih jakim i vrlo jakim udarima potresa.

Zahvale

Ovo opsežno eksperimentalno i analitičko istraživanje provedeno je u Institutu IZIS Sveučilišta Sv. Ćirila i Metoda u Skoplju u okviru NATO-vog trogodišnjeg inovativnog projekta Znanost za mir i sigurnost: Seizmičko poboljšanje mostova u

jugoistočnoj Europi primjenom inovativnih tehnologija (SFP: 983828). U tom projektu sudjelovalo je pet država: Makedonija (D. Ristić, voditelj i direktor PPD-a), Njemačka (U. Dorka, direktor NPD-a), Albanija (A. Lako), Bosna i Hercegovina (D. Zenunović) i Srbija (R. Folić). Formiranje laboratorija RESIN, kao novog laboratorija za otvorena ispitivanja u okviru Regionalne mreže seizmičkih inovacija mladih znanstvenika, prihvaćeno je kao zaseban dugoročni zadatak. Autori zahvaljuju na značajnoj NATO-voj podršci u realizaciji ovog cjelovitog, dugoročnog i financijski zahtjevnog inovativnog istraživačkog projekta.

LITERATURA

- [1] Kelly, J.M.: A seismic base isolation: A review and bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5 (1986), pp. 202-216, [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(86\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0)
- [2] Kunde, M.C., Jangid, R.S.: Seismic behaviour of isolated bridges: A-state-of-the-art review, *EJSE, Electronic Journal of Structural Engineering*, 3 (2003).
- [3] Turkington, D.H., Carr, A.J., Cooke, N., Moss, P.J.: Seismic design of bridges on Lead-rubber bearings, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115 (1989) a, pp. 3000-3016.
- [4] Robinson, W.H.: Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10 (1982), pp. 593-604, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100408>
- [5] Dolce, M., Cardone, D., Palermo, G.: Seismic isolation of bridges using isolation systems based on flat sliding bearings. *Bull Earthq. Eng.* 14:1285-1310, 5 (2007), pp. 491-509.
- [6] Iemura, H., Taghikhany, T., Jain, S. K.: Optimum Design of Resilient Sliding Isolation System for Seismic Protection of Equipments. *Bull Earthq. Eng.*, 5 (2007), pp. 85-103, <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9010-5>
- [7] Kartoum, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M.: Sliding isolation system for bridges: Analytical study, *Earthquake Spectra*, 8 (1992), pp. 345-372, <https://doi.org/10.1193/1.1585685>
- [8] Wang, Y.P., Chung, L., Wei, H.L.: Seismic response analysis of bridges isolated with friction pendulum bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27 (1998).
- [9] Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A.: A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, *Earthquake Spectra*, 6 (1990), pp. 317-334, <https://doi.org/10.1193/1.1585573>
- [10] Mokha, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M.: Teflon bearings in seismic base isolation I: Testing, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 116 (1990), pp. 438-454, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:2\(438\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:2(438))
- [11] Constantinou, M.C., Kartoum, A., Reinhorn, A.M., Bradford, P.: Sliding isolation system for bridges: Experimental study", *Earthquake Spectra*, 8 (1992), pp. 321-344, <https://doi.org/10.1193/1.1585684>
- [12] Skinner, R.I., Kelly, J.M., Heine, A.J.: Hysteretic Dampers for earthquake resistant structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3 (1975), pp. 287-296, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030307>
- [13] Guan Z., Li, J., Xu, Y.: Performance Test of Energy Dissipation Bearing and Its Application in Seismic Control of a Long-Span Bridge, *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, 2010, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000099](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000099)
- [14] Tsopelas, P., Constantinou, M.C., Kim, Y.S., Okamoto, S.: Experimental study of FPS system in bridge seismic isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25 (1996) a, pp. 65-78, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199601\)25:1<65::AID-EQE536>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<65::AID-EQE536>3.0.CO;2-A)
- [15] Dolce, M., Filardi, B., Marnetto, R., Nigro, D.: Experimental tests and applications of advanced biaxial elastoplastic device for the passive control of structures, *Proc. of 4th World congress on joint sealants and bearing systems for concrete structures*, Sacramento, California (USA), 1996.
- [16] Ene, D., Yamada, S., Jiao, Y., Kishiki, S., Konishi, Y.: Reliability of U-shaped steel dampers used in base-isolated structures subjected to biaxial excitation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46 (2017) 4, pp.621-639, <https://doi.org/10.1002/eqe.2806>
- [17] Oh, S.H., Song, S.H., Lee, S.H. et al.: Seismic response of base isolating systems with U-shaped hysteretic dampers, *Int. Journal of Steel Structures*, 12 (2012) 2, pp 285-298, <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2011-0>
- [18] Jankowski, R., Wilde, K., Fujino, Y.: Pounding of superstructure segments in isolated elevated bridge during earthquakes, *Earthquake Eng. and Struct. Dynamics*, 27 (1998), pp. 487-502, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199805\)27:5<487::AID-EQE738>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199805)27:5<487::AID-EQE738>3.0.CO;2-M)
- [19] Tubaldi, E., Mitoulis, S. A., Ahmadi, H., Muhr, A.: A parametric study on the axial behaviour of elastomeric isolators in multi-span bridges subjected to horizontal seismic excitations. *Bull Earthq. Eng.*, 14 (2016), pp. 1285-1310, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9876-9>
- [20] Serino, G., Occhiuzzi, A.: A semi-active oleodynamic damper for earthquake control: Part 1: Design, manufacturing and experimental analysis of the device. *Bull Earthq. Eng.*, 1 (2003), pp. 269-301, <https://doi.org/10.1023/A:1026340911767>
- [21] Mayes, R.L., Buckle, I.G., Kelly, T.E., Jones, L.R.: AASHTO Seismic isolation design requirements for highway bridges, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 118 (1992), pp. 284-304, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:1\(284\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:1(284))

- [22] Unjoh, S., Ohsumi, M.: Earthquake response characteristics of super-multispan continuous menshin (seismic isolation) bridges and the seismic design, *ISET Journal of Earthquake Engineering Technology*, 35 (1998), pp. 95-104.
- [23] Ristic, J., Misini, M., Ristic, D., Guri, Z., Pllana, N.: Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Shaking table tests of large-scale model, *GRAĐEVINAR*, 70 (2017) 6, pp. 463-485, <https://doi.org/10.14256/JCE.2147.2017>
- [24] ANSYS Mechanical: Finite element analysis (FEA) software, ANSYS, Inc., USA.
- [25] Candeias, P., Costa, A.C., Coelho, E.: Shaking table tests of 1:3 reduced scale models of four story unreinforced masonry buildings, 13th World Conf. on Earthquake Eng., Vancouver, Paper: 2199, 2004.
- [26] Ristic, D., Ristik, J.: New Integrated 2G3 Response Modification Method for Seismic Upgrading of New and Existing Bridges, 15th World Conference on Earthquake Engineering, (WCEE), Lisbon, Portugal, 2012.
- [27] Ristic, D.: Nonlinear Behaviour and Stress-Strain Based Modelling of Reinforced Concrete Structures Under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, Doctoral Dissertation, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan, 1988.
- [28] Ristik, J.: Comparative Seismic Analysis of RC Bridge Structure Applying Macedonian Seismic Design Regulations and Eurocodes, MSc Thesis, Department for Theory of Structures, University SS Cyril and Methodius, Skopje, Macedonia, 2011.
- [29] Ristik, J.: Modern Technology for Seismic Protection of Bridge Structures Applying New System for Modification of Earthquake Response, PhD Thesis, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), University SS Cyril and Methodius, Skopje, Macedonia, 2016.
- [30] Wilson, E.L.: Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering, Berkeley, California: Third Ed., 2002.
- [31] Wilson, E.L., Habibullah, A.: SAP2000, Structural and earthquake engineering software, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.