

Primljen / Received: 5.12.2017.

Ispravljen / Corrected: 12.3.2018.

Prihvaćen / Accepted: 18.4.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2018.

## Seizmičko poboljšanje izoliranih mostova pomoću uređaja SF-ED: Ispitivanje modela u velikom mjerilu na potresnom stolu

### Autori:



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Jelena Ristić**, dipl.ing.građ.  
[jelena.ristik@live.com](mailto:jelena.ristik@live.com)



<sup>2</sup>Izv.prof.dr.sc. **Misin Misini**, dipl.ing.građ.  
[misin.misini@uni-pr.edu](mailto:misin.misini@uni-pr.edu)



<sup>3</sup>Prof.dr.sc. **Danilo Ristić**, dipl.ing.građ.  
[danilo.ristic@gmail.com](mailto:danilo.ristic@gmail.com)



<sup>2</sup>Mr.sc. **Zijadin Guri**, dipl.ing.građ.  
[guri.zijadin@gmail.com](mailto:guri.zijadin@gmail.com)



<sup>4</sup>Dr.sc. **Nebi Pllana**, dipl.ing.građ.  
[nplana@ipe-proing.com](mailto:nplana@ipe-proing.com)

<sup>1</sup>FON Sveučilište, Arhitektonski fakultet, Skopje, Makedonija

<sup>2</sup>Sveučilište u Prištini, Fakultet građevinarstva i arhitekture, Priština, Kosovo

<sup>3</sup>Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIS), Skopje, Makedonija

<sup>4</sup>IPE-Proing, Priština, Kosovo

Izvorni znanstveni rad

**Jelena Ristić, Misin Misini, Danilo Ristić, Zijadin Guri, Nebi Pllana**

### Seizmičko poboljšanje izoliranih mostova pomoću uređaja SF-ED: Ispitivanje modela u velikom mjerilu na potresnom stolu

U radu su prikazani rezultati originalnog eksperimentalnog istraživanja na potresnom stolu modela mosta u velikom mjerilu koji je opremljen naprednim sustavom seizmičke zaštite tipa USI-SF. Instalirani osnovni sustav seizmičke izolacije izveden je primjenom novih dvojnih kružnih kotrljajućih seizmičkih ležajeva (DSRSB), a kvalitativno poboljšanje seizmičkih karakteristika provedeno je pomoću instaliranih naprednih višesmjernih prostornih pojasnih uređaja za rasap energije (SF-ED). Rezultati istraživanja pokazuju da se primjenom uređaja DSRSB i SF-ED mogu postići značajna kvalitativna poboljšanja seizmičkih karakteristika izoliranih cestovnih mostova.

#### Ključne riječi:

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

Original scientific paper

**Jelena Ristić, Misin Misini, Danilo Ristić, Zijadin Guri, Nebi Pllana**

### Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Shaking table tests on large-scale model

Results of original experimental research, obtained during shaking table tests on a large-scale bridge model equipped with an advanced seismic protection system type USI-SF, are presented in the paper. The installed basic seismic isolation system is created by applying novel double spherical rolling seismic bearing (DSRSB) devices, while qualitative upgrading of seismic performances is made using the installed advanced multi-directional space flange energy dissipation (SF-ED) devices. Research results show that significant qualitative improvement of seismic performances of isolated road bridges can be achieved using DSRSB and SF-ED devices.

#### Key words:

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

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Jelena Ristić, Misin Misini, Danilo Ristić, Zijadin Guri, Nebi Pllana**

### Seismische Verbesserung der mit dem Gerät SF-ED isolierten Brücken: Untersuchung des Modells in großem Maßstab auf dem Erdbebentisch

In der Abhandlung werden die Ergebnisse der ursprünglichen experimentellen Untersuchung des Brückenmodells in großem Maßstab auf dem Erdbebentisch dargelegt, das mit einem fortschrittlichen System des seismischen Schutzes des Typs USI-SF ausgestattet ist. Das installierte seismische Basisisoliersystem wurde durch Verwendung neuer doppelter kreisrunder rollender seismischer Lager ausgeführt (DSRSB), und die qualitative Verbesserung der seismischen Eigenschaften wurde mithilfe der installierten fortschrittlichen multidirektionalen räumlichen Energieverteilungsvorrichtung (SF-ED) durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass man durch die Verwendung der Geräte DSRSB und SF-ED eine Verbesserung der seismischen Eigenschaften der isolierten Straßenbrücken erreichen kann.

#### Schlüsselwörter:

Brücke, seismische Isolierung, Duktilität, Energieverteilung, seismische Sicherheit

## 1. Uvod

Najznačajnija istraživanja u području seizmičke izolacije mostovnih konstrukcija prvobitno su provedena u najpoznatijim istraživačkim centrima u Japanu, SAD-u, Italiji, Novom Zelandu i u nekim drugim državama. U novije su se vrijeme intenzivirala i proširila istraživanja u ovom specifičnom području, pa tako istraživanja provode i mnoge druge države diljem svijeta. Zbog vrlo velikog raspona inovativnih ideja, do sada provedena istraživanja najčešće su usko usmjerena na razvoj posebnih pojedinačnih uređaja kao što su:

- gumeni seizmički ležajevi
- klizni seizmički ležajevi
- kotrljajući seizmički ležajevi
- uređaji za ograničavanje pomaka
- posebna analitička istraživanja
- posebna eksperimentalna istraživanja
- istraživanja usmjerena prema uvođenju seizmičke izolacije u graditeljsku praksu.

Opsežan i detaljan uvid u svjetska postignuća ostvarena u ovom uskom području znanosti daje se u objavljenim radovima brojnih autora kao npr. [1, 2]. Posebne karakteristike histereznog ponašanja običnih gumenih i olovno-gumenih seizmičkih ležajeva prikazane su u radovima [3, 4]. Ponašanje kliznih seizmičkih ležajeva [5-7] i nedavno razvijenih jednostavnih klatnastih seizmičkih ležajeva [8, 9] detaljno se proučava i eksperimentalno provjerava [10, 11] te se ti uređaji postupno uvode u praksu. Uvodi se i koncept primjene predloženih dodatnih uređaja za rasap seizmičke energije [12-14, 20-22] isto kao i uređaja za ograničavanje velikih pomaka. U novije se vrijeme bilježi uzlazni razvojni trend u ovom inovativnom području potresnog građevinarstva, što uključuje i izradu dodatnih analiza raznih specifičnih srodnih pojava kao što su utjecaj podizanja [15], aksijalno ponašanje elastomernih izolatora [16] i poluaktivnih prigušivača [17], a izrađuju se i studije koje su posvećene kvalitativnom poboljšanju postojećih tehnologija. Postupno se uvode i kontinuirano revidiraju [18] propisi o projektiranju seizmički izoliranih mostova, naročito u državama koje se nalaze u seizmički aktivnim područjima [19]. U zaključcima radova, mnogi autori daju preporuke o mogućnostima provođenja dodatnih istraživanja u ovom području znanosti, što uključuje i razvoj naprednih ideja o poboljšanju postojećih sustava za izolaciju građevina. Katastrofalna oštećenja klasičnih mostova zabilježena u nedavnim jakim potresima obično nastaju zbog nedovoljne otpornosti ležaja mostova, neodgovarajućeg projektiranja gornjeg i/ili donjeg ustroja mosta, te zbog neadekvatnog projektiranja temelja ako se u obzir ne uzimaju lokalni uvjeti tla. Gornji ustroj mostova obično trpi znatne deformacije, dolazi do slijeganja, trajnih pomaka i pojave velikih pukotina, pa čak i do prevrtanja rasponske konstrukcije. Često dolazi do pomicanja rasponskog sklopa što dovodi do otvaranja velikih pukotina, ili pak do potpunog urušavanja konstrukcije.

U slučaju neočekivano jakih potresa moguća su i znatna oštećenja novijih mostova. Danas se primjenjuju stroge norme u pogledu sigurnosti i korištenja takvih konstrukcija i to kako za nove tako i za postojeće mostove. U praksi se u današnje vrijeme mogu uočiti sljedeće tipične pogreške u projektiranju konstrukcija:

- seizmički izolirane građevine projektiraju se od slučaja do slučaja, bez definiranja svih faktora rizika koji su značajni za iznalaženje sigurnih tehničkih rješenja
- neki se dodatni elementi za rasap energije projektiraju zasebno za uzdužne i poprečne smjerove, što je fizički nepovoljno jer potres obično djeluje u svim smjerovima. Zato se hitno trebaju uvesti napredni uređaji za učinkovitu zaštitu građevina od potresa iz bilo kojeg smjera
- u nekim slučajevima do velikih oštećenja ili potpunog popuštanja dolazi zbog primjene nedovoljno sigurnih tehnoloških rješenja iako samo izuzetno sigurna rješenja mogu ograničiti velike pomake u slučaju vrlo jakih potresa.

Ovaj istraživački projekt pokrenut je kao odgovor na postojeće probleme koji se odnose na katastrofalna oštećenja mostovnih konstrukcija uslijed djelovanja jakih potresa, pri čemu se takve konstrukcije ruše čak i u najnaprednijim državama svijeta. Istraživanja prikazana u ovom radu već su dovela do razvoja originalne, napredne i eksperimentalno provjerene opcije poboljšano seizmički izoliranog sustava s prostornim pojasnim uređajima, poznatog pod nazivom USI-SF. On predstavlja kvalitativan doprinos rješavanju složenih problema s ciljem naprednog projektiranja seizmički otpornih mostovnih konstrukcija kod kojih u slučaju jakih potresa dolazi do kontrolirane razine oštećenja tj. do oštećenja koja ne sprečavaju korištenje mosta.

## 2. Prikaz razvoja uređaja USI-SF za seizmičku zaštitu mostova

### 2.1. Objašnjenje sadašnjih potreba tehnološkog razvoja

Kako bi se omogućilo neometano funkcioniranje cestovnih mostova u seizmički aktivnim područjima tijekom njihove duge trajnosti (200 godina ili više), trebaju se ulagati napor u svrhu poboljšanja sustava seizmičke izolacije koji služe za ublažavanje destruktivnog djelovanja jakih potresa. Jako destruktivno djelovanje najčešće se bilježi tijekom snažnih potresa, a naročito u slučaju dosezanja kritičnog sustava frekvencija pomaka tla, koji se ne može definirati unaprijed niti se može pouzdano predvidjeti. U nekim kritičnim situacijama današnji sustavi za seizmičku izolaciju mostovnih konstrukcija podložni su ozbiljnim oštećenjima što može narušiti opću stabilnost konstrukcije. Razni nedostaci postojećih tehnoloških rješenja mogu bilo pojedinačno ili zajedno dovesti do velikih problema i do neprihvatljivog ugrožavanja stabilnosti mostova zbog djelovanja potresa, koji se inače smatraju najkritičnijom

i najmanje predvidivom prirodnom pojavom u smislu intenziteta i učestalosti. Tipično naglo oštećenje seizmički izolirane konstrukcije zabilježeno je tijekom jakog potresa koji je 1999. godine pogodio mjesto Duzce u Turskoj. Do znatnog oštećenja velikog vijadukta Bolu uglavnom je došlo zbog registriranog razlomljenog rasjeda koji prelazi trasu vijadukta, zbog kojeg je potres bio znatno jači od vrijednosti za koju je građevina projektirana. Ipak, izolirana građevina nije se u potpunosti srušila te je nakon uspješne sanacije ponovo stavljena u funkciju. S obzirom na činjenicu da seizmički izolirane građevine mogu biti izložene velikim rizicima u nekim izuzetnim seizmičkim uvjetima, ovo istraživanje je prvobitno bilo usredotočeno na razvoj poboljšanog sustava za seizmičko ojačanje izoliranih mostova.

## 2.2. Integrirani eksperimentalno-istraživački program

U Institutu za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIIS) u Skoplju provedena su opsežna eksperimentalna i analitička istraživanja u okviru trogodišnjeg NATO-vog projekta Znanost za mir i sigurnost: Seizmičko poboljšanje mostova u jugoistočnoj Europi pomoću inovativnih tehnologija (SFP: 983828), koji je u cijelosti proveden pod vodstvom trećeg autora (Ristić, D.) u razdoblju od 2010. do 2014. U projektu je naglasak stavljen na fundamentalna istraživanja i na razvoj inovativnih tehnologija za seizmičko izoliranje i seizmičku zaštitu mostova. Eksperimentalna ispitivanja i istraživanja usmjerene prema razvoju sustava USI-SF koji se predstavlja u ovom radu, zaseban su segment opsežnih istraživanja provedenih u okviru NATO-vog projekta Znanost za mir i sigurnost.

## 2.3. Koncept naprednog sustava USI-SF za seizmičku zaštitu mostova

Poboljšani sustav za seizmičku izolaciju (eng. *Upgraded Seismically Isolated* - USI) s prostorno pojasnim uređajima (eng. *Space Flange* - SF) za rasap energije (ED) napredan je tehnološki koncept kojim se postiže usklađena i poboljšana modifikacija seizmičkog odziva konstrukcije. Sustav USI-SF razvijen je kao napredna alternativna metoda za kvalitativno poboljšanje seizmičke zaštite mostovnih konstrukcija, te predstavlja integralni prilagodni sustav utemeljen na predloženom konceptu globalne optimalizacije seizmičke energije. Sustav USI-SF bazira se na obaveznom uključivanju sljedeća tri dodatna usklađena sustava:

### Uključivanje sustava za seizmičku izolaciju (SI)

Taj sustav za seizmičku izolaciju rasponske konstrukcije mosta treba sadržavati adekvatno odabrane seizmičke izolatore koji će osigurati nisku krutost u horizontalnom smjeru te koji će na siguran način nositi ukupnu težinu čitave rasponske konstrukcije koja leži na uređajima SI. Na taj se način prikladno projektirani seizmički izolator može instalirati

na svako poduporno mjesto duž rasponske konstrukcije, tako da se čitava izolirana težina izravno prenosi na nosive srednje stupove i/ili na krute nosive upornjake mosta. U ovom slučaju postoje brojne mogućnosti za odabir odgovarajućeg sustava za seizmičku izolaciju rasponske konstrukcije mosta, što uključuje i primjenu novorazvijenog naprednog tehničkog rješenja za provedbu seizmičke izolacije.

### Uključivanje sustava za rasap seizmičke energije (ED)

Kako je jedna od karakteristika seizmičkih izolatora nedovoljno prigušenje za rasap seizmičke energije, uvedeni su dodatni disipatori seizmičke energije. Zbog toga uređaji ED trebaju posjedovati optimalnu krutost, optimalnu nosivost i visok stupanj duktilnosti u odnosu na učinak seizmičkih izolatora. Prvo, vrlo velika krutost uređaja ED dovodi do nepoželjnog utjecaja i impulzivnog prijenosa sile tromosti. Kako bi se izbjegao ovaj problem, preporučuje se smanjenje početne krutosti uređaja ED do odgovarajuće optimalne razine. Drugo, ako je nosivost uređaja ED izuzetno velika, oni mogu prenositi velike ili kritične sile na stupove. Kako bi se izbjegao mogući problem, nosivost disipatora energije treba se svesti na projektiranu granicu. Treće, uređaji ED trebaju imati dostatnu razinu duktilnosti. U slučaju velikih sila tromosti mogući su vrlo veliki pomaci koji mogu iznositi 25-30 cm ili više. Zbog toga uređaji ED trebaju izdržati velike deformacije bez oštećenja. Općenito uzevši, trebali bi se koristiti uređaji ED s velikom mogućnošću rasapa seizmičke energije kroz nelinearne deformacije i kreiranje naglašenih histereznih krivulja. U okviru ovog istraživanja postignut je izuzetno značajan napredak u pogledu tri gore navedena svojstva, što je rezultiralo formulacijom predloženih naprednih uređaja SF-ED.

### Uključivanje sustava za ograničavanje pomaka (DL)

Tijekom jakih seizmičkih vibracija obično se generira određeni broj naglašeno jakih impulsa. U tom se slučaju javljaju vrlo izražene amplitude pomaka koje se ponekad ne mogu uspješno kontrolirati na inženjerski pouzdan način. Jaki i negativni utjecaji trebaju se smanjiti ili potpuno izbjeći uvođenjem uređaja za ograničavanje pomaka (eng. *displacement limiting devices* - DLD).

## 2.4. Metodologija primijenjena u istraživanju

Prvi dio eksperimentalnog istraživanja uključivao je nelinearna ciklična kvazistatička ispitivanja prototipnih modela s naprednim komponentama i uređajima koji su za ovo ispitivanje instalirani izravno na njihova stvarna mjesta unutar prototipnog modela ISUBRIDGE izvedenog u velikom mjerilu. Drugi dio eksperimentalnog istraživanja odnosio se na seizmičko ispitivanje modela mosta USI-SF uz simulaciju snažnog seizmičkog djelovanja na potresnom stolu. Primjenom odgovarajućih mjera projektiranja, isti fizikalni model je usklađen kako bi se omogućilo uspješno kvazistatičko ispitivanje pojedinačnih uređaja te seizmičko ispitivanje modela mosta USI-SF na potresnom stolu.

### 3. Ispitivanje prototipnih modela novih izolacijskih uređaja DSRSB

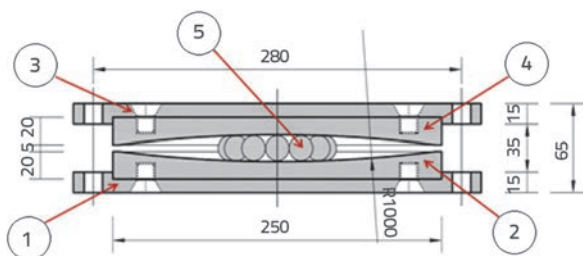
#### 3.1. Program za eksperimentalnu provjeru uređaja DSRSB

Prvobitno je planirana provedba eksperimentalnih provjera seizmičkog ponašanja naprednog sustava USI-SF za seizmičku zaštitu mostova uz pomoć opsežnih ispitivanja originalno izgrađenog prototipnog modela mosta u velikom mjerilu na potresnom stolu sa simulacijom razornog djelovanja zabilježenih stvarnih potresa velikog intenziteta. Međutim, prvobitno planirana vrsta ležajeva za seizmičku izolaciju tada se nije mogla kupiti. Kako bi se riješio ovaj problem, trebalo je provesti opsežan postupak pripremnih istraživanja, što je uključivalo originalno projektiranje prototipnih modela odgovarajućih ležajeva za seizmičku izolaciju, proizvodnju tih ležajeva i njihovo eksperimentalno ispitivanje simuliranjem reverznog cikličnog opterećenja. Istraživanje provedeno u toj fazi uključivalo je primjenu naprednog sustava za seizmičku izolaciju u modeliranju mostova i dvojne kružne kotrljajuće seizmičke ležajeva (eng. *double spherical rolling seismic bearing* - DSRSB).

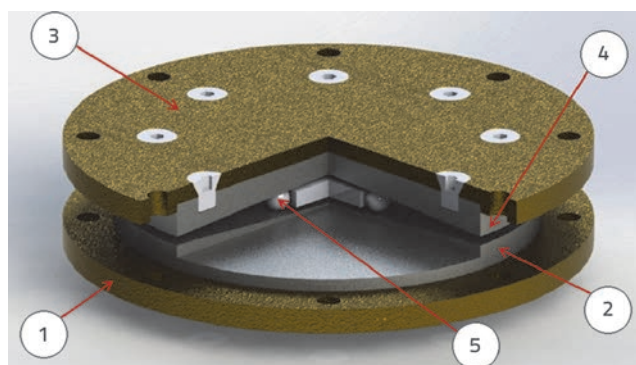
#### 3.2. Projektiranje prototipnih modela DSRSB

Sustav za seizmičku izolaciju primijenjen u izradi mostovnog modela USI-SF, eksperimentalno ispitan na potresnom stolu, definiran je pomoću naprednih prototipnih modela dvojnih kružnih kotrljajućih seizmičkih ležajeva (DSRSB) s dvije sferne površine velikog polumjera (slike 1. do 3.). Posebni zahtjevi projektiranja definirani su u projektu prototipnih modela uređaja DSRSB:

- osigurati dostatnu nosivost u pogledu vertikalnih opterećenja koja će se nanositi u planiranim eksperimentima
- osigurati dostatnu mogućnost pomaka za planirana eksperimentalna ispitivanja
- osigurati polumjer zakrivljenosti sfernih površina koji je potreban za postizanje ciljnih perioda vibracije
- osigurati klizne površine s minimalnim vrijednostima trenja
- projektirati i proizvesti središnji kotrljajući dio s minimalnom reaktivnom silom trenja.

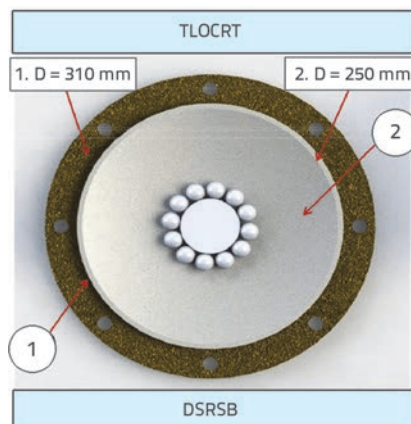


Slika 1. Prototip uređaja DSRSB: poprečni presjek s prikazom geometrijskih svojstava



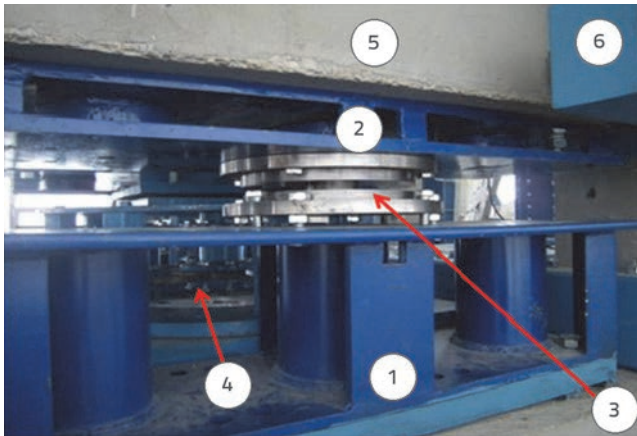
Slika 2. Prototip uređaja DSRSB: pogled na uređaj i prikaz tipičnog poprečnog presjeka

Sve dimenzije prototipnog uređaja DSRSB određene su u skladu s definiranim zahtjevima. Gornja (4) i donja (2) kružna ploča (slika 1.) izrađena je od prikladne vrste tvrdog nehrđajućeg metala odgovarajućih svojstava trajnosti i poliranosti, što pridonosi smanjenju koeficijenta trenja. Središnji kotrljajući dio (5) projektiran je u obliku prstena s 12 kotrljajućih loptica promjera 18 mm, simetrično raspoređenih u krug, pri čemu su središta suprotnih loptica udaljena 74 mm. Polumjer kružnih površina gornje (4) i donje (2) ploče iznosi  $R = 1000$  mm. Središnji kotrljajući dio izveden je u obliku cilindričnog prstena promjera 80 mm. Razmak između dviju kružnih ploča iznosi  $h = 5$  mm na rubovima. Promjer gornje (4) i donje (2) kružne ploče iznosi  $D = 250$  mm, a debljina vanjske strane je  $d_1 = 20$  mm. Obje kružne ploče povezane su s gornjom (3) i donjom (1) završnom metalnom pločom promjera 310 mm i debljine 15 mm. Osam otvora promjera 14 mm izvedeno je duž oboda obiju završnih ploča, slika 3. Ti otvori služe za montažu seizmičkih ležajeva. Proizvedena je serija od osam prototipnih modela uređaja DSRSB kako bi se omogućila montaža alternativnih ispitnih modela mosta, uključujući i model s tri raspona i osam potpornih točaka (slike 1. do 3.). Broj uređaja DSRSB ovisi o broju otvora modela mosta. Četiri su bila potrebna za ispitivanje mosta s jednim otvorom, a na svakoj krajnjoj potpornoj plohi korištena su dva uređaja.



Slika 3. Prototip uređaja DSRSB: tlocrt s osnovnim geometrijskim svojstvima





Slika 4. Prototip uređaja DSRSB ugrađenog u model mosta USI-SF u velikom mjerilu

Inicijalna proizvodnja prototipnih modela DSRSB dovršena je na bazi prvobitnog projekta primjenom posebnih industrijskih postupaka. Seizmički se ležajevi odlikuju velikom nosivošću, tj. svaki može preuzeti vertikalno opterećenje od najviše  $N = 200$  kN. Međutim, njihov osnovni period vibracija ne ovisi o veličini vertikalnog opterećenja, pa se stoga mogu koristiti za brojna seizmička ispitivanja (primjenom raznih stupnjeva opterećenja) u laboratorijskim uvjetima. Proizvodni proces za prvih osam prototipskih modela uključivao je sljedeće aktivnosti:

- nabavu čelika
- proizvodnju standardnih čeličnih elemenata
- nabavu tvrdog nehrđajućeg metala
- preciznu proizvodnju nehrđajućih kružnih metalnih ploča
- fino poliranje kružnih kliznih površina
- spajanje gotovih dijelova
- montažu novih prototipova i ispitivanje.

### 3.3. Ispitivanje histereznog ponašanja prototipova DSRSB

Za ispitivanje uređaja DSRSB određen je najprikladniji postav pokusa (slika 4.), pri čemu je iskorištena činjenica da je gornji (5) i donji ustroj modela mosta već bio izveden u skladu s prethodno definiranim programom sveukupnih ispitivanja. Zatim su četiri prototipa uređaja DSRSB precizno postavljena na njihova mjesta, dva na lijevi upornjak i dva na desni. Tako je AB ploča (5) rasponske konstrukcije bila oslonjena svojom težinom od  $Q = 85,0$  kN preko čeličnog spojnog dijela (2) na četiri seizmička ležaja (3). Ona je dakle svojom težinom nanosila vertikalnu silu od  $F_z = 21,25$  kN na svaki pojedini ležaj. Planirana kvazistatička ispitivanja uspješno su provedena pomoću hidrauličnog pokretača (6) (slika 6.)

prvobitno projektiranog za velike pomake, koji se može koristiti za amplitude pomaka do  $\max D = \pm 300$  mm. Osim toga, taj je pokretač predviđen i za nanošenje reverznih sila do vrijednosti od  $\max F = \pm 300$  kN.

Programirana horizontalna ciklična opterećenja uspješno su se nanosila izravno na AB ploču rasponske konstrukcije pomoću pokretača (6) koji je na desnu potporu (2) donjeg ustroja modela mosta pričvršćen pomoću odgovarajuće metalne konstrukcije (5) posebno izrađene za tu namjenu (slika 5.). Takav eksperimentalni sustav ima brojne prednosti jer omogućuje nanošenje identičnih vertikalnih opterećenja, ili stvarnih opterećenje korištenih u planiranim seizmičkim ispitivanjima te, konačno, omogućuje uspješnu simulaciju programiranih prethodnih cikličnih pomaka s uzlaznom amplitudom do potrebne granice od  $\max D = 45$  mm. Provedena eksperimentalna kvazistatička ispitivanja histereznog ponašanja prototipnih uređaja, uz primjenu već izgrađenih segmenata modela mosta u velikom mjerilu predviđenog za seizmička ispitivanja, usvojena su kao najprikladniji način za simuliranje stvarnih nelinearnih karakteristika ispitivanih prototipova, slika 5.

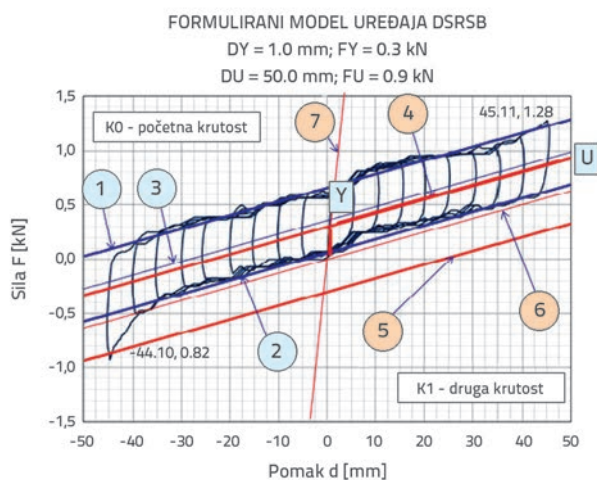


Slika 5. Model mosta USI-SF za ispitivanje uređaja DSRSB i SF-ED u uvjetima simulacije reverznog cikličnog opterećenja: 1) krajnja lijeva potpora; 2) krajnja desna potpora; 3) potpora iznad kraćih središnjih stupova; 4) potpora iznad dužih središnjih stupova; 5) potporna čelična konstrukcija hidrauličnog pokretača; 6) hidraulični pokretač za nanošenje cikličnog opterećenja; 7) potpora uređaja DL u vidu čelične konstrukcije; 8) kontrolni računalni sustav

Stvarne reprezentativne histerezne karakteristike pojedinačnih uređaja definirane su analitičkom obradom zabilježenih eksperimentalnih rezultata za ispitani set sastavljen od četiri uređaja DSRSB, nakon čega je registrirana sila podijeljena s brojem 4. Reprezentativni histerezni odziv pojedinačnih prototipnih uređaja DSRSB prikazan je na slici 6. Registrirana krivulja odziva trebala se pomaknuti jer je prezentirano ispitivanje pokrenuto s pomakom namještenim na nulu, no nakon prethodno dovršenog ispitivanja preostalo je nešto sile. Rezultati pokazuju da je prikaz histereznog odziva nalik na kosi četverokut te da se može vrlo uspješno modelirati pomoću bilinearnog modela. Osim toga, sposobnost ovog seizmičkog ležaja da preuzme horizontalne deformacije od  $\geq 45,0$  mm također je dostatna. Iz definiranog histereznog odnosa možemo zaključiti da seizmički izolacijski sustav sastavljen od uređaja DSRSB ima izvrsne karakteristike koje se očituju kao:

- vrlo male reakcijske sile u svim horizontalnim smjerovima
- vrlo male sile kotrljajućeg trenja
- vrlo stabilne histerezne krivulje za čitav raspon velikih pomaka.

Ukupna težina modela rasponske konstrukcije mosta iznosi  $Q = 85,0$  kN. Histerezni odziv jednog uređaja DSRSB pokazuje vrlo nizak maksimalni otpor od:  $\max F = \pm 0,90$  kN ili, u postocima, taj otpor iznosi:  $pf = \max F \times 100 / (0,25 \times Q) = 4,2$  %. Zabilježeni eksperimentalni podaci pokazuju da se ispitani izolacijski uređaj DSRSB odlikuje vrlo stabilnim histereznim ponašanjem u svim smjerovima te da posjeduje izuzetne karakteristike u smislu seizmičke izolacije konstrukcija jer može izbjeći moguća rezonantna stanja i pri najjačim seizmičkim pobudama. Uređaji SF-ED nisu bili prisutni prilikom ispitivanja histereznog ponašanja izolacijskog sustava DSRSB. Na taj je način zabilježeno samo stvarno histerežno ponašanje sveukupnog izolacijskog sustava DSRSB.



Slika 6. Nelinearni histerezni odziv jednog prototipnog modela DSRSB: 1) zabilježena krivulja gornje anvelope (EC); 2) zabilježena donja vrijednost EC; 3) zabilježena linija simetrije; 4) pomaknuta gornja vrijednost EC; 5) pomaknuta donja vrijednost EC; 6) pomaknuta linija simetrije; 7) zabilježena vrijednost početne krutosti

### 3.4. Zaključci nakon ispitivanja prototipova uređaja DSRSB

Na temelju detaljnog ispitivanja mogu se donijeti sljedeći zaključci seizmičkog ponašanja inovativnih dvojnih kružnih kotrljajućih seizmičkih ležajeva s kružnim površinama identičnog velikog polumjera:

- Za te je uređaje DSRSB potrebno točno dimenzioniranje tako da mogu preuzeti očekivana vertikalna opterećenja.
- Osnovna perioda tih ležajeva ovisi o polumjeru kružnih (sfernih) površina.
- Kotrljajući seizmički ležajevi odlikuju se velikom sposobnošću preuzimanja horizontalnih pomaka.

- Histerezni odziv uređaja DSRSB bio je vrlo stabilan, tj. izražen u obliku kosog četverokuta.
- Bilinearni model može se vrlo uspješno primijeniti za analitičko modeliranje uređaja DSRSB.
- Ispitivani izolacijski uređaji DSRSB imaju velik potencijal za primjenu u inženjerskoj praksi.

## 4. Ispitivanje prototipnih modela naprednih uređaja SF za rasap energije

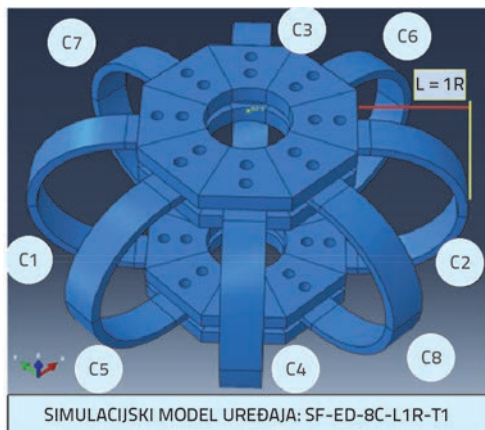
### 4.1. Program eksperimentalne provjere uređaja SF-ED

Sustav za rasap seizmičke energije koji je instaliran u ispitani model mosta USI-SF sastojao se od naprednih prostorno pojasnih uređaja (SF) za rasap energije (ED). Uređaji SF-ED predloženog tipa do sada još nisu analizirani i nisu dostupni na tržištu. U radu je prikazan dio istraživanja koji se odnosi na razvoj dva osnovna oblika uređaja SF-ED uključenih u sustav 1: SF-ED-8C-L1R i SF-ED-4C-L1R. U okviru ovog istraživanja ostvareni su značajni rezultati:

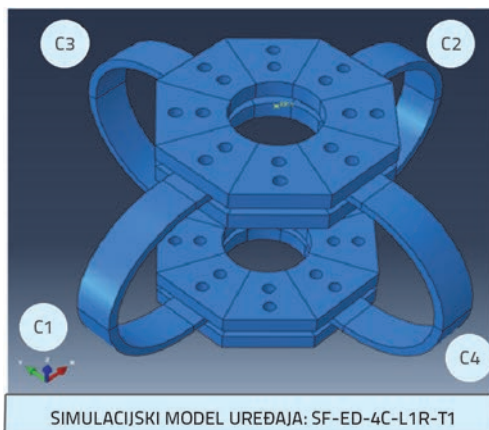
- potpuno je usvojena tehnologija projektiranja, proizvodnje i ispitivanja uređaja SF-ED
- dobivene su stvarne karakteristike histereznog ponašanja korištene u formulaciji analitičkih modela
- potvrđeno je da je uređaj prikladan za ugradnju u model mosta velikog mjerila radi dinamičkog ispitivanja na potresnom stolu
- ostvareni su preduvjeti za provjeru sustava USI-SF na potresnom stolu.

### 4.2. Projektiranje prototipnih modela SF-ED

Izrađena su dva osnovna oblika uređaja, tj. SF-ED-8C-L1R-Ti i SF-ED-4C-L1R-Ti, pri čemu je značajan uvjet bio postizanje prostorne i usklađene reakcije uređaja u svim smjerovima. Oznake za pobliže definiranje uređaja: SF – prostorna pojasnica; ED – rasap energije; 8C ili 4C – broj komponenata; L1R stvarne dimenzije  $L = 1R$ , i T1 ili T2 stvarne dimenzije poprečnog presjeka instaliranih komponenata. Trajektorija uslovljenog relativnog kretanja rasponske konstrukcije mosta u odnosu na donji ustroj u slučaju potresa nije poznata i u velikoj je mjeri nepredvidiva. Odziv konstrukcije na seizmičke pomake ulazi u kategoriju slučajnih vibracija. Prostorna kružna struktura uređaja usvojena je kako bi se omogućio prostorni odziv uređaja. Ta struktura sastoji se od osam ili četiri simetrične čelične komponente uređaja SF-ED koje su pričvršćene na gornju potpornu ploču (eng. *upper support plate* - USP), i na donju potpornu ploču (LSP) koje služe za povezivanje uređaja s prototipnim modelom mosta USI-SF u prostoru između AB rasponske konstrukcije i donjeg ustroja (slike 7. do 10.). Općenito uzevši, osam čeličnih komponenata postavljeno je radijalno pod kutom od  $45^\circ$  u definirani koordinatni sustav xy.



Slika 7. Prototipni model osnovnog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1



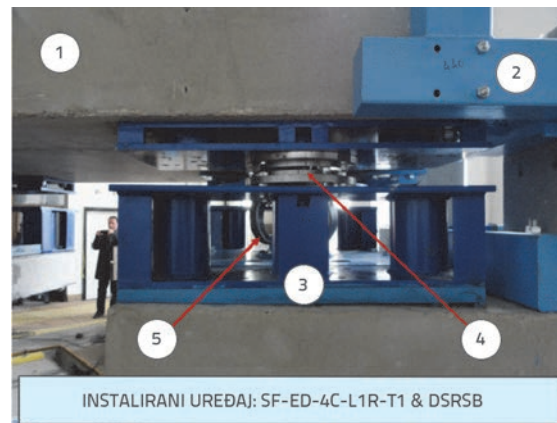
Slika 8. Prototipni model osnovnog uređaja SF-ED-4C-L1R-T1

Za čitav uređaj SF-ED odabrano je osam komponenata SF-ED kako bi se postigla gotovo istovjetna ujednačena reakcija u svim proizvoljnim smjerovima seizmičkog djelovanja, slika 7. Radijalne čelične prototipske komponente (5), slika 9., konstruirane su u obliku prostornih pojasnica (SF) pravokutnog poprečnog presjeka. Poprečni presjek prostornih pojasnica Ti ne mora biti fiksna. Mehaničke karakteristike korištenog metala mogu također biti varijabilne. Ovisno o dimenzijama poprečnog presjeka pojasnica određuju se mehaničke karakteristike čelika, te se stvaraju uvjeti za razradu i proizvodnju uređaja SF-ED tražene početne krutosti, granične čvrstoće, duktilnosti i otpornosti na pomak. Povezivanje gornjih (3) i donjih (1) kontaktnih površina uređaja ED, slika 9., može se ostvariti primjenom raznih konstrukcijskih rješenja kojima se definiraju razni granični uvjeti spojeva (2) i (4). Na temelju raznih mogućnosti graničnih uvjeta, poprečnih presjeka kružnih pojasnica i mehaničkih svojstava odabranih vrsta čelika, otvaraju se široke mogućnosti za industrijsku proizvodnju raznih vrsta uređaja ED u kategoriji SF. Prostorne su pojasnice (5) polukružnog oblika a njihov vanjski polumjer iznosi  $R = 105$  mm (vanjski promjer je  $D = 210$  mm). Kako bi se stvorili preduvjeti za povezivanje prostornih pojasnica (komponenta ED) na gornjim i donjim krajevima, slika 9, horizontalni dijelovi pojasnice (5) projektirani su u obliku produžetaka pojedinačne

dužine  $L_f = 70$  mm. U svakom od tih produžetaka predviđena su dva otvora promjera 12 mm za djelotvorno povezivanje oba kraja prostornih pojasnica između dviju oktogonálnih čeličnih ploča smještenih na gornjoj strani veze (4) i dviju analognih identičnih čeličnih ploča smještenih na donjoj strani potpore (2). Četiri oktogonalne čelične ploče izvedene su kao identični elementi s bočnom dimenzijom  $a = 87$  mm, a debljina im je iznosila  $d = 20$  mm. Postavljena vrsta uređaja SF-ED potpuno je učvršćena u rasponsku konstrukciju i donji ustroj modela mosta pomoću gornjih i donjih spojnih sustava (slike 9. i 10.). Prostorne pojasnice u uređajima SF-ED imaju dva različita poprečna presjeka,  $b/d = 40/10$  mm i  $b/d = 40/8$  mm, koji su označeni kao T1 i T2.



Slika 9. Instalirani osnovni uređaj SF-ED-8C-L1R-T1: (1) donja osnovna ploča; (2) donje nosive ploče; (3) gornja osnovna ploča; (4) gornje nosive ploče; (5) komponenta SF-ED



Slika 10. Detalj uređaja spremnog za ispitivanje: (1) rasponska konstrukcija; (2) čelični nosač uređaja DL; (3) čelični nosač uređaja DSR SB; (4) uređaj DSR SB; (5) uređaj SF-ED-4C-L1R-T1

Prva proizvodnja osnovnih prototipskih modela uređaja SF-ED realizirana je na temelju originalnih projekata. Svi metalni dijelovi, komponente, sustavi povezivanja i alternativni modelski uređaji proizvedeni su i korišteni za provedbu originalnih kvazistatičkih ispitivanja i u fazama dinamičkih eksperimentalnih pokusa



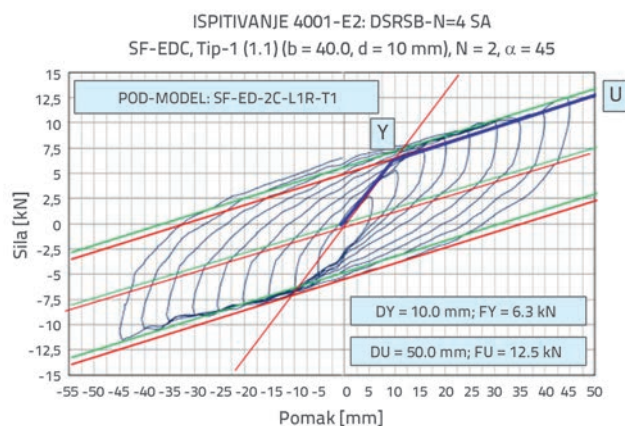
na potresnom stolu. Postupak prve proizvodnje prototipskih modela uređaja SF-ED (slika 9.) sastojao se od sljedećih značajnih aktivnosti:

- nabava duktilnog čelika
- proizvodnja svih čeličnih elemenata i uređaja
- izrada posebnih spojnih čeličnih dijelova korištenih u modelu mosta USI-SF
- proizvodnja nosivih čeličnih konstrukcija koje služe za instalaciju mobilnog pokretača za ciklična ispitivanja, slika 5.
- proizvodnja posebnih spojnih metalnih dijelova.

### 4.3. Ispitivanje histereznog ponašanja prototipskih uređaja SF-ED

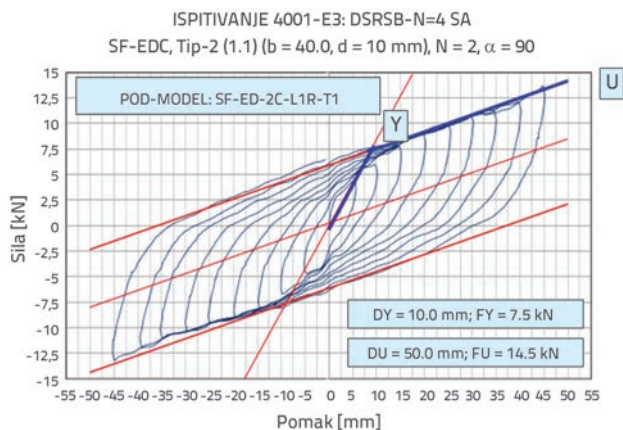
Primjenom analiziranih inovativnih svojstava prostorne konstrukcije uređaja SF-ED omogućeno je aktiviranje svih osam ili svih četiri instaliranih prostornih pojasnice (komponenta) u slučaju inducirano pomaka u bilo kojem smjeru, ovisno o smjeru rezultirajuće seizmičke sile. Ovisno o orijentaciji varira i doprinos raznih komponenata SF-ED u kumulativnom preuzimanju sile putem uređaja SF-ED, što ovisi o stvarnom radijalnom smjeru pojasnice ED (komponente) u odnosu na smjer rezultirajuće deformacije. Općenito uzevši, ako smjer deformacije odgovara kutu usmjerenja neke komponente, tada ulazna deformacija generira promjenu geometrijskog oblika dotične komponente SF-ED. U prvoj se fazi oblik komponente postupno mijenja, pa se tako početni polukružni oblik mijenja u asimetrični polueliptični oblik. Asimetričnost polueliptičnog oblika rezultat je relativnog pomaka dviju paralelnih nosivih ploča. Kod većih deformacija komponente SF-ED, na dotičnu komponentu ne utječe samo sila savijanja već i pritisak na jednom kraju, a tlačna je sila dominantna na drugom kraju. Inducirana složena raspodjela naprezanja, slika 16., dovodi to odgovarajuće promjene geometrije uređaja. Posljedično se uočava složeni nelinearni odziv komponente SF-ED, naročito u slučaju značajnog povećanja relativnih deformacija. Ako smjer relativne deformacije nije podudaran sa smjerom određene komponente SF-ED tj., primjerice, ako je kut  $\alpha = \pm 45^\circ$  ili  $\alpha = \pm 90^\circ$  ili  $\alpha = \pm 135^\circ$ , tada je komponenta dodatno izložena torziji pa tako doprinos rezultirajućeg naprezanja u raznim poprečnim presjecima postaje još složeniji. Međutim, eksperimentalna ispitivanja pružila su mogućnost određivanja stvarnog nelinearnog ponašanja, kako pojedinačnih komponenata ED instaliranih u raznim geometrijskim položajima, tako i cjelokupnih uređaja SF-ED. U praktičnoj primjeni, predloženi uređaj SF-ED može se postaviti kao cjelina s osam komponenata ED (C1 do C8), slika 7., ili kao cjelina sa simetričnim skupom od četiri komponente ED (C1 do C4), slika 8. U oba slučaja, gornje i donje metalne ploče na koje su pričvršćeni gornji i donji krajevi uređaja SF-ED kreću se paralelno i mogu postići prilično velike relativne deformacije ovisno o kapacitetu preuzimanja deformacije seizmičkih izolatora korištenih u sustavu mosta USI-SF. Stoga, nelinearno ponašanje raznih komponenata uređaja SF-ED predstavlja složeno naponsko-deformacijsko stanje koje nastaje zbog duboke nelinearnosti materijala i velikog utjecaja geometrijske nelinearnosti koja se

javlja zbog velike promjene inicijalne geometrije svake pojedine komponente SF-ED. S obzirom na mogućnost kreiranja mnogih različitih i posebnih opcija, ovdje razmatrani projektirani i izgrađeni prototipski mostovni model USI-SF velikog mjerila vrlo uspješno je poslužio kao posebna samopodesiva platforma za eksperimentalna ispitivanja (SA-ETP), slika 5. Kreirana platforma SA-ET omogućila je provedbu mnogih različitih kvazistatičkih ispitivanja (više od stotinu) uključujući i ispitivanja histereznog ponašanja raznih konfiguracija komponenata SF-ED i uređaja SF-ED. Planirana kvazistatička ispitivanja uspješno su provedena pomoću hidrauličkog pokretača (6), slika 5. Sva su eksperimentalna ispitivanja provedena automatski pomoću prethodno definiranih cikličnih pomaka s postupnim povećavanjem amplituda pomaka do duboke nelinearnosti. Na taj su način stvoreni napredni uvjeti za generiranje originalnih histereznih dijagrama za sve ispitane konfiguracije, nakon isključivanja poznatog sudjelovanja prisutnog sustava za izolaciju sastavljenog od četiri ranije ispitana uređaja DSRSB. Na ovakav originalan način osmišljen je napredan mostovni sustav USI-SF koji se razmatra u ovom eksperimentalnom i analitičkom istraživanju. U stvari, rasponska konstrukcija modela mosta u obliku teške armiranobetonske ploče instalirana je iznad četiri uređaja DSRSB koji su predstavljali sustav za seizmičku izolaciju. Određeni reprezentativni rezultati dobiveni tijekom ispitivanja histereznog ponašanja raznih konfiguracija komponenata SF-ED prikazani su na slikama 11. i 12. Tipično nelinearno histerežno ponašanje para komponenata SF-ED, instaliranog pod kutom od  $\alpha \pm 45^\circ$ , prikazano je na slici 11. Analogno tome, na slici 12. vidimo tipično nelinearno histerežno ponašanje istog para komponenata SF-ED, ali za njihov karakteristični položaj definiran kutom od  $\alpha \pm 90^\circ$ . Eksperimentalno dobiveni histerezni dijagrami pokazuju da komponente SF-ED imaju sljedeće povoljne karakteristike: (1) Histerezni odnosi svakog simetrično povezanog para komponenata SF-ED vrlo su stabilni; (2) Zbog velike promjene prvobitne geometrije, komponente SF-ED iskazuju izrazito stabilnu vrijednost druge krutosti K2 u drugoj fazi.

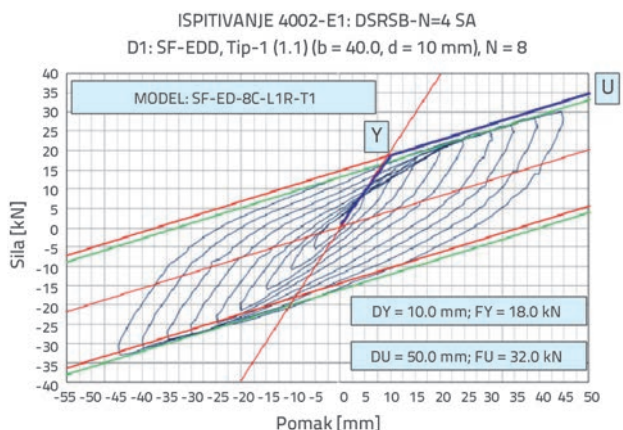


Slika 11. Histerezni odziv dviju komponenata SF-ED tipa T1 ( $\alpha = \pm 45^\circ$ )

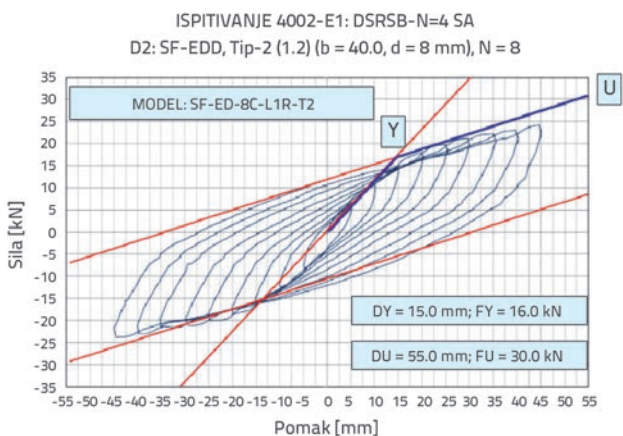




Slika 12. Histerezni odziv dviju komponenata SF-ED tipa T1 ( $\alpha = \pm 90^\circ$ )



Slika 13. Histerezni odziv prvobitnog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 s osam komponenata ( $N = 8$ )



Slika 14. Histerezni odziv prvobitnog uređaja SF-ED-8C-L1R-T2 s osam komponenata ( $N = 8$ )

Njihova prvobitna krutost  $K_1$  je veća, ali se točka popuštanja dostiže pri relativno malim deformacijama. Nakon toga se uočava naglašeno nelinearno ponašanje karakterizirano znatnim povećanjem površina histereznih krugova.

Takve karakteristike pokazuju da komponente SF mogu apsorbirati i raspršiti velike količine seizmičke energije u čitavom rasponu velikih cikličnih deformacija; (3) Nakon povrata sa svake postignute maksimalne deformacije u bilo kojem smjeru, ponovno se javljaju male povratne elastične deformacije i, odmah nakon toga, element se još jednom aktivira u neelastičnom domenu, ostvarujući tako histerezni odziv; (4) Histerezni odnosi vrlo su stabilni i upućuju na velike mogućnosti rasapa seizmičke energije. Uz njihove prvobitne osnovne geometrijske karakteristike, postoji i mogućnost njihovog mijenjanja radi primjene nekog novog tehničkog rješenja; (5) U skladu s usvojenim identičnim geometrijskim karakteristikama ispitanih parova komponenti, u oba su ispitivanja dobivene slične vrijednosti maksimalne sile otpora, i to kako slijedi: (1) za ispitivanje 1 ( $\alpha = 45^\circ$ ), maksimalna sila otpora iznosi  $F_{max} = \pm 12,5$  kN i (2) a za ispitivanje 2 ( $\alpha = 90^\circ$ ), maksimalna sila otpora nešto je viša i doseže vrijednost od  $F_{max} = \pm 14,5$  kN. Ta posebna istraživanja potvrđuju da projektant ima otvorene mogućnosti projektiranja tipskih elemenata za rasap seizmičke energije kako bi dobio elemente koji se odlikuju optimalnim nelinearnim svojstvima. Stoga je konačno kvazistatičko ispitivanje uključivalo i eksperimentalno ispitivanje cjelokupnih uređaja SF-ED. Slika 13. prikazuje histerezni dijagram ispitivanog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 koji se sastoji od osam komponenata SF-ED tipa T1. Rezultati ovog ispitivanja pokazuju da maksimalna sila otpora doseže vrijednost od  $F_{max} = \pm 32,0$  kN, pri čemu su oblik i stabilnost histerezne krivulje potpuno sačuvani i iskazuju vrlo dobre karakteristike. Slika 14. prikazuje histereznu krivulju ispitivanog uređaja SF-ED-8C-L1R-T2 sastavljenog od osam komponenata za rasap energije tipa T2. Zabilježena maksimalna sila nešto je niža ( $F_{max} = \pm 30,0$  kN), ali su karakteristike histereznog odziva i ovdje vrlo povoljne.

#### 4.4. Zaključci nakon ispitivanja prototipova uređaja SF-ED

Na temelju rezultata kvazistatičkog ispitivanja prototipskih modela komponenata SF-ED i uređaja SF-ED mogu se donijeti sljedeći zaključci: Predloženi originalni koncept uređaja SF-ED s aktivacijom nelinearnog odziva prostornih pojasnica predstavlja atraktivno kompaktno rješenje koje uključuje povoljno ponašanje i velike mogućnosti za praktičnu primjenu. Primjena uređaja na stvarnim mostovima može se uspješno definirati u postupku projektiranja usvajanjem odgovarajućeg niza geometrijskih i materijalnih svojstava. Sile vjetrova i kočenja mogu se potpuno kontrolirati dodavanjem određenih uobičajenih elemenata. Djelotvorno i stabilno aktiviranje uređaja SF-ED u svim smjerovima smatra se naprednom karakteristikom jer se time štiti integritet sustava a potres ne može pronaći "slabu točku" u izoliranoj konstrukciji. Sustav seizmičke izolacije s dvojnim kružnim kotrljajućim seizmičkim ležajevima imao je isti odziv u svim smjerovima te je iskazao vrlo stabilno ponašanje čak i pri najvećim amplitudama induciranih pomaka.

## 5. Modeli za numeričku simulaciju naprednih uređaja SF-ED

Analićka simulacija cikličnog nelinearnog ponašanja predloženog osnovnog prototipskog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 izuzetno je složen zadatak zbog kompleksnog geometrijskog oblika uređaja te zbog specifičnih rubnih i/ili instalacijskih uvjeta. Napredne teoretske spoznaje ključne su za postizanje realnih analitičkih simulacijskih rezultata u pogledu nelinearnog histereznog odziva uređaja, te za analizu nelinearnog seizmičkog odziva ispitivanog modela mosta (u 2. fazi). Također su potrebne i novije spoznaje iz područja matrične analize konstrukcija [28], nelinearne analize konačnih elemenata [29, 30], dinamike konstrukcija s numeričkim metodama za nelinearnu postupnu analizu konstrukcija [31, 32] kao i novije znanstvene spoznaje iz područja znanosti o materijalima i gradnji mostova [33, 34]. Analizirani su i korišteni napredni programi za posebne analize [35-37] kako bi se omogućilo praktično provođenje planirane izuzetno kompleksne nelinearne analize trodimenzionalnog cikličnog odziva inovativnih uređaja SF-ED, te nelinearne analize trodimenzionalnog seizmičkog odziva naprednog modela mosta USI-SF. Za numeričku simulaciju histereznog odziva naprednih uređaja SF-ED, u ovoj inicijalnoj fazi korišten je nelinearni trodimenzionalni analitički model formuliran pomoću računalnog programa ABAQUS [36]. Ako se materijal smatra linearno elastičnim, ako se ne mijenjaju rubni uvjeti, te ako se samo jedan niz vanjskih sila polako nanosi na konstrukciju, tada analiza odgovara pojedinačnom linearnom statičkom rješenju. U takvom se slučaju treba riješiti samo jedan niz jednačbi ravnoteže, ako su nametnuti rubni uvjeti:

$$[K]\{U\} = \{R\}$$

Ako je problem nelinearan te ako matrica krutosti nije konstantna, treba se primijeniti nelinearna analiza, a to uključuju provođenje određenog broja iteracija kako bi se za svaki slučaj opterećenja dobilo rješenje ravnoteže odgovarajuće točnosti. Međutim, za analizu histereznog odziva cjelovitog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 potrebno je rješenje složenog nelinearnog problema, što uključuje i provedbu posebnog postupka za slučaj višestrukog opterećenja. Zadano opterećenje numerički je simulirano u okviru 30000 koraka opterećenja, a u svakom od tih koraka proveden je određen broj iteracija ravnoteže kako bi rješenje bilo što točnije.

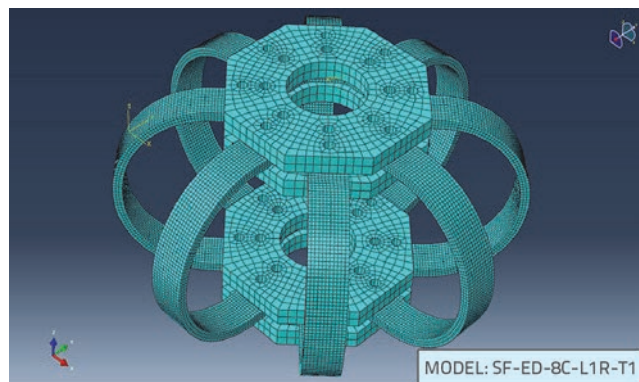
Provedeno istraživanje izuzetno je korisno jer predstavlja značajnu opću metodologiju za rješavanje specifičnih problema kao što su:

- provjera mogućnosti rješavanja posebnih istraživačkih i projektantskih zadataka na temelju provođenja precizne trodimenzionalne nelinearne koncepcije modeliranja
- eksperimentalna provjera predloženog modela za simulaciju složenog histereznog odziva pomoću uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 pri općem cikličnom opterećenju do duboke nelinearnosti.

Sve istraživačke aktivnosti u ovom području uspješno su provedene u tri faze:

- formuliranje nelinearnog detaljnog 3D analitičkog modela
- analiza nelinearnog histereznog odziva uređaja pri simulaciji cikličnih deformacija
- komparativni prikaz originalnih teoretskih i eksperimentalnih rezultata.

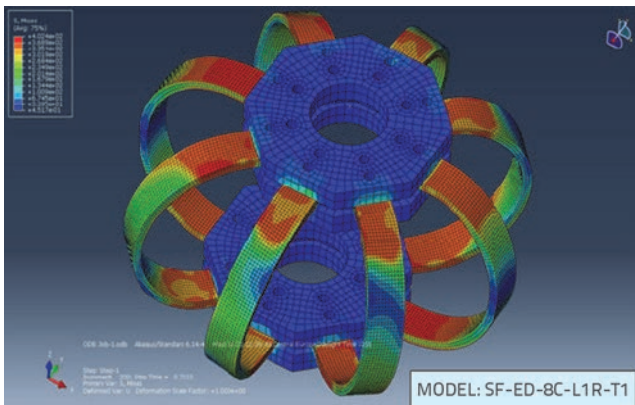
a) Formuliranje preciznog nelinearnog analitičkog modela prototipskog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1. Na slici 15. prikazan je primjer formulacije preciznog trodimenzionalnog nelinearnog modela konačnih elemenata (model R3DNL-FE) cjelokupnog uređaja tipa SF-ED-8C-L1R-T1, koji se koristi za nelinearnu analizu pomoću računalnog programa ABAQUS [36]. Idealno fiksni rubni uvjeti simulirani su za donju potpurnu ploču. Trajni horizontalni pomak zadan je za gornju ploču tijekom simulacije ciklične deformacije u smjeru x, što je realan ulazni podatak za numeričku simulaciju nelinearnog cikličnog ponašanja modeliranog uređaja.



Slika 15. Detaljni trodimenzionalni nelinearni model konačnih elemenata formuliran za analitičku simulaciju složenog histereznog odziva uređaja SF-ED-8C-L1R-T1

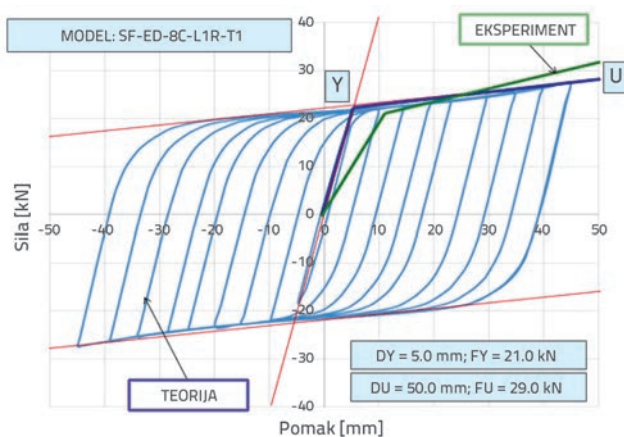
b) Analiza nelinearnog histereznog odziva prototipskog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1. Za provedbu ove o vremenu ovisne specifične kvazistatičke analize iskorištena je dostupna opcija za implementaciju postupne nelinearne statičke analize. Tako je omogućena simulacija postupnih deformacija u zadanom smjeru. Za te je potrebe numerički zadan i analitički primijenjen poznati unaprijed određeni slučaj cikličnih pomaka, sličan onom koji je korišten tijekom provedbe odgovarajućeg eksperimentalnog ispitivanja. Odgovarajući prethodni podaci o stupnjevima deformacije u postupnoj analizi s usvojenim iterativnim nelinearnim postupkom analitički su razmatrani na bazi poznatog unaprijed definiranog slučaja cikličnih deformacija, uzimajući pritom u obzir dodatni iteracijski na koracima baziran postupak za postizanje definirane točnosti. Cjelokupni rezultati nelinearne analize dobiveni su u preciznom numeričkom formatu za sve značajne fizikalne veličine (naprezanje, deformacija, sila, fizička deformacija itd.) i u tu je svrhu primijenjen detaljni nelinearni analitički

mikromodel, slika 16. prikazuje tipičnu raspodjelu naprezanja u svim komponentama SF-ED tijekom simulacije stvarnog mehaničkog odziva za inducirane postupne relativne pomake između donjih i gornjih potpora cjelovitog uređaja SF-ED tipa SF-ED-8C-L1R-T1.



Slika 16. Raspodjela naprezanja u komponentama SF-ED tijekom histereznog odziva naprednog uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 pri induciranim relativnim cikličnim pomacima do duboke nelinearnosti

c) Značenje eksperimentalnih i teoretskih rezultata. Eksperimentalnim ispitivanjima istog uređaja do duboke nelinearnosti dobiven je vrlo stabilan histerezni dijagram, slika 17. U slučaju ispitivanja, stvarna razina učvršćenja svih komponenata uređaja ED u zoni između donjih i gornjih čeličnih potpornih ploča ostvarena je nanošenjem unaprijed definiranog torzijskog momenta  $M_t = 0,4 \text{ kNm}$  na sve vijke, čime su ostvareni polučvrsti uvjeti povezivanja. Na temelju odgovarajućih eksperimentalnih rezultati definirana je rezultirajuća bilinearna reprezentativna anelopa, kao što se može vidjeti na slici 17.



Slika 17. Histerezni odziv na reverzna ciklična opterećenja uređaja SF-ED-8C-L1R-T1, izračunan pomoću formuliranog preciznog trodimenzionalnog nelinearnog modela konačnih elementa kojim se simuliraju idealno učvršćeni spojevi SF-ED

Cjelopupan analitički dobiven histerezni odziv uređaja SF-ED-8C-L1R-T1 na reverzno ciklično opterećenje, izračunat pomoću formuliranog preciznog 3D nelinearnog modela, prikazan je također na slici 17. Međutim, u ovoj su analizi uvjeti idealno učvršćenih donjih i gornjih potpora simulirani analitičkim postupkom. Kao što vidimo na slici 17., histerezni odziv uređaja je vrlo stabilan, s idealnom simetrijom koja upućuje na vrlo visok stupanj točnosti proračuna. Međutim, neke se razlike ipak mogu uočiti usporedbom jednostavne eksperimentalne bilinearne anelope i analitički definirane bilinearne anelope. Iako je analitička histerezna krivulja šira od eksperimentalne krivulje, ipak je postignuta dobra simulacija stvarnih složenih karakteristika odziva. Te razlike uglavnom proizlaze iz analitički simuliranih idealno učvršćenih spojeva potpora komponenata SF-ED, tj. zato što stvarni polučvrsti uvjeti nisu razmatrani u ovom radu. Međutim, potvrđeno je da je primjena preciznog 3D nelinearnog analitičkog modela najmoćnija, općenito primjenjiva, te vrlo napredna opcija modeliranja, kojom se može realno simulirati složeni nelinearni histerezni odziv uređaja SF-ED. Primijenjeni način modeliranja može se okarakterizirati kao napredna opcija modeliranja koja se može dodatno poboljšavati u kontekstu analitičke simulacije složenih građevinskih i konstrukcijskih detalja. I, na kraju, primjena eksperimentalno provjerenog koncepta za provođenje precizne nelinearne analize geometrijski složenih komponenata i uređaja do duboke nelinearnosti pruža izvanrednu priliku za uvođenje naprednih sustava za kvalitativno poboljšanje seizmičke zaštite mostovnih konstrukcija kroz optimalnu modifikaciju seizmičkog odziva sustava.

## 6. Seizmička ispitivanja modela mosta USI-SF na potresnom stolu

### 6.1. Konceptija potresnog stola za prototipski model mosta USI-SF

Strategija planiranja i izgradnje fizikalnih modela uključuje analizu nekoliko značajnih aspekata koji se odnose na simuliranje osnovnih geometrijskih, fizikalnih i funkcionalnih karakteristika odabranih prototipova, a u vezi sa stvarnim uvjetima dinamičkog ispitivanja na potresnom stolu u Institutu IZIS. Stoga su u projektiranju i izradi ovdje ispitanih fizikalnih modela u obzir uzete dimenzije konstitutivnih elemenata prototipa mosta i njihov doprinos globalnoj učinkovitosti prototipa mosta, zatim karakteristike osnovnih konstrukcijskih komponenata, tip sustava za seizmičku izolaciju, karakteristike instaliranih originalnih uređaja SF-ED i njihovih spojeva, te postupci korišteni u izradi prototipa. Ukupna dužina analiziranog prototipskog mosta s tri otvora iznosi  $L = 15,75 + 27,00 + 15,75 = 58,50 \text{ m}$ . Kontinuirana AB rasponska konstrukcija tog mosta oslanja se na stupove preko zglobnih podupora, s tim da su pokretni ležajevi korišteni na obje krajnje potpore mosta. Visina kraćih i dužih stupova iznosila je  $h_1 = 9,50 \text{ m}$  tj.  $h_2 = 11,70 \text{ m}$ . U projektiranju prototipskog modela mosta, seizmička fuga uzeta



Tablica 1. Parametri projektiranja modela prototipskog mosta USI-SF u mjerilu 1:9 korišteni u ispitivanju na potresnom stolu kao kombinirani model prave replike –simulacija umjetne mase

Br.	Parametri za skaliranje	Potrebni faktori skaliranja	Potrebni faktori skaliranja za $lr = 1/9$	Usvojeni faktori skaliranja za $lr = 1/9$
1	Dužina ( $lr$ )	$lr$	1/9	1/9
2	Vrijeme ( $tr$ )	$(lr)^{1/2}$	1/3	1/3
3	Gravitacijsko ubrzanje ( $gr$ )	1	1	1
4	Ubrzanje ( $ar$ )	1	1	1
5	Brzina ( $vr$ )	$(lr)^{1/2}$	1/3	1/3
6	Frekvencija ( $fr$ )	$(lr)^{-1/2}$	3	3
7	Pomak ( $\delta r$ )	$lr$	1/9	1/9
8	Težina ( $Wr$ )	$(lr)^3$	1/729	1/729
9	Sila ( $Fr$ )	$(lr)^2$	1/81	1/81
10	Moment ( $Mr$ )	$(lr)^3$	1/729	1/729
11	Perioda ( $Tr$ )	$(lr)^{1/2}$	1/3	1/3

je u obzir namjernim povećanjem visine za  $h_g = 40,0$  cm kako bi se stekli uvjeti za instaliranje uređaja čije su dimenzije pogodnije za ovo istraživanje. U stvarnosti se njihova geometrija i ostale karakteristike mogu podesiti u skladu s potrebama. Uzimajući u obzir sve bitne faktore, a prije svega veličinu potresnog stola (5,0 x 5,0 m) i korisno opterećenje, osnovni model ISUBRIDGE trebao se geometrijski smanjiti u odnosu na prvobitni prototip. Zbog tih je razloga usvojen geometrijski faktor mjerila od 1:9 koji u ovom slučaju omogućuje provjeru zahtjeva, ali uz primjenu usvojenog koncepta modeliranja. Zbog tog smanjenja mjerila, sve pojave koje su uključene u dinamička ispitivanja morale su se prilagoditi u skladu sa zakonom sličnosti [23]. Usvojen je prikladan model (kombinirani model prave replike – simulacija umjetne mase) uzimajući pritom u obzir osnovne relevantne faktore. Za simulaciju krute AB rasponske konstrukcije usvojena je kruta ploča s dodanom masom (kroz povećanje dimenzija poprečnog presjeka) i za to je korišten isti materijal kao i kod prototipske konstrukcije. Za simulaciju središnjih stupova korišten je čelični materijal. Uređaji za seizmičku izolaciju i rasap energije projektirani su i proizvedeni u umanjenom mjerilu. Zakon sličnosti podrazumijeva usvajanje odnosa za razne parametre, i to za sve njih primjenom geometrijskog faktora mjerila ( $lr$ ), tablica 1. U izradi AB segmenata modela mosta korišten je beton klase C25/30, dok je čelik klase S355 odabran i korišten u izvođenju čeličnih uređaja SF-ED. S obzirom na gornje parametre za projektiranje, eksperimentalni model mosta prije svega je zamišljen kao model koji treba reproducirati realne uvjete u svrhu uspješnog ispunjavanja već navedenih glavnih ciljeva istraživanja [24-27]. U modelu se ponajprije provodi eksperimentalna provjera ponašanja sustava USI-SF u uvjetima vrlo snažnih seizmičkih pobuda. Kako bi se ostvarili spomenuti ciljevi, korišten je fizikalni model tipičnog mosta s tri otvora, izveden u velikom mjerilu. Tijekom projektiranja i građenja modela mosta definirano je nekoliko značajnih početnih ciljeva kako bi se omogućila

sigurna simulacija visokih razina inercijskih sila koje dovode do dovoljno jakog odziva sustava.

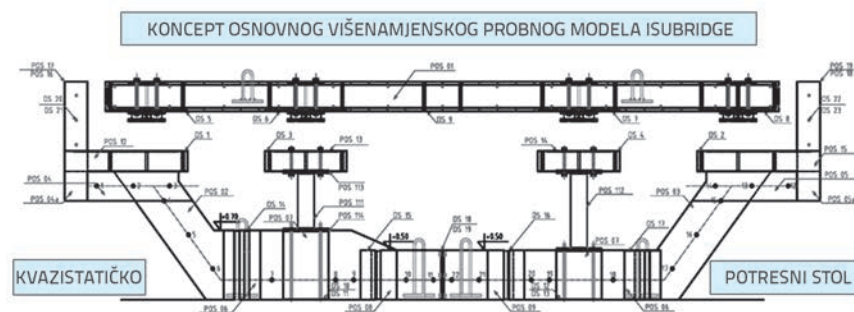
Odabrani su sljedeći najznačajniji faktori:

- Tri su otvora usvojena za prototipski most kako bi se mogli predvidjeti kruti upornjaci i elastični središnji stupovi, što je vrlo uobičajena i karakteristična situacija kod stvarnih mostovnih konstrukcija s kojima se susrećemo u inženjerskoj praksi.
- Središnji stupovi prototipskog mosta trebaju biti dovoljno elastični (njihova elastičnost treba biti mnogo izraženija od one koju iskazuju kruti upornjaci) kako bi se realna pojava krutih upornjaka i elastičnih središnjih stupova mogla uključiti u neko buduće eksperimentalno ispitivanje.
- Usvojene su različite visine središnjih stupova kako bi se uzele u obzir razlike u krutosti takvih središnjih stupova. Time je omogućena primjena istog modela prototipskog mosta u eksperimentalnom ispitivanju mosta s krutim upornjacima i središnjim stupovima različite krutosti.
- Rasponska konstrukcija modela prototipskog mosta projektirana je kao kruta AB ploča ukupne težine koja je definirana tako da omogućiti simulaciju realno velikih inercijskih sila bez primjenjivanja dodatnog opterećenja, slika 18. To je omogućilo aktivaciju instaliranih uređaja DSRSB i uređaja SF-ED.
- Smjer kretanja tla uslijed seizmičkog djelovanja nije unaprijed poznat i, općenito uzevši, nije izravno podudaran s osnovnim uzdužnim ili poprečnim usmjerenjem mosta. Zbog toga je uzdužna os mosta pozicionirana dijagonalno u odnosu na četvrtasti oblik potresnog stola. Na taj je način omogućeno generiranje seizmičkih sila u oba smjera, tj. u uzdužnom (x) i poprečnom (y) smjeru, iako potresni stol Instituta IZIS prihvaća ulazak seizmičkih sila u vertikalnom i u jednom horizontalnom smjeru.
- Rasponska konstrukcija mosta u potpunosti leži na sustavu seizmičke izolacije DSRSB. Na taj se način ukupna težina

raspanske konstrukcije prenosi na nosive točke, tj. na seizmičke izolatore.

- Seizmički uređaji SF-ED zamišljeni su tako da ne sudjeluju u preuzimanju bilo kakve težine. Jedina uloga uređaja SF-ED sastoji se u djelotvornom raspršivanju seizmičke energije ili u uvođenju dodatnog prigušenja. Tako bi se trebali osigurati pogodni uvjeti za kontrolu intenzivnih vibracija koje se javljaju tijekom vrlo snažnih potresa.

Kako bi se udovoljilo spomenutim uvjetima i specifičnim zahtjevima, projektiran je i izgrađen specifičan eksperimentalni model mosta u velikom mjerilu. Projektirani i izgrađeni model mosta USI-SF prikazan je na slikama 5., 18. i 19.



Slika 18. Projektirani osnovni prototipski model višenamjenskog mosta



Slika 19. Prototipski model mosta USI-SF za ispitivanje seizmičkog ponašanja postavljen na IZIIS-ovom potresnom stolu, sa dva originalna uređaja SF-ED-4C-L1R-T1 i četiri uređaja DRSRB

- a) Karakteristike donjeg ustroja modela mosta. Donji ustroj eksperimentalnog modela prototipskog mosta sastoji se od dvije paralelne krute AB grede s odgovarajućim zakošenjem na oba kraja kako bi se omogućilo povišeno horizontalno pozicioniranje potpora upornjaka. Horizontalni dijelovi objiju paralelnih AB gređa koriste se kako bi se omogućio smještaj modela mosta na potresnom stolu u smjeru njegove dijagonale. Ukupna dužina horizontalnog dijela AB gređa iznosi  $l_1 = 520$  cm. Tlocrtna dužina obaju krajeva s njihovim produžecima iznosi:  $l_2(\text{left}) = l_2(\text{right}) = 155$  cm. S obzirom na te dimenzije, ukupna dužina donjeg ustroja iznosi  $L_{DS} = 520 + 2 \cdot 155 = 830$  cm. Spomenute dvije paralelne gređe

izvedene su tako da im poprečni presjek iznosi  $b/h = 25/50$  cm. Međutim, na lijevoj je strani visina poprečnog presjeka uvećana za 20 cm, pa iznosi  $b/h = 25/70$  cm. Tako je ispunjen uvjet za izvođenje središnjih stupova različite visine. Objje paralelne AB gređe spojene su sa šest poprečnih AB gređa, po tri na svakoj polovici. Dimenzije poprečnih gređa na lijevoj polovici donjeg ustroja iznose: (1)  $b/h = 40/70$  cm; (2)  $b/h = 50/70$  cm i (3)  $b/h = 40/50$  cm. Središnja poprečna gređa na lijevoj polovici ( $b/h = 50/70$  cm) koristi se za učvršćenje kraćih stupova izvedenih kao par čeličnih stupova kružnog i šupljeg poprečnog presjeka. Zakošeni dijelovi paralelnih AB gređa završavaju s horizontalnim dijelovima koji su na krajevima spojeni s poprečnim AB gređama i monolitnim AB pločama debljine 20 cm, lijevanima na mjestu ugradnje. Objje krajnje AB ploče koriste se za instaliranje lijevog i desnog uređaja DRSRB i uređaja SF-ED između njih (slike 20. i 23.). Dva vertikalna AB stupa poprečnog presjeka  $a/b = 25/35$  cm i visine  $h = 70$  cm projektirana su na svakom kraju AB modela donjeg ustroja mosta. Ti se kratki stupovi koriste kao sigurnosni elementi koji nose uređaje za kontrolu velikih pomaka. Središnji stupovi izvedeni su u parovima od po dva čelična stupa šupljeg kružnog presjeka promjera 168 mm i debljine stijenke 12 mm.

Na gornjoj površini čelični stupovi nose završne čelične spojne ploče koje podupiru AB poklopne ploče dimenzija 90 cm x 150 cm x 20 cm. Na tim AB poklopnim pločama predviđena su dva položaja za eventualnu ugradnju jednog para uređaja DRSRB i uređaja SF-ED između njih.



Slika 20. Izrađeni i instalirani komplet sastavljen od dva uređaja DRSRB i jednog uređaja SF-ED-4C-L1R-T1 na desnoj krajnjoj potpori ispitivanog modela prototipskog mosta

Čitav donji ustroj izveden je kao montažna konstrukcija, a sastoji se od dva dijela iste dužine (slike 19. i 22.). Spoj ta dva

dijela izveden je zasebno na dvije uzdužne AB grede u sredini pomoću čelinih čeličnih ploča i odgovarajućih klinova. Montaža donjeg ustroja ovisi o laboratorijskim uvjetima, tj. o nosivosti laboratorijske dizalice, koja je ograničena na  $\max Q = 100$  kN.

b) Karakteristike gornjeg ustroja (raspanske konstrukcije) modela mosta. Gornji ustroj modela mosta izveden je kao AB ploča odgovarajuće težine (slika 18.). Kako bi se dobila potrebna težina, AB ploča izvedena je s poprečnim presjekom dimenzija  $b/d = 150/30$  cm. Ukupna dužina AB ploče iznosi  $l = 740$  cm. Na svakom je kraju ostavljen slobodan prostor  $D_1 = D_2 = 20$  cm. Širina krajnjih vertikalnih stupova iznosi  $b_1 = b_2 = 25$  cm. S obzirom na takve dimenzije na vrhu, ukupna dužina čitavog eksperimentalnog modela mosta iznosi  $L = 740$  cm +  $2 \cdot 20$  cm +  $2 \cdot 25$  cm = 830 cm. AB ploča postavljena je na visinskom razmaku od  $h_d = 40$  cm u odnosu na najviše površine AB donjeg ustroja. Taj razmak (seizmička fuga) služi za smještaj dva (2) metalna odstoynika na svakom od četiri dostupna oslonačka položaja (dva krajnja i dva središnja oslonačka položaja). Uređaji DSR SB postavljeni su na te metalne odstoynike, a između metalnih odstoynika nalazi se prostor za instaliranje novih uređaja SF-ED, slika 20.

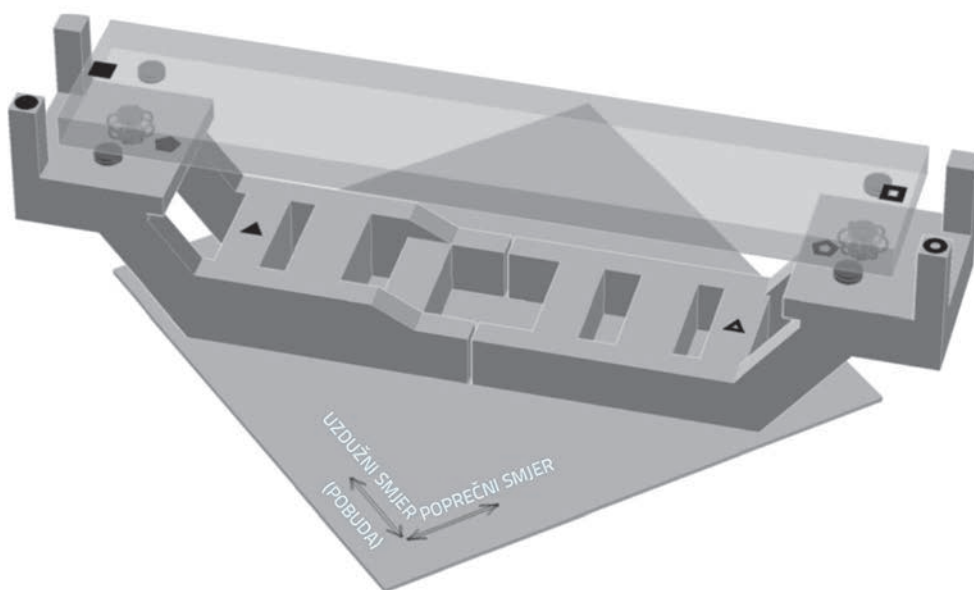
c) Uređaji za ograničavanje pomaka. Sustav za ograničavanje pomaka (DLD) projektiran je i izrađen kako bi se onemogućilo urušavanje teške raspanske konstrukcije modela mosta tijekom snažnog dinamičkog odziva te kako bi se omogućilo sigurno izvođenje ispitivanja u slučaju simuliranja vrlo jakih seizmičkih udara, slika 5. Sustav DL sastojao se od osam zasebnih uređaja za ograničavanje pomaka (DLD) izvedenih u vidu kratkih elastičnih čeličnih konzola koje djeluju kao nelinearni graničnici a zadaća im je da izbjegnu opasne "krute

udare". To omogućuje djelotvorno funkcioniranje sustava za seizmičku izolaciju koji se sastoji od četiri uređaja DSR SB i sustava za rasap energije koji je sastavljen od dva uređaja SF-ED (slika 23.) jer su uređaji DL postavljeni na jednaku sigurnosnu udaljenost i omogućuju razmak od  $D_g = 60$  mm. Ti se uređaji mogu aktivirati samo u slučaju pretjeranih pomaka a tada iskazuju povratnu silu kojom se onemogućuje pomak čitavog gornjeg ustroja tijekom pokusa na potresnom stolu.

## 6.2. Senzori na modelu mosta USI-SF

Na model su pričvršćeni odgovarajući senzori kako bi se omogućilo prikupljanje reprezentativnih eksperimentalnih rezultata tijekom seizmičkog ispitivanja modela mosta USI-SF. Sa slike 21. vidljivo je da su upotrijebljene tri različite vrste odgovarajućih senzora, kako slijedi:

- a) Pretvornici (senzori) LVDT za mjerenje relativnog pomaka. Ti su pretvornici služili za mjerenje relativnih pomaka tokom vremena između donjeg i gornjeg ustroja modela mosta. Pritom je osnovni cilj bio odrediti vrijeme aktivacije uređaja DSR SB i SF-ED, jer oni reagiraju ovisno o magnitudi relativnih pomaka. Za tu svrhu trebala su ukupno četiri pretvornika tipa LVDT.
- b) Pretvornici LP za mjerenje apsolutnog pomaka. Ti su pretvornici služili za mjerenje ukupnog pomaka tokom vremena u odabranim karakterističnim točkama modela mosta. Ukupni su pomaci izmjereni učvršćivanjem jednog kraja pretvornika izravno na model mosta kod kojeg dolazi do pomaka, a drugi je kraj fiksiran u odgovarajućoj točki na istoj visini koja se nalazi na čeličnom stupu izvan potresnog stola (stup je učvršćen na pod laboratorija), gdje ne dolazi



CH 01	NP1	●	L	LVDT-01
CH 02	NP1	●	T	LVDT-02
CH 03	NP2	●	L	LVDT-03
CH 04	NP2	●	T	LVDT-04
CH 05	NP3	▲	L	LP-01
CH 06	NP4	▲	L	LP-02
CH 07	NP7	■	L	LP-03
CH 08	NP8	■	L	LP-04
CH 09	NP3	■	L	ACC-01
CH 10	NP3	■	T	ACC-02
CH 11	NP4	■	L	ACC-03
CH 12	NP4	■	T	ACC-04
CH 13	NP5	●	L	ACC-05
CH 14	NP5	●	T	ACC-06
CH 15	NP6	●	L	ACC-07
CH 16	NP6	●	T	ACC-08
CH 17	NP7	▲	L	ACC-09
CH 18	NP7	▲	T	ACC-10
CH 19	NP8	▲	L	ACC-11
CH 20	NP8	▲	T	ACC-12

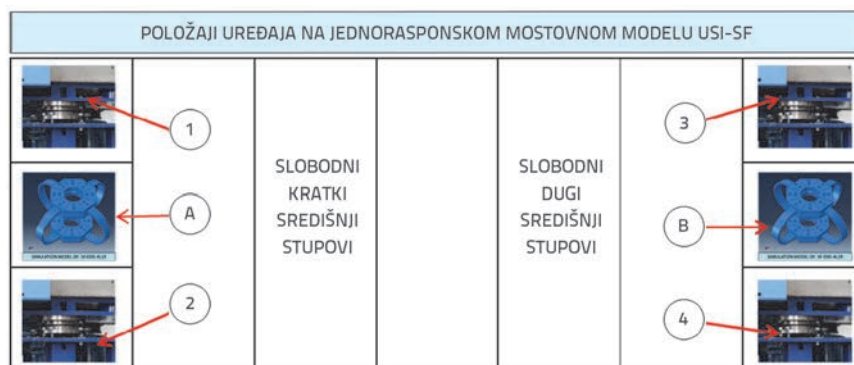
Slika 21. Točke prikupljanja podataka i senzori s odgovarajućim zapisnim kanalima



ni do kakvog pomaka. Ustvari, prva dva kanala služila su za bilježenje pomaka donjeg ustroja (LP-01 i LP-02), a druga dva kanala za bilježenje pomaka na gornjem ustroju (LP-03 i LP-04).



Slika 22. Laboratorijska montaža na potresni stol modela mosta USI-SF u velikom mjerilu radi provođenja seizmičkih ispitivanja simuliranjem stvarnih potresa



Slika 23. Položaji uređaja DRSRB (1 do 4) i uređaja SF-ED (A i B) na jednorasponskom prototipskom modelu mosta USI-SF u velikom mjerilu, prilikom ispitivanja na potresnom stolu

c) Akcelerometri ACC za bilježenje podataka o ubrzanju. Ti su akcelerometri služili za bilježenje podataka o ubrzanju u određenim karakterističnim točkama na modelu konstrukcije mosta. Odabrano je šest karakterističnih točaka i u svakoj od njih su mjerene dvije komponente ubrzanja. Za bilježenje ubrzanja korišteno je ukupno dvanaest kanala:

- *Kanali za bilježenje ubrzanja na gornjem ustroju.* Gornji ustroj mosta sastoji se od krute AB ploče. Odabrane su dvije mjerne točke (po jedna na svakom kraju) tj. korištena su ukupno četiri kanala (kanali od 1 do 4)
- *Kanali za mjerenje ubrzanja u gornjoj zoni donjeg ustroja.* Odabrane su dvije mjerne točke u gornjoj zoni donjeg ustroja modela mosta. One su se nalazile na vrhu kratkih AB stupova, na lijevoj i na desnoj strani. Četiri kanala (kanali

od 5 do 8) korištena su za mjerenje dviju komponenti ubrzanja u svakoj točki

- *Kanali za mjerenje ubrzanja u donjoj zoni donjeg ustroja.* Dvije mjerne točke, smještene lijevo i desno od osnovne AB grede učvršćene na potresni stol, odabrane su kako bi se dobila informacija o ubrzanju u donjoj zoni donjeg ustroja mosta. Četiri kanala (kanali 9 do 12) služila su za mjerenje dviju komponenta ubrzanja u svakoj točki.

### 6.3. Simulacija potresa na potresnom stolu

Nakon izrade segmenata modela i posebnih uređaja SI, ED i DL, te nakon pripreme ostalih spojeva i uređaja, na potresni je stol montiran prototipski model mosta u velikom mjerilu USI-SF za potrebe provođenja planiranih seizmičkih ispitivanja, tj. simulacije stvarnih seizmičkih uvjeta. Montaža je provedena ugradnjom dostavljenih komponenta u laboratoriju Inženjerski Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIIS) u Skoplju (slike 22. i 19.).

Nakon postavljanja uređaja na prototipski model mosta USI-SF u skladu s programom za njihovo postavljanje, definirani

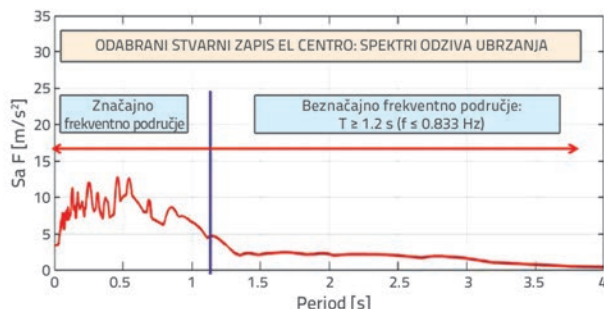
su reprezentativni seizmički ulazni parametri i postupak ispitivanja, kako bi se mogli generirati originalni podaci za potrebe ovog istraživanja.

Reprezentativne seizmičke pobude odabrane su na temelju iskustva stečenog u Institutu IZIIS u području simuliranja dinamičkih uvjeta koji su bliski očekivanim kritičkim opterećenjima za razmatrani stvarni tradicionalni neizolirani prototipski most ovog tipa, s osnovnom periodom od približno  $T \approx 0,5$  s. Kod izoliranog sustava usvojenog u ovom istraživanju osnovna perioda odabranog prototipskog mosta povećana je na  $T_1 = 1,5$  s. Zatim je

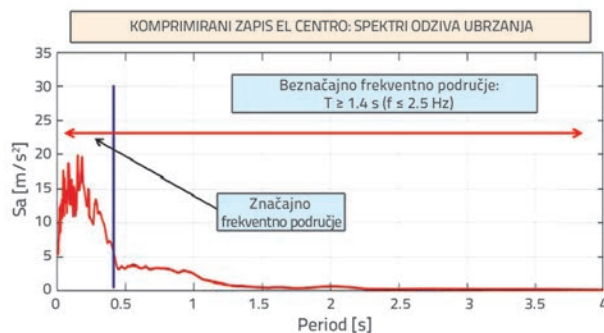
usvojen rezultirajući sustav izoliranog mosta u naravnoj veličini kao stvarni prototip za izgradnju modela u velikom mjerilu za ispitivanje na potresnom stolu. Na temelju ovog modela i ostalih podataka, odabrana su sljedeća dva stvarna potresa kao reprezentativni ulazni seizmički podaci:

- zapis potresa El Centro (1940.) u SAD-u
- zapis potresa koji je 1979. godine pogodio mjesto Petrovac u Crnoj Gori. Oba potresa prikazana su na slikama 24. i 26.

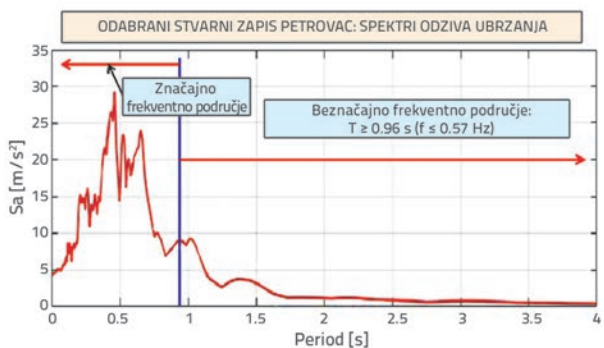
Kako bi se frekvencije odabranih potresa uskladile s dinamičkim karakteristikama eksperimentalnog modela, zapisi o potresima komprimirani su vremenskim faktorom  $FT = 1/\sqrt{R}$ , gdje je  $R = 9$  geometrijski razmjer umanjenja modela mosta. Oba izračunana komprimirana seizmička zapisa prikazana su grafički na slikama 25. i 27.



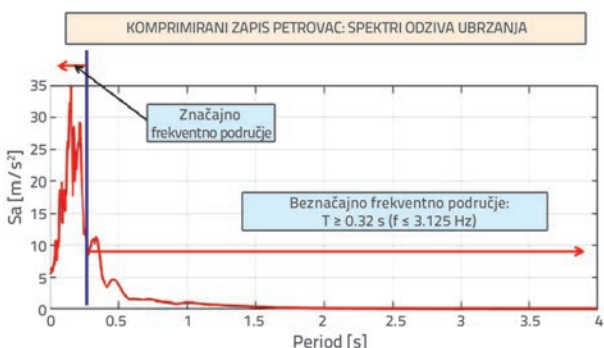
Slika 24. Spektri odziva ubrzanja za stvarne (vremenski nekomprimirane) zapise potresa El Centro sa stvarnim frekventnim sustavom



Slika 25. Spektri odziva ubrzanja za podešene vremenski komprimirane zapise potresa El Centro (PGA = 0,544 g) s frekvencijama za ispitivanje, PGA - najveće horizontalno ubrzanje tla (eng. Peak Ground Acceleration)



Slika 26. Spektri odziva ubrzanja za stvarne (vremenski nekomprimirane) zapise potresa Petrovac sa stvarnim frekventnim sustavom



Slika 27. Spektri odziva ubrzanja za vremenski komprimirane zapise potresa Petrovac (PGA = 0,544 g) s frekventnim sustavom za ispitivanje

Kako bi se dobio najbolji mogući uvid u protupotresni učinak naprednog sustava USI-SF, za ispitivanje na potresnom stolu namjerno su odabrani vrlo visoki intenziteti ulazne seizmičke pobude. Ispitivanja na potresnom stolu inovativnog sustava USI-SF za seizmičku zaštitu mostovnih konstrukcija izuzetno su značajna jer pružaju odgovor na mnoga važna pitanja. Drugim riječima, potrebno je odrediti, primjenom ovog inovativnog sustava, odziv mosta na udar izuzetno jakog potresa i odmah zatim na udar drugog potresa iste jačine. Na taj se način može zaključiti da li primijenjeni sustav seizmičke zaštite može uspješno zaštititi most u slučaju ponovljenih seizmičkih udara. Zbog izuzetne važnosti ovog pitanja, tijekom eksperimentalnog istraživanja posebna pažnja je posvećena upravo ovom značajnom aspektu. Uzimajući to u obzir, eksperimentalni postupak je definiran tako da omogući realizaciju sljedeća tri osnovna koraka:

- primjenu višenamjenskog modela mosta i osmišljavanje naprednog modela mosta USI-SF upotrebom uređaja SI, ED i DL (slika 23.)
- provođenje (početnih i ponovljenih) ispitivanja modela mosta USI-SF na potresnom stolu simuliranjem karakterističnog potresa velikog intenziteta
- obrada eksperimentalnih rezultata radi kvantifikacije stvarnih seizmičkih učinaka mostovnog sustava USI-SF i ocjene njegove prikladnosti za praktičnu upotrebu.

Kako bi se dobio eksperimentalno potvrđen odgovor na pitanja o sposobnosti sustava da izdrži ponovne udare jakog potresa, zamišljeni eksperimentalni postupak proveden je u dva koraka. U prvom koraku, na potresnom stolu je obavljeno početno ispitivanje modela mosta USI-SF (prvi model). U drugom koraku, isti model mosta (sada kao "drugi model") korišten je još jednom "da bi se postigao efekt vrlo jakog potresa" i ispitivanje na potresnom stolu je ponovljeno. Taj drugi eksperimentalni model označen je kao model USI-SF-R, gdje slovo R označava ponovljena seizmička ispitivanja. Realizacija potpunog programa ispitivanja, što je uključivalo provođenje četiri simulacije jakih potresa na potresnom stolu, omogućila je definiranje stvarnih odzivnih karakteristika analiziranog sustava USI-SF i ocjenu praktične primjenjivosti kao sredstva za bolju seizmičku zaštitu mostova.

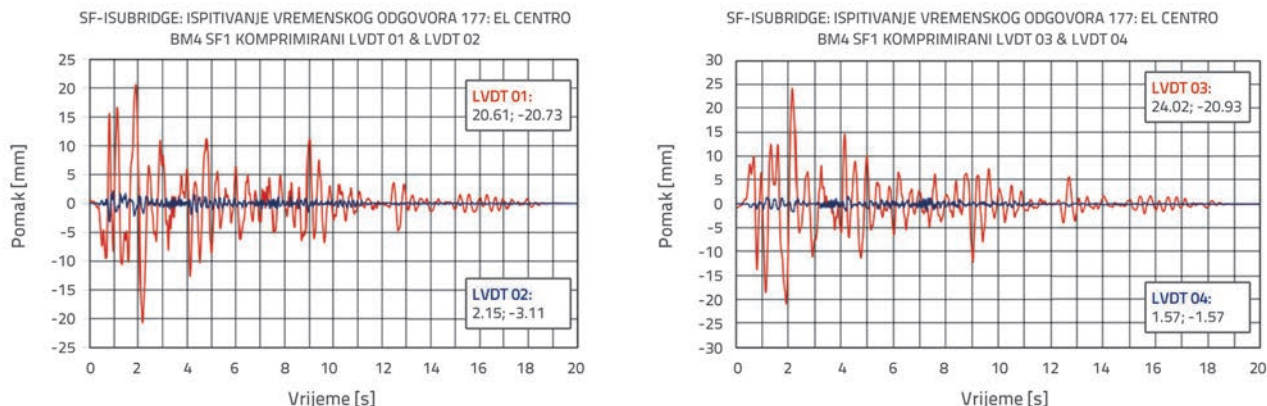
#### 6.4. Odabrani rezultati ispitivanja na potresnom stolu za početni i ponovljeni potres El Centro

Prije seizmičkog ispitivanja modela USI-SF na potresnom stolu obavljeno je nekoliko ispitivanja kratkotrajnom harmonijskom pobudom (engl. *sine sweep test*) kako bi se definiralo prigušenje i rezonantne frekvencije modela mosta u velikom mjerilu. Međutim, posebna je pojava uočena tijekom početnih ispitivanja na potresnom stolu kada su korišteni vrlo niski signali. Točnije, dvojni kružni kotrljajući seizmički sustav za seizmičku izolaciju ponašao se aperiodički pri ubrzanju od  $A \leq 0,01$  g jer, u tom slučaju, spektri odziva ne

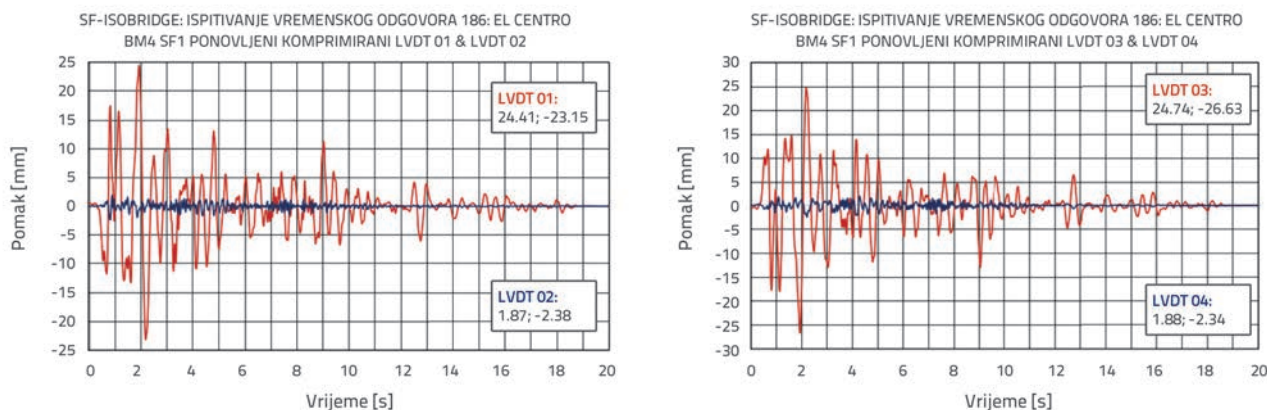
iskazuju izrazite rezonantne frekvencije. Takvo je ponašanje vrlo vjerojatno uzrokovano vrlo malim amplitudama valjanja optica kada zakrivljena površina iskazuje beznačajan efekt. Osim toga, ispitivanja harmonijskom pobudom provedena su simuliranjem jače konstantne akceleracije s dvije razine intenziteta,  $A_1 = 0,02$  g i  $A_2 = 0,05$  g, uzimajući u obzir prilično širok raspon frekvencija od  $f = 1-35$  Hz. Dva osnovna modalna

oblika vibracija predstavljaju relativan pomak gornjeg ustroja modela mosta u smjerovima x i y u usporedbi s krutim donjim ustrojem modela.

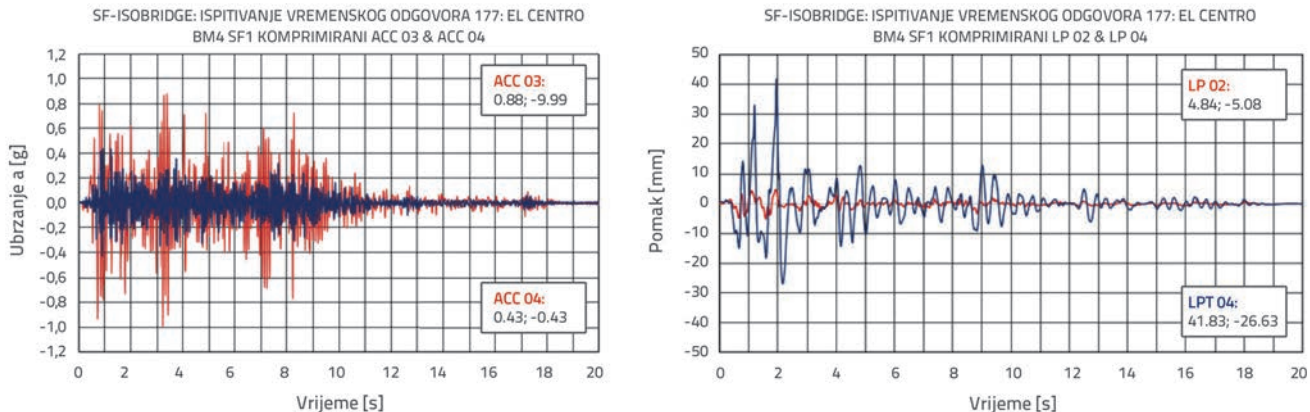
Osnovna perioda vibracija  $T = 0,53$  s ( $f = 1,887$  Hz) definirana je samo za slučaj modela mosta na kojem su instalirani uređaji DRSRB. Međutim, osnovna perioda  $T = 0,35$  s ( $f = 2,857$  Hz) dobivena je za model cjelokupnog mosta na kojem su bili



Slika 28. Početno prvo ispitivanje modela mosta USI-SF: Pomak zabilježen pomoću LVDT 01, 02, 03 i 04 pri simulaciji na potresnoj ploči potresa El-Centro prilagođenog na  $PGA = 0,77$  g



Slika 29. Ponovljeno drugo ispitivanje modela mosta USI-SF: Pomak zabilježen pomoću LVDT 01, 02, 03 i 04 pri simulaciji na potresnoj ploči potresa El-Centro prilagođenog na  $PGA = 0,77$  g



Slika 30. Početno, tj. prvo ispitivanje modela mosta USI-SF: Ubrzanje zabilježeno pomoću ACC 03 i 04 i apsolutni pomak zabilježen pomoću LP 02 i 04 pri djelovanju potresa El-Centro prilagođenog na  $PGA = 0,77$  g



instalirani uređaji DSRSB i SF. Raspon prigušenja od  $\xi = 3.0-3.5$  % definiran je za slučaj kompletnog modela. Veliki niz originalnih eksperimentalnih podataka uspješno je zabilježen tijekom prva dva ispitivanja modela mosta USI-SF na potresnom stolu kad je simulirano djelovanje vremenski komprimiranog potresa El Centro. U ovom su radu iskazani samo najkarakterističniji rezultati koji jasno pokazuju karakteristike seizmičkog odziva mostovnog sustava USI-SF.

U okviru programa ispitivanja namjerno su izazvane vrlo kritične situacije koje se javljaju pri ponovljenim jakim podrhtavanjima tla, tj. pri dužim jakim seizmičkim pobudama. Karakteristični eksperimentalni rezultati iskazani su u obliku zabilježenih vremenskih zapisa odgovarajućih fizikalnih veličina u reprezentativnom nizu slika (slike 28. do 30.). Osim toga, uspješno su na svim mjernim kanalima zabilježene pozitivne i negativne vršne vrijednosti fizikalnih veličina. Te su vrijednosti konzistentno

**Tablica 2. Pozitivni i negativni relativni vršni pomaci donjeg i gornjeg ustroja zabilježeni na četiri senzora LVDT tijekom početnih i ponovljenih ispitivanja na potresnom stolu za potres El-Centro**

Br.	Početno prvo seizmičko ispitivanje Potres El-Centro PGA = 0,77 g			Ponovljeno drugo seizmičko ispitivanje Potres El-Centro PGA = 0,77 g		
	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]
1	LVDT-01	20,61	20,73	LVDT-01	24,41	23,15
2	LVDT-02	2,15	3,11	LVDT-02	1,87	2,38
3	LVDT-03	24,02	20,93	LVDT-03	24,74	26,63
4	LVDT-04	1,57	1,57	LVDT-04	1,88	2,34

**Tablica 3. Pozitivni i negativni apsolutni vršni pomaci registrirani pomoću četiri senzora LP tijekom početnih i ponovljenih simulacija na potresnom stolu komprimiranog potresa El-Centro**

Br.	Početno prvo seizmičko ispitivanje Potres El-Centro PGA = 0,77 g			Ponovljeno drugo seizmičko ispitivanje Potres El-Centro PGA = 0,77 g		
	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]
1	LP-01	8,98	9,61	LP-01	9,13	9,30
2	LP-02	4,83	5,04	LP-02	4,89	5,07
3	LP-03	30,66	25,83	LP-03	34,70	27,30
4	LP-04	41,79	26,78	LP-04	41,47	29,15

**Tablica 4. Pozitivna i negativna vršna ubrzanja zabilježena pomoću dvanaest senzora ACC tijekom početnih i ponovljenih simulacija komprimiranog potresa El-Centro na potresnom stolu**

Br.	Početno prvo seizmičko ispitivanje Potres El-Centro PGA = 0,77 g					Ponovljeno drugo seizmičko ispitivanje Potres El-Centro PGA = 0,77 g				
	Kanal	MaxA G (+)	DAF	MaxA G (-)	DAF	Kanal	MaxA G (+)	DAF	MaxA G (-)	DAF
1	ACC-01	0,40	0,52	0,45	0,58	ACC-01	0,33	0,42	0,43	0,56
2	ACC-02	0,17	0,22	0,17	0,22	ACC-02	0,17	0,22	0,15	0,19
3	ACC-03	0,88	1,14	0,99	1,28	ACC-03	1,13	1,47	1,13	1,47
4	ACC-04	0,44	0,57	0,43	0,56	ACC-04	0,55	0,71	0,46	0,60
5	ACC-05	0,38	0,49	0,33	0,42	ACC-05	0,37	0,48	0,35	0,45
6	ACC-06	0,15	0,19	0,16	0,20	ACC-06	0,19	0,25	0,17	0,22
7	ACC-07	0,66	0,85	0,55	0,71	ACC-07	0,82	1,06	0,91	1,18
8	ACC-08	0,71	0,92	0,60	0,78	ACC-08	0,69	0,90	0,62	0,80
9	ACC-09	0,73	0,95	0,68	0,88	ACC-09	0,70	0,91	0,68	0,88
10	ACC-10	0,14	0,18	0,14	0,18	ACC-10	0,19	0,25	0,17	0,22
11	ACC-11	0,63	0,82	0,61	0,79	ACC-11	0,60	0,78	0,59	0,77
12	ACC-12	0,13	0,17	0,11	0,14	ACC-12	0,13	0,17	0,12	0,15

i sažeto prikazane u odgovarajućim tablicama (tablice 2. do 4.). Na svakom kanalu snimljena je velika datoteka sa 120.000 numeričkih vrijednosti. Za svako eksperimentalno ispitivanje korišteno je dvadeset aktivnih kanala. S obzirom na to da su se zapisi istovremeno pohranjivali na dvadeset aktivnih i nekoliko dodatnih kanala, zabilježeno je otprilike 5.000.000 numeričkih vrijednosti tijekom samo jednog eksperimentalnog ispitivanja sustava USI-SF na potresnom stolu u institutu IZiIS. Navedeni podaci jasno pokazuju koliko su zabilježeni početni podaci važni za provjeru seizmičkog učinka sustava USI-SF pri vrlo jakom ponovljenom potresu El Centro.

Na slikama 28. i 29. prikazani su vremenski zapisi relativnih pomaka zabilježenih pomoću uređaja LVDT-01 do LVDT-04 tijekom početnog prvog ispitivanja na potresnom stolu i ponovljenog drugog ispitivanja mostovnog modela USI-SF, tj. pri simulaciji komprimiranog potresa El-Centro prilagođenog na  $PGA = 0,77$  g. Sljedeći se zaključci mogu izvesti na temelju rezultata prikazanih na slikama 28. i 29.:

- pomaci zabilježeni pomoću uređaja LVDT-01 i LVDT-03 u smjeru seizmičke pobude (L) dominantni su tijekom čitavog ispitivanja
- pomaci zabilježeni pomoću uređaja LVDT-02 i LVDT-04 u smjeru poprečnom na seizmičku pobudu (T) prilično su mali i beznačajni, što upućuje na realan odziv u očekivanom rasponu
- gotovo iste maksimalne amplitude pomaka zabilježene su na lijevom i desnom kraju rasponske konstrukcije, što je realno i očekivano
- seizmički odziv sustava USI-SF vrlo je sličan u slučaju početnog tj. prvog ispitivanja na potresnom stolu (slika 28.) i ponovljenog tj. drugog ispitivanja na potresnom stolu (slika 29.), s vrijednostima  $maxD = 24,02$  mm i  $maxD = 26,63$  mm, tablica 2.

Posljednje zapažanje potvrđuje vrlo stabilno ponašanje sustava USI-SF pri djelovanju vrlo snažnog opetovanog potresa. Na slici 30. (lijevo) iskazani su vremenski zapisi ubrzanja zabilježeni na desnom kraju rasponske konstrukcije pomoću uređaja ACC-03 (smjer L) i uređaja ACC-04 (smjer T) tijekom početnog tj. prvog ispitivanja mostovnog modela USI-SF na potresnom stolu pri čemu je simuliran komprimirani potres El-Centro prilagođen na  $PGA = 0,77$  g. Uočena je vrlo dobra podudarnost svih ostalih vremenskih zapisa, što pokazuje da je čitav postupak ispitivanja proveden uspješno. Tablica 4. prikazuje pozitivna i negativna vršna apsolutna ubrzanja zabilježena pomoću dvanaest senzora ubrzanja na odabranim točkama donjeg i gornjeg ustroja tijekom početnih i ponovljenih ispitivanja na potresnom stolu. Iz prikazanih se rezultata mogu izvesti sljedeći osnovni zaključci:

- vremenski zapisi ubrzanja zabilježeni na točkama na gornjem ustroju u smjeru seizmičke pobude (ACC-03) dominantni su tijekom čitavog ispitivanja
- ubrzanja zabilježena na točkama na donjem ustroju kao i u smjeru poprečnom na seizmičku pobudu (ACC-02) bitno su manja, što pokazuje da je odziv u očekivanom rasponu

- kao što se moglo i očekivati, na lijevom i na desnom kraju rasponske konstrukcije zabilježene su gotovo iste maksimalne amplitude ubrzanja
- seizmički odziv na sustavu USI-SF vrlo je sličan kod početnog (prvog) ispitivanja na potresnom stolu i kod drugog tj. ponovljenog ispitivanja na potresnom stolu, pri čemu su zabilježene vrijednosti  $maxA = 0,99$  g i  $maxA = 1,13$  g (tablica 4.).

Tako je još jednom potvrđeno stabilno ponašanje sustava USI-SF. U istoj tablici vrijednost dinamičkog koeficijenta (DAF) izravno upućuje na odnos između odzivne vršne akceleracije i ulazne vršne akceleracije ( $DAF = Ar/PGA$ ) za sve točke mjerenja i odgovarajuće smjerove. Na slici 30. (desno) daje se usporedni prikaz apsolutnih vremenskih zapisa pomaka zabilježenih u smjeru L pomoću senzora LP-02 (donji ustroj) i LP-04 (rasponska konstrukcija) tijekom početnog ispitivanja (prvog ispitivanja) mostovnog modela USI-SF na djelovanje komprimiranog potresa El-Centro prilagođenog na  $PGA = 0,77$  g. Pozitivni i negativni apsolutni vršni pomaci zabilježeni pomoću senzora LP prikazani su u tablici 3. Na temelju rezultata prikazanih u ovom istraživanju mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- dominantni su apsolutni vremenski zapisi pomaka na mjernim točkama gornjeg ustroja (LP-3 i LP-4)
- apsolutni pomaci na mjernim točkama donjeg ustroja (LP-1 i LP-2) mnogo su manji, što pokazuje da je odziv u očekivanom rasponu
- maksimalne amplitude zabilježene na lijevom i desnom kraju gornjeg ustroja gotovo su jednake (kao što se moglo i očekivati)
- seizmički odziv sustava USI-SF vrlo je sličan u slučaju početnog i ponovljenog ispitivanja na potresnom stolu (tablica 3.) kao što to i potvrđuju zabilježene vrijednosti  $maxDabs = 41,79$  mm i  $maxDabs = 41,47$  mm.

## 6.5. Odabrani rezultati ispitivanja na potresnom stolu za početni i ponovljeni potres Petrovac

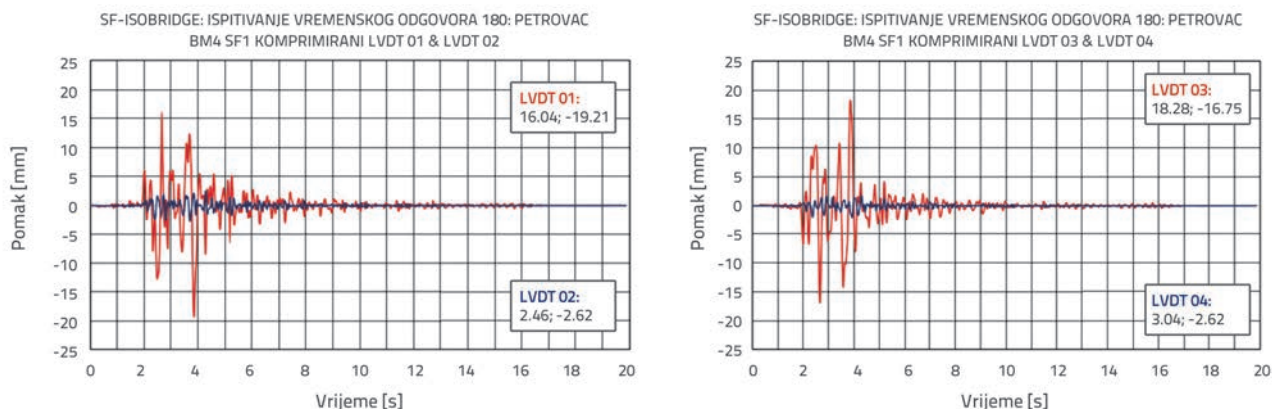
U početnom tj. prvom ispitivanju i u ponovljenom tj. drugom ispitivanju modela mosta uočene su slične karakteristike mostovnog sustava USI-SF pod utjecajem snažnog potresa Petrovac. Usporedba odabranih eksperimentalnih rezultata iskazana je u obliku analognih vremenskih zapisa na slikama 31., 32. i 33. Pozitivne i negativne vršne vrijednosti zabilježene pomoću odgovarajućih uređaja tj. kanala konzistentno su prikazane u tablicama 5., 6. i 7. Vremenski zapisi pomaka zabilježeni pomoću uređaja LVDT-01 do LVDT-04 tijekom početnih i ponovljenih ispitivanja mostovnog modela USI-SF na potresnom stolu za komprimirani potres Petrovac, prilagođen na  $PGA = 0,71$  g i  $PGA = 0,74$  g, prikazani su na slikama 31. i 32. Slični se zaključci mogu izvesti na temelju rezultata dobivenih tijekom ta dva ispitivanja:

- dominantni su pomaci zabilježeni pomoću uređaja LVDT-01 i LVDT-03 (smjer L), a pomaci zabilježeni pomoću uređaja LVDT-02 i LVDT-04 (smjer T) prilično su mali i beznačajni

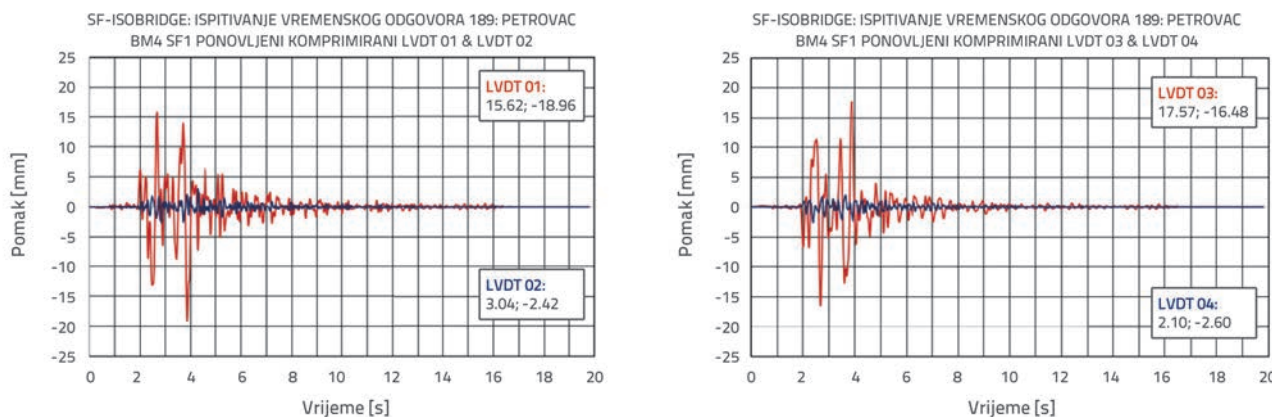
- kao što se moglo i očekivati, slične amplitude pomaka zabilježene su i na lijevom i na desnom kraju gornjeg ustroja
- seizmički odziv sustava USI-SF vrlo je sličan kod početnog tj. prvog ispitivanja i ponovljenog tj. drugog ispitivanja, gdje se bilježe karakteristične vrijednosti maxD = 19,21 mm tj. maxD = 18,96 mm (tablica 5.), što još jednom pokazuje da se

sustav USI-SF ponaša vrlo stabilno pod utjecajem snažnog opetovanog potresa.

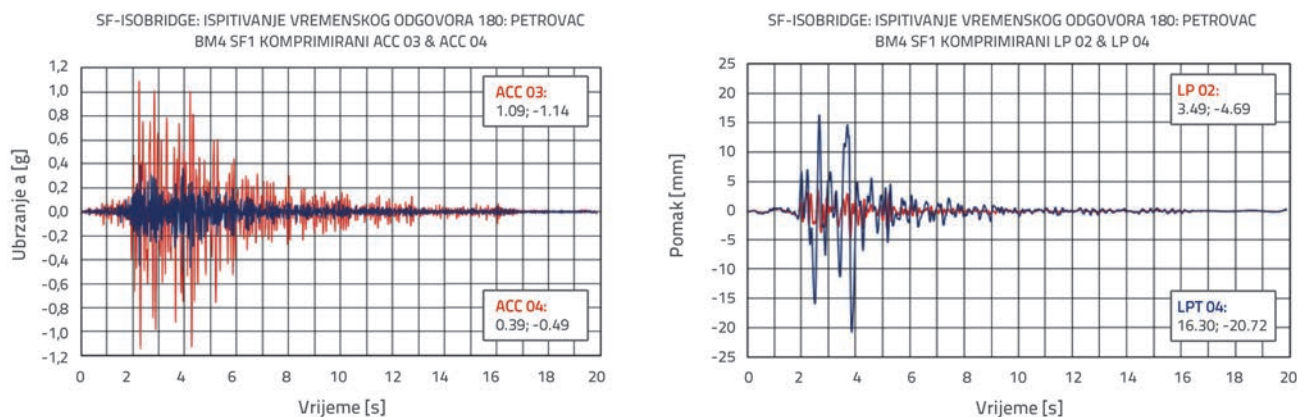
Vremenski zapisi ubrzanja zabilježeni na desnom kraju gornjeg ustroja pomoću uređaja ACC-03 (smjer L) i ACC-04 (smjer T) tijekom početnog tj. prvog ispitivanja mostovnog modela USI-SF na potresnom stolu



Slika 31. Početno tj. prvo ispitivanje mostovnog modela USI-SF: Pomak zabilježen na potresnom stolu pomoću uređaja LVDT 01, 02, 03 i 04 pri simulaciji potresa Petrovac prilagođenog na PGA = 0,71 g



Slika 32. Ponovljeno tj. drugo ispitivanje mostovnog modela USI-SF: Pomak zabilježen na potresnom stolu pomoću uređaja LVDT 01, 02, 03 i 04 pri simulaciji potresa Petrovac prilagođenog na PGA = 0,74 g



Slika 33. Početno tj. prvo ispitivanje mostovnog modela USI-SF: Ubrzanje zabilježeno na potresnom stolu pomoću uređaja ACC 03 i 04 i apsolutni pomak zabilježen pomoću uređaja LP 02 i 04 pri simulaciji potresa Petrovac prilagođenog na PGA = 0,71 g



pod utjecajem komprimiranog potresa Petrovac prilagođenog na  $PGA = 0,71$  g, usporedno su prikazani na slici 33. (lijevo). Pozitivna i negativna apsolutna vršna ubrzanja zabilježena pomoću senzora ubrzanja na odabranim točkama tijekom početnih i opetovanih ispitivanja na potresnom stolu prikazana su u tablici 7. Usporedba početnih i opetovanih ispitivanja na potresnom stolu pokazuje da im je seizmički odziv sustava USI-SF vrlo sličan, s karakterističnim vrijednostima  $maxA = 1,14$  g tj.  $maxA = 1,25$  g (tablica 7.). Prikazani dinamički koeficijenti (DAF) upućuju na slične odzivne i ulazne odnose.

Apsolutni pomaci zabilježeni u smjeru L na uređaju LP-02 (donji ustroj) i uređaju LP-04 (gornji ustroj) tijekom početnog tj. prvog ispitivanja mostovnog modela USI-SF na potresnom stolu prikazani su na slici 33. (desno). Pozitivni i negativni apsolutni vršni pomaci zabilježeni pomoću četiri senzora LP prikazani su u tablici 6. Seizmički odziv sustava USI-SF vrlo je sličan kod početnog i ponovljenog ispitivanja (tablica 6.), što još jednom potvrđuje pouzdano ponašanje novog sustava USI-SF pod utjecajem snažnog ponovljenog potresa.

**Tablica 5. Pozitivni i negativni relativni vršni pomaci donjeg i gornjeg ustroja zabilježeni pomoću četiri senzora LVDT tijekom početnih i ponovljenih simulacija potresa Petrovac na potresnom stolu**

Br.	Početno prvo seizmičko ispitivanje Potres Petrovac $PGA = 0,71$ g			Ponovljeno drugo seizmičko ispitivanje Potres Petrovac $PGA = 0,74$ g		
	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]
1	LVDT-01	16,04	19,21	LVDT-01	15,62	18,96
2	LVDT-02	2,46	2,62	LVDT-02	3,04	2,62
3	LVDT-03	18,28	16,75	LVDT-03	17,57	16,48
4	LVDT-04	1,67	1,96	LVDT-04	2,10	2,60

**Tablica 6. Pozitivni i negativni vršni pomaci zabilježeni pomoću četiri senzora LP tijekom početnih i ponovljenih simulacija komprimiranog potresa Petrovac na potresnom stolu**

Br.	Početno prvo seizmičko ispitivanje Potres Petrovac $PGA = 0,71$ g			Ponovljeno drugo seizmičko ispitivanje Potres Petrovac $PGA = 0,74$ g		
	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]	Kanal	MaxD (+) [mm]	MaxD (-) [mm]
1	LP-01	6,46	6,61	LP-01	6,30	6,62
2	LP-02	3,49	4,69	LP-02	3,45	4,89
3	LP-03	15,35	18,39	LP-03	16,67	17,67
4	LP-04	16,30	20,72	LP-04	15,94	19,85

**Tablica 7. Pozitivna i negativna vršna ubrzanja zabilježena pomoću dvanaest senzora ACC tijekom početnih i ponovljenih simulacija komprimiranog potresa Petrovac na potresnom stolu**

Br.	Početno prvo seizmičko ispitivanje Potres Petrovac $PGA = 0,71$ g					Ponovljeno drugo seizmičko ispitivanje Potres Petrovac $PGA = 0,74$ g				
	Kanal	MaxA G (+)	DAF	MaxA G (-)	DAF	Kanal	MaxA G (+)	DAF	MaxA G (-)	DAF
1	ACC-01	0,42	0,59	0,41	0,58	ACC-01	0,38	0,51	0,41	0,55
2	ACC-02	0,20	0,28	0,19	0,25	ACC-02	0,18	0,24	0,15	0,20
3	ACC-03	1,09	1,41	1,14	1,60	ACC-03	1,10	1,49	1,25	1,69
4	ACC-04	0,39	0,51	0,49	0,64	ACC-04	0,41	0,55	0,50	0,67
5	ACC-05	0,28	0,39	0,34	0,48	ACC-05	0,27	0,36	0,30	0,40
6	ACC-06	0,23	0,30	0,24	0,31	ACC-06	0,21	0,28	0,26	0,35
7	ACC-07	0,70	0,98	0,83	1,08	ACC-07	0,65	0,88	0,82	1,11
8	ACC-08	0,42	0,54	0,53	0,69	ACC-08	0,48	0,65	0,54	0,73
9	ACC-09	0,70	0,98	0,70	0,98	ACC-09	0,72	0,97	0,71	0,96
10	ACC-10	0,15	0,21	0,20	0,28	ACC-10	0,16	0,22	0,21	0,28
11	ACC-11	0,64	0,83	0,59	0,83	ACC-11	0,65	0,88	0,60	0,81
12	ACC-12	0,13	0,18	0,11	0,15	ACC-12	0,13	0,17	0,11	0,15

## 6.6. Osnovni zaključci nakon ispitivanja na potresnom stolu

Na temelju ukupnih rezultata dobivenih na potresnom stolu tijekom ispitivanja novog mostovnog sustava USI-SF mogu se izvesti sljedeći zaključci. Uređaji DSRSB izvrsno su rješenje za seizmičku izolaciju gornjeg ustroja mosta jer su sposobni na siguran način prihvatiti vrlo velike pomake u svim smjerovima. Uređaji SF-ED napredna su rješenja za raspršivanje seizmičke energije jer mogu prihvatiti velike pomake a i odlikuju se stabilnim histereznim ponašanjem u svim smjerovima za zadanu duboku nelinearnost odziva. Predloženi mostovni sustav USI-SF inovativno je i pogodno opće rješenje za seizmičku zaštitu mostovnih konstrukcija od vrlo snažnih potresa. Cjelokupan napredni mostovni sustav USI-SF može djelotvorno podnijeti ciklična duboko nelinearna djelovanja s više vrhova opterećenja. Nakon utjecaja vrlo snažnih potresa, sustav ne pokazuje bitna oštećenja. Općenito uzevši, dokazano je da sustav može uspješno funkcionirati pod opetovanim seizmičkim utjecajima bez ikakvih potreba za popravcima ili mijenjanjem uređaja. Sustav može i dalje djelotvorno funkcionirati bez bitnih poteškoća. Svi ti zaključci izravna su eksperimentalna potvrda naprednih seizmičkih karakteristika sveukupnog sustava USI-SF, a te su karakteristike itekako važne za postizanje kvalitativno bolje seizmičke zaštite mostova u slučaju vrlo snažnih opetovanih potresa.

## 7. Zaključci

Sljedeći opći zaključci mogu se izvesti na temelju rezultata dobivenih tijekom opsežnih eksperimentalnih i teoretskih analiza pomoću inovativnog prototipskog mostovnog modela USI-SF. Optimizirani novi seizmički izolatori DSRSB izuzetno su atraktivna i djelotvorna pasivna sredstva za seizmičku izolaciju mostova u proizvoljnim smjerovima. Međutim, kako bi se mogli koristiti na nekom određenom mostu, ti seizmički izolatori trebaju se projektirati na bazi napredne koncepcije integralne modifikacije odziva i na temelju odgovarajućih analitičkih postupaka. Napredni višesmjerni histerezni uređaji za raspršivanje energije SF odlikuju se jedinstvenim svojstvima apsorpcije energije pa u tom smislu mogu stabilno prilagoditi svoje ponašanje ovisno o smjeru proizvoljnog potresa, te se uskladiti sa stvarnim intenzitetom ulazne seizmičke energije. U stvari, napredni uređaji SF-ED na vrlo stabilan, napredan

i inovativan način omogućuju trodimenzionalni histerezni odziv u najkritičnijim slučajevima ponovljenih potresa u svim smjerovima. Uređaji za ograničavanje pomaka, DLD, vrlo su djelotvorna i obvezna mjera te zadnji stup obrane od pretjeranog pomaka gornjeg ustroja mosta. Utvrđeno je da su instalirani uređaji za ograničavanje pomaka djelotvoran pasivni sustav koji dodatno pridonosi povećanju seizmičke sigurnosti mosta, a aktiviraju se samo u kritičnim slučajevima tj. kod vrlo snažnih potresa. Eksperimentalna ispitivanja provedena u ovom radu potvrđuju da napredni sustav USI-SF predstavlja potencijalno rješenje za ostvarenje bolje i učinkovitije seizmičke izolacije mostova. Sustav se temelji na optimiziranom usklađivanju seizmičke energije, te predstavlja učinkovito, cjelovito i tehničko inovativno rješenje koje povezuje prednosti seizmičke izolacije, raspršivanja seizmičke energije i djelotvorne kontrole pomaka. Razvijeni i ispitani sustav USI-SF može u velikoj mjeri promijeniti seizmički odziv, te može služiti kao djelotvorna seizmička zaštita mostova u svim smjerovima u slučaju vrlo snažnih opetovanih seizmičkih udara. U istraživanjima koja slijede trebaju se provesti kreativna analitička ispitivanja s posebnim naglaskom na razvoj općih praktičnih pravila projektiranja za razvijeni napredni sustav USI-SF, kako bi se omogućila seizmička zaštita raznih reprezentativnih vrsta cestovnih mostova, projektiranih primjenom raznih konstrukcijskih materijala i geometrijskih postavki, te podložnih opetovanim seizmičkim udarima raznih intenziteta i frekvencija.

## 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 je projektu sudjelovalo 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 podršci koju je pružio NATO u realizaciji ovog cjelovitog, dugoročnog i financijski zahtjevnog inovativnog istraživačkog projekta.

## LITERATURA

- [1] Kelly, J.M.: Aseismic base isolation: A review and bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5 (1986), pp. 202-216.
- [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.

- [5] Dolce, M., Cardone, D., Palermo, G.: Seismic isolation of bridges using isolation systems based on flat sliding bearings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (2007) 4, pp. 491–509.
- [6] Iemura, H., Taghikhany, T., Jain, S.K.: Optimum Design of Resilient Sliding Isolation System for Seismic Protection of Equipments, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (2007) 1, pp. 85–103.
- [7] Kartoum, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M.: Sliding isolation system for bridges: Analytical study, *Earthquake Spectra*, 8 (1992), pp. 345–372.
- [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. and Mahin, S.A.: A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, *Earthquake Spectra*, 6 (1990), pp. 317–334.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [15] 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.
- [16] 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, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14 (2016) 4, pp. 1285–1310.
- [17] Serino, G., Occhiuzzi, A.: A semi-active oleodynamic damper for earthquake control: Part 1: Design, manufacturing and experimental analysis of the device, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1 (2003) 2, pp. 269–301.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Dolce, M., Filardi, B., Marnetto, R., Nigro, D.: Experimental tests and applications of a advanced biaxial elastoplastic device for the passive control of structures, *Proc. of 4<sup>th</sup> World congress on joint sealants and bearing systems for concrete structures*, Sacramento, California (USA), 1996.
- [21] 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.
- [22] Oh, S.H., Song, S.H., Lee, S.H., Kim, H.J.: Seismic response of base isolating systems with U-shaped hysteretic dampers, *Int. Journal of Steel Structures*, 12 (2012) 2, pp 285–298.
- [23] Candeias, P., Costa, A.C., Coelho, E.: Shaking table tests of 1:3 reduced scale models of four story unreinforced masonry buildings, *13<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Eng., Vancouver*, Paper: 2199, 2004.
- [24] Ristic, D., Ristik, J.: Advanced Integrated 2G3 Response Modification Method for Seismic Upgrading of Advanced and Existing Bridges, *15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, (WCEE), Lisbon, Portugal, 2012.
- [25] Ristic, D.: Nonlinear Behaviour and Stress-Strain Based Modeling of Reinforced Concrete Structures Under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, *Doctoral Dissertation*, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan, 1988.
- [26] 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.
- [27] Ristik, J.: Modern Technology for Seismic Protection of Bridge Structures Applying Advanced System for Modification of Earthquake Response, *PhD Thesis*, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), University SS Cyril and Methodius, Skopje, Macedonia, 2016.
- [28] Wilson, L.E.: *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering*, Berkeley, California: Third Ed., 2002.
- [29] Bathe, K.J.: *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall, 1982.
- [30] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.: *The Finite Element Method – Volume 1: The Basis*, Fifth Edition, Berkeley, California, 2000.
- [31] Chopra, K.A.: *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Eng.*, Berkeley, 1995.
- [32] Clough, R.W., Penzien, J.: *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Advanced York, N.Y., 1975.
- [33] Kelly, J.M., Dimitrios, A.K.: *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*, John Wiley & Sons, 2011.
- [34] Priestley, M.J.N., Seible, F., Calvi, G.M.: *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Advanced York, 1996.
- [35] Wilson, E.L., Habibullah A.: *SAP2000, Structural and earthquake engineering software*, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [36] ABAQUS: *Software for finite element analysis and computer-aided engineering*, ABAQUS Inc., USA.
- [37] ANSYS Mechanical: *Finite element analysis (FEA) software*, ANSYS, Inc., USA.