

Primljen / Received: 15.1.2024.

Ispravljen / Corrected: 5.8.2024.

Prihvaćen / Accepted: 16.8.2024.

Dostupno online / Available online: 10.11.2024.

# Nelinearni odziv modela AB stupova uslijed stvarnih potresa i osnih opterećenja

## Autori:



Doc.dr.sc. **Zijadin Guri**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Prištini  
Fakultet građevinarstva i arhitekture  
[zijadin.guri@uni-pr.edu](mailto:zijadin.guri@uni-pr.edu)  
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Jelena Ristić**, dipl.ing.građ.  
Međunarodno balkansko sveučilište (IBU) u  
Skopju  
Tehnički fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
[jelena.ristic@ibu.edu.mk](mailto:jelena.ristic@ibu.edu.mk)



Prof.dr.sc. **Danilo Ristić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište SS Ćirila i Metoda u Skopju  
Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku  
seizmologiju (IZIIS), Skopje  
[danilo.ristic@gmail.com](mailto:danilo.ristic@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Zijadin Guri, Jelena Ristić, Danilo Ristić**

## Nelinearni odziv modela AB stupova uslijed stvarnih potresa i osnih opterećenja

U ovom su radu predstavljeni izvorni rezultati iz naprednih seizmičkih ispitivanja sustavom HYLSE-1, provedenih na modelima armiranobetonskih stupova podvrgnutim simuliranim manjim i većim osnim opterećenjima. Ovo istraživanje obuhvaća komparativnu analizu modela armiranobetonskih (AB) stupova i modela kompozitnih armiranobetonskih stupova (eng. *composite-reinforced concrete* - CRC) primjenom detaljnih nelinearnih analitičkih mikromodela. Rezultati pokazuju da su intenzitet potresa, razina osnog opterećenja i ovijanje betona primarni čimbenici koji utječu na složeni histerezni odziv i lom modela stupova armiranih uobičajenim čeličnim šipkama ili šipkama od polimera ojačanog staklenim vlaknima (GFRP). Ova su otkrića presudna za poboljšanje projektiranja potresne otpornosti alternativno armiranih stupova izloženih jakim potresima.

### Ključne riječi:

beton, stupovi, čelične šipke, GFRP šipke, ispitivanje, potresi, nelinearni odziv

Research Paper

**Zijadin Guri, Jelena Ristic, Danilo Ristic**

## Nonlinear response of RC column models under real earthquakes and axial loads

This paper reports on original findings from advanced HYLSE-1 seismic tests conducted on steel-reinforced concrete column models subjected to simulated low and high axial loads. The study includes a comparative analysis of steel-reinforced concrete (SRC) column models and composite-reinforced concrete (CRC) column models, using refined nonlinear analytical micro-models. The results demonstrate that earthquake intensity, axial load level, and concrete confinement are the primary factors influencing the complex hysteretic responses and failure of column models reinforced with either conventional steel bars or novel glass fibre-reinforced polymer (GFRP) bars. These findings are crucial for enhancing the seismic design of alternatively reinforced columns subjected to severe earthquakes.

### Key words:

concrete, columns, steel bars, GFRP bars, testing, earthquakes, nonlinear response

## 1. Uvod

U seizmičkim regijama sigurnost konstrukcija uvelike ovisi o seizmičkim svojstvima njihovih stupova, zbog čega je ključno razumjeti njihove karakteristike seizmičkog odziva. Tradicionalno su se čelične šipke upotrebljavale kao armatura u armiranobetonskim (AB) stupovima. Međutim, nedavna istraživanja usmjerena su na upotrebu šipki od polimera ojačanih vlaknima (eng. *Fiber Reinforced Polymer* - FRP) za sprječavanje korozije u agresivnim okruženjima. Za projektiranje stupova armiranih čeličnim šipkama ili FRP šipkama, koji mogu izdržati velika seizmička opterećenja i imati značajne nelinearne odzive, važno je razumjeti učinke različitih konstrukcijskih parametara na histerezne odzive.

Zbog specifičnih svojstava konstrukcija sa stupovima (npr. mostova, složenih objekata) i nepredvidive prirode pobude uslijed kretanja tla, stupovi su primarno izloženi kombinaciji savijanja izazvanog potresom i osnim opterećenjem [1]. Istraživanja dvosmjernog odziva AB stupova pod stalnim osnim opterećenjem pokazala su da dvosmjerno opterećenje smanjuje kapacitet pomaka i ubrzava degradaciju čvrstoće i krutosti [2-6]. Ispitivanja su pokazala da omjer osnog opterećenja i poprečnog presjeka stupa, (tj.  $S = N/\sigma_c A_c$ ) značajno utječe na njegov relativni kapacitet pomaka [4, 7, 8]. Prema modelu pomaka [9, 10], povećanje omjera osnog opterećenja s 0,1 na 0,3 smanjuje kapacitet pomaka za faktor 2,3. Stoga nepostojanje razmatranja učinaka osnog opterećenja pri projektiranju može dovesti do oštećenja ili čak potpunog urušavanja stupova uslijed jakih potresa. U takvim slučajevima potrebne su složene i skupe tehnike pojačanja i popravka kako bi se povećala čvrstoća i duktilnost stupova. Te tehnike uključuju AB omotač, čelični omotač, vanjski spojeni FRP, površinsku ugradnju FRP-a, omotač od slitine s prisjetljivosti oblika i hibridni omotač, kako je prikazano u nedavnim istraživanjima [11, 12]. Zbog svojih naprednih mehaničkih svojstava i dokazane izdržljivosti, FRP šipke nedavno su se počele primjenjivati kao alternativni oblik unutarnje armature. Elementi armirani FRP-om često se upotrebljavaju u AB konstrukcijama i mostovima izloženim agresivnim uvjetima okruženja [13]. Prednosti FRP šipki u odnosu na čelične šipke uključuju veći odnos čvrstoće prema težini, elektromagnetsku neutralnost, izvrsnu sposobnost rezanja za privremene primjene i njihovu laganu, fleksibilnu prirodu. Većina FRP šipki izrađena je od karbonskih (eng. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* - CFRP), staklenih (eng. *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP) ili aramidnih (AFRP) vlakana [14, 15]. Značajno je da su opsežna istraživanja usmjerena na mehanička svojstva GFRP šipki, posebno na njihovu tlačnu čvrstoću, koja je tipično 55 do 65 % njihove vlačne čvrstoće [16, 17]. Na tlačnu i vlačnu čvrstoću prije svega utječu obujam i vrsta vlakana, materijal na bazi smole i proizvodni postupak, dok modul elastičnosti ostaje približno jednak i za tlak i za vlak [18]. Nedavna istraživanja zasebno su ispitala ponašanje stupova ojačanih GFRP šipkama i onih ojačanih čeličnim šipkama [13, 19, 20]. Za određenu količinu uzdužne armature,

kod elemenata ojačanih GFRP šipkama češće dolazi do pucanja i pomaka uslijed savijanja u odnosu na elemente ojačane čeličnim šipkama (Nanni, 1993.) [23]. GFRP šipke manje pridonose osnoj nosivosti stupova u odnosu na čelične šipke, a upotreba FRP armature umjesto čelika ne povećava tlačnu čvrstoću stupova, ali odgađa izvijanje uzdužnih šipki [13, 21, 22]. Kapaciteti momenta savijanja i osne nosivosti stupova ojačanih čeličnim šipkama viši su od onih u stupova ojačanih GFRP šipkama, iako obje vrste pokazuju sličnu duktilnost [19, 20, 23]. Budući da je modul stišljivosti GFRP šipki niži od njihovog vlačnog modula, mnogi autori i norme za projektiranje [16] savjetuju da se ne upotrebljavaju kao tlačna armatura u stupovima i gredama. Kanadska norma za projektiranje [17] dopušta GFRP armaturu za tlačne primjene, ali preporučuje da čvrstoća stlačenih šipki ne bude uključena u proračun nosivosti konstrukcijskih elemenata. Iako su u različitim istraživanjima ispitani betonski stupovi armirani čeličnim ili GFRP šipkama, postoji relativno malo usporednih istraživanja koja upotrebljavaju iste modele.

S obzirom na ozbiljna i neprihvatljiva oštećenja uočena u stupovima pod složenim opterećenjem izazvanim potresom, proučavanje sigurnosti od potresa tradicionalnih i suvremenih stupova armiranih GFRP-om ključna je i uvijek važna tema istraživanja. Ovim istraživanjem želimo iskoristiti naše jedinstvene prethodne rezultate istraživanja dobivene iz opsežnih eksperimentalnih ispitivanja pomoću sustava HYLSE-1 i naprednih koncepata mikromodeliranja za stvaranje novih i značajnih znanstvenih uvida.

**a) Napredak u ispitivanju sustavom HYLSE-1:** Ispitivanja provedena upotrebom hibridnog sustava opterećenja za odziv na potres (eng. *Hybrid Loading System of Earthquake Response* - 1: HYLSE-1) predstavljaju specifično eksperimentalno ispitivanje provedeno u Japanu, koje uključuje izvorna istraživanja trećeg autora. Ispitni sustav HYLSE-1 omogućio je stvarnu simulaciju neelastičnoga seizmičkog odziva modela AB stupova pod simuliranim učincima jakih potresa, dok je također uključivao interaktivne učinke određenih osnih opterećenja. Pomoću dobro osmišljenog programa ispitivanja, eksperimentalno su ispitani učinci različitih utjecajnih parametara, uključujući:

*Stare pokuse u svrhu novih znanstvenih dostignuća:* S obzirom na napredak suvremenih programa i mikromodeliranja, zajedno s vrijednim rezultatima prethodnih eksperimenata pomoću HYLSE-1, sada su najbolji uvjeti za provođenje ovog specifičnog istraživanja nakon mnogo godina.

*Niske vrijednosti osnog opterećenja:* Potresni odziv modela pod niskim, stalnim osnim opterećenjem potvrđen je simulacijom različitih razina čvrstoće betona, ovijanja i intenziteta potresa.

*Visoke vrijednosti osnog opterećenja:* Slično tome, potresni odziv modela pod visokim, stalnim osnim opterećenjem potvrđen je razmatranjem istih promjenjivih parametara.

*Niski i visoki intenzitet potresa:* Simulacijom niskog i visokog intenziteta potresa procijenjeni su histerezni odzivi i stanja oštećenja ispitanih modela.

*Čvrstoća i ovijanje betona:* Utjecaj čvrstoće i ovijanja betona na ispitane stupove utvrđen je i prikazan u odgovarajućim tablicama.

**b) Napredak u modeliranju:** Značajan napredak u modeliranju dokazan je točnim predviđanjem histerezisnih odziva za iste ispitane modele.

Konvencionalni i kompozitni stupovi pod malim i velikim osnim opterećenjem: Upotrebom detaljnih i eksperimentalno validiranih analitičkih mikromodela, histerezisni odzivi armiranih stupova s konvencionalnim i novim kompozitnim ojačanjima predviđeni su i uspoređeni pod simuliranim niskim i visokim stalnim osnim opterećenjima.

Učinak osnog opterećenja na konvencionalne i kompozitne stupove: Izvorni rezultati analize jasno su pokazali stvarne učinke osnog opterećenja na stupove armirane konvencionalnim i kompozitnim armaturama.

**c) Važnost i novost u pristupu istraživanja:** Neodrživa seizmička šteta i potpuno urušavanje stupova u nedavnim potresima naglašavaju važnost i novi pristup ovog istraživanja. Ovo sveobuhvatno istraživanje ima za cilj pružiti vrijedan, eksperimentalno potvrđen doprinos koji rješava i uklanja nedostatke postojećih istraživanja.

Uklanjanje nedostataka u istraživanju: S obzirom na sve veću praktičnu primjenu uobičajenih i novih stupova, postoji jasna potreba za sustavnom komparativnom ocjenom razlika u histerezisnim odzivima između uobičajeno armiranih stupova i onih armiranih kompozitnim materijalima. Ovo istraživanje pokrenuto je i dovršeno kako bi se pružili izvorni rezultati i uklonili postojeći nedostaci u istraživanju.

Tijek višezadanog istraživanja: Istraživanje se sastojalo od nekoliko specifičnih faza istraživanja, uključujući: 1) obrada rezultata seizmičkih ispitivanja sustavom HYLSE-1 sa simuliranim manjim i većim vrijednostima opterećenja; 2) analitičko predviđanje histerezisnih odziva uobičajenih armiranih stupova i onih armiranih novijim GFRP šipkama pod manjim i većim aksijalnim opterećenjima; 3) eksperimentalnu validaciju formuliranog nelinearnog mikromodela; i 4) izvođenje izvornih zaključaka i preporuka.

Sažetak novih rezultata: Za buduće projektiranje stupova armiranih konvencionalnim čelikom i novijim GFRP šipkama u seizmičkim područjima, procijenjeni su i predstavljeni učinci različitih uključenih varijabli.

Korak prema naprednim primjenama: Na temelju izvornih usporednih rezultata, praktični izgled stupova armiranih konvencionalnim čelikom ili novijim GFRP šipkama u seizmičkim područjima može se značajno poboljšati. U tom se kontekstu također preporučuje aktualiziranje postojećih seizmičkih projektnih mogućnosti.

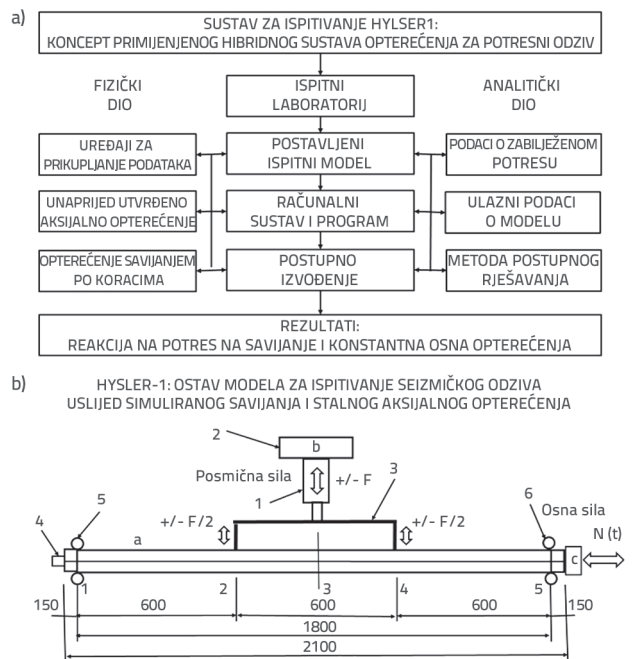
U radu su prikazani rezultati izvornih ispitivanja odziva na potres na umanjenim modelima prototipa stupova podvrgnutih simuliranim osnim opterećenjima. Ti su rezultati uspoređeni s onima iz detaljnih analitičkih istraživanja nelinearnih odziva istih modela, armiranih ili čeličnih ili GFRP šipkama, na temelju eksperimentalno potvrđenih nelinearnih modela [14, 15].

## 2. Ciljevi i metodologija istraživanja

U praksi su naširoko u upotrebi betonski stupovi armirani čeličnim šipkama. Međutim, neodgovarajuće projektiranje dovelo je do značajnih oštećenja ili čak urušavanja AB stupova u prethodnim potresima. Za rješavanje problema s korozijom u agresivnim okruženjima novi betonski stupovi armirani FRP šipkama nedavno su se pojavili kao pouzdano zamjensko rješenje u građevinskoj praksi [16]. Cilj ovog istraživanja jest usporedna procjena svojstava do sloma obje vrste stupova izloženih savijanju i osnom opterećenju. Istraživanje objedinjuje eksperimentalne i analitičke pristupe za rješavanje postojećih nedostataka u projektiranju i istraživanju. S obzirom na složenost istraživačkih ciljeva, istraživanje je obuhvatilo sveobuhvatna eksperimentalna i analitička istraživanja primjenom istih modela stupova i uvjeta opterećenja.

## 3. Uvođenje hibridnog sustava opterećenja za odziv na potres

Hibridna ili pseudodinamička metoda seizmičkog ispitivanja HYLSE-1 izvorno je razvijena na temelju specifičnog eksperimentalnog koncepta koji je uspostavio istraživački tim, uključujući trećeg autora.



**Slika 1. Sustav ispitivanja HYLSE-1 (laboratorij u Kyotu): a) koncept hibridnog sustava opterećenja za odziv na potres; b) ispitni postav za ispitivanje modela stupova uslijed simuliranog potresa i pod osnim opterećenjem**

Ova metoda i dalje je popularna zbog malih troškova i sposobnosti kombiniranja prednosti ispitivanja na potresnom

stolu s dodatnim specifičnim prednostima. Najraniji sustavi pseudodinamičkog ispitivanja uvedeni su u Japanu [24-27]. U hibridnom ispitivanju seizmičkog odziva, sustav integrira laboratorijsko-analički pristup, s modelom stupova koji služe kao temeljna laboratorijska komponenta. Za utvrđeni kombinirani laboratorijsko-analički sustav i odabrani zabilježen potres, pomak primijenjen u svakoj fazi laboratorijskog modela izračunan je primjenom korak po korak numeričkog rješenja odgovarajuće diferencijalne jednačbe gibanja. Izračunani pomak je zatim primijenjen putem hidraulične preše, čime se proizvelo vrijeme ispitivanja seizmičkog odziva. Trenutačno eksperimentalno istraživanje koje je uključivalo ispitivanje neelastičnoga seizmičkog odziva modela AB stupova pod pobudom uslijed simuliranih jakih potresa i osnim opterećenjima, bilo je dio šireg istraživačkog projekta. Taj sveobuhvatni projekt proveden je u Laboratoriju za seizmičku gradnju Sveučilišta u Kyotu u Japanu te je dio doktorske disertacije trećeg autora [28]. Seizmička ispitivanja provedena su primjenom online računalno upravljano hibridnog sustava opterećenja za odziv na potres (HYLSER-1), kao što je prikazano na slici 1. Slika 1.a prikazuje koncept sustava ispitivanja HYLSER-1, koji se sastoji od tri povezana dijela:

- **fizički dio**, uključujući uređaje za prikupljanje podataka koji bilježe vremenski zapis osnovog opterećenja u svakoj fazi (konstantno u ovim eksperimentima) i izmjereno ukupno opterećenje uslijed savijanja u svakoj fazi
- **analitički dio**, koji uključuje numeričke podatke o ubrzanju u funkciji vremena i intenzitetu odabranog ulaznog potresa, kao i analitički određene podatke o masi i prigušenju za kombinirani sustav
- **laboratorij za ispitivanje**, koji uključuje laboratorijsku opremu za ispitivanje, ispitni model ugrađen unutar kompatibilnog mehaničkog sustava i računalo sa softverom koji olakšava izvođenje eksperimenta pomoću sustava HYLSER-1 korak po korak.

Postavljanje modela AB stupa, ispitano pod simuliranom pobudom od potresa i osnovog opterećenja, prikazano je na slici 1.b. Eksperimentalni model, označen s "a", izrađen je kao jednostavni gredni nosač s rasponom podijeljenim na tri segmenta od po 600 mm, s lijevim, srednjim i desnim segmentom definiranim točkama 1 – 2, 2 – 4 i 4 – 5. Točka 3 predstavlja središnju točku, a točke 1 i 5 označavaju lijevi i desni oslonac odozdo. Sustav označen s "b" upotrijebljen je za primjenu sile savijanja i bilježenje suprotne efektivne povratne sile koja može biti pozitivna ili negativna ( $\pm F$ ). Silu savijanja generira elektrohidraulični aktuator označen s "1", poduprt segmentom označenim s "2". Kruti čelični sustav s oznakom "3" pružao je ciklično opterećenje na simetričnim točkama opterećenja 2 i 4. Osnova sila, N1 ili N2, primijenjena je pomoću nevezane (smanjenog trenja) čelične šipke visoke čvrstoće s oznakom "4", ugrađene u cilindrični prostor čija je središnja os poravnana sa središtima sekcija duž duljine modela. Na svojoj lijevoj strani čelična je šipka bila pričvršćena za betonsku stranu modela, a

na desnoj strani bila pričvršćena na elektrohidraulični aktuator s oznakom "c" koji je nanosio osnu silu. Tijekom primjene vlačne sile aktuatora na čeličnu šipku, na model je djelovala tlačna sila. Gornje točke 5 i 6 predstavljaju gornje krajnje nosače modela, koji se aktiviraju uslijed primjene negativne (gornje) sile savijanja. Eksperimentalni proces uključivao je rješavanje nelinearne diferencijalne jednačbe drugog reda za kombinirani sustav, s povratnom silom F izmjenom izravno s aktuatora. Izračunani inkrementalni pomak za svaki korak korišten je za određivanje ukupnog pomaka koji će primijeniti hidraulični aktuator. Sustav HYLSER-1 uspješno je upotrijebljen za provođenje ispitivanja seizmičkog odziva kombiniranog sustava, uključujući modele AB stupova. S obzirom na složene odzive konstrukcijskih stupova kao ključnih elemenata, istraživanja posvećena razumijevanju nelinearnog ponašanja i seizmičke sigurnosti tradicionalnih i inovativnih vrsta stupova i dalje su značajna i stalna tema istraživanja [29-33].

## 4. Seizmička ispitivanja modela AB stupova ojačanih čelikom uključujući simulirana osna opterećenja

### 4.1. Ispitani modeli AB stupova ojačanih čelikom

Svi ispitani eksperimentalni modeli kvadratnog presjeka  $150 \times 150$  mm, duljine 2100 mm i raspona 1800 mm, izrađeni su od iste vrste betona i uzdužne armature. Uzdužna armatura sastojala se od četiriju čeličnih šipki ( $\varnothing 13$  mm) s modulom elastičnosti  $E_s = 210,0$  GPa i granicom popuštanja  $f_y = 400,0$  MPa. Središnja čelična šipka ( $\varnothing 30$  mm), koja se upotrebljava za primjenu osne sile, izrađena je od čelika visoke čvrstoće s modulom elastičnosti  $E_s = 200,0$  GPa i granicom popuštanja  $f_s = 950,0$  MPa. Upotrijebljen je obični beton s modulom elastičnosti  $E_c = 27,0$  GPa i tlačnom čvrstoćom  $f_c = 45,0$  MPa. Kako bi se proučio učinak ovijanja, poprečna armatura osigurana je spiralnim čeličnim šipkama ( $\varnothing 5$  mm) s razmacima  $e = 6$  cm i  $9$  cm. Da bi se istražio učinak intenziteta potresa, primijenjena su tri intenziteta ispitivanja, definirana faktorom intenziteta potresa  $r$ , pri čemu je  $r = 1,0$  i predstavlja potres El Centro i odgovor do točke popuštanja uzorka. Intenzitet je zatim povećan za 30 % i 100 %, pri čemu je  $r = 1,3$  odnosno  $2,0$ .

### 4.2. Seizmička ispitivanja pod simuliranim osnim opterećenjem $N1 = 88,0$ kN

Tri seizmička ispitivanja modela ojačanih čelikom, podvrgnutih simuliranom osnom opterećenju od  $N1 = 88,0$  kN ( $0,391$  kN/cm<sup>2</sup>), provedena su primjenom sustava za ispitivanje HYLSER-1. Projektni parametri ispitanih modela i dobiveni reprezentativni rezultati prikazani su u tablici 1.

Za tri pseudodinamična testa D1, D6 i D7 koeficijenti intenziteta potresa bili su  $r = 2,0$ ,  $2,0$  odnosno  $1,3$ . U modelu D1 spiralno ojačanje imalo je razmak od  $e = 6,0$  cm, dok su modeli D6 i D7 imali razmak od  $e = 9,0$  cm. Odstupanja u intenzitetu potresa i

Tablica 1. HYLSEK-1 ispitivanja uobičajenih betonskih modela: rezultati seizmičkog odziva za modele testirane uslijed simuliranog potresa El Centro i pod stalnim osnim opterećenjem  $N1 = 88,0$  kN

| Ispitivanje                          |    | Tip C i indeks kvalitete okoliša (EQI) (r) | Valjak $f_{ck}$ [MPa] | Razmak e [cm] | Oсно N [kN] | max F +/- [kN] | +/- DM [cm] | +/- FM [kN] | +/- D2 [cm] | +/- F2 [kN] |      |
|--------------------------------------|----|--|-----------------------|---------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 1                                    | D1 | normalan/<br>r = 2,0                       | 43,4                  | 6             | 88,0        | 70,0           | 1,2         | 66,0        | 2,0         | 70,0        |      |
|                                      |    |  |                       |               |             | -60,0          | -1,1        | -50,0       | -2,0        | -55,0       |      |
| 2                                    | D6 | normalan/<br>r = 2,0                       | 49,0                  | 9             | 88,0        | 70,0           | 1,1         | 65,0        | 2,0         | 70,0        |      |
|                                      |    |  |                       |               |             | -60,0          | -1,0        | -50,0       | -2,0        | -55,0       |      |
| 3                                    | D7 | normalan/<br>r = 1,3                       | 44,8                  | 9             | 88,0        | 70,0           | 1,1         | 68,0        | 2,0         | 70,0        |      |
|                                      |    |  |                       |               |             | -55,0          | -1,0        | -49,0       | -2,0        | -55,0       |      |
| Prosječna vrijednost za e = 6 cm     |    |  | 43,4                  | 6             | 88,0        | 65,00          | 1,15        | 58,00       | 2,0         | 62,5        |      |
| Prosječna vrijednost za e = 9 cm     |    |  | 46,9                  | 9             |             | 63,75          | 1,05        | 58,00       | 2,0         | 62,5        |      |
| Prosječna vrijednost za e = 6 i 9 cm |    |  | 45,5                  | 6 i 9         |             | 64,17          | 1,08        | 58,00       | 2,0         | 62,5        |      |
| *predviđeno analizom                 |    |  |                       |               | A           | 88,0           | 65,00       | 1,00        | 65,00       | 2,0         | 61,0 |

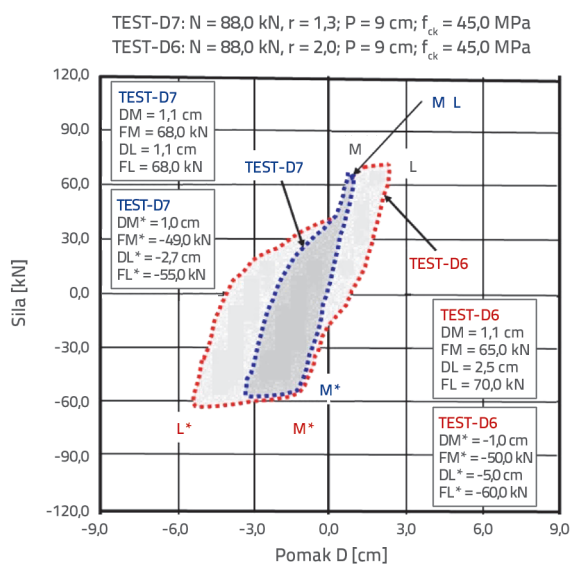
ovijanju rezultirala su različitim oblicima histereznih seizmičkih odziva. Tablica 1. prikazuje sljedeće parametre koji obilježavaju histerezni seizmički odziv:

- maks. F (+/-): najveće pozitivne i negativne povratne sile
- DM (+/-) i FM (+/-): najveće pozitivne i negativne deformacije i povratne sile na točkama popuštanja
- D2 (+/-) i F2 (+/-): za postavljenu deformaciju od  $D2 = \pm 2,0$  cm, zabilježena pozitivna i negativna povratna sila na obrisima histereznog odziva (HR).

Nakon tri retka s ispitnim vrijednostima u tablici 1., sljedeća dva retka predstavljaju prosječne vrijednosti za modele s  $e = 6,0$  cm i  $9,0$  cm. Sljedeći red sadrži prosječne vrijednosti za sve ispitane modele.

Donji red (označen s \*) predstavlja analitički predviđene vrijednosti maksimalne sile primjenom detaljnog mikromodela ispitnog uzorka, temeljenog na čistoj nelinearnoj kvazistatičkoj analizi opisanoj u poglavlju 5.5 (1). Ova analiza uzima u obzir poprečni razmak armature od  $e = 6,0$  cm. Eksperimentalni i analitički rezultati se vrlo dobro podudaraju. Na primjer, najveća zabilježena sila u eksperimentu ( $\max F = 64,17$  kN) i najveća sila predviđena analizom ( $\max F = 65,0$  kN) razlikuju se samo za 1,3%. Slično tome, za povratne sile na utvrđenim točkama popuštanja, eksperimentalna vrijednost ( $\exp FM = 58,0$  kN) i analitička vrijednost ( $\anal FM = 65,0$  kN) razlikuju se za samo 10%.

Za usporedbu eksperimentalnih rezultata korišteni su obrisi histereznog odziva (HR) konačnih seizmičkih odziva, koji jasno pokazuju oblik histereznog odziva u svakom pojedinom testu. Karakteristične točke M i L, odnosno  $M^*$  i  $L^*$ , označavaju točku popuštanja odnosno točku konačnog deformacijskog odziva. Slika 2 prikazuje ove reprezentativne točke na obrisima HR-a za modele stupova D7 i D6 u seizmičkom ispitivanju, podvrgnute simuliranom potresima El Centro različitih intenziteta ( $r = 1,3$  i  $r = 2,0$ ) i simuliranom osnom opterećenju od  $N1 = 88,0$  kN. Ova dva obrisa histereznog odziva naglašavaju učinak intenziteta potresa na histerezni odziv, s obzirom na to da su ostali parametri strukturnih modela ostali nepromijenjeni.



Slika 2. Reprezentativne točke i konačni oblici histereznih odziva dobiveni na temelju seizmičkog ispitivanja modela stupova D6 i D7, ispitanih pod uvjetima simuliranog potresa El Centro s osnim opterećenjem od  $N1 = 88,0$  kN

Rezultati na slici 2. pokazuju da su seizmička ispitivanja sustavom HYLSEK-1 realistična i vrlo učinkovita metoda za provjeru učinaka ključnih parametara koji utječu na seizmičku sigurnost ključnih elemenata i nosivih sustava.

#### 4.3. Seizmička ispitivanja pod simuliranim osnim opterećenjem $N2 = 265,0$ kN

Sljedećih pet seizmičkih ispitivanja modela stupova ojačanih čelikom provedeno je pod većim simuliranim osnim opterećenjem od  $N2 = 265,0$  kN ( $1,177$  kN/cm<sup>2</sup>). Parametri ispitanih modela i njihovi zabilježeni seizmički odzivi navedeni su u tablici 2. U testovima D2 i D16 korišteni su koeficijenti intenziteta potresa  $r = 2,0$  u pokusima D3 i D8  $r = 1,3$ , odnosno  $r = 1,0$  u pokusu D15.



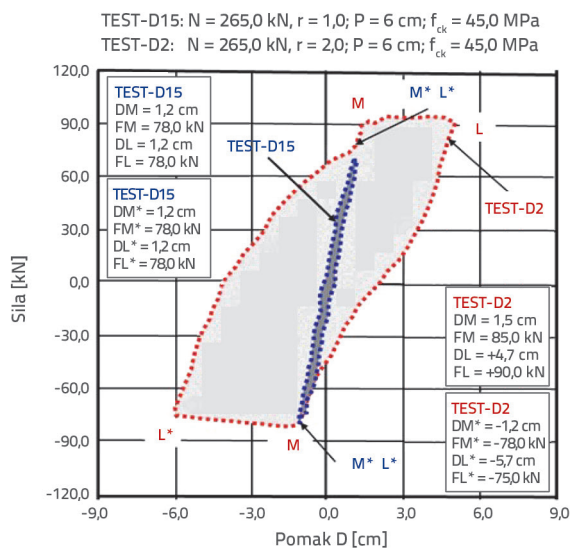
Tablica 2. Ispitivanje uobičajenih betonskih modela pomoću sustava HYLSEK-1: Rezultati seizmičkog odziva za modele ispitane pod uvjetima simuliranog potresa El Centro sa stalnim osnim opterećenjem od  $N_2 = 265,0 \text{ kN}$

| Ispitivanje                          |     | Tip C i indeks kvalitete okoliša (EQI) (r) | Valjak $f_{ck}$ [MPa] | Razmak e [cm] | Oсно N [kN] | max F +/- [kN] | +/- DM [cm] | +/- FM [kN] | +/- D2 [cm] | +/- F2 [kN] |       |
|--------------------------------------|-----|--|-----------------------|---------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| 1                                    | D2  | normalan/<br>r = 2,0                       | 49,7                  | 6             | 265,0       | 91,0           | 1,5         | 85,0        | 2,0         | 90,0        |       |
|                                      |     |  |                       |               |             | -81,0          | -1,2        | -78,0       | -2,0        | -80,0       |       |
| 2                                    | D3  | normalan/<br>r = 1,3                       | 42,5                  | 6             | 265,0       | 90,0           | 1,3         | 74,0        | 2,0         | 90,0        |       |
|                                      |     |  |                       |               |             | -65,0          | -1,4        | -75,0       | -2,0        | -75,0       |       |
| 3                                    | D8  | normalan/<br>r = 1,3                       | 44,8                  | 9/<br>Urušen  | 265,0       | 87,0           | 1,6         | 87,0        | 2,0         | 80,0        |       |
|                                      |     |  |                       |               |             | -80,0          | -1,0        | -66,0       | -2,0        | -65,0       |       |
| 4                                    | D15 | normalan/<br>r = 1,0                       | 50,1                  | 6             | 265,0       | 78,0           | 1,2         | 78,0        | -           | Linearno    |       |
|                                      |     |  |                       |               |             | -70,0          | -1,0        | -80,0       | -           | Linearno    |       |
| 5                                    | D16 | normalan/<br>r = 2,0                       | 61,1                  | 6/<br>Urušen  | 265,0       | 90,0           | 1,2         | 85,0        | 2,0         | 90,0        |       |
|                                      |     |  |                       |               |             | -80,0          | -1,2        | -75,0       | -2,0        | -76,0       |       |
| Prosječna vrijednost za e = 6 cm     |     |  | 50,85                 | 6             | 265,0       | 80,62          | 1,25        | 78,75       | 2,0         | 83,50       |       |
| Prosječna vrijednost za e = 9 cm     |     |  | 44,80                 | 9             |             | 83,50          | 1,30        | 76,50       | 2,0         | 72,50       |       |
| Prosječna vrijednost za e = 6 i 9 cm |     |  | 49,64                 | 6 i 9         |             | 81,20          | 1,26        | 78,30       | 2,0         | 80,75       |       |
| *Predviđeno analizom                 |     |  |                       |               | A           | 265,0          | 82,50       | 1,00        | 80,00       | 2,0         | 60,00 |

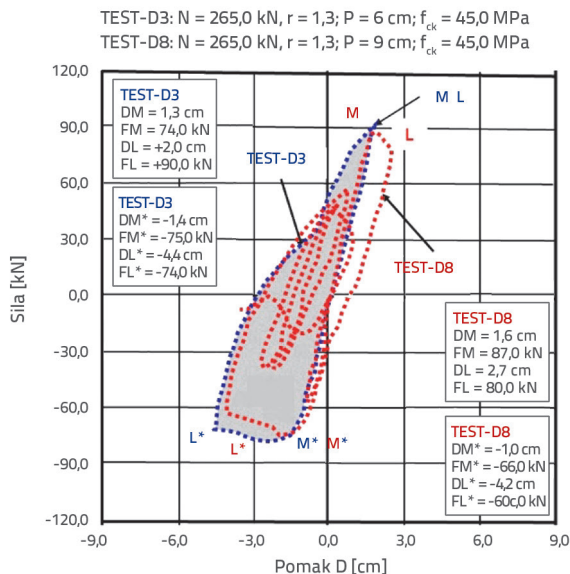
Poprečna spiralna ojačanja upotrijebljena u modelima D2, D3, D15 i D16 imala su razmak od  $e = 6,0 \text{ cm}$ , dok je razmak  $e = 9,0 \text{ cm}$  korišten u modelu D8. U tablici 2. navedeni su eksperimentom određeni parametri koji su upravljali seizmičkim odzivima pet ispitanih modela. Nakon pet pojedinačnih redaka ispitnih vrijednosti u tablici 2, sljedeća tri retka predstavljaju prosječne vrijednosti za modele s razmakom  $e = 6,0 \text{ cm}$  i  $9,0 \text{ cm}$ , kao i prosječne vrijednosti za svih pet ispitanih modela. Slično tome, donji red (označen s \*) predstavlja krajnje vrijednosti analitički predviđene sile upotrebom istog detaljnog mikromodela uzorka i nelinearne kvazistatičke analize opisane u poglavlju 5.5. (2), uzimajući u obzir razmak  $e = 6,0 \text{ cm}$  za poprečnu armaturu. I u ovom slučaju postoji snažna povezanost između analitičkih i eksperimentalnih rezultata. Konkretno, razlika između najvećih povratnih sila utvrđenih eksperimentalno i analitički bila je 1,6 %, a za povratne sile u točki popuštanja zabilježena razlika od 2,2 % također je bila vrlo mala. Izrađeni su reprezentativni obrisi histereznog odziva za ispitivanja provedena pod simuliranim učincima osnoga opterećenja od  $N_2 = 265,0 \text{ kN}$ . Analogno tome, konture histereznog odziva prikazane su kao točke M, L, M\* i L\*, koje upravljaju oblicima zabilježenih seizmičkih odziva. Slika 3. prikazuje stabilne histerezne odzive dobivene za seizmički ispitane modele stupova D15 i D2 u uvjetima simuliranog potresa El Centro s uvrđenim intenzitetima koje predstavljaju vrijednosti  $r = 1,0$  odnosno  $2,0$ .

Za model D2, dobiveni obrisi histereznog odziva bili su prilično široki i iskazivali su značajno nelinearno ponašanje zahvaljujući simuliranom visokom intenzitetu potresa, prikazanom kao  $r = 2,0$ . Međutim, seizmički odziv modela D15 bio je uglavnom linearan i dosegao je točku popuštanja samo na stranama pozitivnih i negativnih deformacija. Ovaj test potvrđuje da pri vrijednosti  $r = 1,0$  seizmički odziv pokazuje linearno ponašanje. Modeli D2 i

D15 pokazali su stabilne histerezne odzive zahvaljujući manjem razmaku spiralne armature ( $e = 6,0 \text{ cm}$ ). Slika 4. prikazuje reprezentativne točke na obrisima HR-a za seizmičko ispitivanje modela stupova D3 i D8 s istim ulaznim intenzitetom potresa ( $r = 1,3$ ). Model D3 pokazao je stabilan histerezni odziv, dok se model D8 urušio, što se očituje izmjerenom nulnom povratnom silom. Ova značajna razlika u seizmičkim odzivima modela D3 i D8 izravno je povezana s razlikom u ovijanju, s razmacima od  $e = 6,0 \text{ cm}$  odnosno  $9,0 \text{ cm}$  koji se primjenjuju za modele D3 i D8.



Slika 3. Reprezentativne točke i konačni obrisi histereznih odziva dobiveni iz seizmičkog ispitivanja modela stupova D15 i D2 podvrgnutih potresu El Centro i osnom opterećenju od  $N_2 = 265,0 \text{ kN}$



Slika 4. Representativne točke i konačni oblici histerezisnih odziva dobiveni iz seizmičkih ispitivanja modela stupova D3 i D8 u uvjetima simuliranog potresa El Centro i pod osnim opterećenjem N2 = 265,0 kN

## 5. Detaljno nelinearno modeliranje stupova ojačanih čelikom i GFRP-om

Ključna komponenta sadašnjeg istraživanja uključivala je neovisnu detaljnu analitičku simulaciju tipičnog kvazistatičkog ispitivanja ili izvođenje "analitičkog eksperimenta" (analiza sa simuliranim vremenski ovisnim opterećenjem). Ovo analitičko istraživanje utvrdilo je usporedne histerezisne odzive modela stupova s identičnom geometrijom, potporom i uvjetima opterećenja, sličnim ispitivanim uzorcima. Provedene su dvije usporedne analize, uzimajući u obzir modele stupova ojačanih

konvencionalnim čeličnim ili novijim GFRP ojačanjem. Ova je analiza bila uspješna i oslanjala se na prethodno iskustvo autora s detaljnim modeliranjem. Konkretno, primijenjeni su detaljni i eksperimentalno utvrđeni trodimenzionalni nelinearni analitički modeli iz prethodnih istraživanja [14, 15]. Ovo istraživanje služi kao komplementarno istraživanje i pruža dodatne uvide u histerezisne odzive uzoraka koji nisu zabilježeni u seizmičkim ispitivanjima sustavom HYLSE-1. Histerezisni odziv u "analitičkom testu" dobiven je upotrebom unaprijed definiranog cikličnog opterećenja, dok je u testu HYLSE-1 ciklično opterećenje uvjetno i ovisno o intenzitetu potresa i frekvencijskom sadržaju.

### 5.1. Svojstva materijala

Tablica 3. detaljno prikazuje čelična i GFRP ojačanja analitički ispitanih stupova, kao i simulirane programe savijanja i osnog opterećenja.

U tablici 4. navedena su svojstva obične čelične armature, a u tablici 5. svojstva novih GFRP šipki, koja definiraju odgovarajuće odnose naprezanja i deformacija usvojene iz prethodno prikazanih ispitivanja [14, 15].

### 5.2. Nelinearni analitički model konačnih elemenata

Provedena nelinearna analiza s primjenom modela konačnih elemenata (FEA) bila je usmjerena na unapređenje modeliranja dviju vrsta ispitanih uzoraka, odnosno modela stupova ojačanih (i) običnim čeličnim i (ii) kompozitnim GFRP armaturnim šipkama, simulirajući isti protokol opterećenja sve do stanja izrazito nelinearnog ponašanja. Budući da usvojeni složeni protokol opterećenja nalik potresu predstavlja istovremena konstantna osna i obrnuta ciklička posmična opterećenja, nelinearno analitičko istraživanje složen je zadatak. Kako bi se opisao

Tablica 3. Modeliranje i opterećenje ispitivanih stupova s podacima o čeličnoj i GFRP armaturi

| Model | Vrsta armature | Uzdužne šipke<br>Ø [mm] | Poprečne spiralne<br>šipke<br>Ø [mm] | Opterećenje modela (Analitički test) |                   |
|-------|----------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
|       |                |                         |                                      | Oсно - stalno (tlačni)               | Savijanje (pomak) |
| M1    | čelik          | 4Ø13                    | Ø5/6 cm                              | 88,0 kN                              | ciklički          |
| M2    | čelik          | 4Ø13                    | Ø5/6 cm                              | 265,0 kN                             | ciklički          |
| M1A   | GFRP           | 4Ø10                    | Ø5/6 cm                              | 88,0 kN                              | ciklički          |
| M2A   | GFRP           | 4Ø10                    | Ø5/6 cm                              | 265,0 kN                             | ciklički          |

Tablica 4. Mehanička svojstva čeličnih armaturnih šipki

| Promjer [mm] | Materijali | Modul elastičnosti Es [GPa] | Granica popuštanja fy [MPa] | Čvrstoća [MPa] | Deformacija [%] | Izduženje [%] |
|--------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|---------------|
| 13           | čelik      | 210                         | 400                         | 560            | 0,2             | 5             |

Tablica 5. Mehanička svojstva šipki srmrsnih GFRP-om

| Promjer [mm] | Materijal | Modul elastičnosti [GPa] | Vlačna čvrstoća [MPa] | Krajnja deformacija u vlaklu [%] |
|--------------|-----------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 10           | GFRP      | 50                       | 1100                  | 2,5                              |

kompleksni fenomen odziva, primijenjena je metoda presjeka vlakana primjenom programa *SeismoStruct* [34]. Uzorak stupa modeliran je korištenjem četiri 3D nelinearna konačna elementa na bazi vlakana (eng. *fiber-model*) postavljenih između *pet čvornih točaka*. Da bi se realno zabilježila raspodjela zakrivljenosti duž svakog konačnog elementa, *pet dodatnih integracijskih odjeljaka* po elementu uzeti su u obzir. *SeismoStruct* omogućuje samo pristup odzivu vlakana na naprezanje i deformaciju na krajnjim presjecima elementa. Poprečni presjeci modela su diskretizirani u detaljnu mrežu vlakana uzimajući u obzir vlakna za *ovijeni beton*, *neovijeni beton* i stvarna *armaturna vlakna*.

### 5.3. Modeliranje naprezanja i deformacije materijala

Za modeliranje nelinearnog ponašanja betona odabran je model Changa i Madera (1994). U ovom je modelu primijenjena srednja tlačna čvrstoća od 48,0 MPa, srednja vlačna čvrstoća od 4,8 MPa, modul elastičnosti od 32 562,5 MPa i deformacija pri vršnom naprezanju od 0,002. Bezdimenzijski kritični koeficijenti tlačne i vlačne deformacije odredili su oblik histerezne krivulje. Za nelinearno ponašanje čelične armature korišten je Menegoto-Pinto model čelika [34] s modulom elastičnosti  $2 \times 10^5$  MPa i granicom popuštanja od 575,0 MPa. Ponašanje šipki armiranih GFRP-om modelirano je pomoću linearnog modela s modulom elastičnosti od  $5 \times 10^4$  MPa, vlačne čvrstoće  $1,1 \times 10^3$  MPa, tlačne čvrstoće  $7 \times 10^2$  MPa i specifičnom težinom od  $50 \text{ kN/m}^3$ .

### 5.4. Numerička nelinearna strategija analize naprezanja i deformacije

Detaljna numerička nelinearna strategija analize naprezanja i deformacije uspostavljena je pažljivim odabirom sljedećih ključnih parametara:

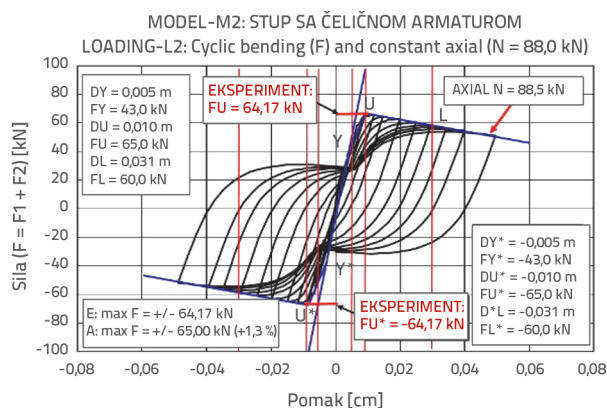
- ukupno 800 koraka, s vremenskim korakom od  $\Delta t = 0,005 \text{ s}$ , što rezultira ukupnim vremenom pseudorješenja od  $T = 4,4 \text{ s}$
- iterativna strategija s najviše 40 ponavljanja po prirastu rješenja ( $IT = 40$ ), do 35 korigiranja tangentne matrice krutosti po prirastu ( $NSA = 35$ ), ograničenje iteracije divergencije od ( $DI = 35$ ), a maksimalni kriterij tolerancije postavljen na  $1 \times 10^{20}$  ( $\max T = 1e20$ ), maksimalno smanjenje koraka od 0,001 ( $\max SR = 0,001$ ) i najmanje 1 ponavljanje rješenja ( $\min SI = 1$ )
- ažurirane kriterije konvergencije, upotrebom mješovitog pristupa koji se temelji na pomaku/rotaciji s dopuštenom granicom pomaka od 0,0001 m i dopuštenom granicom rotacije od 0,0001 rad.

Tijekom čitavog analitičkog istraživanja provedene su najviše tri iteracije po koraku tijekom računarske obrade.

### 5.5. Modeliranje stupova s običnom čeličnom armaturom

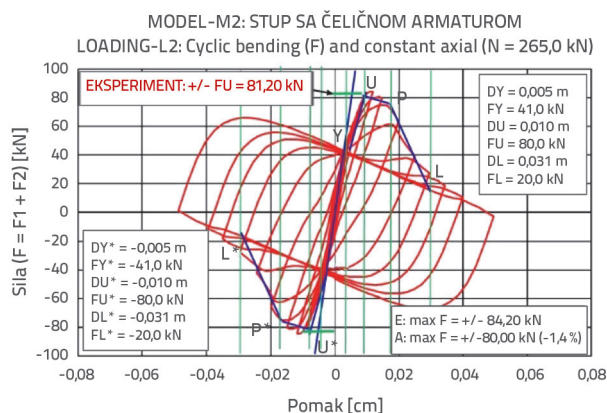
**1) Obični stup ojačan čelikom sa simuliranim osnim opterećenjem N1 = 88,0 kN.** Analitički predviđen histerezni

odziv sila-pomak modela stupa M1 armiranog običnim čeličnim šipkama uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja od  $N1 = 88,0 \text{ kN}$  prikazan je na slici 5. Izračunana histerezna veza potpuno je simetričnog oblika, što izravno potvrđuje konstruirana pozitivna grana anvelope utvrđenom točkama popuštanja Y, U i L te simetričnom negativnom granom utvrđenom odgovarajućim simetričnim točkama (plava linija). Početna krutost predstavljena je segmentom prve linije. Zbog simuliranog učinka nižeg osnog opterećenja N1, padajući dio anvelope određen točkama U i L nije oštar i općenito pokazuje vrlo dobro duktilno ponašanje.



Slika 5. Model M1 s čeličnom armaturom: Analitički predviđena histerezna reakcija sile-pomaka uslijed simuliranog cikličnog savijanja i konstantnog osnog opterećenja  $N1 = 88,0 \text{ kN}$

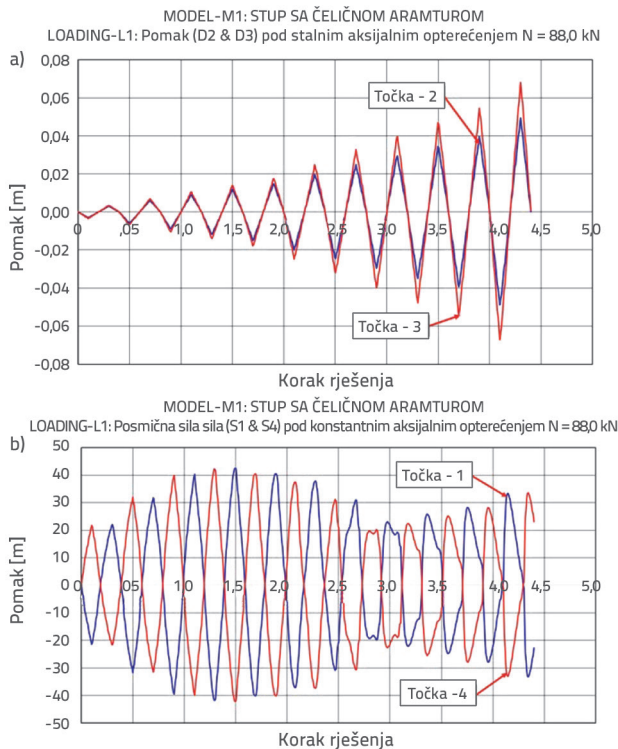
**2) Obični stup ojačan čelikom sa simuliranim osnim opterećenjem N2 = 265,0 kN.** Analitički predviđen histerezni odziv sila-pomak modela stupa M2 armiranog običnim čeličnim šipkama uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja od  $N2 = 265,0 \text{ kN}$  prikazan je na slici 6.



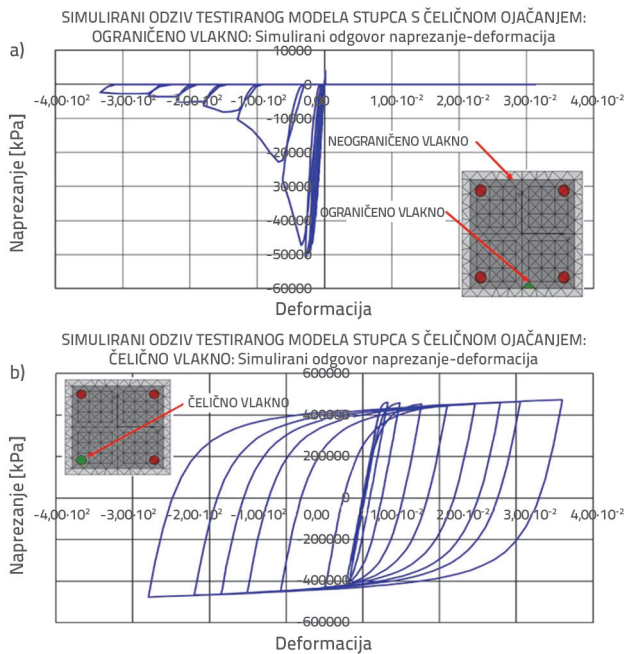
Slika 6. Model M2 s čeličnom armaturom: Predviđeni histerezni odziv uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N2 = 265,0 \text{ kN}$



Zbog simuliranog učinka većeg osnog opterećenja  $N_2$ , opadajući dio krivulje određen točkama U i L postao je vrlo strm, što upućuje na lošu duktilnost.



Slika 7. Model M1 s čeličnom armaturom: Vremenski zapis pomaka i posmične sile slijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N_1 = 88,0$  kN

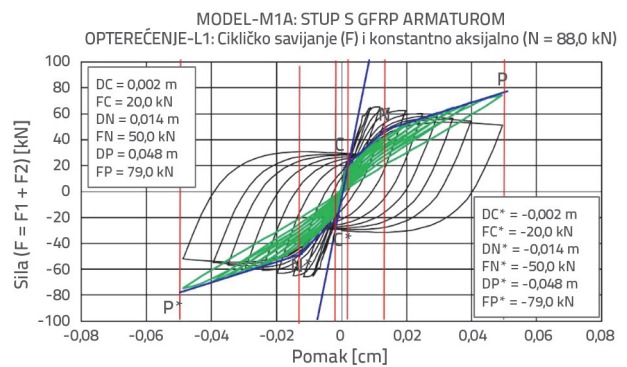


Slika 8. Model M1 s čeličnom armaturom: Odnosi naprezanje-deformacija ovijenog betona i čeličnih vlakana uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N_1 = 88,0$  kN, (naprezanje: kPa)

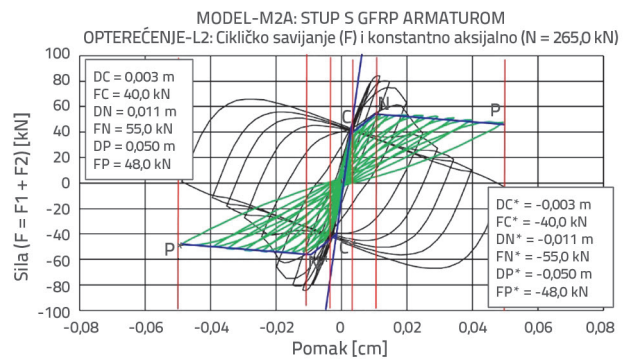
Slika 7. prikazuje predviđene karakteristične pomake i povijesti posmične sile uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N_1 = 88,0$  kN, a slika 8. prikazuje primjere praćenih i označenih odnosa naprezanja i deformacija odabranih ovijenih betonskih vlakana i običnih čeličnih armaturnih vlakana.

### 5.6. Modeliranje stupova s kompozitnom GFRP armaturom

1) Kompozitni GFRP armirani stup pri simuliranom osnom opterećenju  $N_1 = 88,0$  kN. Histerezni odziv dobiven analizom ekvivalentnog modela stupa M1A s kompozitnom GFRP armaturom uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N_1 = 88,0$  kN prikazan je na slici 9. (zeleno).



Slika 9. Model M1A sa šipkama od polimera ojačanog staklenim vlaknima (GFRP): Histerezni odziv uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N_1 = 88,0$  kN. Model s kompozitnom armaturom (CRC) prikazan je zelenom bojom, a model s čeličnom armaturom (SRC) prikazan je crnom bojom



Slika 10. Model M2A armiran GFRP-om: Histerezni odziv uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja  $N_2 = 265,00$  kN. Model s kompozitnom armaturom (CRC) prikazan je zelenom bojom (SRC) prikazan je crnom bojom

U usporedbi s čeličnom armaturom (crno), izračunana histerezna veza u ovom je slučaju sasvim drugačija, ali još uvijek zadržava potpuno simetričan oblik. To je prikazano pozitivnom granom krivulje određene točkama C, N i P, i odgovarajućom negativnom granom određenom točkama C\*, N\* i P\*.

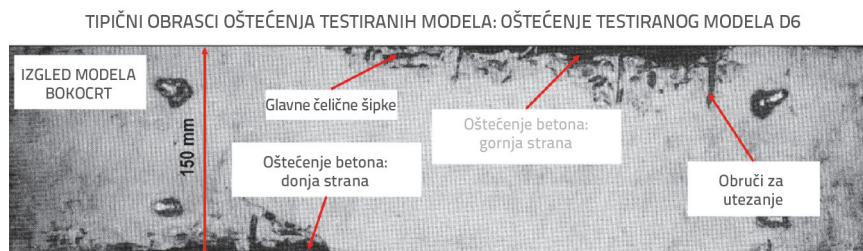
Zbog simuliranog učinka nižeg osnog opterećenja N1, konačni segment linije određen točkama N i P pokazuje nisku krutost, s pozitivnim nagibom čak i za vrlo velike deformacije. Međutim, ključno je napomenuti da se histerezni odziv odlikuje značajnim gubitkom krutosti, koji je rezultat kombiniranih učinaka linearnog odziva GFRP šipki i nelinearnog odziva uslijed naprezanja i deformacije betonskih vlakana.

**2) Kompozitni GFRP armirani stup pri simuliranom osnom opterećenju N2 = 265,0 kN.** Slično tome, slika 10. (zeleno) prikazuje analitički predviđeni histerezni odziv za ispitani model stupa M2A, koji je armiran istim kompozitnim GFRP-om i podvrgnut simuliranom cikličkom savijanju i konstantnom osnom opterećenju N2 = 265,0 kN. U usporedbi s histerezom opaženom za nižu vrijednost osnog opterećenja N1, oblik histereznog odziva za veću vrijednost osnog opterećenja N2 značajno se razlikuje. To je vidljivo u pozitivnoj grani krivulje određene točkama C, N i P, i simetričnom negativnom segmentu određenom točkama C\*, N\* i P\*. Zbog većeg osnog opterećenja N2, segment određen točkama N i P odlikuje se malom, ali stabilnom negativnom krutošću, što upućuje na vrlo visoku duktilnost za velike deformacije. Bez obzira na to, predviđeni histerezni odziv također pokazuje izražen gubitak krutosti.

## 6. Glavni rezultati ispitivanja

**1) Oštećenje.** Važna prednost seizmičkih ispitivanja pomoću sustava HYLSE-1 bila je činjenica da je vrijeme izvođenja ispitivanja produženo na približno 45 min, što je korišteno za praćenje širenja pukotina i oštećenja tijekom karakterističnih faza odziva modela. Kao što je prikazano na slici 11., tipična oštećenja uočena su u kritičnom (srednjem) dijelu ispitivanog modela D6 (bočni pogled). Širenje početnih i širih pukotina i drobljenje odnosno pucanje betona primijećeni su uvijek na donjoj i gornjoj strani deformiranih uzoraka. Slična mjesta oštećenja utvrđena su analitičkim istraživanjem. To je potvrđeno zabilježenim odnosima naprezanja i deformacija za beton i čelična vlakna na kritičnom presjeku.

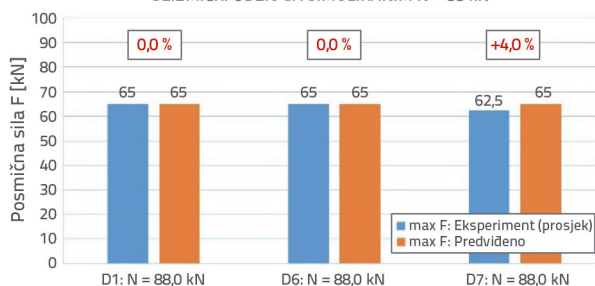
**2) Model.** Izvorni rezultati dobiveni seizmičkim ispitivanjem pomoću sustava HYLSE-1 potvrdili su strategiju numeričkog modeliranja. Slika 12. prikazuje najveće vrijednosti posmične sile dobivene iz triju seizmičkih ispitivanja AB modela pomoću sustava HYLSE-1 i analitički predviđenu posmičnu silu uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja N1 = 88,0 kN. Zabilježene razlike vrlo su male, u ovom slučaju od najviše 4 %. Slično tome, slika 13. prikazuje najveće vrijednosti posmične sile dobivene iz pet seizmičkih ispitivanja AB modela pomoću sustava HYLSE-1 i analitički predviđenu posmičnu silu uslijed simuliranog cikličnog savijanja i stalnog osnog opterećenja N2 = 265,0 kN. I u ovom su slučaju zabilježene razlike vrlo male, tj. najviše 11,4 %.



Slika 11. Bočni pogled na zabilježeno oštećenje srednjeg dijela ispitivanog AB modela D6 (stara fotografija)

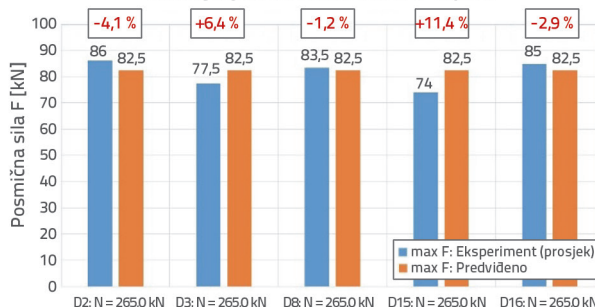
**3) Učinci osnog opterećenja.** Na oblik histereznog odziva stupova armiranih čeličnim ili GFRP šipkama značajno je utjecala razina osnog opterećenja. Za stupove ojačane čeličnim šipkama, najveće vrijednosti povratne sile dobivene pri simuliranim razinama osnog opterećenja N1 i N2 bile su 65,0 kN odnosno 80,0 kN, a razlika od 23,1 % koja je proizašla iz toga je značajna. Oblici obrisa histereznog odziva također se razlikuju (slike 5. i 6.). Za stupove ojačane GFRP šipkama, povratne sile zabilježene pod simuliranim osnim opterećenjima N1 i N2 iznosile su 40,0 kN odnosno 55,0 kN, a dobivena razlika od 37,5 % također je značajna. Oblici obrisa histereznog odziva također su značajno pogođeni (slike 9. i 10.).

EKSPERIMENTALNA I PREDVIĐENA MAKSIMALNA POSMIČNA SILA RC-MODELA: SEIZMIČKI ODZIV SA SIMULIRANIM N = 88 kN



Slika 12. Najveće posmične sile iz triju seizmičkih ispitivanja AB modela pomoću sustava HYLSE-1 u usporedbi s analitičkim predviđanjima, uz simulirano osno opterećenje N1 = 88,0 kN

EKSPERIMENTALNA I PREDVIĐENA MAKSIMALNA POSMIČNA SILA RC-MODELA: SEIZMIČKI ODZIV SA SIMULIRANIM N = 265 kN



Slika 13. Najveće posmične sile iz pet seizmičkih ispitivanja AB modela pomoću sustava HYLSE-1 u usporedbi s analitičkim predviđanjima, uz simulirano osno opterećenje N2 = 265,0 kN

**4) Krutost i deformabilnost.** Razlika u svojstvima krutosti stupova ojačanih čeličnim i GFRP šipkama bila je značajna. Za stupove ojačane čeličnim šipkama, zabilježena krutost bila je puno veća u odnosu na stupove ojačane GFRP šipkama (slike 5., 6., 9. i 10.), a rezultati su pokazali da su stupovi ojačani GFRP šipkama bili izloženi većim deformacijama.

## 7. Zaključak

Na temelju rezultata iz opsežnih eksperimentalnih seizmičkih ispitivanja i naprednog analitičkog istraživanja navedenoga ovdje, izvlače se sljedeći zaključci važni za uspješno seizmičko projektiranje stupova ojačanih ili običnim čeličnim šipkama ili novim GFRP šipkama:

- Relativno male razlike u čvrstoći betona (otprilike 8 do 12 %) uočene u ovom istraživanju imale su minimalan utjecaj na histerezni odziv ispitanih modela AB stupova.
- Za stupove ispitane nižom osnom silom (N1), učinak različitih razina ovijanja na njihov histerezni odziv bio je zanemariv. Međutim, pod većom simuliranom osnom silom (N2), zabilježena su značajna oštećenja ili urušavanje AB stupova, posebno uslijed potresa većeg intenziteta.
- Za stupove ojačane čelikom ili GFRP-om, različite razine osne sile imale su značajan utjecaj. Pri nižim simuliranim osnim silama, histerezno kretanje ostalo je stabilno i općenito je pokazalo izraženu duktilnost. Međutim, pri većim simuliranim osnim silama, histerezno kretanje pokazalo je smanjenu duktilnost, brzo smanjenje povratne sile, značajna oštećenja i eventualni slom, osobito uslijed potresa jačeg intenziteta.

- I eksperimentalna i analitička istraživanja potvrdila su da do kritičnog ponašanja ili potpunog urušavanja stupova armiranih čelikom ili GFRP-om dolazi uslijed neodgovarajuće razine ovijanja i u situacijama kada su stupovi izloženi velikim osnim silama izazvanih intenzivnim potresima.
- Rezultati istraživanja potvrdili su da stupovi ojačani čelikom imaju značajno veću sposobnost apsorpcije energije, dok stupovi ojačani GFRP-om imaju znatno niži kapacitet zbog izraženog učinka sužavanja uočenog u njihovom histereznom odzivu na potres.
- Za buduću konstrukciju stupova ojačanih čelikom u seizmičkim područjima ključno je procijeniti i uzeti u obzir moguću varijaciju osne sile.
- Za buduće oblikovanje stupova ojačanih novim GFRP šipkama u seizmičkim područjima, bitno je pouzdano procijeniti moguće varijacije osne sile i učinke povećane deformabilnosti pod seizmičkim opterećenjima, te uključiti ta razmatranja u projektiranje.

## Zahvala

Seizmička ispitivanja pomoću sustava HYLSEK-1 provedena su u Laboratoriju za seizmičku gradnju Sveučilišta u Kyotu u Japanu, dok su proširena ispitivanja GFRP-a i analitička istraživanja provedena u laboratoriju RESIN u Skoplju, koji je osnovao prof. D. Ristić, PPD, kao regionalni istraživački centar u okviru inovativnog NATO-ovog Programa znanosti za mir i sigurnost: *Seizmičko poboljšanje mostova u jugoistočnoj Europi pomoću inovativnih tehnologija (SFP: 983828)*. Autori izražavaju svoju iskrenu zahvalnost obama laboratorijima na njihovoj podršci i uvjetima za provođenje ispitivanja.

## LITERATURA

- [1] Raza, S., Scott, J., Menegon, J., et al.: Axial Load Variation of Columns in Symmetrical RC Buildings Subject to Bidirectional Lateral Actions in Regions of Low to Moderate Seismicity, *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1772151>
- [2] Di Ludovico, M., Verderame, G.M., Prota, A., et al.: Experimental behaviour of nonconforming RC columns with plain bars under constant axial load and biaxial bending, *Journal of Structural Engineering*, 139 (2013) 6, pp. 897–914, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000703](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000703).
- [3] Qiu, F.W., Li, W.F., Pan, P., et al.: Experimental tests on reinforced concrete columns under biaxial quasi-static loading, *Engineering Structures*, 24 (2002) 4, pp. 419–28. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00108-0).
- [4] Raza, S., Menegon, S.J., Tsang, H.H., et al.: Force-displacement behaviour of limited ductile high-strength RC columns under bidirectional earthquake action, *Engineering Structures*, 208 (2020), pp. 110278. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110278>.
- [5] Rodrigues, H., Arède, A., Varum, H., et al.: Experimental evaluation of rectangular reinforced concrete column behaviour under biaxial cyclic loading, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42 (2013) 2, pp. 239–59, <https://doi.org/10.1002/eqe.2205>.
- [6] Rodrigues, H., Varum, H., Arède, A., et al.: A comparative analysis of energy dissipation and equivalent viscous damping of RC columns subjected to uniaxial and biaxial loading, *Engineering Structures*, 35 (2012), pp. 149–64, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.014>.
- [7] Raza, S., Tsang, H.H., Wilson, J.L.: Unified models for post-peak failure drifts of normal- and high-strength RC columns. *Magazine of Concrete Research*, 70 (2018) 21, pp. 1081–1101.
- [8] Raza, S., Menegon, S.J., Tsang, H.H., et al.: Collapse performance of limited ductile high-strength RC columns under uni-directional cyclic actions, *Journal of Structural Engineering*, 2020a, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002772](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002772).
- [9] Wilson, J.L., Wibowo, A., Lam, N.T.K., et al.: Drift behaviour of lightly reinforced concrete columns and structural walls for design applications, *Australian Journal of Structural Engineering*, 16 (2015) 1, pp. 62–73, <https://doi.org/10.7158/S14-002.2015.16.1>.

- [10] Menegon, S.J., Wilson, J., Lam, L., et al.: RC walls in Australia: Seismic design and detailing to AS 1170.4 and AS 3600. *Australian Journal of Structural Engineering*, 19 (2018) 1, pp. 67–84, <https://doi.org/10.1080/13287982.2017.1410309>.
- [11] He, R., Yang, Y., Sneed, L.H.: Seismic repair of reinforced concrete bridge columns: Review of research findings. *Journal of Bridge Engineering*, 20 (2015) 12, pp. 04015015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000760).
- [12] Raza, S., Khan, M.K.I., Menegon, S.J., et al.: Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: State-of-the-art review, *Sustainability*, 11 (2019) 11, pp. 3208. <https://doi.org/10.3390/su11113208>.
- [13] De Luca, A., Matta, F., Nanni, A.: Behavior of full-scale concrete columns internally reinforced with glass FRP bars under pure axial load, *Composites & Polycon 2009*, American Composites Manufacturers Association, January 15–17, 2009.
- [14] Guri, Z., Kokalanov, G., Ristic, D., Ristic, J.: Modeling of circular columns with ordinary and composite reinforcement, *Proceedings of International conference: Earthquake engineering and engineering seismology*, SGIS, 2018, Kraljevo, Serbia.
- [15] Guri, Z., Misini, M.: Experimental testing and numerical analysis of circular columns reinforced with steel and glass-fibre-reinforced polymer. *Magazine of Concrete Research*, 73 (2019) 4, pp.1–27, <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00003>.
- [16] ACI (American Concrete Institute): ACI 440.1R-06: Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2006.
- [17] CSA (Canadian Standards Association): CAN/CSA-S806-02: Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers. Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2002.
- [18] Deitz, D.H., Harik, I.E., Gesund, H.: Physical properties of glass fiber reinforced polymer rebars in compression. *Journal of Composites for Construction*, 7 (2003) 4, pp. 292–301.
- [19] Tobbi, H., Farghaly, A.S., Benmokrane, B.: Concrete columns reinforced longitudinally and transversally with glass fiber-reinforced polymer bars, *ACI Structural Journal*, 109 (2012) 4, pp. 551–558.
- [20] Hadi, M., Karim, H., Sheikh, M.: Experimental investigations on circular concrete columns reinforced with GFRP bars and helices under different loading conditions, *Journal of Composites for Construction*, 20 (2016) 4, pp. 4016009-1-04016009-12.
- [21] Elchalakani, M., Ma, G., Aslani, F., Duan W.: Design of GFRP-reinforced rectangular concrete columns under eccentric axial loading. *Magazine of Concrete Research*, 69 (2017) 17, pp. 1–13.
- [22] Weber, A.: Advanced reinforcement technology with GFRP rebar. In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International fib Congress*, Naples, Italy, 2006.
- [23] Nanni, A.: Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement, *Journal of Structural Engineering*, 119 (1993) 11, pp. 3344–3359.
- [24] Takanashi, K., et al.: A Simulation of Earthquake Response of Steel Buildings In *Proceedings, 6<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India, 1997.
- [25] Takanashi, K., et al.: Pseudo-Dynamic Tests on 2-Story Steel Frame by Computer-Load Test Apparatus Hybrid System In *Proceedings, 7<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Istanbul, Turkey, 1981.
- [26] Okada, T., Seki, M., Park, Y.J.: A Simulation of Earthquake Response of Reinforced Concrete Building Frames to Bi-Directional Ground Motion by IIS Computer-Actuator On-Line System. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey, 1980.
- [27] Yamada, Y., Iemura, H.: Hybrid Analysis on Earthquake Response of Deteriorating Hysteretic Structures, In *Proceedings of the Sino-American Symposium on Bridge and Structural Engineering*, Peking, China, 1982.
- [28] Ristic, D.: Nonlinear behavior and stress-strain based modelling of reinforced concrete structures under earthquake induced bending and varying axial loads, *Doctoral Dissertation*, School of Civil Engineering, Kyoto University, Japan, 1988.
- [29] Tamahloult, M., Tiliouine, B.: 3D nonlinear seismic analysis and design of base-isolated buildings under near field ground motions, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 5, pp. 483–493, <https://doi.org/10.14256/JCE.3548.2022>
- [30] Başgöze, A., Güncü, A.: Determining the regional disaster risk analysis of buildings in Erzincan, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 3, pp. 257–272, <https://doi.org/10.14256/JCE.3436.2021>
- [31] Husain, M., Hassan, H., Mohamed, H.A., Elgharrawy, E.S.: Seismic response of post-tension shear walls – Outrigger structure, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 6, pp. 491–502, <https://doi.org/10.14256/JCE.3418.2021>
- [32] Mertol, H. C., Tunc, G., Akis, T.: Evaluation of masonry buildings and mosques after Sivrice earthquake, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 9, pp. 881–892, <https://doi.org/10.14256/JCE.3101.2021>
- [33] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., Lulić, L.: Strengthening of masonry walls with FRP or TRM, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 937–953, <https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020>
- [34] SeismoStruct: SeismoStruct – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures Seismosoft, Pavia, Italy, 2021, <http://www.seismosoft.com/en/SeismoStruct.aspx>