

Primljen / Received: 2.11.2020.

Ispravljen / Corrected: 30.8.2021.

Prihvaćen / Accepted: 26.11.2021.

Dostupno online / Available online: 10.1.2022.

# Utjecaj čeličnih vlakana na armiranobetonski spoj grede i stupa pri cikličnom opterećenju

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Recep Kadir Pekgökgöz**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Harran, Turska  
Fakultet tehničkih znanosti  
Odjel za građevinarstvo  
[recepkadir@harran.edu.tr](mailto:recepkadir@harran.edu.tr)



Doc.dr.sc. **Fatih Avcil**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Bitlis Eren, Turska  
Fakultet tehničkih znanosti  
[favcil@beu.edu.tr](mailto:favcil@beu.edu.tr)

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Recep Kadir Pekgökgöz, Fatih Avcil**

## Utjecaj čeličnih vlakana na armiranobetonski spoj grede i stupa pri cikličnom opterećenju

Vibracije izazvane potresom uzrokuju snažne horizontalne sile u spojevima greda i stupova. Ako su granične vrijednosti opterećenja premašene, dolazi do nepopravljivih oštećenja. Provedena su eksperimentalna i analitička istraživanja kako bi se odredio kapacitet disipacije energije i duktilnost spojeva greda i stupova, a u tu su svrhu korištene mješavine samozbijajućeg betona i običnog betona kojima su dodavane različite količine čeličnih vlakana. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s rezultatima koji su dobiveni na uzorcima običnog betona. Rezultati dobiveni ispitivanjem pokazuju da se obični beton i samozbijajući beton slično ponašaju u pogledu kapaciteta disipacije energije. Poznato je da čelična vlakna povećavaju duktilnost. U ovom je radu utvrđeno da je duktilnost najizraženija pri volumnom udjelu vlakana od 1 %.

### Ključne riječi:

ciklično opterećenje, čelična vlakna, disipacija energije, samozbijajući beton, duktilnost

Research Paper

**Recep Kadir Pekgökgöz, Fatih Avcil**

## Effect of steel fibres on reinforced concrete beam-column joints under reversed cyclic loading

The vibrations produced by earthquakes cause large horizontal forces in beam-column joints. If these forces exceed the limit values that the joints can withstand, severe irreparable damage might occur. Experimental and analytical studies were conducted to determine the energy dissipation capacity and ductility of beam-column joints by using the Self-Compacting Concrete (SCC) and Normal Concrete (NC) mixes containing various quantities of steel fibres. Test results were compared with the results obtained using the test specimen made of normal concrete. The test results reveal similar behaviour of normal concrete and self-compacting concrete with regard to energy dissipation capacity. The use of steel fibres is known to increase ductility. This study shows that this behaviour is more prominent in the case of 1 % fibre volume ratio.

### Key words:

cyclic loading, steel fibre, energy dissipation, self-compacting concrete, ductility

## 1. Uvod

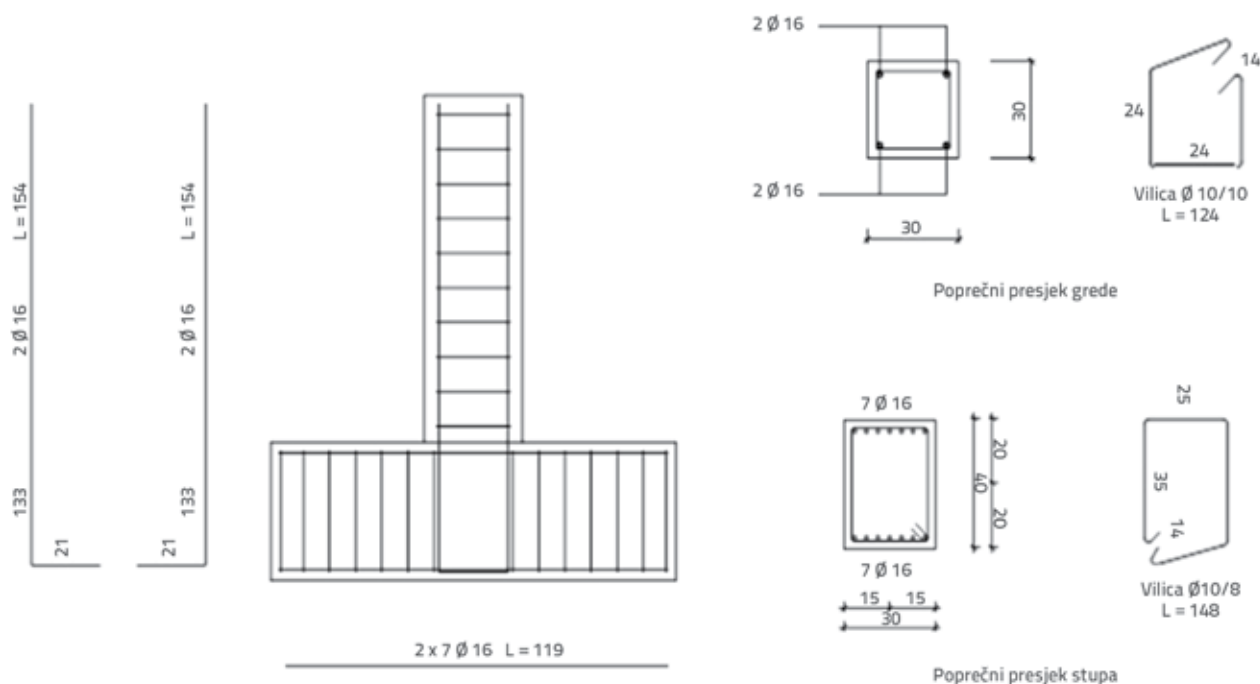
Spoj grede i stupa izuzetno je značajan za projektiranje okvirnih konstrukcija. Čvrstoća i duktilnost ovise o prikladnoj razradi detalja spojeva stupova i greda. U literaturi se mogu naći brojne studije u kojima se određuje ponašanje spoja grede i stupa od običnog betona, a u njima se naglasak stavlja na proizvodnju i primjenu kompozita ojačanih vlaknima [1-5]. U okviru tih studija je utvrđeno da čelična vlakna mogu poboljšati ponašanje uzoraka i to naročito u pogledu disipacije energije i duktilnosti [6]. Međutim, nedovoljno je istraženo ponašanje spojeva betonskih greda i stupova ojačanih vlaknima, naročito u odnosu na seizmičko opterećenje [7-9]. Vlakna, kao sredstvo za ojačanje, izvrstan su alternativni materijal za poboljšanje mehaničkog odziva spojeva greda i stupova. Vlakna koja se koriste u betonskim konstrukcijama povećavaju duktilnost, sposobnost disipacije energije, savojnu i vlačnu čvrstoću [10, 11].

U nekim se istraživanjima pokušava utvrditi na koji način ojačanje vlaknima utječe na trajnost i duktilnost. Studije koje su izradili Oh [12] te Para-Montesinos i Wight [13] pokazuju da ojačanje čeličnim vlaknima bitno utječe na povećanje savojne čvrstoće konstrukcija. Također je utvrđeno da se spoj betonske grede i stupa ojačan čeličnim vlaknima odlikuje znatno većom čvrstoćom i otpornošću na deformacije [14, 15]. Kako bi se poboljšalo seizmičko ponašanje nedovoljno čvrstih armiranobetonskih konstrukcija, analizirani su vlaknima ojačani cementni kompoziti visoke učinkovitosti (eng. *high-performance fibre reinforced cement composites* - HPRCC) u rasponu debljina od 20 do 50 mm, a ispitivanje je provedeno za potrebe proizvodnje montažnih ploča [16]. Yurdakul i

Avsar [17] navode da armiranobetonski spoj grede i stupa ojačan polimerom s ugljičnim vlaknima omogućuje učinkovito povećanje čvrstoće i sposobnosti disipacije energije. Provedena su i eksperimentalna istraživanja kako bi se odredilo na koji način promjena udjela čeličnih vlakana u betonskoj mješavini utječe na sposobnost sidrenja i duktilnost spoja grede i stupa izrađenog od betona visoke čvrstoće [18]. Rezultati te studije pokazuju da sposobnost sidrenja i duktilnost spoja raste s porastom udjela čeličnih vlakana u betonskoj mješavini. Isto tako, neki su istraživači istražili mogućnost ojačanja čeličnim vlaknima kao alternativan način za smanjenje udjela armaturnih vilica u spojevima grede i stupa [19].

## 2. Cilj istraživanja

U ovom eksperimentalnom istraživanju prikazuje se ciklično opterećenje različitih vrsta spojeva betonskih greda i stupova realne veličine koji su ojačani različitim udjelima čeličnih vlakana. Izrađene su mješavine običnog betona (eng. *Normal Concrete* - NC) i samozbijajućeg betona (eng. *Self-Compacting Concrete* - SCC) s dodatkom čeličnih vlakana u volumnom udjelu od 0 %, 0,5 % i 1,0 %. Projektiranje spoja grede i stupa rađeno je u skladu s "Turskim zahtjevima za projektiranje i izvođenje armiranobetonskih konstrukcija" [20]. Iako u literaturi već ima primjera istraživanja betonskih elemenata u realnim dimenzijama, do sada nisu objavljene studije o istraživanju samozbijajućeg betona s različitim udjelima čeličnih vlakana. Naslici 1. prikazani su detalji uzoraka spoja armiranobetonskog stupa i grede. Debljina zaštitnog sloja betona iznosi 30 mm za gredu, tj. 25 mm za stup. Armaturne vilice postavljene su u svim zonama osim u području spoja stupa i grede. To



Slika 1. Detalji uzoraka korištenih u ispitivanju

Tablica 1. Sastav betonskih mješavina

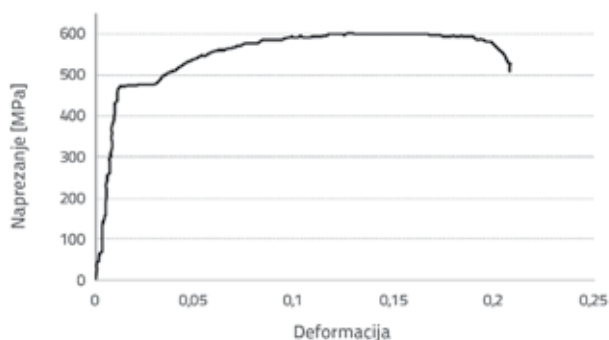
Oznaka mješavine	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Leteći pepeo [kg/m <sup>3</sup> ]	Voda [kg/m <sup>3</sup> ]	Voda / (cement + leteći pepeo)	Superplastifikator [kg/m <sup>3</sup> ]	Čelična vlakna [kg/m <sup>3</sup> ]	Agregat [kg/m <sup>3</sup> ]
NCO	400	0	192	0,48	8	0	1870
NCO.5	400	0	192	0,48	8	39,3	1845
NC1	400	0	192	0,48	8	78,5	1820
SCCO	400	180	191	0,33	10,4	0	1600
SCCO.5	400	180	191	0,33	10,4	39,3	1550
SCC1	400	180	191	0,33	10,4	78,5	1510

je područje izostavljeno kako bi se moglo istražiti djelovanje čeličnih vlakana na širenje pukotina. Rezultati dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem uzoraka NC-a i SCC-a uspoređeni su u pogledu stupnja oštećenja te sposobnosti disipacije energije.

### 3. Materijali

U tablici 1. prikazan je sastav šest različitih betonskih mješavina. U svim je uzorcima korišten portlandski cement tipa CEM I 42,5R prema zahtjevima norme TS EN 197-1 [21] te bazalni agregat maksimalne veličine zrna 16 mm. U ovom istraživanju, ciljana tlačna čvrstoća dobivena na valjcima nakon 28 dana ne bi smjela biti manja od 30 MPa. Istovremeno s izradom uzoraka grede i stupa, izađene su i kocke veličine 150 mm te valjci veličine 150x300 mm.

Rezultati dobiveni nakon laboratorijskog ispitivanja prema normi TS EN 12390-3 [22] pokazuju da prosječna tlačna čvrstoća betonskih kocaka iznosi 40 MPa. Prosječan modul elastičnosti betonskih uzoraka iznosi 35 GPa.



Slika 2. Dijagram naprezanje – deformacija za čelik

Korištena je armatura S420 s granicom popuštanja 420 MPa. Mehanička svojstva armature i karakterizacija rezultata ispitivanja prema normi TS EN ISO 6892-1 [23] prikazani su na slici 2. i u tablici 2. U mješavini vlakana i betona korištena su čelična vlakna granice popuštanja 1100 MPa, dužine 50 mm i promjera 1 mm, pri čemu je njihov volumni udio u

betonu iznosio 0,5 % i 1 %. U mješavini samozbijajućeg betona korišten je superplastifikator prema normi TS EN 934-2 [24] kako bi se pospješila obradivost. Korišten je i leteći pepeo klase F iz termoelektrane Afsin-Elbistan. Odnos letećeg pepela i cementa iznosio je 0,45 za samozbijajući beton, a odnos vode i cementa s letećim pepelom iznosio je 0,33 kod svih uzoraka.

Tablica 2. Karakteristike čelične armature

Armatura	Granica popuštanja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Istezanje [%]	Modul elastičnosti [GPa]
S420	477	600	21,1	200

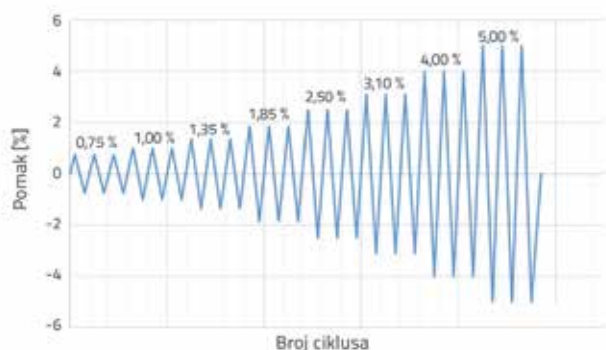
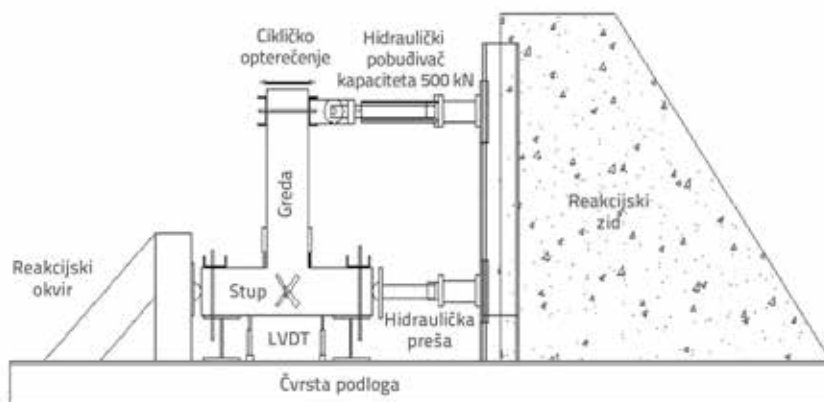
### 4. Eksperimentalni program i postupak ispitivanja

U Laboratoriju za konstrukcije Odjela za građevinarstvo Sveučilišta Harran ispitano je ukupno šest uzoraka spoja grede i stupa u prirodnoj veličini. U svim su uzorcima stupovi položeni horizontalno a grede vertikalno (slika 3.). Opterećenje se nanosilo na gornji kraj grede pomoću hidrauličnog aktuatora postavljenog na reakcijski zid. Uz to, na stup se nanosilo stalno opterećenje pomoću horizontalno postavljene hidraulične preše. Dva kraja stupa su fiksirana tako da su spriječeni horizontalni i vertikalni pomaci, a omogućena je jedino rotacija.

Spojevi grede i stupa podvrgnuti cikličnom opterećenju ispitani su kontrolom pomaka. Opterećenje uključuje tri jednaka ciklusa pomaka, pri čemu se u svakom koraku opterećenja sila nanosi na vrh grede, kao što je to prikazano na slici 4. Za sve uzorke faktor pomaka počinje s 0,75 % a maksimum je 5 %. Ciljni pomaci izračunavaju se množenjem faktora pomaka s udaljenošću od točke u kojoj je nanoseno opterećenje pa do osi koja prolazi kroz sredinu stupa. Pomak kraja grede i opterećenje nanoseno na vrh grede očitavaju se pomoću uređaja za prikupljanje podataka spojenog na mjerilo. Sustav za prikupljanje podataka iskazuje rezultate u obliku dijagrama pomaka i opterećenja.



Slika 3. Postav ispitivanja



Slika 4. Opterećenje uz kontrolu pomaka

## 5. Rezultati ispitivanja i analiza

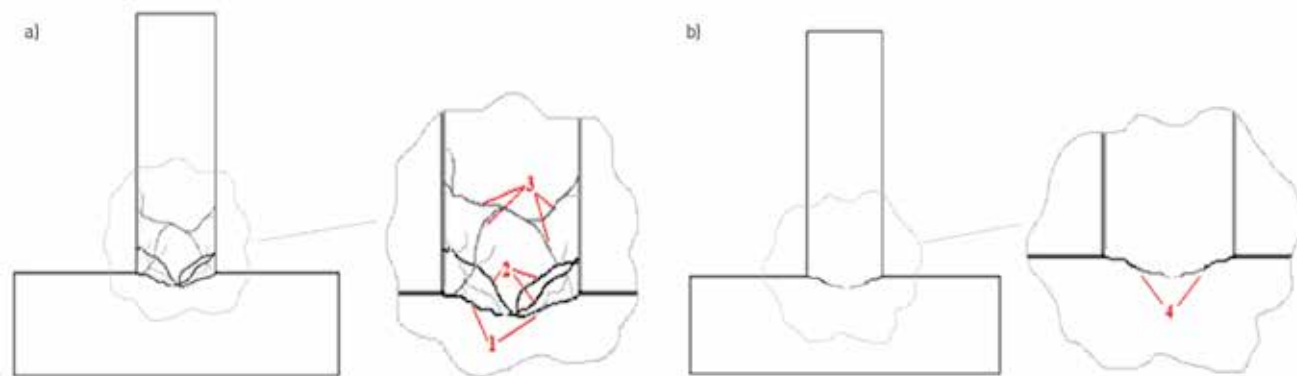
### 5.1. Oblici sloma

Na slici 5. prikazani su oblici sloma za šest različitih uzoraka podvrgnutih cikličkom opterećenju koje se nanosi na kraju grede. Formiranje pukotina uzrokovanih opterećenjem prikazano je na slici 6. Za uzorke pripremljene pomoću običnog betona i samozbijajućeg betona, savojne pukotine paralelne s površinom stupa pojavile su se na gredi pri pomaku od 1 % (Pukotine 1). U slučaju pomaka od 2,5 %, posmične pukotine počele su se pojavljivati u području spoja tih kontrolnih uzoraka (Pukotine 2). Pri dodatnom opterećenju posmične su se pukotine počele širiti te su se nove posmične pukotine pojavile pri vrhu grede (Pukotine 3). Pri pomaku od 3,1 %, došlo je do ljuštenja betona između pukotina 1 i 2. Pri daljnjem opterećenju, pri pomaku od 5 %, došlo je do širenja pukotina 3 te do pucanja betona.



Slika 5. Oblici sloma betonskih uzoraka: a) Uzorak NC0; b) Uzorak NC0.5; c) Uzorak NC1; d) Uzorak SCC0; e) Uzorak SCC0.5; f) Uzorak SCC1

Kod uzoraka ojačanih vlaknima (NC0.5, NC1, SCC0.5 i SCC1), savojne su se pukotine pojavile pri pomaku od 1,35 % (Pukotine 4). Poznato je da se dodavanjem čeličnih vlakana povećava posmična čvrstoća armiranobetonskih spojeva greda-stup [25, 26]. Isto tako, pri analizi rezultata ispitivanja, ustanovljeno je da ojačanje čeličnim vlaknima dovodi do povećanja posmične čvrstoće uzoraka te se stoga posmične pukotine ne pojavljuju u području spoja. Tijekom potresa neće doći do popuštanja u području spoja grede i stupa te će se tako izbjeći ljudske žrtve. Upravo sprječavanje ljudskih žrtava osnovna je korist od primjene betona ojačanog vlaknima.

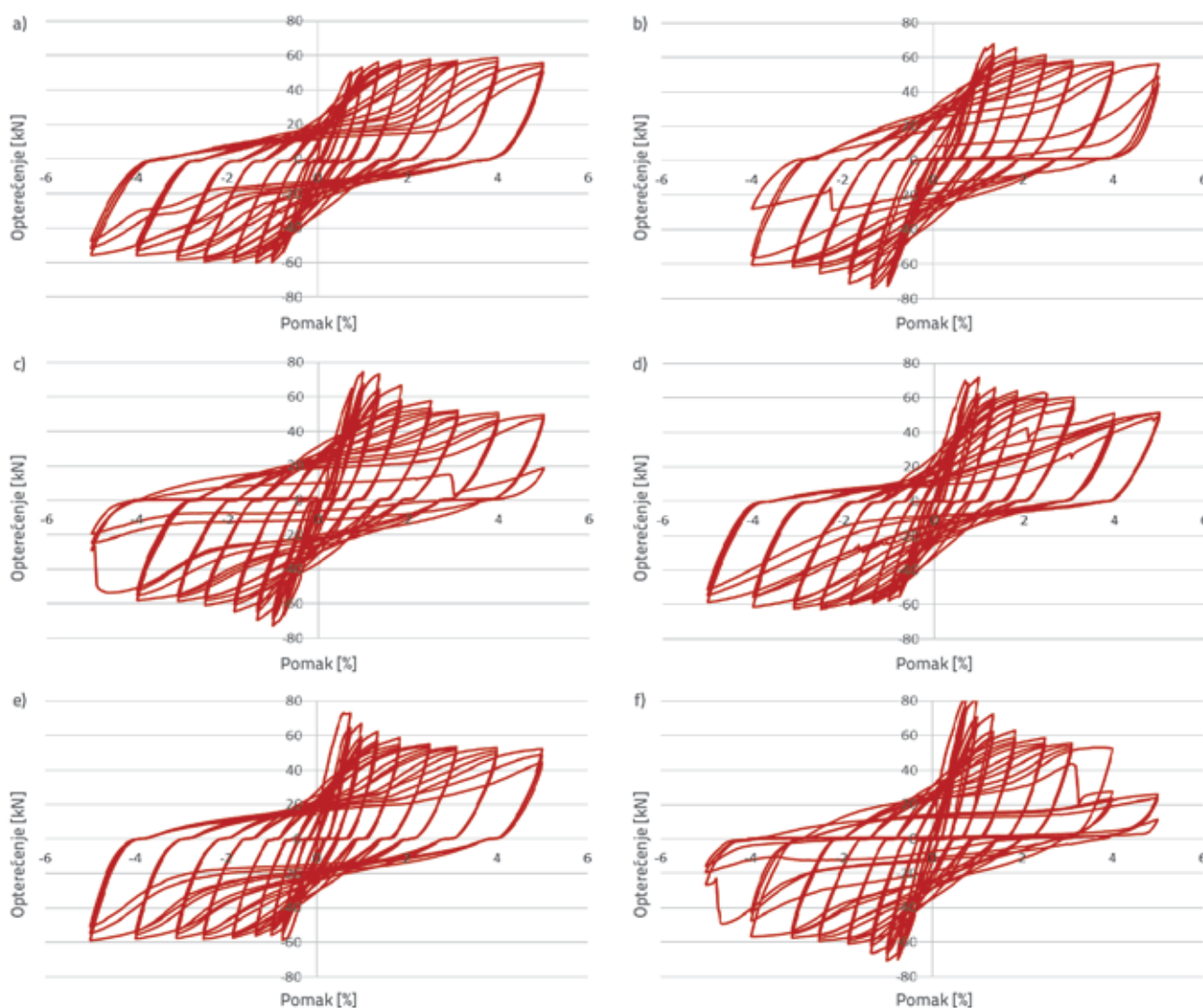


Slika 6. Pukotine na uzorcima: a) bez vlakana; b) s vlaknima

### 5.2. Rasap energije

Histerezne petlje opterećenje-pomak pri nanošenju cikličnog opterećenje na gornji kraj grede prikazane su

na slici 7. za svaki korak opterećenja kontrolom pomaka. Ukupna disipacija energije kod svakog uzorka jednaka je sumi površine ispod envelopnih krivulja histerezne petlje opterećenje-pomak.



Slika 7. Odnos opterećenje-pomak ispitanih uzoraka: a) Uzorak NCO; b) Uzorak NCO.5; c) Uzorak NC1; d) Uzorak SCC0; e) Uzorak SCC0.5; f) Uzorak SCC1

Tablica 3. Granično opterećenje i sposobnost raspršivanja energije

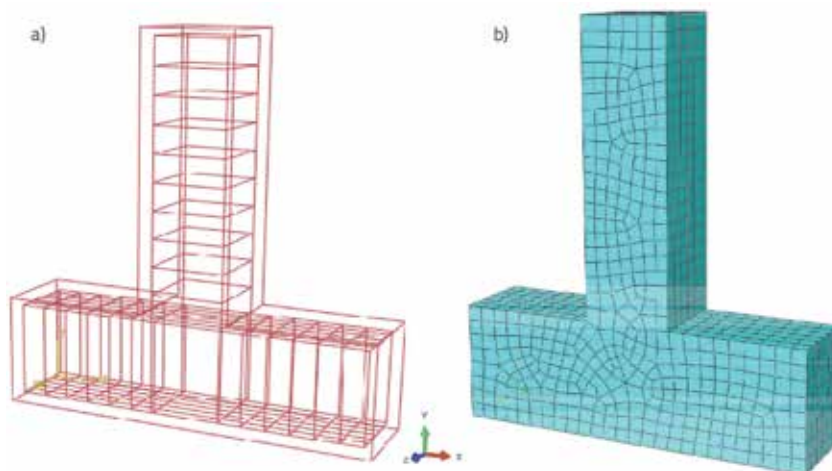
Naziv uzorka	Granično opterećenje [kN]	Maksimalni pomak [%]	Kapacitet disipacije energije [kNmm]	Povećanje kapaciteta disipacije energije [%]
NCO	58,7	5	8260	0,0
NCO.5	64,3	5	8300	0,5
NC1	75,3	5	9270	12
SCCO	66,2	5	8200	0,0
SCCO.5	66,2	5	8290	1,0
SCC1	79,2	5	9000	10

Vrijednosti graničnog opterećenja i kapacitet disipacije energije prikazane su u tablici 3. za sve analizirane uzorke. Iz te se tablice vidi da za obični beton granično opterećenje iznosi 58,73 kN za kontrolni uzorak, dok se porast od 9 % bilježi za uzorak s 0,5 % vlakana (NCO.5), a porast od 28 % za uzorak s 1 % vlakana (NC1). Kapacitet disipacije energije iznosi 8260 kNmm za običan beton, dok je porast praktički zanemariv za uzorak NCO.5, a za uzorak NC1 taj porast iznosi 12 %. Slična je situacija i kod samozbijajućeg betona gdje granično opterećenje kontrolnog uzorka iznosi 66,17 kN. Porast graničnog opterećenja vrlo je nizak za uzorak s 0,5 % vlakana (SCCO.5), a za uzorak s 1 % vlakana (SCC1) taj porast iznosi 20 %. Kod samozbijajućeg betona, kapacitet disipacije energije iznosi 8200 kNmm za kontrolni uzorak, tj. 8290 kNmm za uzorak SCCO.5. Na uzorku s 1 % čeličnih vlakana (SCC1) zabilježena je najveća disipacija energije (9000 kNmm), pri čemu je taj iznos za 10 % veći od odgovarajuće vrijednosti za kontrolni uzorak. Nema većih razlika između vrijednosti graničnog opterećenja i kapaciteta disipacije energije kod uzoraka NC-a i SCCa- (drugim riječima, vrijednosti kapaciteta disipacije energije gotovo su iste za NCO.5 i SCCO.5). To pokazuje da se oba tipa betona mogu koristiti za iste namjene. Kod samozbijajućeg betona nije potrebno nabijanje, pa je stoga po cijeni i utrošku radne snage pogodniji od normalnog betona.

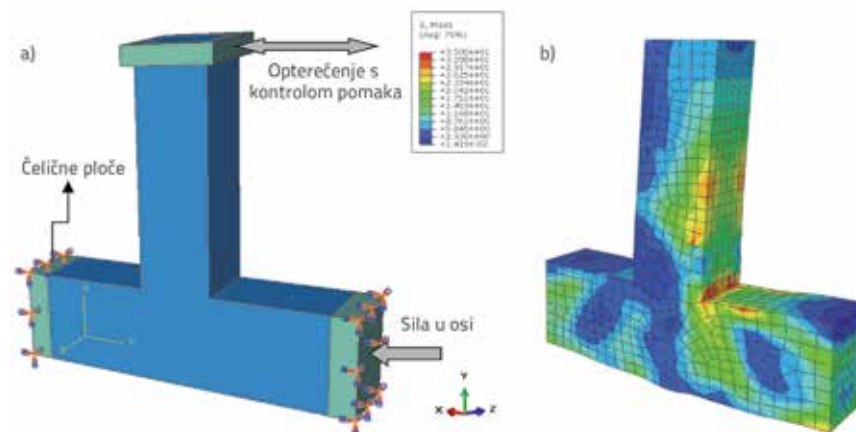
### 5.3. Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata analize metodom konačnih elemenata za uzorke NCO

U ovom poglavlju histerezne krivulje opterećenje-pomak kontrolnih uzoraka običnog betona uspoređuju se s rezultatima koji su dobiveni na temelju analize konačnih elemenata. Za potrebe

analize konstrukcije, u programu Abaqus/CAE izrađen je nelinearni model konačnih elemenata [27]. Modeliranje je provedeno pomoću konačnih elemenata tipa C3D8R (linearni "brick" element s 8 čvorova), a maksimalna veličina mrežnog elementa iznosila je 50 mm, što je sasvim prikladno s obzirom na brzinu računalna koja su korištena u analizi. Korišten je model plastičnog oštećenja betona, a dvodimenzionalni "truss" element odabran je za armaturu. Uz to, čelične su šipke modelirane kao ugrađena armatura. Na slici 8. prikazan je betonski uzorak NCO dobiven metodom konačnih elemenata.

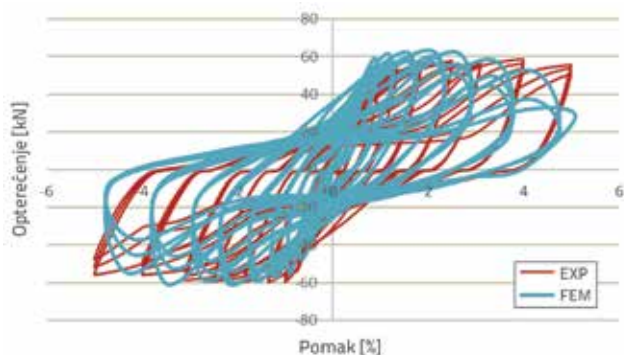


Slika 8. Model konačnih elemenata: a) detalji uzorka; b) mreža elemenata



Slika 9. a) Granični uvjeti uzorka; b) Naprezanja iz analize metodom konačnih elemenata

Analiza je provedena primjenom istih graničnih uvjeta kao i u eksperimentalnom dijelu. Opterećenje s kontrolom pomaka nanoseno je na vrh grede a registrirana su naprezanja koja se javljaju u kritičnim zonama, kako je to prikazano na slici 9. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja dobiveni na uzorku NCO, koji je poslužio kao referentni model, uspoređeni su s rezultatima analize konačnih elementata. Slika 10. prikazuje histerezne petlje opterećenje-pomak rezultate dobivene eksperimentom i proračunom.



Slika 10. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih rezultata

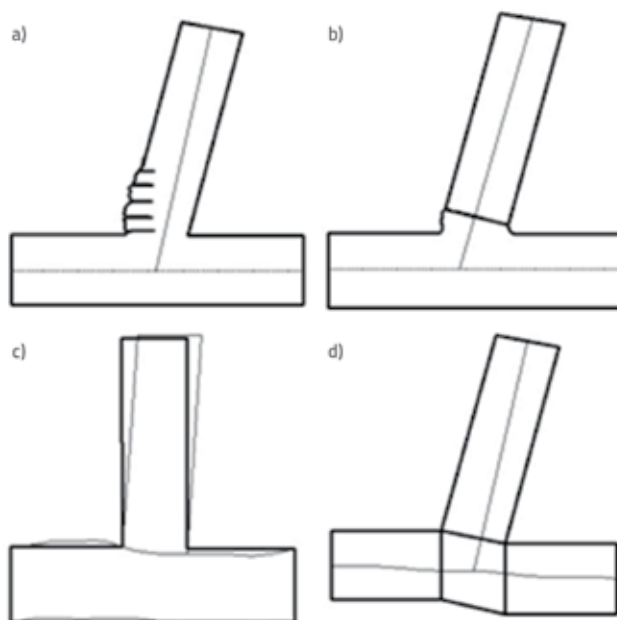
U tablici 4., za kontrolni su uzorak prikazani disipacija energije i granična opterećenja koji su dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem i metodom konačnih elemenata. Uočena je manja razlika od 5,4 % u ocjeni rezultata koji se odnose na disipaciju energije. Nakon usporedbe eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih metodom konačnih elemenata, utvrđena je njihova dobra podudarnost. Takvi rezultati upućuju na zadovoljavajuću točnost postava ispitivanja, mjerenja i načina pripreme uzoraka.

Tablica 4. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja i proračuna prema metodi konačnih elemenata za uzorak NCO

Uzorak NCO	Granično opterećenje [kN]	Maksimalni pomak [%]	Kapacitet disipacije energije [kNmm]
Eksperimentalni rezultati	58,73	5	8260
Rezultati prema metodi konačnih elemenata	62,75	5	8705

## 5.4. Komponente rotacije

Pomak izmjeren na kraju grede sastoji se od četiri osnovna faktora, kao što se to može vidjeti na slici 11. Ti faktori su: rotacija područja plastičnog zgloba (a), lokalne rotacije do kojih dolazi zbog velikih deformacija armature grede u spoju (b), rotacija stupa (c) i distorzija spoja greda-stup (d). LVDT senzori postavljeni su u odgovarajuće položaje na spoju greda-stup kako bi se izmjerile te komponente, koje zapravo čine ukupnu rotaciju.



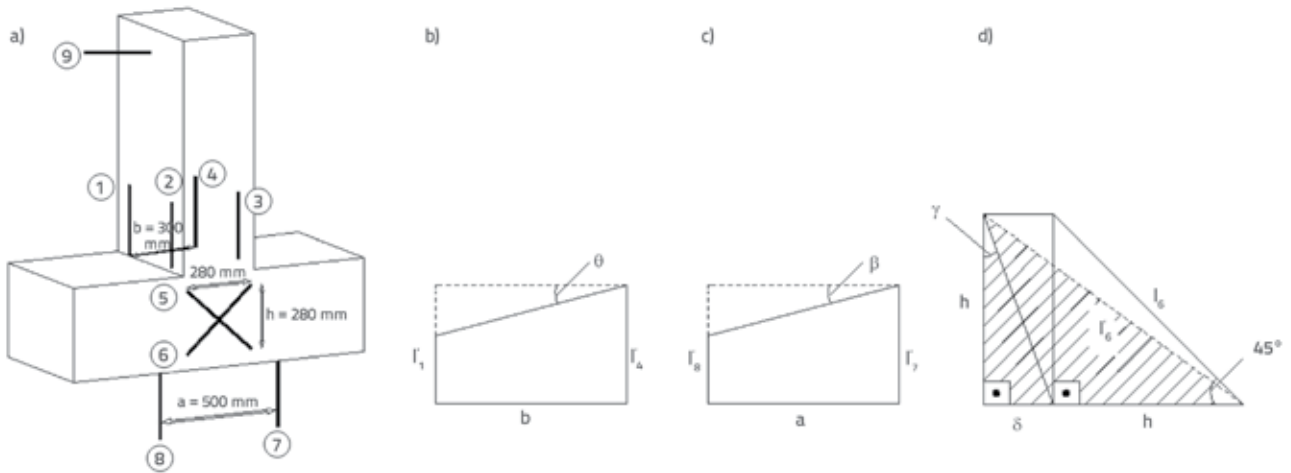
Slika 11. Sveukupni faktori rotacije: a) Plastični zglob; b) Deformacija armature grede na spoju; c) Rotacija stupa; d) Distorzija spoja

Linearno varijabilni diferencijalni transformatori (LVDT senzori) postavljeni su kako bi se izmjerili pomak i rotacija na kraju grede i na spoju grede i stupa. Proračun sveukupne rotacije, utemeljen na te tri komponente, prikazan je na slici 12.

LVDT senzori 1 i 4, prikazani na slici 13.a, postavljeni su kako bi se izmjerila rotacija grede. Vrijednosti produljenja izmjerene LVDT sensorima 1 i 4 nakon početnog nanošenja opterećenja iskazani su pomoću oznaka  $l'_1$  i  $l'_4$ . Kut  $\theta$  označava rotaciju grede



Slika 12. Primjena LVDT senzora: a) Rotacije stupa; b) Rotacije grede; c) Distorzija spoja



Slika 13. Mjerenje rotacije spoja: a) pozicije LVDT senzora, b) rotacija grede, c) rotacija stupa, d) distorzija spoja

a određen je primjenom geometrijskih odnosa koji su prikazani na slici 13.b. 
$$\delta = \frac{1}{2h} \left[ (l'_6)^2 \left\{ 1 - 2 \frac{h^2}{(l'_6)^2} \right\} \right] \quad (6)$$

$$tg \theta \approx \theta = \frac{l'_4 - l'_1}{b} \quad (1)$$
 
$$\frac{\delta}{h} = tg \gamma \approx \gamma = \frac{1}{2h^2} \left[ (l'_6)^2 \left\{ 1 - 2 \frac{h^2}{(l'_6)^2} \right\} \right] \quad (7)$$

Senzori 7 i 8 postavljeni su kako bi se izračunala rotacija stupa. Vrijednosti produljenja izmjerene LVDT senzorima 7 i 8 nakon početka ispitivanja označene su kao  $l'_7$  i  $l'_8$ . Kut  $\beta$  označava rotaciju stupa a izračunan je primjenom geometrijskih odnosa koji su prikazani na slici 13.c:

$$tg \beta \approx \beta = \frac{l'_7 - l'_8}{a} \quad (2)$$

izračunan je kut  $\beta$  koji označava rotaciju stupa.

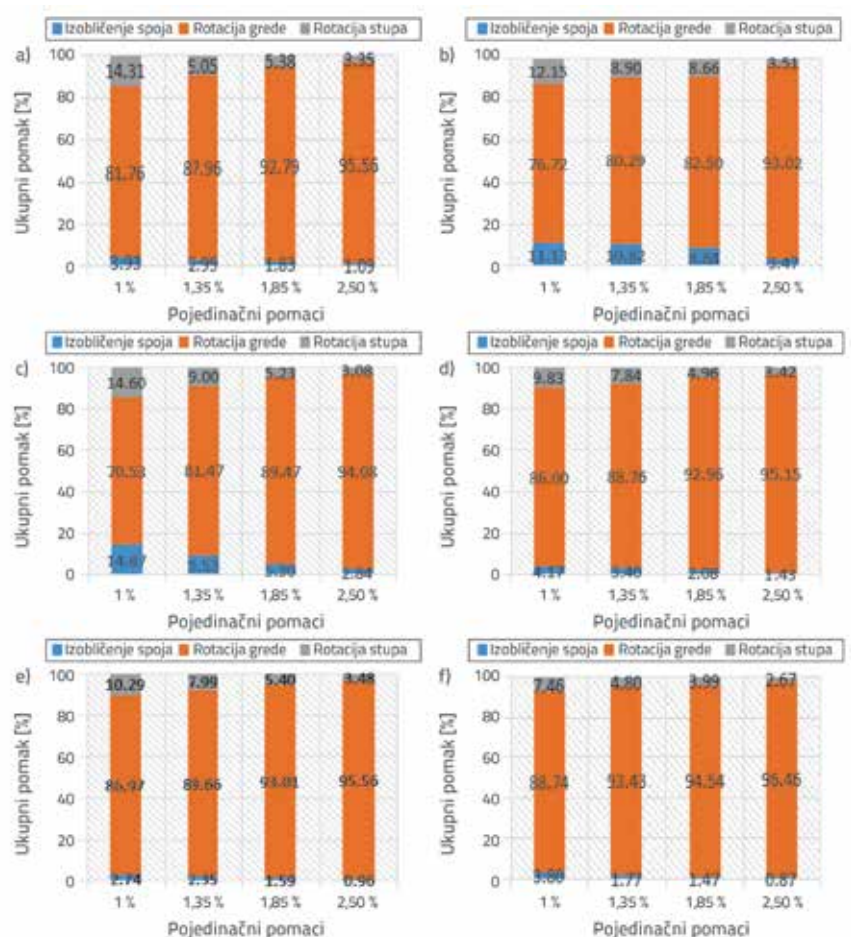
Kao što se vidi na slici 13.a, LVDT senzori 5 i 6 postavljeni su na uzorak. Horizontalna udaljenosti između LVDT senzora, izmjerena duljina, te horizontalne komponente LVDT senzora 6 nakon početka eksperimenta, redom su označene kako slijedi:  $h$ ,  $l'_6$  i  $\delta+h$ . Kut  $\gamma$  označava distorziju spoja, a izračunava se prema slici 13.d te u skladu sa sljedećim geometrijskim odnosima:

$$h^2 + (\delta + h)^2 = (l'_6)^2 \quad (3)$$

$$h^2 + \delta^2 + 2\delta h + h^2 = (l'_6)^2 \quad (4)$$

$$\frac{2h^2}{(l'_6)^2} + \frac{\delta^2}{(l'_6)^2} + \frac{2\delta h}{(l'_6)^2} = 1, \quad (5)$$

$$\frac{\delta^2}{(l'_6)^2} \text{ (zanemareno)}$$



Slika 14. Postotak rotacije kao udio svake komponente u ukupnoj rotaciji: a) Uzorak NCO; b) Uzorak NCO.5; c) Uzorak NC1; d) Uzorak SCC0; e) Uzorak SCC0.5; f) Uzorak SCC1



Ukupna rotacija spoja definirana je kao suma faktora od kojih se sastoji rotacija. Ukupna disipacija energije na spoju grede i stupa dijeli se kao odnos svake komponente rotacije i ukupne rotacije. Kako pomak raste od 0,75 % do 5 %, tako rastu i rotacije na spoju, spoj slabi i formira se plastični zglob na presjeku grede blizu plohe stupa. Zbog toga je raspon od 1 % do 2,5 % pomaka usvojen pri ocjenjivanju pojedinačnih udjela faktora u ukupnoj disipaciji energije. Deformacija armature grede na spoju je zanemarena jer je rotacija mala u odnosu na ostale komponente. Dakle, u obzir su uzete tri komponente ukupne energije kao što se to može vidjeti na slici 14.

Rotacija grede očito je odgovorna za najveći dio disipacije energije na spoju. Stoga se može zaključiti da je spoj projektiran po načelu jakog stupa i slabe grede. Za male pomake od npr. 1 %, disipacija energije zbog rotacije stupa i distorzije spoja je velika, ali u spoju nema velikih pukotina. Kako pomak raste od 1 % do 2,5 %, tako se smanjuje disipacija energije zbog rotacije stupa i distorzije spoja, a povećava se disipacija energije zbog rotacije grede. U rasponu pomaka koji se analizira u ovom radu, povećanje udjela čeličnih vlakana ne utječe na disipaciju energije, pa tako nije ni došlo do pojave velikih pukotina na spoju grede i stupa.

## 6. Zaključak

U ovom se radu analiziraju spojevi greda-stup, ojačani s različitim udjelima čeličnih vlakana, te podvrgnuti cikličnom opterećenju s kontrolom pomaka. Uzorcima običnog betona (NC) i samozbijajućeg betona (SCC) dodavana su čelična vlakna u volumnim udjelima od 0 %, 0,5 % i 1,0 %. Sljedeći se

zaključci mogu izvući na temelju rezultata istraživanja i analize eksperimentalnih rezultata:

Čvrstoća i duktilnost mogu se povećati uvođenjem vlakana u spoj grede i stupa. Kao rezultat rotacije grede, raspršeno je otprilike 90 % ukupne energije u spoju grede i stupa.

Disipacija energije zbog rotacije stupa i distorzije spoja bila je prilično mala u usporedbi s disipacijom energije zbog rotacije grede. Iako kod udjela čeličnih vlakana od 0,5 % nema povećanja sposobnosti disipacije energije u usporedbi s kontrolnih uzorkom, značajno povećanje disipacije energije (10-12 %) zabilježeno je kod udjela čeličnih vlakana od 1 %. To je povećanje izuzetno značajno za seizmičko projektiranje armiranobetonskih konstrukcija.

Povećanje posmične čvrstoće u uzorcima ojačanim vlaknima dovodi do smanjenja područja plastičnog zgloba, tj. smanjuje se oštećenje betona. Spojevi grede i stupa ojačani vlaknima doprinose smanjenju broja i težine ozljeda uzrokovanih potresom.

Običan beton i samozbijajući beton slično se ponašaju glede disipacije energije te se stoga mogu koristiti za iste namjene u području građevinarstva. Međutim, samozbijajući beton financijski je povoljniji od običnog betona jer nema potrebe za mehaničkim vibriranjem niti povezanom utroška rane snage.

## Zahvala

Ovo istraživanje provedeno je uz potporu Jedinice za koordinaciju turskih znanstvenoistraživačkih projekata koja djeluje pri Sveučilištu Harran (brojevi projekata HUBAK: 16073 i 17122)

## LITERATURA

- [1] Kumar, V., Shamim, M.: Influence of Beam Reinforcement on Exterior Beam-Column Joints, *Journal of Structural Engineering*, 26 (1999) 2, pp. 123-127.
- [2] Choi, H.K., Choi, Y.C., Choi, C.S.: Development and testing of precast concrete beam-to-column connections, *Engineering Structures*, 56 (2013), pp. 1820-1835.
- [3] Rajagopal, S., Prabavathy, S.: Study of exterior beam-column joint with different joint core and anchorage details under reversal loading, *Structural Engineering and Mechanics*, 46 (2013) 6, pp.809-825.
- [4] Yuksel, E., Karadogan, H.F., Bal, İ.E.: Seismic behaviour of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction. *Engineering Structures*, 99 (2015), pp.157-172.
- [5] Isik, E., Isik, M.F., Bulbul, M.A.: Web based evaluation of earthquake damages for reinforced concrete buildings, *Earthquakes and Structures*, 13 (2017), pp. 387-396.
- [6] Das, P., Choudhury, S.: Experimental Study on Fibre-Reinforced Concrete Beam-Column Joint with Ductile Detailing Under Reverse Cyclic Loading, *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2018) 3.4, pp. 85-89.
- [7] Sharbatdar, M.K., Saatcioglu, M., Benmokrane, B., El-Salakawy, E.: Behaviour of FRP reinforced concrete beam-column joints under cyclic loading, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Durability & Field Applications of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, (CDCC-07), Univ. of Sherbrook, Canada, 2007.
- [8] Hasaballa, M.H.: Seismic Behaviour of Exterior GFRP Reinforced Concrete Beam-Column Joints, M.Sc. Thesis, University of Manitoba, Manitoba, Canada, 2009.
- [9] Mady, M., Elragaby, A., Elsalakawy, E.: Seismic behaviour of beam-column joints reinforced with GFRP bars and stirrups, *Journal of Composites for Construction*, 15 (2011) 6, pp. 875-886.
- [10] Tavakoli, H.R., Jalali, P., Mahmoudi, S.: Experimental evaluation of the effects of adding steel fibre on the post-cyclic behaviour of reinforced self-compacting concrete beams. *Journal of Building Engineering*, 32 (2020), 101673. 2019,25:100771.
- [11] Siddika A., et al.: Strengthening of reinforced concrete beams by using fibre-reinforced polymer composites: A review, *Journal of Building Engineering*, 25 (2019), pp. 100798.
- [12] Oh, B.H.: Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Containing Steel Fibres, *Journal of Structural Engineering*, 118 (1992) 10.

- [13] Parra-Montesinos, G.J., Wight, J.K.: Seismic Response of Exterior RC Column-to-Steel Beam Connections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126 (2000) 10, pp. 1113-1121.
- [14] Jiuru, T., Chaobin, H., Kaijian, Y., Yongcheng, Y.: Seismic Behaviour and Shear Strength of Framed Joint Using Steel-Fibre Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118 (1992) 2, pp. 341-358.
- [15] Caballero, K.E., Bonet, J.L., Avarro, J.N., Marti, J.R.: Behaviour of Steel-Fibre-Reinforced Normal-Strength Concrete Slender Columns under Cyclic Loading, *Engineering Structures*, 39 (2012), pp. 162-175.
- [16] Bedirhanoğlu, İ., İlki, A.: HPRCC for retrofitting of reinforced concrete members built with low strength concrete, *ITU Journal Series D: Engineering*, 8 (2009) 6, pp. 146-156.
- [17] Yurdakul, Ö., Avşar, Ö.: Structural repairing of damaged reinforced concrete beam-column assemblies with CFRPs, *Structural Engineering and Mechanics*, 54 (2015) 3, pp. 521-43.
- [18] Hamad, B.S., Haider, E.Y.A.: Effect of Steel Fibres on Bond Strength of Hooked Bars in High-Strength Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (2011) 5, pp. 673-681.
- [19] Gencoğlu, M., Eren, I.: An experimental study on the effect of steel fibre reinforced concrete on the behaviour of the exterior beam-column joints subjected to reversal cyclic loading, *Turk J Eng Environ Sci*, 26 (2002), pp. 493-502.
- [20] Turkish Standardization Institute, Requirements for design and construction of reinforced concrete structures TS 500, Ankara, Turkey, 2000.
- [21] TSI, TS EN 197-1: Cement-part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements, Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute, 2012.
- [22] TS EN 12390-3. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute, 2019.
- [23] TS EN ISO 6892-1 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute, 2020.
- [24] TS EN 934-2+A1: Admixtures for concrete, mortar and grout-Part 2: concrete admixtures-definitions, requirements, conformity, marking and labelling. Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute, 2013.
- [25] Junior, A.L.M., Vedoato, A.P.: The Shear Strength of Steel Fibre-Reinforced Concrete Beams, *IBRACON Structures and Materials Journal*, Sao Paulo, 4 (2011) 5.
- [26] Cucchiara, C., Fossetti, M., Papia, M.: Steel fibre and transverse reinforcement effects on the behaviour of high strength concrete beams, *Structural Engineering and Mechanics*, 42 (2012) 4, pp. 551-570.
- [27] Abaqus: ABAQUS user's manual version 6.14-1, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Providence, RI, USA, 2014.