

Primljen / Received: 30.6.2020.

Ispravljen / Corrected: 14.8.2020.

Prihvaćen / Accepted: 7.10.2020.

Dostupno online / Available online: 10.1.2021.

Savijanje AB greda od običnog betona i betona s čeličnim vlaknima armiranih različitim vrstama FRP šipki

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **I.A. Sharaky**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Taif, Saudijska Arabija
Odjel za građevinarstvo
Sveučilište Zagazig, Egipat
Tehnički fakultet, Odjel za materijale
ibm_attia@zu.edu.eg



Prof.dr.sc. **H.K. Shehab Eldin**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Zagazig, Egipat
Tehnički fakultet, Odjel za materijale
hshehab@yahoo.com



Mr.sc. **Mohamed M. Shehata**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Zagazig, Egipat
Tehnički fakultet, Odjel za materijale
mohamadyshahata74@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Heba A. Mohamed**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Zagazig, Egipat
Tehnički fakultet, Odjel za materijale
hebawahbe@yahoo.com

Autor za korespondenciju

Izvorni znanstveni rad

I.A. Sharaky, H. K. Shehab Eldin, Mohamed M. Shehata, Heba A. Mohamed

Savijanje AB greda od običnog betona i betona s čeličnim vlaknima armiranih različitim vrstama FRP šipki

Šipke od vlaknima armiranih polimera (FRP) mogu se koristiti kao zamjena za čelične šipke da bi se izbjegla korozija čelika. U ovom radu su pripremljeni i ispitani uzorci armiranobetonskih greda od običnog betona i betona s čeličnim vlaknima (SFC) armirani šipkama od staklenih vlakana, armiranih polimera (GFRP) ili čeličnim šipkama. Rezultati ispitivanja pokazali su da se tlačna čvrstoća betona povećala s povećanjem omjera čeličnih vlakana (SF) koji su korišteni u ovom istraživanju (od 0 % do 1,5 %). Jednako tako, grede armirane GFRP šipkama imale su nižu početnu krutost i veću duktilnost nego one armirane čeličnim šipkama.

Ključne riječi:

armiranobetonske grede, vlaknima armirani polimeri, čelična vlakna, CFRP, GFRP, AFRP

Original scientific paper

I.A. Sharaky, H. K. Shehab Eldin, Mohamed M. Shehata, Heba A. Mohamed

Flexural Response of RC beams cast with normal and steel fibre concrete internally reinforced with various types of FRP bars

Fibre Reinforced Polymer (FRP) bars can be used as an alternate for reinforcing bars to avoid corrosion of steel. Samples of reinforced concrete beams cast with normal or steel fibre concrete (SFC), internally reinforced with Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) or steel bars, are prepared and tested in this paper. Experimental results show that compressive strength of concrete increases with an increase in steel fibre (SF) ratio used in this study (from 0% to 1.5%). Also, the beams reinforced with GFRP bars have a lower initial stiffness and higher ductility than those reinforced with steel bars.

Key words:

reinforced-concrete beams, fibre reinforced polymers, steel fibres, CFRP, GFRP, AFRP

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

I.A. Sharaky, H. K. Shehab Eldin, Mohamed M. Shehata, Heba A. Mohamed

Biegen von Stahlbeton-Trägern aus normalem Beton und Beton mit Stahlfasern, die mit verschiedenen Arten von FK-Stäben bewehrt sind

Faserverstärkte Polymerstäbe (FK) können als Ersatz für Stahlstäbe verwendet werden, um Stahlkorrosion zu vermeiden. In dieser Arbeit wurden Proben von Stahlbetonbalken aus gewöhnlichem Beton und Stahlfaserbeton (SFB) hergestellt und getestet, die mit Glasfaserstäben, verstärkten Polymeren (GFK) oder Stahlstäben bewehrt waren. Die Testergebnisse zeigten, dass die Druckfestigkeit des Betons mit zunehmendem Anteil der in dieser Studie verwendeten Stahlfasern (SF) zunahm (von 0 % auf 1,5 %). Ebenso hatten mit GFK-Stäben bewehrte Träger eine geringere Anfangssteifigkeit und eine höhere Duktilität als mit Stahlstäben bewehrte Träger.

Schlüsselwörter:

Stahlbetonbalken, faserverstärkte Polymere, Stahlfasern, CFK, GFK, AFK

1. Uvod

Šipke od vlaknima armiranih polimera (eng. *Fiber Reinforced Polymer* - FRP) odnedavno se upotrebljavaju kao uzdužna i poprečna armatura u brojnim betonskim konstrukcijama kao što su pomorske građevine, ploče mostova, tuneli, parkirne konstrukcije i postrojenja za pročišćavanje vode. Zbog prednosti FRP šipke u odnosu na čelične šipke (omjer visoke čvrstoće i mase te trajnost), sve je učestalija uporaba FRP-a umjesto čelika kao armature betonskih elemenata radi izbjegavanja problema korozije čelika, pogotovo u Sjevernoj Americi. Savijanje armiranobetonskih greda armiranih FRP šipkama proučavano je u prijašnjim istraživanjima [1-10]. Izračunana je duktilnost pri savijanju armiranobetonskih elemenata s čeličnim šipkama i to kao omjer graničnog pomaka i pomaka prilikom popuštanja čelika, dok se u slučaju armiranobetonskih elemenata s FRP šipkama duktilnost može izračunati na različite načine [11-13]. Općenito, navodi se da, umjesto svojstva FRP-a, svojstva betona smatraju se temeljnim čimbenikom koji utječe na duktilnost betonskih greda armiranih FRP šipkama. O primjeni i mehaničkim svojstvima betonskih greda armiranih GFRP-om (eng. *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP) provedena su mnoga istraživanja kao što su nosivost na savijanje, prijanjanje armature i betona, mehanika loma i trajnost [14-20]. Najvažniji rezultati tih istraživanja otkrili su da su se progib na sredini raspona i širina pukotina značajno smanjivali kako se koeficijent armiranja povećavao. Jednako tako, postojalo je i povećanje graničnog opterećenja i do 47 % i 97 % zbog povećanja koeficijenta armiranja na μ_b na 1,7 μ_b , odnosno s μ_b na 2,7 μ_b (μ_b je koeficijent armiranja pri balansiranom slomu) [19]. Naprezanje prijanjanja bilo je obrnuto proporcionalno promjeru šipke i duljini sidrenja GFRP šipki. Osim toga, kao što je i očekivano, GFRP šipke s glavom na kraju imale su veću nosivost na izvlačenje u odnosu na šipke s ravnim završetkom.

Omar i dr. [21] proučavali su savijanje armiranobetonskih greda od običnog betona (eng. *normal concrete* - NC) te betona visoke čvrstoće (eng. *high strength concrete* - HSC). Rezultati ispitivanja pokazali su da je povećanje koeficijenta armiranja FRP armaturom više utjecalo na granično stanje uporabljivosti nego na granično stanje nosivosti ispitivanih greda. Jednako tako, smanjenje razmaka između FRP šipki utjecalo je na granično stanje uporabljivosti, a povećanje čvrstoće betona povećalo je nosivost ispitanih greda. Štoviše, duktilnost izražena preko deformabilnosti je veća nego ona temeljena na energiji. S druge strane, proučavano je sedam geopolimernih betonskih greda s različitim koeficijentima armiranja i raspodjelom armature od GFRP-a i čelika [22]. Rezultati eksperimenta pokazali su da hibridne grede imaju bolju duktilnost i uporabivost u odnosu na geopolimerne betonske grede armirane samo GFRP šipkama. Jednako tako, hibridne grede pokazale su i do 15 % veću nosivost nego geopolimerne betonske grede armirane GFRP šipkama. Wen i dr. [23] proučavali su učinke koeficijenta armiranja poprečnom armaturom od GFRP-a te utjecaj tlačne i vlačne armature na disipiranu energiju u armiranobetonskim

gredama. To istraživanje pokazalo je da se otpornost na koroziju i nosivost GFRP šipki mogu posve iskoristiti uporabom FRP-a za poprečnu i uzdužnu vlačnu armaturu. Kada se GFRP šipke dodaju u tlačno područje, vrijednosti deformacijske energije, kao i odgovarajući omjeri deformacija, pokazali su konzistentno povećanje s povećanjem koeficijenta armiranja GFRP armaturom. Eksperimentalni rezultati koje su dobili Araba i Ashour [24] otkrili su da je povećanje kapaciteta nosivosti s povećanjem koeficijenta armiranja vlačnom GFRP armaturom rezultiralo smanjenom duktilnošću. Štoviše, zbog toga što se FRP ponaša linearnoelastično do sloma, kontinuirane betonske grede armirane FRP šipkama pokazale su smanjenu mogućnost preraspodjele opterećenja između kritičnih presjeka u usporedbi s gredama koje su armirane čeličnim šipkama [25-27]. Nadalje, Bischoff i Gross [28, 29] pokazali su da iznenadni gubitak krutosti i raspucavanje utječe na progibe i ponašanje nakon pojave pukotina. Mousavi i dr. [30] proučavali su progibe betonskih greda armiranih GFRP-om i navode da je niska vrijednost modula elastičnosti (E) GFRP šipki uzrok iznenadnog gubitka krutosti grede. Osim toga, koeficijent prijanjanja i modul elastičnosti (E) FRP-a bili su glavni čimbenici koji utječu na ponašanje betonskih greda armiranih GFRP-om. Zbog niskih vrijednosti modula elastičnosti i modula posmika (G) FRP-a, raspored GFRP profila koji osigurava veliku nosivost korištenjem krute hibridne strukture pokazao se rješenjem koje treba preporučiti [31-41]. Iz svega navedenoga, ustanovljeno je da se prethodna istraživanja fokusiraju na istraživanje betonskih greda armiranih GFRP šipkama. S druge strane, ograničena je uporaba betonskih greda armiranih čeličnim vlaknima i GFRP šipkama. U ovom se radu eksperimentalno proučavaju betonske grede armirane GFRP šipkama i čeličnim vlaknima. Vrsta armature (čelik i GFRP) i volumenski udio čeličnih vlakana (1 i 1,5 %) bili su čimbenici koji su se proučavali vezano uz savijanje armiranobetonskih greda. Nadalje, provedena je nelinearna analiza primjenom metode konačnih elemenata koristeći program ANSYS s ciljem da se prouči savijanje betonskih greda armiranih različitim vrstama FRP šipki (staklo, aramid, ugljen), uz korištenje čeličnih vlakana. Ovo istraživanje eksperimentalno proučava savojno ponašanje i duktilnost čeličnim vlaknima armiranih betonskih (eng. *steel fibers concrete* - SFC) greda armiranih GFRP šipkama. Jednako tako, eksperimentalni model verificiran je usporedbom s rezultatima FE modela koristeći ANSYS program kako bi se izvelo parametarsko istraživanje savojnog ponašanja betonskih greda armiranih različitim vrstama FRP šipki (staklo, aramid, ugljik).

2. Eksperimentalni program

2.1. Svojstva materijala i omjeri mješavine

Ispitivane su armiranobetonske grede sa čeličnim vlaknima i bez njih. Na temelju prijašnjih istraživanja postotak čeličnih vlakana (SF) varirao je između 0 % do 2 % (točnije 0,5 %, 0,75 %, 1 %, 1,5 % i 2 %).

Yuanxun Zheng i dr. [42] upozorili su na to da u slučaju kad je udio vlakana manji od 1 %, tada je brzina povećanja tlačne čvrstoće veća; kad je udio vlakana veći od 1 % (na primjer 1,5 % i 2 %), povećanje tlačne čvrstoće postaje sporije. To je razlog zašto su dva udjela čeličnih vlakana korištena u ovom istraživanju (1 % i 1,5 %).

Tlačna i vlačna čvrstoća betona određene su ispitivanjem standardnih kocki (duljine brida 150 mm) [43], odnosno standardnih cilindara (150 x 300 mm) [44]. Utjecaj čeličnih vlakana na tlačnu i vlačnu čvrstoću betona poslije će se analizirati. Eksperimentalno dobivena svojstva čeličnih šipki [45] su: 390 MPa za granicu popuštanja, 572 MPa za vlačnu čvrstoću i 2×10^5 MPa za modul elastičnosti. GFRP šipke proizvedene su u laboratoriju za materijale Sveučilišta Zagazig. Vlačna ispitivanja provedena su na tri uzorka GFRP šipki [46]. Prosječna svojstva dobivena ispitivanjem GFRP uzoraka bila su 596 MPa za vlačnu čvrstoću, 36,1 GPa za modul elastičnosti i 0,0165 za maksimalnu relativnu deformaciju. Slika 1. prikazuje radni dijagram za čelične šipke i GFRP šipke dobivene ispitivanjima.

Koristila su se čelična vlakna s kukama na krajevima duljine 50 mm (Slika 2.), sa svojstvima sažetim u tablici 1.

Prema udjelu volumena vlakana, postoje tri mješavine betona koje se dobivaju promjenom mase čeličnih vlakana, pri čemu su mase ostalih materijala zadržane konstantnima. Količine materijala koje se koriste u mješavini betona prikazane su u tablici 2. Postotak mase vlakana može se izračunati na temelju izraza (1):

$$W_f = \frac{v_f \cdot D_f}{v_m \cdot D_m + v_f \cdot D_f} \quad (1)$$

gdje je:

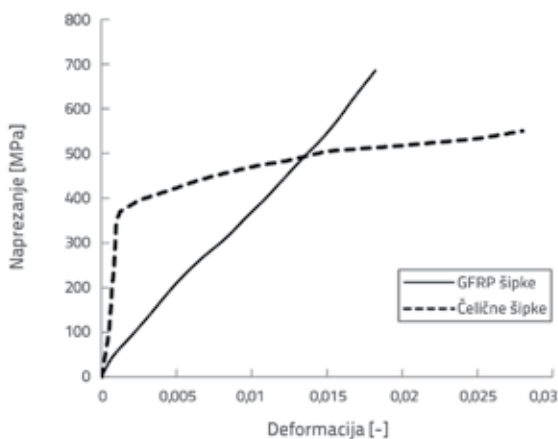
W_f - postotak mase vlakana u ukupnoj masi ispitanih uzoraka

v_f - udio volumena vlakana (0 %, 1 % i 1,5 %)

D_f - gustoća vlakana ($7,84 \times 10^{-5}$ N/mm³)

D_m - gustoća matrice

v_m - udio volumena matrice ($v_m = 100 - v_f$).



Slika 1. Radni dijagram za čelične i GFRP šipke

Tablica 2. Omjeri mješavine za 1 m³ betona

Sastojak	Cement	Voda	Dolomit, br. 1 (Nominalna veličina: 12,5 mm)	Dolomit, br. 2 (Nominalna veličina: 20 mm)	Pijesak
Masa [kg]	360	195	600	600	640



Slika 2. Čelična vlakna s kukama na kraju

Tablica 1. Svojstva čeličnih vlakana (od proizvođača)

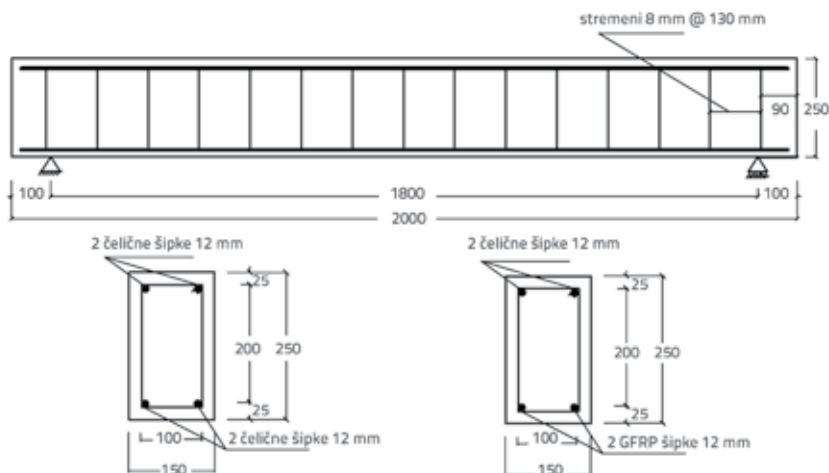
Svojstvo	Vrijednost
Gustoća [kN/m ³]	78,4
Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	800 – 1500 (1100)
Visina uvijanja [mm]	2 - 3
Promjer [mm]	0,75
Duljina [mm]	50
Modul elastičnosti [MPa]	2×10^5
Omjer duljine i promjera, približno	67

3.2. Svojstva greda

Ukupno je šest greda izvedeno i ispitano. Dvije vrste betona, normalni beton (NC) i beton s čeličnim vlaknima (SFC), koristili su se za armiranobetonske grede. Sve ispitane grede imale su poprečni presjek dimenzija 150 x 250 mm i ukupnu duljinu 2000 mm, kao što je prikazano na slici 3. Pojednosti o gredama prikazane su u tablici 3. Sve grede su u tlačnom području armirane dvjema čeličnim šipkama promjera 12 mm. Posmična armatura su čelične sponne promjera 8 mm na razmaku od 130 mm za sve ispitane grede (slika 3.). Vlačnu armaturu greda čine čelične ili GFRP šipke s koeficijentom armiranja od 0,66 %. Normalni beton je korišten u gredi S0.OSF koja je bila armirana dvjema čeličnim šipkama promjera 12 mm u vlačnom području (to je kontrolna greda, CB). Normalni beton (NC) je korišten u gredi G0.OSF koja je armirana u vlačnom području uporabom dviju GFRP šipki promjera 12 mm, a s ciljem da se prouči utjecaj vlačne armature na savijanje i duktilnost grede (slika 4.).

Tablica 3. Oblik grede i parametri ispitivanja

Oznaka grede	Armiranje donjeg područja	Udio čeličnih vlakana [%]	Varijable ispitivanja
S0.OSF(CB)	Čelik	0	Kontrolni uzorak
G0.OSF	GFRP	0	Vrsta armiranja
S1.OSF	Čelik	1	Omjer čeličnih vlakana
G1.OSF	GFRP	1	Vrsta armiranja
S1.5SF	Čelik	1,5	Omjer čeličnih vlakana
G1.5SF	GFRP	1,5	Vrsta armiranja



Slika 3. Dimenzije i detalji armiranja ispitivanih greda (dimenzije u mm)

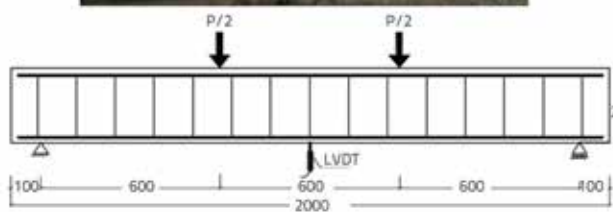
Dvije grede (S1.0SF i S1.5SF) koje imaju jednaku armaturu kao greda S0.OSF bile su izvedene betonom s 1 %, odnosno 1,5 % čeličnih vlakana, a s ciljem da se ispita utjecaj čeličnih vlakana na ponašanje grede. Naposljetku, dvije grede (G1.0SF i G1.5SF) koje imaju jednaku armaturu kao greda G0.OSF bile su izvedene koristeći beton s čeličnim vlaknima i to s 1,0 % čeličnih vlakana, odnosno 1,5 % čeličnih vlakana. Nakon ugradnje betona, grede su ostavljene 24 sata u kalupima, a zatim su stranice kalupa uklonjene. Grede su njegovane vodom 28 dana. Prije ispitivanja betonske grede obojene su bijelim plastičnim premazom koji omogućava opažanje pukotina tijekom ispitivanja.



Slika 4. Detalji armiranja greda

2.3. Postavke uzorka i opreme za ispitivanje

Sve su grede ispitivane savijanjem pomoću dviju koncentriranih sila (4PB) na slobodno oslonjenoj gredi efektivnog raspona od 1800 mm s posmičnim rasponom od 600 mm (slika 5.), a opterećenje je prestalo nakon što se čuo prasak loma (tj. puknuće armature ili drobljenje betona) ili je uređaj za mjerenje sile očitao veliko smanjenje rezultata pa je opterećenje bilo manje od 85 % maksimalne vrijednosti. Grede su opterećivane prateći prirast opterećenja s prirastom sile od 0,06 kN/s.



Slika 5. Postavke ispitnog uzorka te opreme za ispitivanje (dimenzije u mm)

Deformacija greda mjerena je na sredini raspona uporabom linearnog varijabilnog pretvarača duljine (LVDT) s najvećim područjem mjerenja od 100 mm. Ekstenzometar duljine 20 mm i otpornosti od $120 \pm 0,3 \Omega$ lijepiljen je na gornju plohu betonske grede kako bi se kvantificirala tlačna deformacija betona. Vlačne deformacije čeličnih i GFRP šipki mjerile su se tako što je na sredini šipke bio zalijepljen ekstenzometar duljine 5 mm i otpornosti od $120 \pm 0,3 \Omega$. Uređaj za mjerenje sile postavljen je ispod hidraulične preše uređaja za ispitivanje kako bi se zabilježilo opterećenje. Sustav prikupljanja podataka tijekom cijelog ispitivanja bilježio je opterećenja, vertikalni progib na sredini grede, relativne deformacije čelika, GFRP-a i betona (slika 5.).

3. Rezultati ispitivanja

3.1. Utjecaj čeličnih vlakana na svojstva betona

Svojstva betona dobivena eksperimentalnim testovima prikazana su u tablici 4. Uočava se upravo to da čelična vlakna uvelike utječu na mehanička svojstva betona, pogotovo na vlačnu čvrstoću (tj. povećanjem udjela čeličnih vlakana i do 1,5 %, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća postupno su se povećavale). To se opažanje podudara s rezultatima prikazanim u [47-51]. Čelična vlakna djeluju kao most preko pukotine koji prenosi naprezanje s jedne strane pukotine na drugu, što ujedno pomaže betonu da prenese veće vlačno naprezanje jer zatvara pukotine.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće betona

Vrsta betona	Udio čeličnih vlakana [%]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]
NC	0 %	38,7	4,5
FC1	1 %	40,8	5,1
FC2	1,5 %	42,1	5,3

3.2. Nosivost i načini sloma

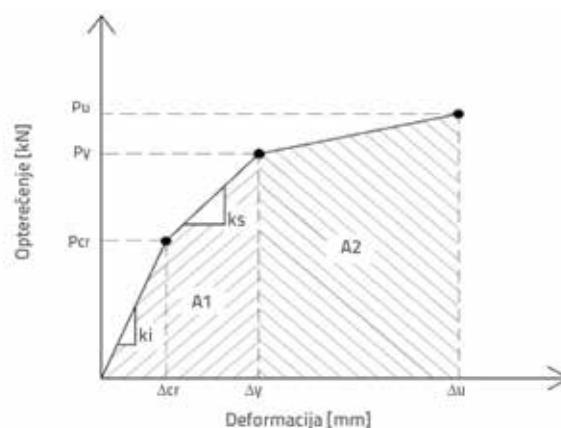
Tablica 5. prikazuje vrijednosti dobivene eksperimentalnim ispitivanjima. U tablici 5. navode se opterećenje pri raspucavanju

Tablica 5. Eksperimentalni rezultati ispitanih greda

Oznaka grede	P_{cr} [kN]	P_y [kN]	P_u [kN]	$P_u/P_{u,CB}$ (%)	Δ_{cr} [mm]	Δ_y [mm]	Δ_u [mm]	$\Delta_u/\Delta_{u,CB}$	K_i	μ_E	μ_d	Način otkazivanja
S0.0SF (CB)	20	75	94	-	3	25	55	1	6,66	1,25	1,1	Y, CC
G0.0SF	14	-	96	102	4	-	57	0,9	3,5	1,48	1,18	T, CC
S1.0SF	30	79	104	110	4	21	84	1,52	7,5	1,49	1,24	Y, CC
G1.0SF	22	-	113	120	5	-	80	1,45	4,4	2,2	1,41	T, CC
S1.5SF	35	82	110	117	4	17	85	1,54	8,75	2,08	1,88	Y, CC
G1.5SF	24	-	114	121	5	-	86	1,56	4,8	3,53	2,15	T, CC

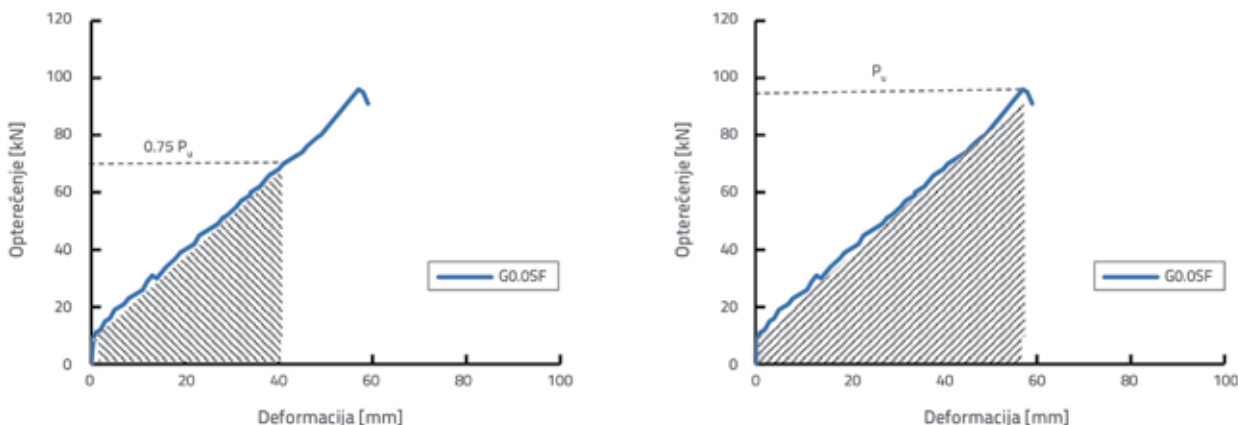
Y - popuštanje čelika (armaturne šipke koje su došle do popuštanja, tj. duktilni slom), CC - drobljenje betona (krhki slom), T - vlačni slom GFRP šipki

(P_{cr}), maksimalna vrijednost nosivosti (P_u), deformacija pri raspucavanju (Δ_{cr}), deformacija pri popuštanju (Δ_y), maksimalna deformacija (Δ_u), faktor deformabilnosti (μ_d), početna krutost (K_i), indeks duktilnosti (μ_E) te načini sloma ispitivanih greda. Početna krutost (K_i) je naznačena kao početni nagib radnog dijagrama, a određena je kao omjer opterećenja raspucavanja (P_{cr}) i deformacije raspucavanja (Δ_{cr}) [52] kao što je prikazano na slici 6. Faktor deformabilnosti (μ_d) za armiranobetonske konstrukcije s čelikom jednostavno se definira kao omjer konačne deformacije (Δ_u) ili deformacije koja odgovara 85 do 90 % maksimalne nosivosti [53] i deformacije pri popuštanju (Δ_y). U ovom istraživanju izračunava se faktor deformabilnosti (μ_d) čeličnih armiranobetonskih greda kao omjer deformacije pri 85 do 90 % nosivosti i deformacije pri popuštanju (Δ_y) (odnosno $\mu_d = (\Delta_{at\ 0,85 P_u} / \Delta_y)$).



Slika 6. Dijagram sila - pomak s prikazom početne krutosti [52]

Zbog linearnog odnosa naprezanja i deformacije FRP šipki, ta se tradicionalna definicija ne može primijeniti na građevine armirane FRP-om. Fadi i El-Hacha [54] utvrdili su novi model deformabilnosti građevina armiranih FRP-om. Vrijednost faktora deformabilnosti betonskog elementa armiranog FRP-om opterećenog savijanjem može se dobiti deformacijom koja odgovara 75 do 80 % nosivosti (tj. $\mu_d = (\Delta_u / \Delta_{at\ 0,75 P_u})$). Vrijednost duktilnosti (μ_E) može se definirati kao omjer između ukupne i elastične potencijalne energije. U slučaju greda armiranih FRP-om, ukupna energija (E_{tot}) može se odrediti ukupnim područjem



Slika 7. Izračun duktilnosti za uzorak G0.05F [55]: a) izračun E_e ; b) izračun E_{tot}

ispod krivulje sila - pomak do sloma, a elastična energija (E_e) može se odrediti iz krivulje sila - pomak i to kao 75 % graničnog opterećenja (nosivosti) [55] (slika 7.). Kada su grede armirane čelikom, ukupna energija (E_{tot}) može se odrediti kao ukupno područje ispod krivulje sila - pomak sve do $0,85 f_{cr}$, a elastična energija (E_{el}) se može izračunati do popuštanja. Duktilnost (μ_E) se može izraziti preko energije kao:

$$\mu_E = \frac{E_{tot}}{E_{el}} \quad \text{- za grede armirane čeličnim šipkama} \quad (2)$$

$$\mu_E = \frac{E_{tot}}{E_{0.75u}} \quad \text{- za grede armirane GFRP šipkama} \quad (3)$$

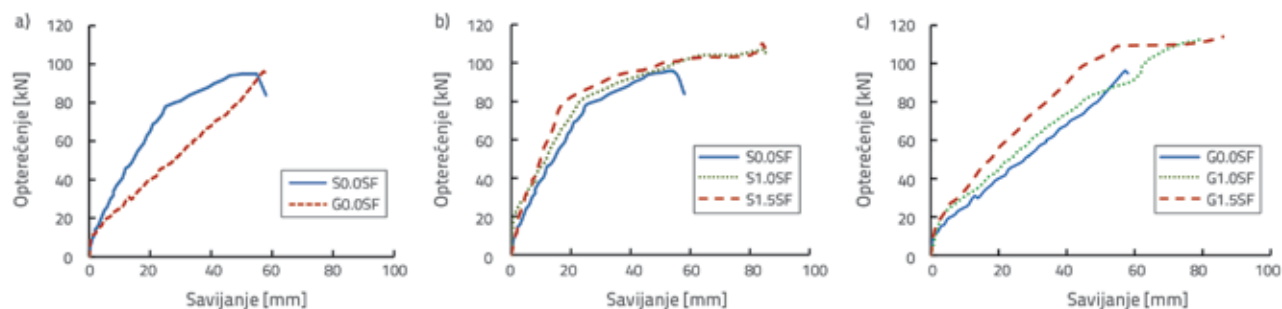
Uočeni načini sloma ispitivanih greda mogu se podijeliti u dvije kategorije. Prvu kategoriju čine duktilni oblici loma savijanjem, a drugu čine krhki lomovi pri drobljenju betona (eng. *concrete crushing* - CC). U neraspucalom stanju (prvo stanje), pukotine nisu uočene. U stanju poslije raspucavanja pa sve do popuštanja vlačne armature (drugo stanje), prve mikropukotine su uočene u slučaju greda armiranih čelikom i GFRP-om. Prva se pukotina formirala na dnu grede među dvjema točkama nanošenja opterećenja (čisto savijanje). S povećanjem opterećenja sve više pukotina počelo se stvarati i širiti prema vrhu grede, no pukotine se nisu vizualno širile. Treće stanje za grede armirane čeličnim šipkama počelo je pri popuštanju vlačne armature te završilo otkazivanjem elementa. U ovom stanju pukotine postaju šire i dulje nego u slučaju otkazivanja prekoračenjem tlačne čvrstoće betona (drobljenje betona), kao što je prikazano na slici 8.a. Greda G0.05F vlačno armirana GFRP šipkama otkazala je lomom jedne šipke,

nakon čega je došlo do drobljenja betona (slika 8.b). Otkazivanje greda s čeličnim vlaknima armirane čeličnim šipkama ili GFRP šipkama uzrokovano je savojnim slomom, nakon čega dolazi do gnječenja betona (slike 8.c do 8.e). Savojno otkazivanje započinje formiranjem pukotina na sredini grede. Više se pukotina stvaralo s povećanjem opterećenja, a zabilježeno je i premošćivanje čeličnih vlakana. Nakon toga, čelična vlakna počela su se izvlačiti iz betonske matrice. Vlakna su se izvlačila u presjecima gdje su grede dosegule svoj krajnji kapacitet opterećenja. Širine pukotina postajale su sve očitije i šire od drugih pukotina u gredi. Općenito, pukotine u gredama armiranim čeličnim šipkama bile su uže nego one u gredama armiranim GFRP šipkama (slika 8.) jer GFRP šipke imaju manju krutost od čeličnih.

Dio čeličnih šipki koje su smještene na sredini pukotine doživio je veliko produljenje nakon kojega je nanošenje opterećenja zaustavljeno. Nosivost greda od normalnog betona armiranog



Slika 8. Uzorci pukotina i načini sloma: a) S0.05F (CB); b) G0.05F; c) S1.05F; d) S1.55F; e) G1.55F



Slika 9. Odnos opterećenje - pomak svih ispitivanih greda: a) Utjecaj vrste armature; b) Učinak udjela čeličnih vlakana za slučaj armiranja čelikom; c) Učinak udjela čeličnih vlakana za slučaj armiranja GFRP-om

s GFRP-om bila je otprilike ista kao i nosivost grede armirane čelikom (samo 2 % razlike, tablica 4.). Povećanjem udjela čeličnih vlakana, povećala se i nosivost grede. Nosivost greda armiranih čelikom povećala se za 10 % kad im je dodano 1 % čeličnih vlakana, odnosno 17 % kad im je dodano 1,5 % čeličnih vlakana. S druge strane, nosivost greda armiranih GFRP šipkama povećala se za 20 % kad im je dodano 1 % čeličnih vlakana, odnosno za 21 % kad im je dodano 1,5 % čeličnih vlakana. Te spoznaje dokazale su da dodavanje čeličnih vlakana poboljšava savojno ponašanje (maksimalno opterećenje, deformabilnost i duktilnost) armiranih greda. Iste su spoznaje sažete u [56], a pokazale su da je dodavanje 1 % čeličnih vlakana s kukom gredama koje su armirane FRP-om poboljšalo njihovu duktilnost tako da su slične gredama s čeličnim šipkama.

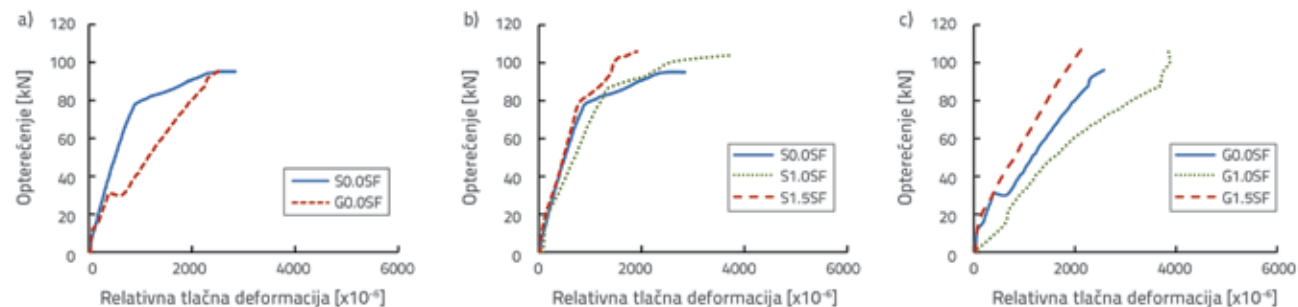
3.3. Odnos opterećenje - progib

Slika 9 pokazuje odnos opterećenja i progiba na sredini grede za ispitane uzorke. Sve ispitane grede prošle su kroz tri faze reakcije prije sloma. U neraspucalnoj fazi (prvoj fazi) odnos opterećenja i progiba se povećavao linearno. U drugoj fazi zabilježen je linearni odnos opterećenja i progiba za sve ispitane grede s povećavanjem progiba grede. U trećoj fazi, u slučaju greda armiranih čeličnim šipkama, krutost greda smanjivala se uz povećavanje progiba grede. S druge pak strane, treća faza nije baš posve jasna u slučaju greda armiranih GFRP šipkama zbog linearnoelastičnog ponašanja FRP materijala. Na krutost krivulje opterećenje-deformacija u slučaju greda armiranih GFRP-om utjecalo je izvlačenje čeličnih vlakana. Bilo je očito da su čelična

vlakna u betonu omogućila armiranim gredama da dožive veći progib prije sloma, a uz to su povećala njihovu nosivost, početnu krutost i sposobnost deformacije. Povećanje krutosti armiranih greda zbog čeličnih vlakana u skladu je s onim objavljenim u [57]. Jednako tako, kad se koriste GFRP šipke umjesto čeličnih šipki, smanjeno je opterećenje pod kojim dolazi do raspucavanja betona, ali dolazi i do približavanja vrijednosti nosivosti između tih dvaju slučajeva. Rezultati su pokazali da je početna krutost greda armiranih GFRP-om za otprilike 47,4 % manja od početne krutosti greda armiranih čelikom za grede bez čeličnih vlakana. Razlog što je tomu tako je taj da GFRP šipke imaju nizak modul elastičnosti koji je potaknuo iznenadni gubitak krutosti grede. Osim toga, uporabom GFRP-a umjesto čelika kao armature povećala se vrijednost duktilnosti za otprilike 18,4 % za grede bez čeličnih vlakana. S druge pak strane, početna krutost, indeks duktilnosti i deformabilnost povećali su se kad su grede armirane čelikom ili GFRP-om bile izvedene od betona s čeličnim vlaknima.

3.4. Relativna tlačna deformacija

Relativna tlačna deformacija mjerila se na gornjoj plohi ispitivanih greda. Rezultati ispitivanja pokazali su da je relativna tlačna deformacija betona izravno proporcionalna količini čeličnih vlakana. Također, u slučaju ispitivanih greda od normalnog betona pri dosezanju krajnjeg opterećenja, otkazivanje je uzrokovano gnječenjem betona, a deformacija armature naglo je pala. Nasuprot tomu, u slučaju uzoraka s FC-om, relativna deformacija armature nastavila se povećavati sve do sloma.



Slika 10. Odnos opterećenja i relativne tlačne deformacije svih testiranih greda: a) utjecaj vrste armature; b) učinak udjela čeličnih vlakana za slučaj armiranja čelikom; c) učinak udjela čeličnih vlakana za slučaj armiranja GFRP-om

Slika 10. prikazuje odnos opterećenja i relativne tlačne deformacije svih ispitivanih greda. Ta slika pokazuje da je uporaba GFRP šipki umjesto čeličnih šipki povećala relativnu tlačnu deformaciju u slučaju uzoraka koji nemaju čelična vlakna (NC - normalni beton). Kad je riječ o gredama koje su armirane čeličnim šipkama s FC-om (1 % čeličnih vlakana), tlačna deformacija povećala se neznatno, unatoč tomu što je 1,5 % čeličnih vlakana smanjilo tlačnu deformaciju vrlo malo. Nešto izraženiji ishod postignut je u slučaju greda armiranih GFRP šipkama.

4. Numerička analiza

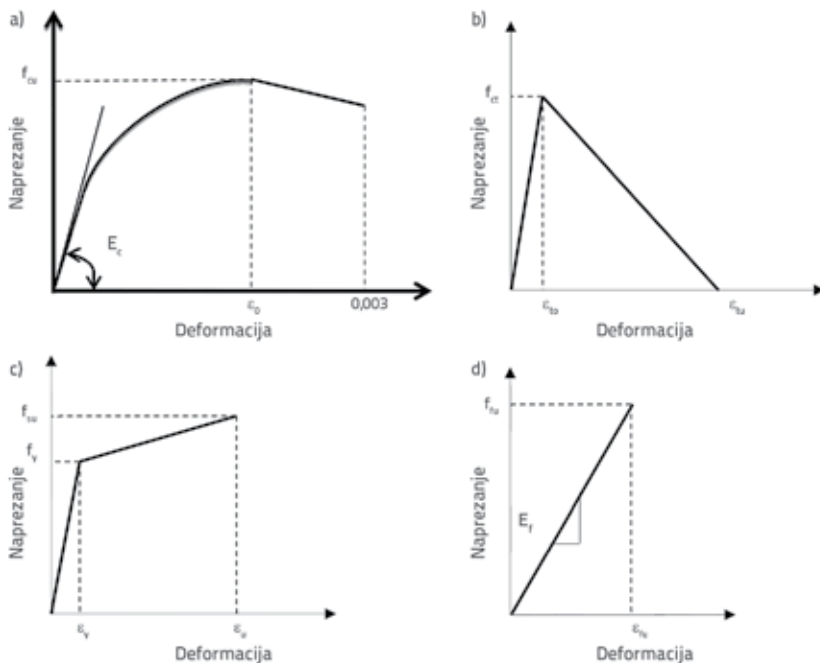
U ovom radu provedena je numerička analiza uporabom ANSYS 15 FE programa s ciljem proučavanja ponašanja armiranih greda koje imaju različitu armaturu i izvedene su normalnim betonom i betonom s čeličnim vlaknima. Radni dijagram materijala, kao i jednoosni modul elastičnosti te vlačna čvrstoća i Poissonov omjer betona definirani su ovisno o eksperimentalnim ishodima, a s ciljem kako bi se napravio model s čeličnim vlaknima i bez njih u ANSYS-u. Opsežna numerička analiza i usklađivanje eksperimentalnih podataka primjenjeni su da bi se usvojile vrijednosti Poissonovog omjera za normalni beton i beton pojačan čeličnim vlaknima [58]. Model betona s razmazanim pukotinama bio je korišten u svim modelima kako bi se simuliralo ponašanje normalnog betona i betona pojačanog čeličnim vlaknima. Multilinearna izotropija betona prikazana je točkama na radnom dijagramu. Relativna deformacija betona pri najvećem napreznju gotovo da je konstanta i jednaka je 0,2 %, a relativna deformacija pri slomu približno je jednaka 0,3 % kao što je zabilježeno u ECP 203-2007 [59]. Ako je beton visoke čvrstoće, tada se približava 0,4 % kao što je zabilježeno ACI i CSA propisima. Uzlazni dio krivulje je parabola na način kako ju definira Hognestad's [60], a preostali dio krivulje smatra se konstantom (idealna krivulja, slika 11.a). Odnos napreznja i relativne deformacije može se odrediti prema izrazu (4):

$$f_c = 0.67f_{cu} \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \tag{4}$$

gdje je:

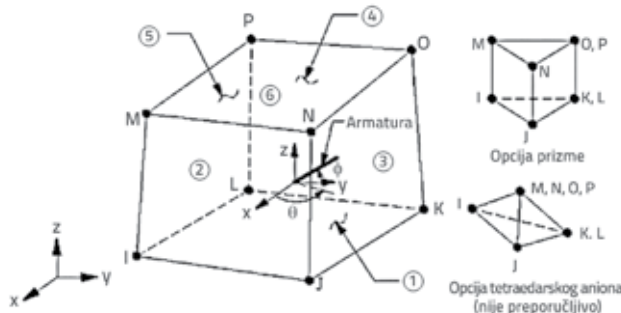
- E_c - modul elastičnosti betona
- f_c - napreznje betona pri određenoj relativnoj deformaciji
- f_{cu} - tlačna čvrstoća betona
- ε_c - relativna deformacija betona, $\varepsilon_0 = 0,002$.

Maksimalno tlačno napreznje betona jednako je $(0,67 f_{cu})$ kao što je zabilježeno u ECP 203-2007 [59]. Kako bi se isključila



Slika 11. Radni dijagrami korišteni za modeliranje betona te čeličnih i GFRP šipki: a) beton u tlaku; b) beton u vlaklu; c) čelik; d) FRP

moogućnost raspucavanja i drobljenja betona, konstantna vrijednost od -1 za jednoosnu čvrstoću raspucavanja ili jednoosnu tlačnu čvrstoću također isključuje mogućnost raspucavanja, odnosno drobljenja. Jednako tako, radni dijagram korišten za modeliranje betona u vlaklu prikazan je na slici 11.b (f_{tu} je vlačna čvrstoća betona, ε_{to} i ε_{tu} su relativne deformacije pri dosezanju f_{tu} odnosno pri slomu). Kako bi se modelirale armirane grede u ANSYS-u, koristio se element (Solid 65) za beton s čeličnim vlaknima i bez njih. Element Solid 65 ima osam čvorova i šest stupnjeva slobode na svakom čvoru (tri translacije i tri rotacije). Taj element ima oblik četverostrane prizme i ima sposobnost plastične deformacije, pukotina u tri ortogonalna smjera. Shema elementa Solid 65 prikazana je na slici 12.



Slika 12. Element Solid 65 (ANSYS)

Korištena je realna konstanta kako bi se u element Solid 65 uključio udio čeličnih vlakana u betonu. U tablici 6. prikazan je izabrani parametar za beton s čeličnim vlaknima i bez njih, a koji je određen analizom osjetljivosti.

Tablica 6. Usvojene vrijednosti primijenjenih parametara za tri vrste betona

Parametar	NC (bez SF)	FC (1 % SF)	FC (1,5 % SF)
Poissonov omjer	0,2	0,225	0,225
Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]	36	38	39
Jednoosna vlačna čvrstoća [MPa]	3,6	4,5	5
Koeficijent prijenosa posmika pri otvorenoj pukotini	0,2	0,5	0,5
Koeficijent prijenosa posmika pri zatvorenoj pukotini	0,8	0,8	0,8

$E_c = 440 \times [59]$ gdje je E_c modul elastičnosti betona i f_{cu} je tlačna čvrstoća betona pri starosti od 28 dana.

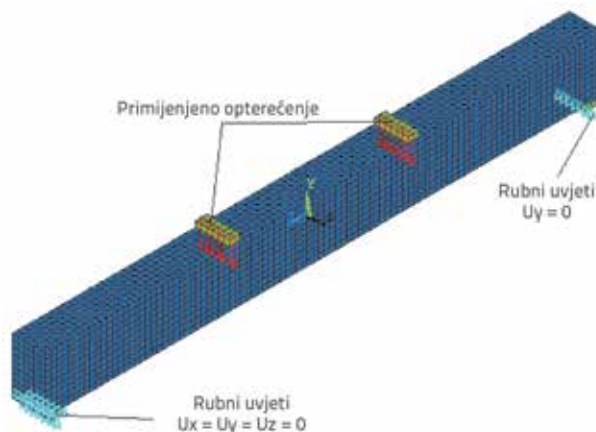
U ovom istraživanju greda je modelirana uporabom diskretne armature, pa je unesena vrijednost nule za realnu konstantu, a to je isključilo mogućnost da se u sklopu elementa Solid 65 zadaje razmazana armatura. Vlačna plastičnost modelirana je za čelične šipke, a FRP šipke modelirane su elastično do sloma (slike 11.c i 11.d) u kojoj su f_{sd} , f_f , ε_y i ε_u vlačna čvrstoća, granica popuštanja, relativna deformacija pri popuštanju i krajnja relativna deformacija čelika, dok su E_f , f_{fu} i ε_{fu} modul elastičnosti, vlačna čvrstoća i relativna deformacija pri slomu FRP-a. Usvojeni su detaljni parametri za GFRP šipke, a koji su eksperimentalno dobiveni. Svojstva materijala AFRP i CFRP šipki uzeta su iz dokumenta Egyptian code of Practice (ECP 208-2005 [61]) kao modul elastičnosti od 70 GPa, odnosno 110 GPa. Element Solid 185 izabran je za čelične ploče preko kojih je uneseno opterećenje u gredu. To je element s osam čvorova i tri stupnja slobode. Element Link 180 je korišten za modeliranje uzdužne čelične, FRP i poprečne armature. To je 3D element s tri stupnja slobode. Realna konstanta za Link 180 predstavlja ploštinu poprečnog presjeka uzdužne armature čelika, šipki FRP-a i poprečne armature. Pretpostavlja se savršeno prianjanje betona i armature. Konačni elementi koji predstavljaju rebrastu armaturu spojeni su s odgovarajućim betonskim elementima kako bi se izbjeglo proklizavanje između armature i betona u modelu. Slika 13. prikazuje ANSYS model koji predstavlja uvjete opterećenja, uvjete oslanjanja i rubne uvjete.

Sve mreže betonskih elemenata bile su kocke i to simetrične, a svaki put nakon vlačnog ili tlačnog sloma one bi se iskrivile. Diskretizacija presjeka grede izvedena je zbog transversalne i longitudinalne simetrije. Primijenjena je standardna Newton-Raphsonova metoda iteracije kako bi se riješio nelinearni sustav jednadžbi ravnoteže metodom konačnih elemenata u ANSYS-u, a koju je prikazao inženjer Vladimir Ivanko [62]. Usvojena je veličina mreže konačnih elemenata od 25 mm za sve modelirane grede u skladu s provedenom analizom osjetljivosti. Kriteriji konvergencije metode konačnih elemenata definirani su

u odnosu na pomak s tolerancijom od 0,01, a ta tolerancija može se povećati kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za proračun te broj koraka kojim se dolazi do savršenog rješenja za testirane grede.

4.1. Potvrda modela konačnih elemenata

Eksperimentalni rezultati potvrdili su modelirane grede. Slika 14. pokazuje odnos opterećenja i progiba za eksperimentalne (E) i modele s konačnim (F) elementima. Sa slike je vidljiva dobra usklađenost numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Ta je usklađenost potvrdila da se modelom moglo precizno simulirati betonske grede s čeličnim vlaknima armirane FRP-om ili čeličnom armaturom.



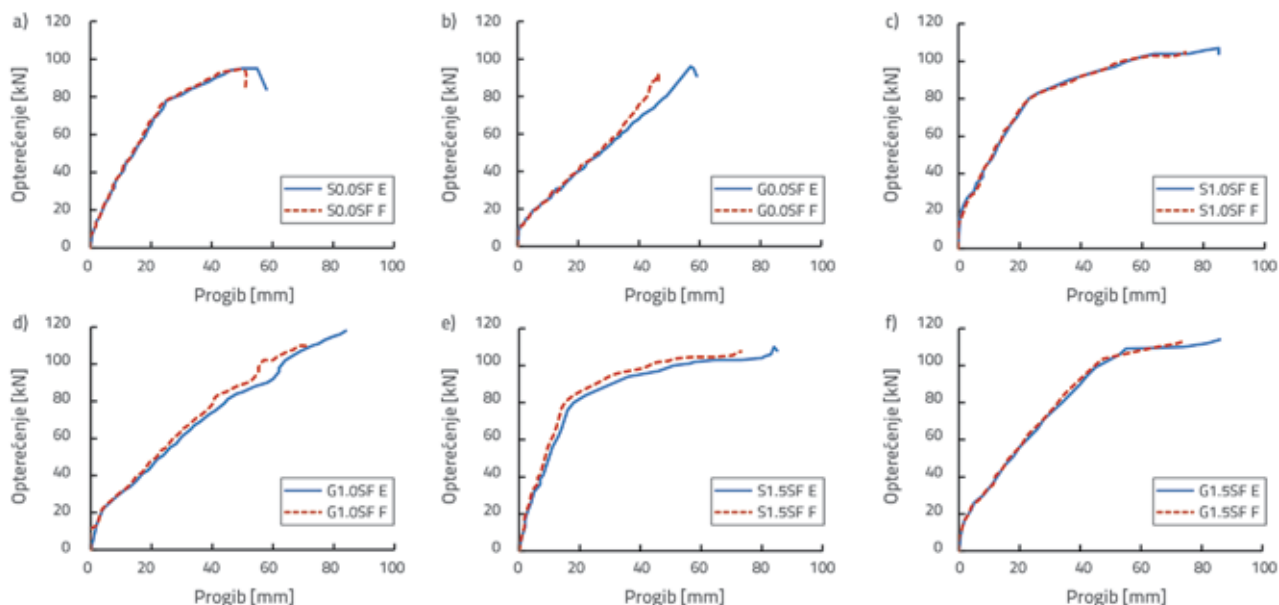
Slika 13. Mreža konačnih elemenata i rubni uvjeti modela

4.2. Parametarsko istraživanje i numerički rezultati simuliranih greda

U ovom parametarskom istraživanju primjenjuje se potvrđeni model. Ispitan je utjecaj FRP šipki (staklo, aramid i ugljik) i koeficijent armiranja (0,54 % i 0,913 %) te udio volumena čeličnih vlakana 0 %, 1 % i 1,5 %) na savijanje greda. Parametarsko istraživanje provedeno je u dvjema skupinama (skupina A i skupina B). Prva skupina (A) sastoji se od betonskih greda armiranih koeficijentom armiranja (ρ_s) = 0,54 % (3 šipke promjera 16 mm). Druga skupina (B) sastoji se od betonskih greda armiranih koeficijentom armiranja (ρ_s) = 0,913 % (5 šipki promjera 16 mm).

Modelirane grede su opterećene kontrolom prirasta pomaka do sloma. Tablica 7. prikazuje numeričke rezultate simuliranih greda u smislu opterećenja pri raspucavanju (P_c), opterećenja pri popuštanju (P_v) i krajnje opterećenje (P_u). Može se vidjeti iz tablice da se vrijednosti krajnjeg opterećenja simuliranih greda povećavaju povećanjem udjela čeličnih vlakana i količine armature.

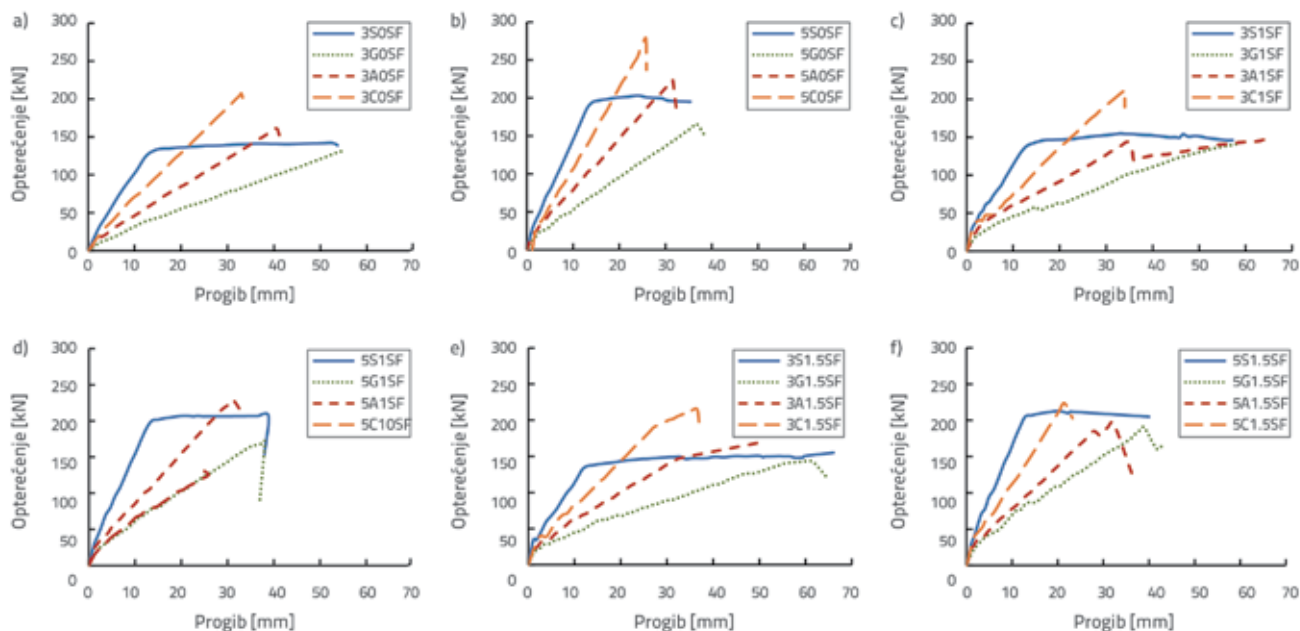
S druge strane, krajnje opterećenje greda armiranih GFRP šipkama i čeličnim šipkama bliže je jedno drugome, dok su grede armirane AFRP i CFRP šipkama pokazale veću nosivost.



Slika 14. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata: a) čelične šipke s 0 % čeličnih vlakana (SF); b) GFRP šipke s 0 % čeličnih vlakana (SF); c) čelične šipke s 1,0 % čeličnih vlakana (SF); d) GFRP šipke s 1,0 % čeličnih vlakana (SF); e) čelične šipke s 1,5 % čeličnih vlakana (SF); f) GFRP šipke s 1,5 % čeličnih vlakana (SF)

Tablica 7. Numerički rezultati simuliranih gređa

Uzorci, ID	V_f [%]	Vrste šipke	Broj šipki	P_{cr} [kN]	P_y [kN]	P_u [kN]
3S0SF	0	Čelik	3	30	125	139
3G0SF		Staklo	3	13	-	135
3A0SF		Aramid	3	20	-	161
3C0SF		Ugljik	3	29	-	206
5S0SF	0	Čelik	5	44	187	202
5G0SF		Staklo	5	24	-	166
5A0SF		Aramid	5	30	-	220
5C0SF		Ugljik	5	37,5	-	278
3S1SF	1	Čelik	3	37	131	149
3G1SF		Staklo	3	16	-	141
3A1SF		Aramid	3	25	-	164
3C1SF		Ugljik	3	30	-	210
3S1.5SF	1,5	Čelik	3	41	139	155
3G1.5SF		Staklo	3	17,5	-	144
3A1.5SF		Aramid	3	28,7	-	169
3C1.5SF		Ugljik	3	33	-	216
5S1SF	1	Čelik	5	50	192	207
5G1SF		Staklo	5	26	-	171
5A1SF		Aramid	5	33	-	228
5C1SF		Ugljik	5	44	-	283
5S1.5SF	1,5	Čelik	5	55	205	215
5G1.5SF		Staklo	5	26	-	188
5A1.5SF		Aramid	5	36	-	239
5C1.5SF		Ugljik	5	46	-	288



Slika 15. Odnos opterećenja i progiba za sve testirane grede: a) 0 % čeličnih vlakana (SF) i ρ_1 ; b) 0 % čeličnih vlakana (SF) i ρ_2 ; c) 1,0 % čeličnih vlakana (SF) i ρ_1 ; d) 1,0 % čeličnih vlakana (SF) i ρ_2 ; e) 1,5 % čeličnih vlakana (SF) i ρ_1 ; f) 1,5 % čeličnih vlakana (SF) i ρ_2

Jednako tako, krajnje opterećenje betonskih greda neznatno se povećalo uporabom čeličnih vlakana bez obzira na to koji je koeficijent armiranja korišten (ρ_1 i ρ_2). Krajnje opterećenje greda armiranih AFRP-om i CFRP-om povećalo se za 15 %, odnosno za 48 % u odnosu na kontrolne grede armirane čeličnim šipkama s koeficijentom armiranja (ρ_1) = 0,54 %. Nasuprot tome, krajnje opterećenje greda armiranih AFRP-om i CFRP-om povećalo se za 9 % odnosno za 37 % u odnosu na kontrolne grede armirane čeličnim šipkama s koeficijentom armiranja (ρ_2) = 0,913 %. Štoviše, povećanje vrijednosti ρ s 0,54 % na 0,913 % povećalo je krajnje opterećenje simuliranih greda armiranih čeličnim, GFRP, AFRP i CFRP šipkama za 45 %, 23 %, 36,6 %, odnosno 35 %. Naposljetku, opaža se da povećanje udjela volumena čeličnih vlakana s 0 % na 1,5 % dovodi do malog povećanja krajnjeg opterećenja simuliranih greda. U slučaju greda s armaturom ρ_1 , krajnje opterećenje greda armiranih čeličnim, GFRP, AFRP i CFRP šipkama povećalo se za 11,5 %, 6,6 %, 5 %, odnosno za 4,8 % kad se udio čeličnih vlakana povećao s 0 % na 1,5 %. S druge strane, za grede s armaturom ρ_2 , krajnje opterećenje greda armiranih čeličnim, GFRP, AFRP i CFRP šipkama povećalo se za 6,4 %, 13 %, 5 %, odnosno za 8,6 % kada se udio čeličnih vlakana povećao s 0 % na 1,5 %. Odnosi opterećenja i progiba, prikazani na slici 15., iscrtani su kako bi predstavio odnos između opterećenja i deformacije simuliranih greda u sredini raspona, i to u različitim fazama opterećenja. Sve simulirane grede pokazale su linearno ponašanje od početnog opterećenja do prve pukotine. Nakon prve pukotine, nastavilo se djelomično linearno ponašanje grede armirane FRP-om sve do loma. Grede s čeličnim vlaknima bile su kruće nego one bez čeličnih vlakana. Za sve simulirane grede izračunani su faktor deformabilnosti (μ_d) i indeks duktilnosti (μ_E) koji se koriste prije spomenutom definicijom. Povećanje

koeficijenta armiranja ρ s 0,54 % na 0,913 % za simulirane grede izazvalo je smanjenje faktora deformabilnosti grede. U slučaju kad je udio čeličnih vlakana 0 %, faktor deformabilnosti smanjio se za 13,6 % za čelične grede, 2,9 % za GFRP šipke, 2,8 % za AFRP šipke i 0,8 % za CFRP šipke. Kad je udio čeličnih vlakana 1,5 %, faktor deformabilnosti smanjio se za 12,1 % za čelične šipke, 9,8 % za GFRP šipke, 8,3 % za AFRP šipke i 1,2 % za CFRP šipke. Nasuprot tome, povećanje udjela čeličnih vlakana s 0 % na 1,5 % povećalo je faktor deformabilnosti simuliranih greda. U slučaju greda s ρ_1 , povećanje udjela čeličnih vlakana s 0 % na 1 % povećalo je faktor deformabilnosti za 7,2 % za čelične šipke, 8 % za GFRP šipke, 21,4 % za AFRP šipke i 9,2 % za CFRP šipke. Štoviše, povećanje udjela čeličnih vlakana s 0 % na 1 % povećalo je faktor deformabilnosti za 12,8 % za čelične šipke, 27 % za GFRP šipke, 29,3 % za AFRP šipke i 26,9 % za CFRP šipke. U slučaju greda s ρ_2 , povećanje udjela čeličnih vlakana s 0 % na 1 % povećalo je faktor deformabilnosti za 7,4 % za čelične šipke, 12 %, za GFRP šipke, 14 % za AFRP šipke i 11,6 % za CFRP šipke, dok pri povećanju udjela čeličnih vlakana na 1,5 % faktor deformabilnosti povećao se za 14,8 % za čelične šipke, 18 % za GFRP šipke, 22 % za AFRP šipke i 26,4 % za CFRP šipke.

Vrsta armature u velikoj mjeri utjecala je na indeks duktilnosti (μ_E) simuliranih greda.

Mijenjanje armature iz čeličnih šipki u armiranje GFRP, AFRP i CFRP šipkama s omjerom ρ_1 povećalo je μ_E za 23,7 %, 22,4 %, odnosno 14,5 %. Mijenjanje armature iz čeličnih šipki u GFRP, AFRP i CFRP šipke s koeficijentom armiranja ρ_2 povećalo je μ_E za 50 %, 52,5 %, odnosno 45,8 %. Štoviše, povećanje udjela čeličnih vlakana s 0 % na 1,5 % povećalo je μ_E simuliranih greda. U slučaju greda s koeficijentom armiranja ρ_1 , vrijednosti μ_E povećale su se za 13,2 % i 21,1 % (čelik), 9,8 % i 28,8 % (GFRP), 28 % i 42,5 %

(AFRP), te 18,4 % i 31,6 % (CFRP) kad se udio čeličnih vlakana promijenio s 0 % na 1 %, odnosno s 0,5 % na 1,5 %. S druge strane, u slučaju greda s koeficijentom armiranja ρ_2 , vrijednosti μ_E povećale su se za 11,9 % i 25,4 % (čelik), 5,6 % i 22,6 % (GFRP), 15,8 % i 28,3 % (AFRP), za 13,4 % i 32 % (CFRP) šipke kad se udio čeličnih vlakana promijenio s 0 % na 1 %, odnosno s 0 % na 1,5 %. Naposljetku, povećanje koeficijenta armiranja (ρ) s 0,54 % na 0,913 % kod simuliranih greda smanjilo je vrijednosti μ_E . U slučaju kad je udio čeličnih vlakana 0 %, vrijednosti μ_E smanjile su se za 22,4 % za čelične šipke, 5,9 % za GFRP šipke, 3,2 % za AFRP šipke te 1,15 % za CFRP šipke.

5. Zaključak

U ovom istraživanju provedena su eksperimentalna i numerička ispitivanja kako bi se odredio utjecaj uporabe FRP šipki i čeličnih vlakana na savijanje armiranobetonskih greda. Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Nosivost ispitanih betonskih greda armiranih čelikom ili GFRP šipkama povećala se s povećanjem udjela čeličnih vlakana (SF) u betonu. U slučaju betonskih greda armiranih čeličnim šipkama, nosivost se povećala za 10 % kad se dodalo 1 %, odnosno 17 % kad se dodalo 1,5 % čeličnih vlakana. S druge strane, dodavanjem 1 % i 1,5 % čeličnih vlakana betonskim gredama armiranih GFRP šipkama povećala se njihova nosivost za 20 %, odnosno za 21 %. Uporaba GFRP armature umjesto čelične povećala je indeks duktilnosti za približno 18,4 % za armiranobetonske grede bez čeličnih vlakana, a početna krutost smanjila se za približno 47,4 %.
- Numeričkom analizom ustanovljeno je da se nosivost greda armiranih AFRP-om i CFRP-om povećala za 15 %, odnosno 48 % u odnosu na kontrolne grede armirane čeličnim šipkama kada je koeficijent armiranja iznosio (ρ_1) = 0,54 %. S druge strane, nosivost greda armiranih AFRP-om i CFRP-om povećala se za 9 %, odnosno za 37 % u odnosu na kontrolne grede armirane čeličnim šipkama kada je koeficijent armiranja iznosio (ρ_2) = 0,913 %.
- Povećanje koeficijenta armiranja ρ s 0,54 % na 0,913 % za simulirane grede izazvalo je smanjenje faktora deformabilnosti kod grede. U slučaju kad je udio čeličnih vlakana 0 %, faktor deformabilnosti smanjio se za 13,6 % za čelične šipke, 2,9 % za GFRP šipke, 2,8 % za AFRP šipke, 0,8 % za CFRP šipke. U slučaju kad je udio čeličnih vlakana 1,5 %, faktor deformabilnosti smanjio se za 12,1 % za čelične šipke, 9,8 % za GFRP šipke, 8,3 % za AFRP šipke, 1,2 % za CFRP šipke.
- Vrsta armature u velikoj je mjeri utjecala na indeks duktilnosti (μ_E) simuliranih greda. Mijenjanje vrste armature s koeficijentom armiranja ρ_1 iz čeličnih šipki u GFRP, AFRP i CFRP šipke povećalo je μ_E za 23,7 %, 22,4 %, odnosno 14,5 %. Mijenjanje vrste armature za koeficijent armiranja ρ_2 iz čeličnih šipki u GFRP, AFRP i CFRP šipke povećalo je μ_E za 50 %, 52,5 %, odnosno 45,8 %.

LITERATURA

- [1] El-Salakawy, E.F., Benmokrane, B.: Serviceability of concrete bridge deck slabs reinforced with FRP composite bars, *ACI Structural Journal*, 101 (2014) 5, pp. 727–36
- [2] Rashid, M., Mansur, M., Paramasivam, P.: Behavior of aramid fiber-reinforced polymer reinforced high strength concrete beams under bending, *Journal of Composites for Construction*, 9 (2005) 2, pp. 117–27
- [3] Duic, J., Kenno, S., Das, S.: Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar, *Construction and Building Materials*, 176 (2018) 10, pp. 470–81
- [4] Rafi, M.M., Nadjai, A., Ali, F., Talamona, D.: Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending, *Construction and Building Materials*, 22 (2018) 3, pp. 277–85
- [5] El-Nemr, A., Ahmed, E.A., Benmokrane, B.: Flexural behavior and serviceability of normal-and high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars, *ACI Structural Journal*, 110 (2013) 6, pp. 1077
- [6] El-Nemr, A., Ahmed, E.A., Barris, C., Benmokrane, B.: Bond-dependent coefficient of glass-and carbon-FRP bars in normal-and high-strength concretes, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 15, pp. 77–89
- [7] Rahman, S.H., Mahmoud, K., El-Salakawy, E.: Behavior of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete continuous T-beams, *Journal of Composites for Construction*, 21 (2016) 2, 04016085
- [8] Al-Sunna, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M.: Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation, *Composites Part B: Engineering*, 43 (2012) 5, pp. 2125–3214
- [9] Yang, J.M., Min, K.H., Shin, H.O., Yoon, Y.S.: Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars, *Composites Part B: Engineering*, 43 (2012) 3, pp. 1077–1086
- [10] Yoo, D.Y., Banthia, N., Yoon, Y.S.: Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars, *Engineering Structures*, 111 (2016) 15, pp. 246–262
- [11] Vijay, P.V., GangaRao, H.V.: Bending behavior and deformability of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete members, *Journal of Structural Engineering*, 98 (2001) 6, pp. 834–842
- [12] Wang, H., Belarbi, A.: Ductility characteristics of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 5, pp. 2391–2401
- [13] Mohamed, N., Farghaly, A.S., Benmokrane, B.: Aspects of deformability of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars, *Journal of Structural Engineering*, 19 (2014) 5, 06014001
- [14] Oehlers, D.J., Seracino, R.: Design of FRP and steel plated RC structures: retrofitting beams and slabs for strength, stiffness and ductility, Elsevier, Oxford, United Kingdom, 2004.

- [15] Bank, L.C.: Composites for construction: structural design with FRP materials, John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [16] Holloway, L.C., Teng, J.G.: Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2008.
- [17] Jakubovskis, R., Kaklauskas, G., Gribniak, V., Weber, A., Juknys, M.: Serviceability analysis of concrete beams with different arrangements of GFRP bars in the tensile zone, *Journal of Composites for Construction*, 18 (2014) 5, 04014005
- [18] Safan, M.A.: Flexural behavior and design of steel-GFRP reinforced concrete beams, *ACI Materials Journal*, 110 (2013) 6, pp. 677
- [19] Adam, M.A., Said, M., Mahmoud, A.A., Shanour, A.S.: Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars, *Construction and Building Materials*, 84 (2015), pp. 354–366
- [20] Islam, S., Afefy, H.M., Sennah, K., Azimi, H.: Bond characteristics of straight and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 83 (2015), pp. 283–98
- [21] Omar, I., Abdelkarim, E., Ahmedb, A., Hamdy, M.M., Benmokrane, B.: Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars, *Engineering Structures*, 186 (2019), pp. 282–296
- [22] Maranan, G.B., Manalo, A.C., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P., Nguyen, T.Q.: Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements, *Engineering Structures*, 182 (2019), pp. 141–152
- [23] Yang, W., He, H., Dai, L.: Damage behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars, *Composite Structures*, 161 (2017), pp. 173–186
- [24] Araba, A.M., Ashour, A.F.: Flexural performance of hybrid GFRP-Steel reinforced concrete continuous Beams, *Composites Part B: Engineering*, 154 (2018), pp. 321–336
- [25] Habeeb, M., Ashour, A.F.: Flexural behavior of continuous GFRP reinforced concrete beams, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 12 (2008), pp. 115–24
- [26] Mahroug, M., Ashour, A.F., Lam, D.: Experimental response and code modeling of continuous concrete slabs reinforced with BFRP bars, *Composite Structures*, 107 (2014), pp. 664–674
- [27] Mahroug, M., Ashour, A.F., Lam, D.: Tests of continuous concrete slabs reinforced with carbon fibre reinforced polymer bars, *Composites Part B: Engineering*, 66 (2014), pp. 348–357
- [28] Bischoff, P.H., Gross, S.: Design approach for calculating deflection of FRP reinforced concrete, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 15 (2011) 4, pp. 490–499
- [29] Bischoff, P.H., Gross, S.: Equivalent moment of inertia based on integration of curvature, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 15 (2011) 3, pp. 263–273
- [30] Mousavi, S.R., Esfahani, M.R.: Effective moment of inertia prediction of FRP-reinforced concrete beams based on experimental results, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 16 (2012) 5, pp. 490–498
- [31] Correia, J.R., Branco, F.A., Ferreira, J.G.: Flexural behaviour of GFRP-concrete hybrid beams with interconnection slip, *Composite Structures*, 77 (2007), pp. 66–78
- [32] Correia, J.R., Branco, F.A., Ferreira, J.: GFRP-concrete hybrid cross-sections for floors of buildings, *Engineering Structures*, 31 (2009), pp. 1331–1343
- [33] Correia, J.R., Branco, F.A., Ferreira, J.G.: Flexural behaviour of multi-span GFRP concrete hybrid beams, *Engineering Structures*, 31 (2009), pp. 1369–1381
- [34] Santos, N., La Rovere, H.L.: Composite concrete/GFRP slabs for footbridge deck systems, *Composite Structures*, 92 (2010), pp. 2554–2564
- [35] Mendes, P.J.D., Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Taheri, M.: Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck, *Composite Structures*, 93 (2011), pp. 2969–2982
- [36] El-Hacha, R., Chen, D.: Behaviour of hybrid FRP-UHPC beams subjected to static flexural loading, *Composites Part B: Engineering*, 43 (2012), pp. 582–593
- [37] Neagoe, C.A., Gil, L., Pérez, M.A.: Experimental study of GFRP-concrete hybrid beams with low degree of shear connection, *Construction Building Materials*, 101 (2015), pp. 141–51
- [38] Nguyen, H., Rahall, N.J., Zatar, W.: Flexural behavior of hybrid composite beams, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, (2013), pp. 53–63
- [39] Gonilha, J.A., Barros, J., Correia, J.R., Sena-Cruz, J., Branco, F.A., Ramos, L.F. et al.: Static, dynamic and creep behaviour of a full-scale GFRP-SFRSCC hybrid footbridge, *Composite Structures*, 118 (2014), pp. 496–509
- [40] Hulatt, J., Holloway, L., Thorne, A.: The use of advanced polymer composites to form an economic structural unit, *Construction Building Materials*, 17 (2003), pp. 55–68
- [41] Koaik, A., Bel, S., Jurkiewicz, B.: Shear connections between GFRP pultruded profiles and concrete: A comparison between bolting and bonding, *MechComp*, Munich, 2016.
- [42] Zheng, Y., Wu, X., He, G., Shang, O., Xu, J., Sun, Y.: Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete by vibratory mixing technology, *Advances in Civil Engineering*, (2018)
- [43] BS EN 12390-3 :2009: Testing Hardened Concrete, Compressive Strength of Test Specimens
- [44] BS EN 12390-6:2009: Testing hardened concrete, Tensile splitting strength of test specimens
- [45] ASTM A370: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel produces, American Society of Testing and Materials, Pennsylvania, USA, 2010.
- [46] ACI 440.3R-12: Guide for test methods for fiber reinforced polymers (FRP) for reinforcing and strengthening concrete structures, ACI committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2012.
- [47] Tanoli, W.A., Naseer, A., Wahab, F.: Effect of Steel Fibers on Compressive and Tensile Strength of Concrete, *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 3 (2014) 4, pp. 393-397
- [48] Jayswal, S.D., Hansora, A.G., Pandya, A.A.: Effect of Steel Fibres on Compressive & Tensile Strength of Concrete using M -Sand as Fine Aggregate, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4 (2015) 5, pp. 189-194
- [49] Zheng, Y., Wu, Y., He, G., Shang, Q., Xu, J., Sun, Y.: Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete by Vibratory Mixing Technology, *Advances in Civil Engineering*, (2018).
- [50] Abbass, W., Khan, M.I., Mourad, S.: Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and Building Materials*, 168 (2018), pp. 556–569

- [51] Wang, X., Zhang, S., Wang, C., Cao, K., Wei, P., Wang, J.: Effect of steel fibers on the compressive and splitting-tensile behaviors of cellular concrete with millimeter-size pores, *Construction and Building Materials*, 221 (2019), pp. 60–73
- [52] Sullivan, T.J., Calvi, G.M., Priestley, M.J.: Initial stiffness versus secant stiffness in displacement-based design, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada 2004, pp. 1-16
- [53] Ahmed, M., Farghal, O., Nagah, A., Haridy, A.: Effect of Confining Method on the Ductility of over-Reinforced Concrete Beams, *Journal of Engineering Sciences*, 35 (2007) 3, pp. 617-633
- [54] Fadi, O., El-Hacha, R.A.: New Ductility Model of Reinforced Concrete Beams Strengthened Using Fiber Reinforced Polymer Reinforcement, *Composites Part B: Engineering*, 43 (2012) 8, pp. 3338-3347
- [55] Spadea, G., Bencardino, F., Swamy, R.N.: Strengthening and Upgrading Structures with Bonded CFRP Sheets, *Design Aspects for Structural Integrity, Proceedings of the 3rd International RILEM Non-Metallic (FRP) for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, 1997, pp. 379-386
- [56] Alsayed, S.H., Alhozaimy, A.M.: Ductility of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars and Steel Fibers, *Journal of Composite Materials*, 33 (1999) 19, pp. 1792-1806, doi:10.1177/002199839903301902
- [57] Ranjbaran, F., Rezayfar, O., Mirzababai, R.: Experimental investigation of steel fiber reinforced concrete beams under cyclic loading, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, (2018) 10, pp. 49–60
- [58] Islam, M.M., Chowdhury, M.A., Sayeed, M.A., Hossain, E.A., Ahmed, S.S., Siddique, A.: Finite element analysis of steel fiber-reinforced concrete (SFRC): validation of experimental tensile capacity of dog-bone specimens, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, (2014), pp. 6-63
- [59] Egyptian Code ECP203-2007: Design and Construction for Reinforced Concrete Structures, Research Centre for Houses Building and Physical Planning, Cairo, Egypt.
- [60] Elstner, R.C., Hognestad, E.: Publications 30-1, International Association for bridges and structural engineering, 1956.
- [61] Egyptian Code ECP 208-2005: Practice for the Use of Fiber Reinforced Polymer (FRP) in the Construction Fields, Egyptian Ministry of Housing, Utilities, and Urban Development, Egyptian Housing and Building National Research Center, 2005., pp. 160
- [62] Ivanco, V.: NonLinear Finite Element Analysis, PhD Theises, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice, Slovakia, 2011.