

Savijanje betonskih stupova armiranih FRP šipkama

mr. sc. **Igor Džajić**¹, prof. dr. sc. **Domagoj Damjanović**²

¹Inženjerski projektni zavod d.d., igor.dzajic@ipz.hr.

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Betonski stupovi namijenjeni elektrodistribuciji proizvedeni centrifugiranjem i prednapeti armaturom od vlaknima armiranog polimera imaju praktičnu potvrdu učinkovitosti i ekonomičnosti u situacijama ubrzanog dotrajavanja konvencionalnih stupova u primorskom okolišu. Nepostojanje normiranih računskih postupaka dimenzioniranja ovakvih elemenata, skromna baza eksperimentalnih istraživanja posebice kada je riječ o uporabi betona smanjenog ugljičnog otiska, uz nužan uvjet izrade nacionalne tehničke ocjene stavljanja na tržište, otežavaju veću komercijalnu uporabu. Ispitivanja svih tipova stupova jednog proizvođača različitih nosivosti i visina u postupku potvrđivanja sukladnosti gotovo je nemoguće i dugotrajan postupak i bio bi zamijenjen predloženim numeričkim metodama. Tema ovog rada daje doprinos teorijskom i eksperimentalnom istraživanju opisanog građevnog proizvoda.

Ključne riječi: nemetalna armatura, ugljičnim vlaknima armirani polimer, CFRP, centrifugirani stupovi, prednapinjanje, ispitivanje do sloma, ispitivanje na savijanje, šuplji kružni presjek

Bending of concrete columns reinforced with FRP bars

Abstract

Concrete poles for power distribution manufactured by centrifugation and prestressed with fibre-reinforced polymer reinforcement have proven to be efficient and economical in situations of accelerated deterioration of conventional poles in the coastal environment. The lack of standardized calculation procedures for the dimensioning of such elements, the modest base of experimental research, especially when it comes to the use of concrete with a reduced carbon footprint, along with the necessary condition of making a national technical assessment for placing it on the market, make greater commercial use difficult. Evaluating all column types of one manufacturer with different load capacities and heights in the process of attestation of conformity is near impossible and time-consuming procedure and would be replaced by the proposed numerical methods. The topic of paper contributes to the theoretical and experimental research of the described construction product.

Key words: non-metallic reinforcement, Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP), centrifugally-cast poles, prestressing, ultimate load testing, bending testing, circular hollow cross-section

1 Uvod

Beton klasično armiran čeličnom armaturom gradivo je koje se danas najviše koristi pri izgradnji građevinskih konstrukcija [1], po svom sastavu kombinacija je dvaju različitih materijala, koji zajednički sudjeluju u prijenosu opterećenja. Mnoge građevine od armiranog betona u agresivnim uvjetima okoliša podložne su koroziji armaturnog čelika i oštećenjima koja rezultiraju skupim popravcima i ograničenjima uporabe građevina. Problem trajnosti naglašen je u agresivnim sredinama, pa se kao jedno od rješenja nameće korištenje armature od vlaknima armiranog polimera -FRP (eng. Fibre Reinforced Polymer) [2]. Nakon desetljeća ispitivanja i ograničene primjene građevinskih elemenata i proizvoda možemo kazati da je novi materijal našao svoju tržišnu primjenu, ali za širu uporabu nedostaju normirani postupci proračuna uz uvažavanje različitosti postupka dizajniranja kada govorimo o savijanju, poprečnim silama, pukotinama i progibima. Betonski stupovi namijenjeni elektrodistribuciji proizvedeni postupkom centrifugiranja i prednapeti armaturom od vlaknima armiranog polimera svakako su jedan od proizvoda koji ima praktičnu potvrdu učinkovitosti i ekonomičnosti u određenim situacijama. Ovakvi proizvodi klasično armirani čeličnom armaturom ugrađuju se u elektrodistributivnu mrežu i izloženi su brzim dotrajavanjem posebice kada je riječ o primorskom okolišu. Prikazano istraživanje pokušaj je proučavanja učinkovitosti prednapinjanja centrifugiranih stupova FRP armaturom u odnosu na klasično armirane centrifugirane stupove. Ono predstavlja pokušaj razvoja i optimizacije postupka prednapinjanja centrifugiranih stupova FRP armaturom te prijedlog smjernica za dimenzioniranje betonskog šupljeg kružnog presjeka temeljem ispitanih mehaničkih značajki gradiva nelinearnom metodom proračuna korištenjem odnosa moment savijanja - zakrivljenost poprečnih presjeka uzduž promatranog elementa. Za sada ne postoje normirani računski postupci dimenzioniranja ovakvih elemenata, a baza ispitivanja je skromna posebice kada govorimo o uporabi betona smanjenog ugljičnog otiska, a jedan od važnijih i manje istraženih problema je sidrenje FRP armature. Tema ovog rada daje doprinos na polju teorijskog i eksperimentalnog istraživanja opisanog građevnog proizvoda.

2 Razvoj betonskih stupova armiranih nemetalnom armaturom

Kompozitne FRP šipke proizvode se procesom izvlačenja (pultrusion) od vlakana velike čvrstoće i krutosti impregniranih polimernom smolom koja nakon stvrdnuća daje željeni oblik. Osim otpornosti na koroziju, prednosti ovih materijala su velika čvrstoća, dobro ponašanje pod dinamičkim opterećenjem i niska zapreminska težina. Nedostaci su elastično ponašanje do sloma, mala ukupna deformacija, nehomogenost, pad čvrstoće na mjestu previjanja te popuštanje pod dugotrajnim opterećenjem bliskim čvrstoći [3]. Ovi materijali korišteni su u aeronautičkoj industriji

od vremena nakon II svjetskog rata, međutim armatura građevinskih konstrukcija od FRP-a nije smatrana isplativom jer nije bilo komercijalnih proizvoda na raspolaganju do 70-ih godina prošlog stoljeća [4]. Do 1990. godine razvija se komercijalna uporaba FRP armature u Japanu na više od 100 projekata. Uporaba FRP armature u Europi započinje u Njemačkoj, izgradnjom mosta prednapetog FRP armaturom 1986 godine [5]. Istodobno se događaju iskoraci u Kanadi i SAD-u, nakon što je započela industrijska proizvodnja FRP armature. Razvitak šipki, mreža, užadi i kabela od novog materijala pratila su intenzivna znanstvena istraživanja značajki gradiva, proizvoda i konstrukcijskih elemenata od betona armiranog FRP-om. Isprva se novi materijal primjenjivao u građevinama koje su zbog posebnih razloga trebale biti armirane nemetalnom armaturom, npr. u bolnicama s opremom osjetljivom na elektromagnetske pojave, da bi se njihova uporaba proširila na pomorske građevine, uzletno-sletne staze zračnih luka, mostove te općenito građevine kod kojih je naglašena važnost trajnosti. Obzirom na specifična svojstva armature od FRP-a, ona se većinom koristi za armiranje betona velike i ultra velike čvrstoće. FRP se proizvodi od staklenih, ugljičnih i aramidnih vlakana, povezanih epoksidnom smolom, poliestrom ili vinilesterom, uz kalupljenje i prešanje [1]. S inženjerskog motrišta vlakna se razlikuju po mehaničkim značajkama kao što su čvrstoća, krutost, gustoća i promjer vlakna. Glavni nedostatak jest da takvi proizvodi nisu duktilni, tj. nema izrazitog popuštanja materijala, kod određenog naprezanja, kao kod čelika [1]. Komercijalne šipke mogu se izvana obložiti kvarcnim pijeskom kako bi se osigurala bolja prionjivost s betonom pa je takva armatura korištena u ovom eksperimentalnom dijelu rada. Centrifugirani armiranobetonski stupovi šupljeg kružnog presjeka armirani FRP armaturom istražuju se od 1994, a prvi eksperimentalni primjerci ugrađeni su u prijenosnu mrežu jednog švicarskog distributera električne energije 1998. godine [6, 7]. Ovakvi stupovi primarno se koriste za prijenosne linije električne mreže, za distribuciju električne energije i kao nosači rasvjete. U mnogim slučajevima postavljaju se na lokacije koje se mogu karakterizirati agresivnom sredinom, bilo da se radi o tlu ili atmosferskoj izloženosti. Kružni presjek centrifugiranih stupova diktira njihov način proizvodnje, a prednost mu je u ravnoj i glatkoj površini te povoljnom estetskom učinku. Specifični zahtjevi naručitelja ovih konstrukcijskih elemenata čine primjenu nemetalne, nekorodirajuće armature vrlo interesantnom. Eksperimentalna proizvodnja stupova s FRP armaturom započinje u trenutku pooštrenja propisa za projektiranje betonskih konstrukcija, kao odgovor na zahtjeve za povećanjem zaštitnog sloja betona, čime su izmjere i masa konvencionalnih stupova postale nepraktične. Od tada su razvijeni različiti tipovi stupova od betona velike čvrstoće armirani šipkama od ugljičnim vlaknima armiranog polimera (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP). Čvrstoća, progib i otpornost na savijanje centrifugiranih betonskih stupova namijenjenih elektrodistribuciji, prednapetih armaturom od CFRP materijala eksperimentalno i numerički je analizirana u [8]. Ustanovljeno je da prikladno armirani, ovi elementi imaju zadovoljavaju-

ća svojstva na savijanje, uključujući svojstvo duktilnosti. Istraživanje je obuhvatilo utjecaj načina armiranja (uzdužnog i poprečnog) na raspucavanje, progibe i način otkazivanja nosivosti. U radu [9] istražena je otpornost na zamor stupova prednapetih CFRP armaturom, prvotno zbog pojave popuštanja prionjivosti između šipki i betona, te je ustanovljeno da ta pojava neće biti presudna za njihovo dotrajavanje. Rad [10] bavi se vezom – prijanjanjem između šipki za prednapinjanje od CFRP-a i betona, budući da ta značajka (proklizavanje šipki) bitno određuje ponašanje konstrukcijskih elemenata. U radu [11] istražen je sustav sidrenja šipki od CFRP kod prednapinjanja betonskih elemenata, budući da se te šipke uvriježeno prednapinju do 40% prekidne čvrstoće. Povećanjem sile prednapinjanja mogu se dobiti učinkovitiji presjeci, a ta se mogućnost prvenstveno omogućuje poboljšanjem kotvi u fazi prednapinjanja. Kod većine istraživanja korišteni su CFRP šipkama prednapeti tanki (30 mm na više) elementi od betona velike do vrlo velike čvrstoće (75 do 100 MPa). U odnosu na ostale raspoložive proizvode od polimera armiranih vlaknima, šipke od CFRP mogu biti nešto skuplje, ali su otpornije na zamor, iskazuju manje puzanje i manje gubitke uslijed relaksacije (popuštanje) nakon prednapinjanja, te su trajnije u alkalnoj sredini odnosno u betonu [12]. Opće karakteristike šipki, kabela i užadi značajno variraju, budući da ih je moguće prilagoditi različitim namjenama po čemu se ovi proizvodi značajno razlikuju od armaturnog čelika, čije se fizikalne i mehaničke značajke kreću unutar relativno uskih granica. Komercijalni CFRP proizvodi za armiranje betonskih konstrukcija obično imaju uzdužnu vlačnu čvrstoću od 600 do 3500 MPa, modul elastičnosti (uzduž vlakana) 100 do 580 GPa i izduljenje do sloma od 0,5% do 1,7% [13]. Velik broj obavljenih istraživanja obuhvatio je značajne aspekte ponašanja građevinskih elemenata prednapetih kabelima od vlaknima armiranog polimera, međutim ovo gradivo nije ušlo u propise za projektiranje, već se koriste smjernice, od kojih su najkorištenije one Američkog instituta za beton [14], premda su prve smjernice izdane u Japanu, a potom i u Kanadi. Europske smjernice izdao je fib [13] i njima su pokriveni principi proračuna za granična stanja nosivosti i granična stanja uporabljivosti za betonske elemente armirane nenapetom FRP armaturom. Principi proračuna za granična stanja sloma u smjernicama su slični, izvedeni iz postavki na kojim se temelje propisi za armirani i prednapeti beton [15]. Prikazana usporedba različitih propisa iskazuje velike razlike u preporukama koje se odnose na granična stanja uporabe. Tehničke značajke komercijalnih proizvoda redovito se kalibriraju opsežnim ispitivanjima, laboratorijskim i numeričkim iz čega se može iščitati potreba za daljnjim istraživanjima u ovom području. Za dimenzioniranje značajnog dijela betonskih konstrukcijskih elemenata mjerodavna je nosivost na savijanje ili savijanje s uzdužnom silom. Konvencionalni betonski elementi armirani ili prednapeti čelikom propisima uređenim postupkom projektiraju se na otkazivanje duktilnim slomom preko armature. Kod konstrukcijskih elemenata armiranih FRP armaturom slom preko armature može se opisati krtim, jednako kao i slom preko betona, pa dimenzioniranje često nameće slom preko betona kao za-

dano granično stanje. Što se tiče progiba, u sličnim uvjetima elementi armirani FRP proizvodima razvijaju veće progibe od usporedivih konvencionalnih elemenata, što se tumači manjim modulom elastičnosti FRP- armature, ali i popuštanjem veze beton – armatura [16]. Može se reći da je ponašanje CFRP šipkama prednapetih elemenata donekle istraženo, međutim, detalji ovakvih konstrukcija i dalje su predmet istraživanja budući da variranje značajki betona i armature pruža mogućnost za iskorak ka proizvodima poboljšanih svojstava.

3 Teorija proračuna

Značajnu barijeru širem korištenju betonskih stupova armiranih šipkama FRP-a predstavlja nedostatak formalno prihvaćene norme za projektiranje. Prvo su objavljeni propisi u Japanu [17], a zatim su slijedile europske preporuke na temelju projekta EUROCRETE project [18], te potom kanadski propis [19] dok su na kraju najviše korištene preporuke, koje su izdane u SAD od strane udruženja ACI [8]. Nekoliko europskih država izdalo je vlastite preporuke za korištenje FRP armature u betonskim konstrukcijama ili za njihovo ojačavanje [18]. Radna skupina udruženja fib (International Federation for Structural Concrete), nakon dugogodišnjeg rada više stručnjaka, objavila je publikaciju – fib Bulletin 40 koji obrađuje FRP armaturu u betonskim konstrukcijama [13]. Brojni rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazali su da se otpornost elementa opterećenog na savijanje može odrediti prema sličnom postupku kojim se dimenzioniraju elementi armirani čeličnom armaturom. Konkretno, može se reći kako je općenito prihvaćeno da se osnovna načela analize savojne otpornosti presjeka čelikom armiranih betonskih elemenata odnose i na one koji su armirani FRP-om uz određene preinake. Pri slomu elementa savijanjem, do otkazivanja dolazi ili drobljenjem betona u tlačnoj zoni ili kidanjem FRP armature u vlačnoj zoni [20]. Publikacija [13] usvaja okvir dan normama [21,22] za ocjenu momenta pri slomu presjeka armiranog FRP armaturom.

3.1 Proračun stupova prilagođenim izrazima

Proračun sklopova napreznih savijanjem armiranih šipkama od FRP-a, donekle je već poznat međutim proračun vitkih elemenata, u što se ubrajaju ovi stupovi, napreznih ekscentričnom tlačnom silom tek je u fazi istraživanja. Problem niske krutosti šipki od FRP-a kao i linearno elastično ponašanje proizvoda od FRP gradiva do sloma te veliki omjer vlačne i tlačne čvrstoće zahtijevaju posebnu provjeru nosivosti stupova opterećenih na ekscentrični tlak. Prvo se mora odrediti granična vitkost ispod koje se stupovi dijele na kratke odnosno iznad spomenute granice stupovi su vitki. Za kratke se stupove može rabiti teorija savijanja koja je već u primjeni, dok se vitki elementi moraju proračunavati po teoriji II. reda ili nekim približnim postupcima gdje je vitkost iznimno važna. Kako su stupovi armirani šipkama od FRP-a više

osjetljivi na slom izvijanjem nego stupovi armirani čelikom, predloženo je smanjenje njihove granične vitkosti [15]. Kada se radi o vitkim elementima naprezanih na ekscentrični tlak primjenjuje se postupak povećanja momenta savijanja na deformiranom sustavu, predloženim američkim ACI-normama za proračun elemenata armiranih čelikom. Izraz za povećanje momenta savijanja glasi:

$$M'' = M \cdot \frac{C_m}{1 - \frac{N_{Ed} / \varphi}{N_E}} \quad (1)$$

gdje je:

$M = N \cdot e_o$ – moment savijanja dobiven po teoriji I reda

$C_m = 0,6 + 0,4 \cdot (M_1 / M_2) \geq 0,4$ – koeficijent kojim se nejednolika raspodjela momenta savijanja po duljini elementa zamjenjuje jednolikom

$\phi = 0,75$ – faktor redukcije

N_{Ed} – proračunska osna sila

l_o – duljina izvijanja stupa

$$N_E = \frac{\pi^2 \cdot E_{cm} \cdot I''}{l_o^2} \quad \text{– Eulerova kritična sila}$$

$$E \cdot I'' = \frac{0,25 \cdot E_{cm} \cdot I_g}{1 + \beta_d} \quad (za \ e / h \leq 0,4) \quad (2)$$

$$E \cdot I'' = \frac{0,1 \cdot E_{cm} \cdot I_g}{1 + \beta_d} \quad (za \ e / h \leq 1,0) \quad (3)$$

$E \cdot I''$ – predstavlja fleksijsku krutost betonskog presjeka za naponsko stanje II (pojava pukotina)

E_{cm} – sekantni modul elastičnosti betona

I_g – moment tromosti punog betonskog presjeka

$\beta_d = M_d / M$ ili N_d / N – koeficijent kojim se uvodi puzanje betona (M_d – moment od dugotrajnog opterećenja)

Tablica 1. Svojstva i granične vitkosti čelikom i FRP šipkama armiranih stupova

Vrsta armature	Omjer tlačne i vlačne čvrstoće	Balansirani koeficijent armiranja ρ_{pb} [%]	Granična vitkost
B500	1,0	5,70	22,2
AFRP	0,1	0,38	21,6
CFRP	0,3	0,90	18,7
GFRP	0,3	1,00	17,2

Tablica 1. prikazuje neka od svojstava i usporedbu čeličnih šipki za armiranje i triju vrsta FRP šipki. Pored omjera tlačne i vlačne čvrstoće prikazani su balansirani koeficijenti armiranja kao i izračunane granične vitkosti stupova armiranih navedenim vrstama FRP šipki. Balansirani koeficijent armiranja prilagođen novom gradivu:

$$\rho_{pb} = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1}{f_p} \cdot \frac{0,003 \cdot E_p}{0,003 \cdot E_p + f_p} + \frac{\rho_{p2} \cdot f'_p}{f_p} \quad (4)$$

gdje je:

f_{ck} – karakteristična tlačna čvrstoća betona

β_1 – koeficijent kojim se definira visina pravokutnika tlačnih napreznja

f_p – vlačna čvrstoća šipke od FRP

f'_p – tlačna čvrstoća šipke od FRP

E_p – modul elastičnosti FRP šipke

$\phi_{p2} = A_{p2} / (b \cdot d)$ – koeficijent armiranja tlačnog područja

$\phi_{pb} = A_{p1} / (b \cdot d)$ – balansirani koeficijent armiranja vlačnog područja

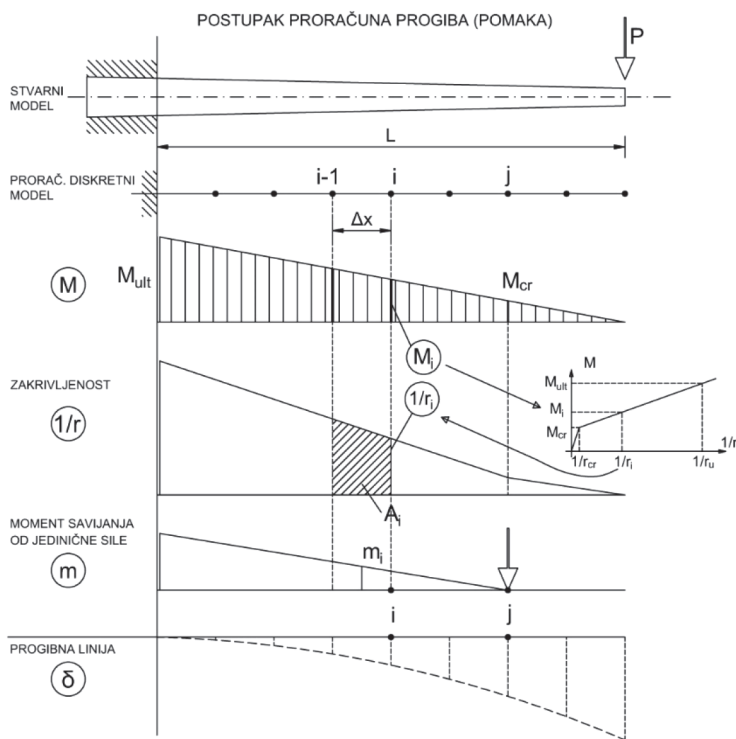
3.2 Kapacitet nosivosti i progib

Prethodno spomenute preporuke i postupci proračuna govore o armiranju presjeka FRP armaturom dok se prednapinjanje presjeka puno rjeđe obrađuje. Pri ispitivanjima do sloma prema normi [23] opterećenje na savijanje se provodi od nule do sloma konstantnim prirastom sile uz mjerenje progiba pa se dobiva P- δ dijagram. Na ovaj je način moguće točno odrediti nosivost na savijanje poprečnog presjeka i precizno izmjeriti progib stupa što onda služi za kalibraciju računskog modela. Predloženi nelinearni proračun korištenjem odnosa moment savijanja - zakrivljenost poprečnih presjeka uzduž promatranog elementa [24-26] temelji se na činjenici da se za raspucali beton zakrivljenost između dviju pukotina proračunava za stanje napreznja II odnosno da se javlja unutarnji spreg sila (tlačni beton i vlačna armatura) koji preuzima vanjsko opterećenje. Zakrivljenost presjeka između dviju pukotina manja je od one na mjestu pukotine.



Slika 1. Pojava pukotina za stanje napreznja II i neraspucani dio između njih

Potrebno je stoga za analitički model dobivanja dijagrama sila-progib podijeliti konzolu na jednake konačne elemente, izračunati momente savijanja u točkama diskretizacije i u sredini konačnog elementa te potom pripadnu zakrivljenost presjeka. Za svaki presjek stupa proračunavaju se naprezanja i relativne deformacije u armaturi, te u betonu na dva nasuprotna, najudaljenija ruba presjeka. Treba uzeti u obzir da su uzduž stupa kontinuirano promjenjivi šuplji presjeci, a time i konstantno promjenjiva krutost te da je metoda iterativna (povećavanje inkrementa sile) iz čega proizlazi da je ovo računski zahtjevan postupak koji bi se mogao ubrzati računalom. Za određivanje proračunske nosivosti presjeka nosivih elemenata prema metodama graničnih stanja koriste se proračunski dijagrami naprezanje-deformacija za beton i armaturu.



Slika 2. Prikaz metode proračuna korištenjem bilinearnog dijagrama $M-1/r$

Izraz za progib u određenoj (diskretnoj) točki konzole:

$$\delta_j = \int_0^L \frac{1}{r} \cdot m \cdot dx = \sum_0^{int} A_i \cdot m_i \quad (5)$$

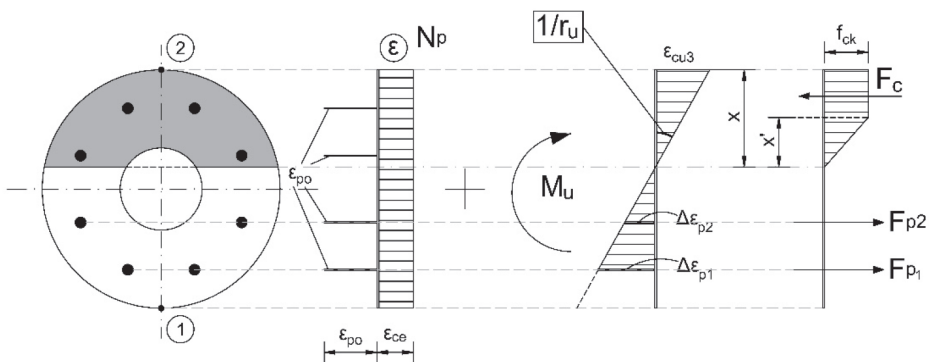
gdje je:

A_i – ploština dijagrama zakrivljenosti ($1/r$) u i -tom intervalu;

m_i – ordinata dijagrama momenta savijanja od jedinične sile u i -tom intervalu kada se jedinična sila nalazi u j -toj točki. Vidi se da veći broj intervala daje veću preciznost. Ponavljanjem simulacije za jediničnu silu u svakoj točki konzole dobiva se progibna linija stupa.

Eksperimentima će biti određen konkretan radni dijagram betona dobivenog istraživanjima. Pretpostavka je da zbog zakrivljenog oblika presjeka treba koristiti bilinearni tlačni dijagram betona što norma [21] dozvoljava čime se postiže olakšanje (slika 3). Numeričko istraživanje temeljiti će se na realnim parametrima gradiva dobivenim laboratorijskim eksperimentima. Numerički modeli će biti kalibrirani rezultatima mjerenja sila, pomaka i naprezanja na eksperimentalnim modelima.

Vlačno ponašanje betona moguće je opisati jedino materijalnom nelinearnošću. Dakle za proračun potrebno je koristiti software koji može analizirati materijalnu nelinearnost kroz slobodan upis različitih parametara kako bi se dobila potrebna idealizirana krivulja koja opisuje materijal. Stoga će se u za numeričke simulacije provedenog eksperimenta koristiti računalni alati – software koji omogućuju proračun i obuhvaćaju materijalnu i geometrijsku nelinearnost. Modeliranje nelinearnog ponašanja će se opisati korištenjem 2D krivulje naprezanje-relativna deformacija za upis parametara čvrstoće za tlačno i vlačno naprezanje. Na slici 3. prikazano je granično stanje nosivosti prednapetog šupljeg betonskog presjeka gdje osna sila N_p uzrokuje centrično tlačno naprezanje, a vanjski djelujući moment savijanja M_u uzrokuje savijanje odnosno zakrivljenost određenog poprečnog presjeka $1/r$. Pri slomu dolazi do prekoračenja najvećeg tlačnog naprezanja betona f_{ck} u rubnom vlakancu kojemu odgovara najveća tlačna deformacija betona pri slomu ϵ_{cu3} .



Slika 3. Prikaz graničnog stanja nosivosti pri drobljenju betona u tlaku

Gdje je sila u pojedinoj šipki F_{pi} i relativna deformacija ε_{pi} :

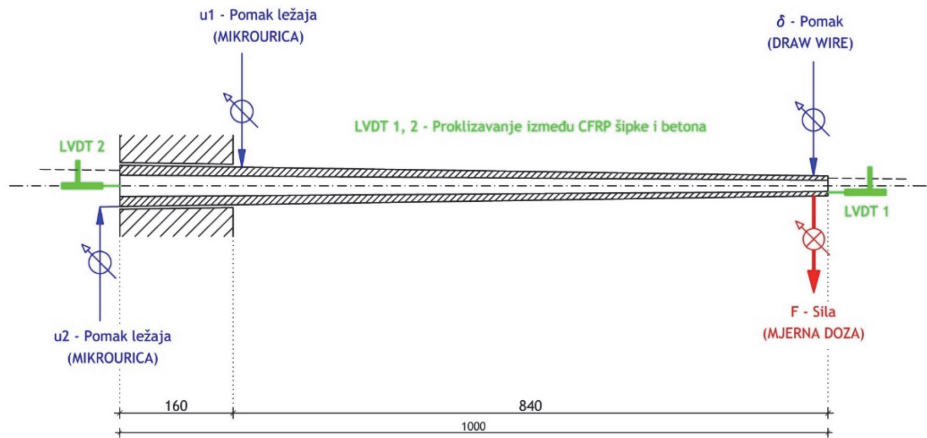
$$F_{pi} = A_{pi} \cdot E_p \cdot \varepsilon_{pi} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{pi} = \varepsilon_{po} + \Delta\varepsilon_{pi} \quad (7)$$

4 Eksperimentalni dio

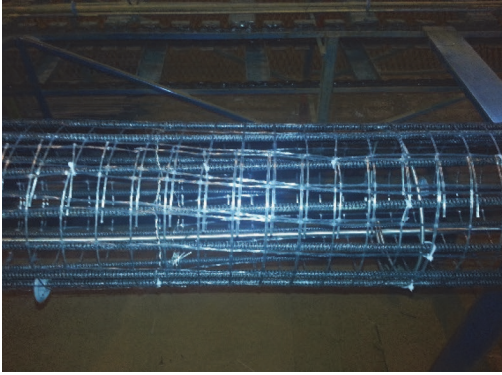
4.1 Uzorci i opis eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu ovoga istraživanja korišten je stup oznake SB 315/10 jer oko 20 % cjelokupne proizvodnje proizvođača otpada na ovaj tip stupa. Radi se o betonskom stupu čija je nazivna nosivost rezultante vodoravnih sila $F_n = 3,15$ kN (315 daN) i ukupne duljine $L = 10$ m. Mjerni postav prikazan je shematski na slici 4. Stupovi su ispitivani u horizontalnom položaju. Donji dijelovi uzoraka bili su fiksirani - upeti u betonske sidrene blokove, a na vrhu stupa – kojemu su omogućeni slobodni pomaci - aplicirana je horizontalna sila okomito na uzorak. Ispod vrha stupa su postavljena čelična kolica kako bi se izbjegao utjecaj vlastite težine na dobivene rezultate.



Slika 4. Shematski prikaz ispitivanja uzoraka

Ispitivanje stupova provedeno je na poligonu proizvođača, na uzorku od četiri stupa jednakih dimenzija, ali s različitim detaljima armature. Za kontrolu i usporedbu rezultata prvi uzorak armiran je konvencionalno - čeličnom armaturom. U tablici 2 prikazani su podaci o armaturi i betonu ispitivanih stupova. Drugi stup armiran je armaturom promjera #8mm od bazaltnih vlakana BFRP.



Slika 5. Armaturni koš od BFRP pripremljen za betoniranje

Treći stup bio je armiran sa šest šipki od ugljičnih vlakana CFRP dok je četvrti stup sa po osam CFRP šipki. Efektivni promjer CFRP šipki iznosio je 4,2 mm, a ukupni promjer šipke s matricom i oblogom od kvarcnog pijeska je 5,4 mm. Uzorak broj četiri je bio centrično prednapet prije stvrdnjavanja ukupnom silom $P_0=110$ kN. U usporedbi s klasičnim prednapinjanjem čeličnim užadima, naprezanje je iznosilo je samo 40 % prekidne čvrstoće šipke, odnosno $\sigma_{p,1}=1000$ MPa. Relativno malen postotak prednapinjanja ima uporište u nedovoljnom poznavanju ponašanja ove armature u području usidrenja, mogućnostima zahvata šipki i njihova prednapinjanja, bojazni od mogućnosti proklizavanja armature te nosivosti samoga kalupa koji mora biti sposoban samostalno se oduprijeti ukupnoj sili prednapinjanja i u procesu centrifugiranja rotira zajedno sa sustavom za usidrenje. U literaturi se preporučeno naprezanje u FRP šipkama pri prednapinjanju navodi u granicama od 800 do 1200 MPa [11].



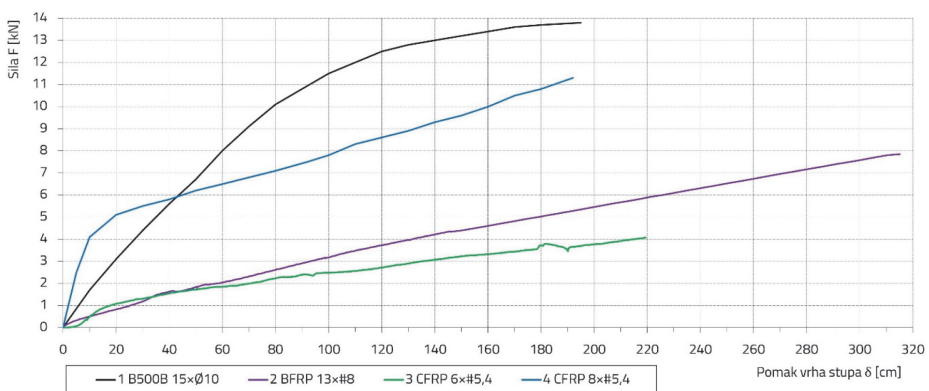
Slika 6. Armaturni koš od CFRP pripremljen za prednapinjanje

4.2 Rezultati ispitivanja do sloma

Referentni uzorak stupa koji je bio armiran čeličnom armaturom očekivano se slomio tako što je došlo do popuštanja armature nakon čega dolazi do drobljenja betona. Velika duktilnost kontrolnog uzorka je ostvarena svojstvom duktilnosti čelične armature. Dijagram opterećenje-pomak je linearan do pojave prve pukotine, nakon čega poprima parabolični izgled do sloma. Drugi uzorak koji je bio armiran BFRP armaturom zadovoljio je projektirane zahtjeve nosivosti. Dijagram P- δ pokazuje linearno ponašanje od početka ispitivanja do sloma. Međutim, zbog prevelikog progiba, relativnih deformacija i pukotina ovako armirani stup ne zadovoljava zahtjeve u pogledu uporabivosti. Treći uzorak armiran CFRP šipkama nije zadovoljio uvjete nosivosti iz očiglednog razloga nedovoljne količine armature. Dijagram P- δ pokazuje bilinearno ponašanje od početka ispitivanja do dostizanja M_{cr} i potom blažu liniju nagiba do sloma. S druge strane pokazao je da se budući uzorci trebaju prednapinjati kako bi se iskoristile superiorne značajke CFRP armature i smanjila potrebna količina FRP armature kada nije prednapeta. Četvrti uzorak armiran prednapetim šipkama od CFRP-a slomio su se drobljenjem betona tlačne zone, nakon čega je uslijedilo puknuće šipki od CFRP-a. Slom uzoraka armiranih CFRP šipkama nastupio je pri silama koje su 15 do 25 % manje od sile sloma referentnog uzorka armiranog čeličnom armaturom.

Tablica 2. Osnovni podaci o gradivima uzoraka i načinu armiranja

Armiranje uzoraka	Prednapinjanje	Beton [MPa]	f_{tk} [MPa]	E [GPa]	$k_{slom} \geq 1,8$
1-B500B- 15x Φ 10mm	Ne	C50/60	500	200	4,38
2-BFRP- 13x#8 mm	Ne	C50/60	1750	2,49	
3-CFRP – 6x#5,4 mm	Ne	C50/60	2600	180	1,29
4-CFRP – 8x#5,4 mm	Da	C50/60	2600	180	3,60



Slika 7. Dijagrami P- δ dobiveni ispitivanjem svih uzoraka stupova na savijanje do sloma

5 Zaključak

Unatoč činjenici da armatura od vlaknima armiranih polimera ima značajno različite mehaničke značajke u odnosu na uobičajenu armaturu od čelika, proračun i dimenzioniranje centrifugiranih armiranobetonskih stupova šupljeg kružnog presjeka može se temeljiti na istim postavkama ali uz uvažavanje principa projektiranja na savijanje, poprečnu silu, stanje pukotina, naprezanje i progib. Ono što je različito svakako u odnosu na konvencionalnu armaturu je drugačiji pristup stupnju sigurnosti. Stoga je potrebno unatoč golemim postignućima primjene FRP-a u armiranobetonskim konstrukcijama ispitati njegovo ponašanje u raznim vidovima primjene kako bi se moglo iskoristiti njegov puni potencijal.

Dobiveni zbirni P- δ dijagram prikazan na slici 7 jasno prikazuje prednost prednapinjanja centrifugiranih stupova i učinkovitost uporabe prednapete FRP armature u odnosu na klasično armirane centrifugirane stupove. Potrebno je dodatno razviti i optimizirati postupak prednapinjanja centrifugiranih stupova FRP armaturom i istražiti mogućnost povećanja početne sile prednapinjanja. Nadalje, poželjno je izraditi smjernice za dimenzioniranje betonskog šupljeg kružnog presjeka temeljem ispitanih mehaničkih značajki gradiva nelinearnom metodom proračuna korištenjem odnosa moment savijanja - zakrivljenost poprečnih presjeka uzduž promatranog elementa.

Nastavak istraživanja može se razvijati u dva smjera. Prvi smjer je u povećanju svojstva gradiva prvenstveno betona gdje bi se uporabom UHPC-a, smanjenjem debljine stijenki mogao postići superioran proizvod smanjene mase i troškova transporta uz istovremeno povećanje trajnosti. S druge strane suprotan smjer istraživanja može nastati uporabom betona normalne čvrstoće spravljenog od veziva smanjenog ugljičnog otiska uporabom cementa CEM II gdje bi se izostavljanje određene količine čistog portland cementa nadomjestilo dodavanjem letećeg pepela, mljevene zgre i mikrosilike. Nedostatak ovoga je smanjena hidratacijska toplina a time i razvoj ranih čvrstoća što je važno za industrijsku proizvodnju. S druge strane, ovakvi se proizvodi uglavnom zaparuju pa se i taj nedostatak brzine prirasta rane čvrstoće može nadvladati.

Literatura

- [1] Kišiček, T., Sorić, Z., Rak, M.: Ispitivanje greda i ploča armiranih šipkama od PAV-a, GRAĐEVINAR, 59 (2007) 7, pp. 581-595
- [2] Kara, I. F.; Ashour, A. F.: Flexural performance of FRP reinforced concrete beams, Composite Structures 94 (2012) 1616-1625

- [3] Tomičić, I.; Sorić, Z., Kišiček, T., Galić, J.: Betonske konstrukcije mostova i zgrada armirane šipkama ili kabelima FRP-a; Zbornik radova Objekti na autocestama, HDGK, Plitvička jezera 2002, pp. 219-229
- [4] Guide for the Design and Construction of structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute 2006.
- [5] Meier, U.; 1992, Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering, Structural Engineering International, Journal of International Association for Bridge and Structural Engineering, V. 2, No. 1, pp. 7-12
- [6] Terrasi G. P., Bättig G., Brönnimann R., 2001: High-strength spun concrete poles prestressed with CFRP, FRPRCS-5, Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, ISBN 07277-3009-6, University of Cambridge, England 16–18 Jul 2001, Ed. C. Burgoyne, pp. 1103-1112
- [7] Terrasi, G. P., 1997: Mit Kohlenstoffasern vorgespannte Schleuderbetonrohre. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Diss. ETH Nr. 12'454, EMPA-Bericht 240
- [8] Shalaby, A. M., Fouad, F. H., Albanese R.; Strength and deflection behaviour of spun concrete poles with CFRP reinforcement, Precast/Prestressed Concrete Journal, Chicago, IL; Spring 2011, 55-77
- [9] Roberts, E.E.; Lees J.M.; Houtt, N.A.: Flexural Fatigue Performance of CFRP Prestressed Concrete, Advances in Structural Engineering v.15, (4):575:588 (2012)
- [10] Toumpanaki, E.; Lees, J.M.; Terrasi, G.P.: Bond Durability of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Tendons Embedded in High Strength Concrete, ASCE Journal of Composites for Construction (2018)
- [11] Terrasi, G. P.; Affolter, C.; Barbezat, M.: Numerical Optimization of a Compact and Reusable Pretensioning Anchorage System for CFRP Tendons; Journal of Composites for Construction; American Society of Civil Engineers; Vol. 15, No. 2, April 1, 2011., 126-135
- [12] Ceroni, F.; Cosenza, E.; Gaetano, M.; Pecce, M.: Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, Cement Concrete Comp., 28(10), 857-868. (2006).
- [13] FRP Reinforcement in Concrete Structures, International Federation for Structural Concrete – Fib; Task Group 9.3, Lausanne, fib bulletin 40, pp. 1–147. (2007).
- [14] Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons, ACI Committee 440, ACI 440.4R-04, American Concrete Institute 2004.
- [15] Tomičić, I.: Proračun vitkih stupova armiranih FRP šipkama, GRAĐEVINAR, 57 (2005) 2, pp. 95-101

- [16] Pilakoutas, K.; Guadagnini, M.; Neocleous, K.; Matthys, S.; Design guidelines for FRP reinforced concrete structures, Structures and Buildings, Vol. 164, Issue SB4, ICE Publishing, Institution of Civil Engineers, 255-263
- [17] Japan Society of Civil Engineers, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, JSCE, Tokyo, Concrete Engineering Series 23, 1997, pp 1-325.
- [18] Clarke, J.L., O'Regan, D.P., Thirugnananedran, C.: EUROCRETE Project, Modification of Design Rules to Incorporate Non-Ferrous Reinforcement, EUROCRETE Project, Sir William Halcrow & Partners London, 1996.
- [19] Canadian Standards Association, Canadian Highway Bridge Design Code, Section 16: Fibre Reinforced Structures, CSA, Canada, 1996, pp. 1-25
- [20] Song, S.; Zang, H.; Duan, N.; Jiang, J.: Experimental Research and Analysis on Fatigue Life of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Tendons, Materials 12 Licensee MDPI, Basel, Switzerland, 2019, p.p. 2-10
- [21] HRN EN 1992-1-1; Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [22] HRN EN 1992-1-1 /NA; Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija -- Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade -- Nacionalni dodatak
- [23] HRN EN 12843:2004: Predgotovljeni betonski proizvodi - Stupovi i motke (EN 12843:2004) Precast concrete products -- Masts and poles (EN 12843:2004)
- [24] Kišiček, T., Sorić, Z., Galić, J.: Određivanje progiba betonskih nosača s armaturom od polimera armiranih vlaknima, GRAĐEVINAR, 60 (2008) 6, pp. 499-511
- [25] Kišiček, T., Sorić, Z.: Dijagram moment savijanja-zakrivljenost za armiranobetonske grede, GRAĐEVINAR, 60 (2003) 4, pp. 207-215
- [26] Kišiček, T.: Progibi betonskih greda s FRP armaturom, Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006