

Primljen / Received: 3.8.2023.

Ispravljen / Corrected: 6.12.2023.

Prihvaćen / Accepted: 7.12.2023.

Dostupno online / Available online: 10.2.2024.

# Analiza sloma hibridno ojačanog AB kvadratnog stupa

## Autori:

Doc.dr.sc. **Vivekanandan R**, dipl.ing.stroj.

Državni inženjerski fakultet, Sengipatti

Odjel građevinarstva

Thanjavur, Indija

[rvivekanandan@gcetj.edu.in](mailto:rvivekanandan@gcetj.edu.in)

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Aarthi Karmegam**, dipl.ing.građ.

Državni inženjerski fakultet, Bodinayakanur

Odjel građevinarstva

Indija

[aarthi\\_karmegam@yahoo.co.in](mailto:aarthi_karmegam@yahoo.co.in)

Prethodno priopćenje

**Vivekanandan R, Aarthi Karmegam**

## Analiza sloma hibridno ojačanog AB kvadratnog stupa

Ovaj rad predstavlja analitičko i eksperimentalno ispitivanje armiranobetonskih (AB) stupova ojačanih kombiniranim sustavom cementnog materijala ojačanog vlaknima (engl. *fibre-reinforced cementitious material* - FRCM) i vanjski povezan vlaknima ojačan polimer (engl. *externally bonded fibre-reinforced plastics* - EB-FRP). Predložena tehnika iskorištava ove prednosti za povećanje čvrstoće i smanjenje preranog sloma AB stupova. Izliveno je sedam kvadratnih AB stupova: jedan obični stup, četiri stupa ojačana FRCM-om i dva hibridno ojačana stupa. Upotrijebljene su dvije vrste vlakana: ugljična i staklena vlakna. Stupovi su ispitani pod aksijalnim tlačnim opterećenjem u okviru za opterećenje. Razmatrana je granična čvrstoća, opterećenje u odnosu na deformaciju, slom i duktilnost kako bi se ispitala faza očvršćivanja i sloma. Predložena metoda omogućila je veći utjecaj ovijivosti i povećani kapacitet s manjim brojem FRCM-a s EB-FRP-om u odnosu na ostale metode. Napravljena su analitička predviđanja vršnog opterećenja te su korelirana s eksperimentalnim rezultatima.

### Ključne riječi:

vlaknima ojačani polimer (FRP), vlaknima ojačani cementni materijal (FRCM), hibrid, AB stup, omatanje, ovijivost, ugljičnim vlaknima ojačani polimer (CFRP), staklenim vlaknima ojačani polimer (GFRP)

Research Paper

**Vivekanandan R, Aarthi Karmegam**

## Failure analysis of hybrid strengthened RC square column

This paper presents an analytical and experimental examination of reinforced concrete (RC) columns strengthened with a combined system of fibre-reinforced cementitious material (FRCM) and externally bonded fibre-reinforced plastics (EB-FRP). The proposed technique makes use of these advantages in enhancing the strength and minimising the premature failure of RC columns. Seven square RC columns were cast: one control column, four FRCM-strengthened columns, and two hybrid-strengthened columns. Two fibres, namely, carbon and glass fibres, were used. The columns were tested under an axial compression load in a loading frame. The ultimate strength, load vs. deformation, failure, and ductility were discussed to examine the failure and strengthening behaviour. The proposed method provided a higher confinement effect and increased capacity with fewer FRCM with EB-FRP than the other methods. Analytical predictions of the peak load were made and correlated with the experimental results.

### Key words:

FRP, FRCM, hibrid, RC column, wrapping, confinement, carbon FRP (CFRP), glass FRP (GFRP)

## 1. Uvod

Većina zgrada u svijetu izgrađena je od armiranog betona. Glavni su uzroci oštećenja postojećih armiranobetonskih konstrukcija nedostaci u projektiranju, neadekvatnost čvrstoće, prirodne nepogode, konstrukcijske pogreške, trajnost, izvanredna opterećenja itd. [1-6]. Dostupne su različite metode ojačanja kako bi se smanjio učinak oštećenja i produžilo trajanje konstrukcija. U razvoju vlaknima ojačanih polimera (FRP), razvijene su i primijenjene različite FRP tehnike zbog njihovih posebnih svojstava, kao što je visoka vlačna nosivost, visok omjer čvrstoće i težine i jednostavno rukovanje. Međutim, FRP ima i određene nedostatke, kao što je nedopuštena uporaba u okruženju vatre, mokrim površinama te neadekvatno spajanje s betonskim površinama. Potrebna je dodatna obrada za suzbijanje ovih problema [7-11].

Razne FRP tehnike, kao što su vanjsko obavijanje FRP šipki, vanjski spojeni FRP (EB-FRP), metoda površinske ugradnje (engl. *Near Surface Mounted* - NSM) i metode cementnih materijala ojačanih vlaknima (engl. *fibre-reinforced cementitious material* - FRCM), omogućuju ojačavanje oslabljenih elemenata u AB zgradama [15-25]. Ojačanje pomoću FRP šipki uključuje upotrebu kompozitnih materijala u svrhu poboljšanja konstrukcijskih performansi betonskih elemenata kao što su grede ili stupovi. FRP šipke sastavljene su od vlakana visoke čvrstoće, poput ugljičnih ili staklenih, ugrađenih u matricu polimerne smole. Ta metoda predstavlja alternativu tradicionalnoj čeličnoj armaturi i često se primjenjuje za rekonstrukciju ili nadogradnju postojećih konstrukcija. Vanjski spojeni FRP je metoda ojačanja konstrukcija, posebice betonskih, primjenom FRP materijala na vanjskoj površini. FRP kompoziti sastoje se od vlakana kao što su ugljična vlakna, staklena vlakna ili aramidna vlakna ugrađena u matricu od smole. U vanjski spojenom FRP-u, kompozitni materijali nanose se na vanjsku površinu konstrukcije kako bi se povećala njezina čvrstoća, izdržljivost i nosivost. Metoda površinske ugradnje (NSM) FRP-a primjenjuje se u građevinarstvu za ojačavanje i armiranje betonskih konstrukcija. U toj metodi FRP materijali, koji se obično sastoje od vlakana kao što su ugljična ili staklena vlakna, ugrađeni u matricu od smole, primjenjuju se unutar udubljenja ili utora izrezanih na površinskom području betonskog elementa. Među različitim tehnikama posljednjih se godina primjenjuje tehnika FRCM koja pruža bolju izvedbu pri naknadnoj ugradnji AB elemenata omogućujući veću nosivost i krutost oštećenim AB elementima [26-28]. Uspoređujući različita vlakna, ugljični FRCM ima veću čvrstoću [12, 29]. Noor Tello i sur. ispitali su ponašanje stupa ojačanog poliparafenilen benzo-bisoksazol vlaknima, cementnim materijalom (PBO-FRCM), a njihovi su rezultati pokazali veću čvrstoću i duktilnost [28]. Kružni stup pokazao je bolje ovijanje od kvadratnog stupa zahvaljujući efektu rubova. Metoda FRCM dala je dobre rezultate u slučaju naknadne ugradnje AB elemenata s ciljem dobivanja dostatnog graničnog kapaciteta, duktilnosti i krutosti. Iako metoda FRCM pokazuje dobre rezultate u ojačavanju/naknadnoj ugradnji, utjecaj na granični kapacitet i duktilnost smanjuje se s

povećanjem broja FRCM slojeva [16-19, 31-36]. Slom FRCM-a uzrokovan je klizanjem vlakana unutar cementnih matrica, a ne pucanjem vlakana. Debljina stupa povećava se s povećanjem broja slojeva FRCM-a, što dovodi do ograničenja prostora [8, 19, 34]. Slučaj s više od dva sloja FRCM-a bio je neučinkovit zbog lakog taloženja slojeva FRCM-a betonske podloge.

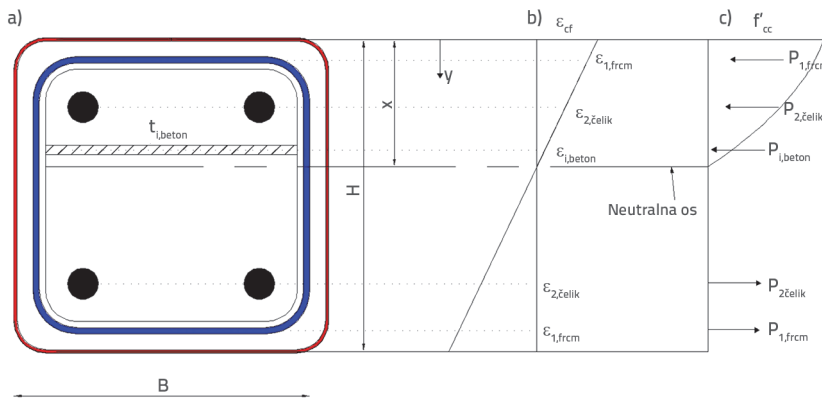
Kako bi se umanjile slabosti svojstvene pojedinačnim tehnikama, jedna strategija uključuje kombiniranje dviju ili više metoda za poboljšanje ukupne izvedbe stupa, a naziva se hibridizacija. Kombinacija dviju metoda/tehnika u ojačavanju armiranobetonskih elemenata pokazuje bolje ponašanje, kao što je granični kapacitet, obrazac sloma i posmično ponašanje. Hibridizacija različitih metoda pomaže u povećanju kapaciteta, krutosti, ovijivosti i duktilnosti te mijenja način sloma zahvaljujući prednostima jedne metode nad drugom [1, 2, 39, 40]. Chellapandian i sur. ispitali su AB stupove ojačane hibridnim površinski ugrađenim/vanjski vezanim FRP-om (NSM/EB-FRP) pod ekscentričnim tlakom i zaključili da metoda daje veću graničnu čvrstoću i duktilnost od 51 % odnosno 272 % [15, 37]. Amit Saini i Surya Prakash proučavali su hibridne EB-om/NSM FRP-om ojačane uske stupove i dokazali povećanu duktilnost od više od 30 % [1]. Medinelspir i sur. [40] ispitali su hibridni CFRP i GFRP u smislu učinkovitosti ovijanja na AB stupovima te su dokazali veće ovijanje i duktilnost. Wakjira i sur. [38] eksperimentalno su ispitali AB stup s hibridnim NSM-om/EB-FRCM-om i dokazali veći kapacitet smicanja, granični kapacitet i karakteristike deformacije.

Prethodna ispitivanja o ojačanju AB elemenata primjenom hibridnih tehnika bila su ograničena. Hibridna metoda pomaže u poboljšanju performansi AB elemenata u smislu posmika, savijanja i tlaka. Međutim, uporaba hibridne metode ograničena je zbog nedostatka eksperimentalnih dokaza.

U ovom su radu eksperimenti provedeni na AB kvadratnom stupu kako bi se analizirala učinkovitost hibridnog FRCM-a/EB-FRP-a samo u odnosu na metodu FRCM. Nadalje, primijenjene su dvije vrste vlakana (ugljična i staklena). Za provjeru učinkovitosti hibridne metode upotrijebljene su konfiguracije ojačanja jednoslojnog FRCM-a, dvoslojnog FRCM-a i hibridnog FRCM-a/EB-FRP-a. Ovaj rad otkriva učinkovitost hibridne metode u odnosu na FRCM samo u smislu graničnog kapaciteta, karakteristika deformacije, duktilnosti i načina sloma. Očekuje se da će ova nova hibridna metoda prevladati nedostatke FRCM-a, maksimizirati kapacitet ojačanog stupa i minimizirati debljinu ojačanog stupa.

## 2. Analitički model

Analitički je model primijenjen za predviđanje ponašanja AB stupa pomoću postupka kompatibilnosti deformacije. Krivulja opterećenja i pomaka konstruirana je pomoću analize presjeka vlakana. Ta je analiza poznata kao pristup „sloj-po-sloj“. U toj je analizi poprečni presjek elementa podijeljen na više slojeva manje debljine oznake "t" (slika 1). Model je pružio procijenjene vrijednosti naprezanja.

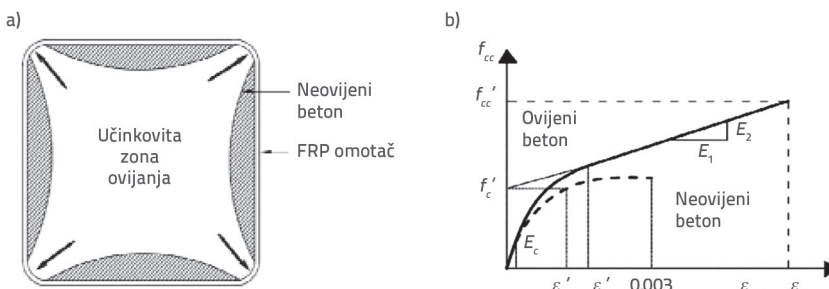


Slika 1. Metoda diskretizacije AB stupa primjenom pristupa vlaknastog elementa: a) poprečni presjek stupa; b) profil deformacije; c) dijagram sila i naprezanja

$$f_c = 2f'_c \left[ \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c}}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c}\right)^2} \right] \quad 0,002 < \varepsilon_c < 0,0035 \quad (2)$$

## 2.2. Ovijeni model betona

Mander i sur. razvili su model ovijnosti uzimajući u obzir faktore kao što je granična ovijena deformacija ( $\varepsilon_{cc}$ ), modul elastičnosti  $E_c$ , i ovijeno tlačno naprezanje ( $f'_{cc}$ ) u Popovicsovoj normaliziranoj jednadžbi naprezanja i deformacije [47, 48]. Potom su Lam i Teng razvili model usmjeren na dizajn za ovijeni beton s EB-FRP-om (slika 2.) [45, 46]. Model autora Mandera i sur. vrijedi samo za ovijanje čelika i precjenjuje čvrstoću FRP ovijanja. Naprezanje ovijenog betona ( $f_c$ ) izračunano je pomoću izraza (5), a vrijednosti odgovarajućih parametara kao što je nagib linearnog dijela ( $E_2$ ) i prijelazna deformacija ( $\varepsilon'_t$ ) mogu se procijeniti pomoću izraza (4) i (5).



Slika 2. Model Lam i Teng i učinak kvadratnog ovijanja: a) utjecaj ovijnosti u kvadratnom presjeku; b) model Lam i Teng

Modificirane Hognestadove jednadžbe (1) i (2) primijenjene su za izračunavanje vrijednosti naprezanja u svakom sloju. U analizi modela upotrijebljen je Hognestadov analitički model za analitička predviđanja neovijenog betona, a Lam-Tengov model za ovijeni beton [43-46]. Konstitutivni odnos primijenjen je za dobivanje odnosa naprezanja i deformacije između čelika i FRP-a.

## 2.1. Neovijeni model betona

Hognestadov parabolički model primijenjen je za predviđanje naprezanja u neovijenim betonskim elementima ( $f_c$ ) pod tlakom [44]. Ukupno opterećenje ( $P_c$ ) može se izračunati pomoću jednadžbi (1) i (2). Izrazi (1) i (2) predviđaju ponašanje betona pri naprezanju i deformaciji prije i nakon vršne vrijednosti. Izraz (2) modificirana je jednadžba za ponašanje betona nakon vršne vrijednosti koju je predložio Hognestad. Modificirana jednadžba pruža analitički predviđene rezultate koji su približni eksperimentalnim rezultatima. Doprinos sile čeličnih šipki  $P_s$  izračunan je pomoću odnosa naprezanja i deformacije te je određena ukupna sila  $P_r$ . Pretpostavljena vršna deformacija ( $\varepsilon'_t$ ) i krajnja deformacija ( $\varepsilon_{cc}$ ) je 0,002 odnosno 0,0035.

$$f_c = f'_c \left[ 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad 0 < \varepsilon_c < 0,002 \quad (1)$$

$$f_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_c} \varepsilon_c^2 & 0 < \varepsilon_c < \varepsilon'_t \\ f'_c + E_2 \varepsilon_c & \varepsilon'_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \end{cases} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (4)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (5)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + \psi_r \cdot 3,3 k_a \frac{f_l}{f'_c} \right) \quad (6)$$

$$f_l = \frac{2E_r n t_r \varepsilon_{fe}}{D} \quad \text{if } \varepsilon_{fe} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} \quad (7)$$

$$k_a = \frac{A_o}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^2 \quad \text{and} \quad k_b = \frac{A_o}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^{0.5} \quad (8)$$

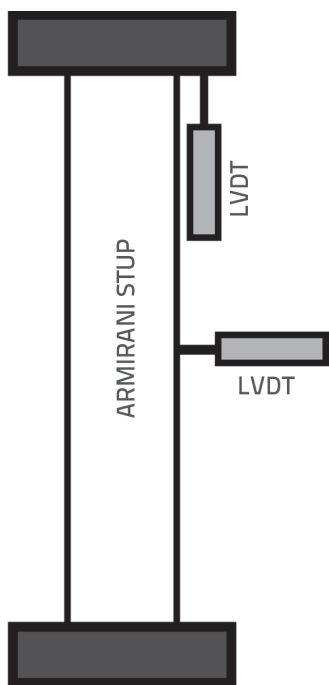
$$\frac{A_o}{A_c} = \frac{1 - \left[ \left( \frac{b}{h} \right) \left( (h - 2r_c) \right)^2 \left( \frac{h}{b} \right) \left( (b - 2r_c) \right)^2 \right]}{3A_g} \cdot \rho_g \quad (9)$$

Maksimalna tlačna čvrstoća ovijenog betona ( $f_{cc}$ ) izračunana je u smislu maksimalnog tlaka ovijanja ( $f_f$ ), kako je opisano u izrazima (6) i (7). Vrijednost dodatnog redukcijskog faktora  $\Psi_f$  uzeta je kao 0,95. Koeficijenti oblika ( $k_o$  i  $k_d$ ) koji se primjenjuju za nekrušne stupove izračunani su pomoću izraza (8). Za kružni stup, koeficijenti oblika postavljeni su na 1. Omjer  $A_e/A_c$  izračunan je pomoću izraza (9). Najvažniji parametar ovijenog modela bio je polumjer kuta ( $r_f$ ) koji je uzet kao 10 mm.

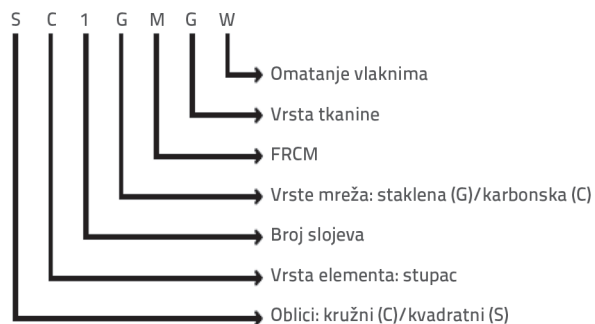
### 3. Eksperimentalno ispitivanje

Eksperiment se sastojao od sedam AB stupova dimenzija 150 mm x 150 mm i ukupne visine 600 mm. Izvedeni uzorci AB stupova su njegovani četiri tjedna. Prije ugradnje betona, tenzometri su fiksirani na srednjim i krajnjim spojnica, kao što je prikazano na slici 3. Nakon dostatnog njegovanja, sloj FRCM-a primijenjen je na uzorak stupa te je odstajao dva dana kako bi se postigla dovoljna čvrstoća veze. Prije nanošenja epoksidnog premaza, površina je očišćena kako bi se uklonila prljavština, prašina i sve neželjene čestice pomoću stroja za čišćenje komprimiranim zrakom. Za hibridni uzorak je epoksidni premaz (2 mm) nanesen preko sloja FRCM-a, a mala količina pijeska nanesena je na spojenu površinu kako bi se postiglo dobro spajanje s FRP-om. FRP je bio omotan preko uzorka obloženo epoksidom.

Slika 3. prikazuje shemu postavljanja opterećenja. Prikaz identifikacijske oznake stupa prikazan je na slici 4., a tablica 1. objašnjava svaki uzorak. Sedam izrađenih stupova prikazano je na slici 5. Postavljanje okvira za opterećenje i raspored LVDT-a prikazani su na slici 6. Stupovi su ispitani pri povećanju opterećenja od 1 kN/s. Čelija za opterećenje postavljena je na vrh uzorka i spojena na sustav prikupljanja podataka (DAQ).



Slika 3. Shematski postav instrumenta



Slika 4. Identifikacijske oznake kvadratnog stupa



Slika 5. Sedam kvadratnih stupova



Slika 6. Eksperimentalni postav - okvir za opterećenje i raspored LVDT-a: a) Okvir za opterećenje; b) LVDT

#### 3.1. Materijali

Sedam je stupova izrađeno u tri serije. Prema normi IS 456-2000, primijenjena je nazivna mješavina betona klase M20 i mješavina čelika klase Fe500. Jedan kubični metar betona sastoji se od 360 kg cementa, 585 kg sitnog agregata i 1223 kg krupnog agregata, a v/c omjer je 0,5. Upotrijebljen je cement klase OPC 53 te najveća veličina agregata od 10 mm. Za svaku mješavinu betona izrađene su tri kocke i tri cilindra kako bi se osigurala tlačna i vlačna čvrstoća betona prema IS 456-2000, a rezultati uzoraka navedeni su u tablici 2. Uzdužna armatura sastoji se od četiri šipke promjera 10 mm, a poprečna armatura

Tablica 1. Oznaka uzorka i njegovi opisi

Identifikacijska oznaka uzorka	Opis
SCC	Obični kvadratni stup
SC1GM	AB kvadratni stup ojačan jednoslojnim staklenim FRCM-om
SC2GM	AB kvadratni stup ojačan dvoslojnim staklenim FRCM-om
SC1GMGW	AB kvadratni stup ojačan jednoslojnim staklenim FRCM-om i vanjskim staklenim FRP omotačem spojen epoksidom
SC1CM	AB kvadratni stup ojačan jednoslojnim ugljičnim FRCM-om
SC2CM	AB kvadratni stup ojačan dvoslojnim ugljičnim FRCM-om
SC1CMCW	AB kvadratni stup ojačan jednoslojnim ugljičnim FRCM-om i vanjskim ugljičnim FRP omotačem spojen epoksidom

Tablica 2. Svojstva betona

Br.	Faze	Uzorak	Tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Prosječna tlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Kocka ili cilindar	Vlačna čvrstoća cijepanjem [N/mm <sup>2</sup> ]	Prosječna vlačna čvrstoća cijepanjem [N/mm <sup>2</sup> ]
1	I	kocka 1	22,81	23,35	Cilindar 1	2,10	2,22
2		kocka 2	24,59		Cilindar 2	2,31	
3		kocka 3	21,26		Cilindar 3	2,35	
4	II	kocka 1	23,11		Cilindar 1	2,33	
5		kocka 2	23,50		Cilindar 2	2,41	
6		kocka 3	25,56		Cilindar 3	2,39	
7	III	kocka 1	23,33		Cilindar 1	2,09	
8		kocka 2	23,20		Cilindar 2	2,03	
9		kocka 3	22,82		Cilindar 3	2,00	

sastoji se od tri šipke promjera 6 mm s razmakom od 250 mm. Uzdužne šipke savijene su do 90° jer se uzima u obzir nosivost. Detalji armature prikazani su na slici 7. Učvršćenje tenzometra prikazano je na slici 8. Slike tkanine izrađene od staklenih vlakana i ugljičnih materijala i mreže prikazane su na slici 9. Svojstva tenzometra, tkanine od vlakana i mreže od vlakana navedena su u tablicama 3., 4. i 5. Uzastopni postupak ojačanja primjenom FRCM-a i vanjskog spajanja FRP-a prikazan je na slici 10.

Tablica 3. Svojstva tenzometra

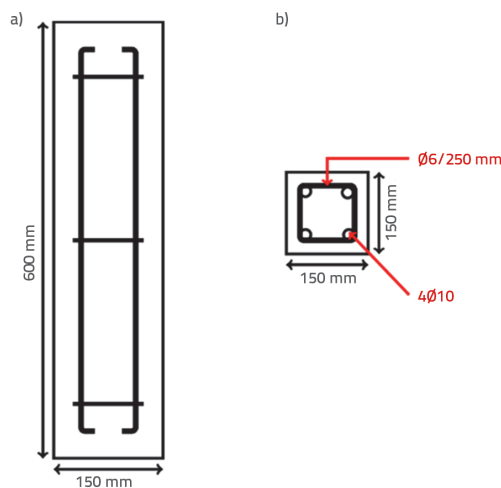
Duljina tenzometra	Otpor	Faktor tenzometra
5mm	350 ± 0,5 ohms	1,9

Tablica 4. Svojstva tkanine

Vrsta vlakana	Staklena	Ugljična
Izduženje	0,048	0,017
Masa po površini	200 g/m <sup>2</sup>	230 g/m <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća	3400 MPa	4130 MPa
Debljina ploče	0,255 mm	0,255 mm

Tablica 5. Svojstva mreže od vlakana

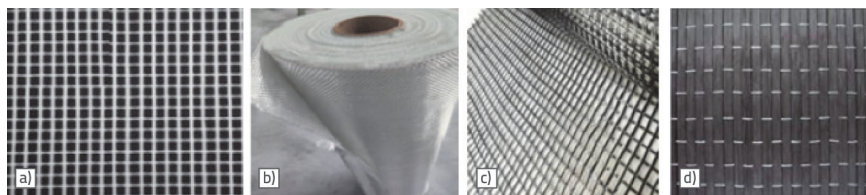
Vrsta vlakana	Staklena	Ugljična
Izduženje	4,70 %	1,70 %
Masa po površini	145 g/m <sup>2</sup>	230 g/m <sup>2</sup>
Veličina mreže	5 mm × 5 mm	10 mm × 10 mm
Debljina ploče	0,175 mm	0,255 mm



Slika 7. Detalji armature AB kružnog stupa: a) uzdužni presjek; b) poprečni presjek



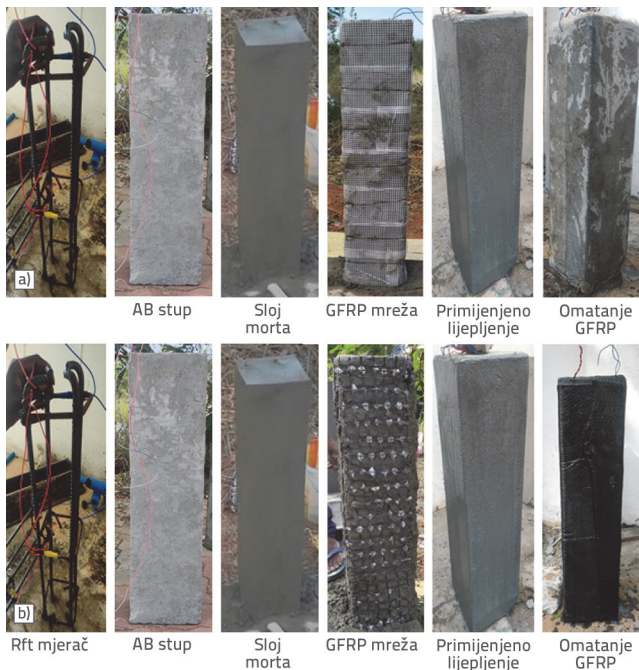
Slika 8. Učvršćivanje tenzometra



Slika 9. Mreža od vlakana i tkanina: a) GFRP mreža; b) GFRP tkanina; c) CFRP mreža; d) CFRP tkanina

se odjeljku raspravlja o graničnom kapacitetu, opterećenju u odnosu na vertikalnu deformaciju, duktilnosti i oblicima slomova te ih se uspoređuje s eksperimentalnim rezultatima i analitičkim predviđanjima.

#### 4.1. Granična čvrstoća



Slika 10. Redoslijed ojačanja AB kvadratnog stupa: a) stakleni FRCM/FRP omotač; b) ugljični FRCM/FRP omotač

Rezultati ispitivanja graničnog opterećenja i deformacije u tri smjera za sve uzorke, točnije SCC, SC1GM, SC2GM, SC1GMGW, SC1CM, SC2CM i SC1GMCW, navedeni su u tablici 6. Postotak povećanja granične čvrstoće ojačanih uzoraka u usporedbi s običnim uzorkom prikazan je na slici 11. Kao što je prikazano na toj slici, svi ojačani uzorci pokazali su veću graničnu čvrstoću kod sloma od običnog uzorka. Stupovi s jednoslojnim i dvoslojnim staklenim/ugljičnim FRCM-om, kao što su SC1GM, SC2GM, SC1CM i SC2CM, pokazali su kapacitete od 10 % do 30 % veće od onog u običnom uzorku. Hibridno ojačani uzorci SC1GMGW i SC1GMCW pokazali su poboljšane performanse, dajući povećanje vršne čvrstoće od 25 % do 50 % pod aksijalnim tlakom u usporedbi s referentnim uzorkom. U usporedbi s uzorkom ojačanim FRCM-om, predložena hibridna metoda pokazala je 15 % do 25 % veću vršnu nosivost. To pokazuje da su hibridne tehnike ojačanja učinkovito poboljšale ponašanje stupa pružanjem boljeg ovijanja i da je kombinirani FRCM/EB-FRP sustav pokazao superiorni vršni kapacitet u usporedbi s ostalima. U hibridnoj metodi, vanjska vlakna apsorbiraju prekomjerno opterećenje stupa i popuštaju, osiguravajući sigurnost stupa od sloma. U usporedbi hibridno ojačanog uzorka sa stupom ojačanim isključivo FRCM-om, hibridni FRCM/EB-FRP pristup postigao je veću čvrstoću s manje slojeva FRCM-a, čime se smanjuje debljina sloja za ojačanje oko stupa. Kutovi kvadratnog stupa zaobljeni su na radijus od 10 mm, što je poboljšalo vezu između vlakana i betonske površine i pomoglo minimizirati efekt rubova. Slika 12. prikazuje usporedbu eksperimentalnog opterećenja s analitičkim predviđanjima. Analitička predviđanja malo su

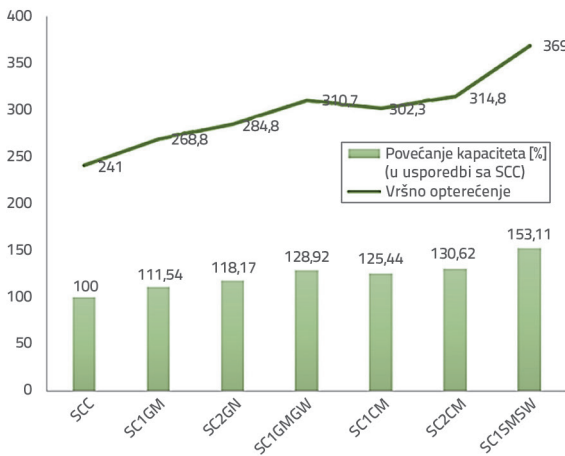
#### 4. Rezultati i rasprava

Svih sedam stupova ispitano je pod aksijalnim tlakom u okviru za opterećenje pri povećanju opterećenja od 1 kN/s. U ovom

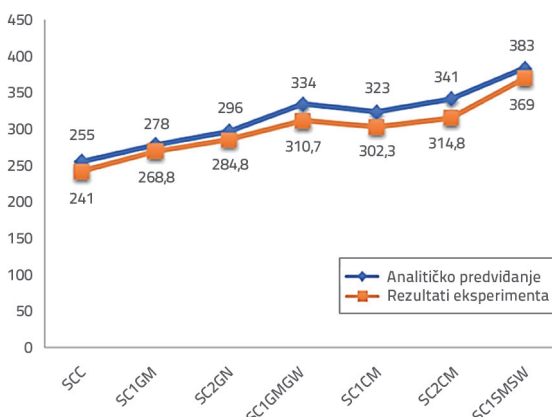
Tablica 6. Rezultati ispitivanja

Br.	Identifikacijska oznaka uzorka	Postotak armature $\rho_s$	Granična nosivost $P_{max}$ [kN]	Deformacija $\Delta y$ (aksijalna) pri graničnom opterećenju [mm]	Deformacija $\Delta x$ (bočna) pri graničnom opterećenju [mm]	Deformacija $\Delta z$ (bočna) pri graničnom opterećenju [mm]	Obrazac sloma
1	SCC	0,014	241,0	9,6	0,9	3,6	Slom uslijed drobljenja
2	SC1GM	0,014	268,7	9,3	0,7	7,4	Zdrobljeni mort, puknuće vlakana
3	SC2GM	0,014	284,8	6,3	2,5	5,5	Odlamanje morta, klizanje i pucanje vlakana
4	SC1GMGW	0,014	310,6	6,8	3,5	2,9	Popuštanje/kidanje vlakana
5	SC1CM	0,014	302,4	5,9	0,9	1	Odlamanje morta, pucanje vlakana
6	SC2CM	0,014	314,8	5,7	3,2	2,7	Odlamanje morta, klizanje i pucanje vlakana
7	SC1GMCW	0,014	369,0	4,8	3,3	3,3	Odlijepljena i naborana vlakna

precijenila vršno opterećenje u usporedbi s eksperimentalnim opterećenjem.



Slika 11. Postotak povećanja kapaciteta u usporedbi s običnim uzorkom (kapacitet običnog stupa smatra se 100 %)

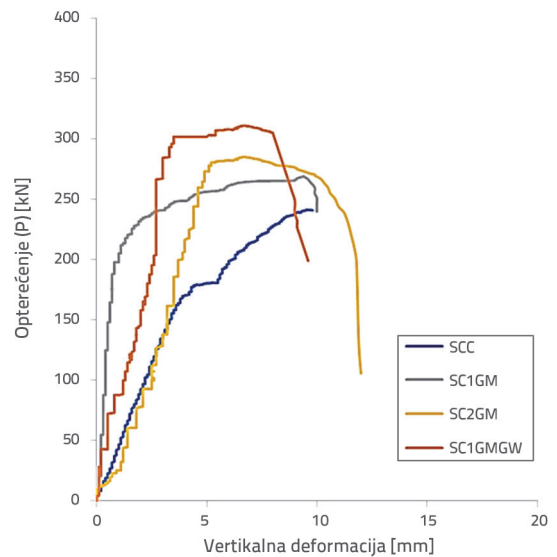


Slika 12. Eksperimentalno opterećenje u odnosu na analitičko predviđanje

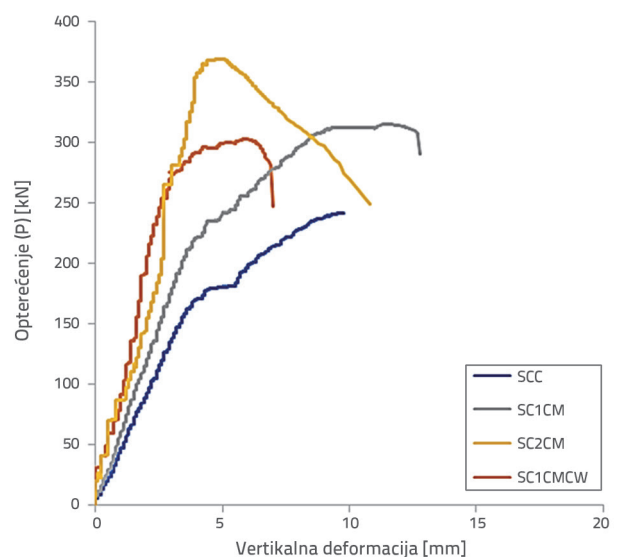
#### 4.2. Opterećenje u odnosu na deformaciju

Krivulja opterećenja u odnosu na deformaciju pomaže razumjeti ponašanje AB elemenata, a odgovarajuće krivulje opterećenja u odnosu na aksijalne deformacije za sve uzorke prikazane su na slikama 13. i 14. Ponašanje svih ojačanih uzoraka pokazalo je slične odzive bez obzira na vrstu vlakana. Kada su ojačani stupovi bili opterećeni, stupovi su pokazali linearno ponašanje od 75 % do 85 % vršnog opterećenja, pokazujući elastično ponašanje. Na početku krivulja opterećenja i deformacije pri manjim deformacijama, kontrolni i ojačani uzorci pokazali su slične odzive. Do te je sličnosti došlo jer je tlačno opterećenje primarno apsorbirala betonska jezgra, a slojevi za ojačanje još nisu bili pod utjecajem. Kako se opterećenje približavalo vršnoj vrijednosti, ojačani su stupovi odstupali od neovijenih stupova, a vanjski slojevi FRM-a/FRP-a razvili su djelovanje ovijanja. Poboľšani uzorci pokazali su manje popuštanje i vršne

pomake od običnih uzoraka, što je pripisano poboljšanjima u početnoj krutosti uzorka, kao što je prikazano na slikama 13. i 14. Popuštanje vlakana napredovalo je pri vršnom opterećenju i uočena je veća deformacija. U konačnici, stupovi su otkazali zbog drobljenja betona, što je možda uvjetovano upotrebom betona niže kvalitete. Uzorci ojačani hibridnim FRP-om pokazali su vrhunsku izvedbu u poboljšanju cjelokupnog ponašanja, što je rezultiralo primjetnim povećanjem čvrstoće za približno 50 %. Nadalje, pojava FRP pukotina od sila cijepanja na vlačnoj strani pri 80 % vršnog opterećenja istaknulo je ključnu ulogu bočnog ovijanja u odgađanju ukupnog sloma elemenata stupa. Značajno popuštanje kod hibridno ojačanog uzorka prije sloma spriječilo je prerano odvajanje slojeva FRM-a.



Slika 13. Opterećenje u odnosu na deformaciju: 1) SCC; 2) SC1GM; 3) SC2GM; 4) SC1GMGC



Slika 14. Opterećenje u odnosu na deformaciju: 1) SCC; 2) SC1GM; 3) SC2GM; 4) SC1GMGC

Tablica 7. Površina ispod krivulje opterećenja i deformacije do vršne vrijednosti

Br.	Oznaka uzorka	Površina ispod krivulje opterećenja i deformacije do vršne vrijednosti [kN/mm]
1	SCC	1574
2	SC1GM	2391
3	SC2GM	2388
4	SC1GMGW	2457
5	SC1CM	2581
6	SC2CM	2861
7	SC1CMCW	2965

Tablica 8. Maksimalne vrijednosti deformacije

Identifikacijska oznaka uzorka	Maksimalna deformacija na krajnjem spoju [mikrometar]	Maksimalna deformacija na srednjem spoju [mikrometar]
CCC	2270	765
CC1GM	962	503
CC2GM	798	443
CC1GMGW	695	325
CC1CM	896	496
CC2CM	801	333
CC1CMCW	669	305

### 4.3. Duktilnost

Karakteristike duktilnosti materijala mjerene su izračunom njihove apsorpcije energije. Tablica 7. prikazuje apsorpciju energije za svaki uzorak koja je izračunana pomoću površine ispod krivulje opterećenja i deformacije. U FRCM/EB-FRP-u primijećena je veća apsorpcija energije od 20 % do 25 % u usporedbi s uzorkom ojačanim FRCM-om. To potvrđuje da vanjski FRP omotač spojen epoksidom ojačava bolje od ovijanja slojem FRCM-a i povećava kapacitet apsorpcije energije. Veća duktilnost rezultirala je većom deformacijom prije sloma stupa.

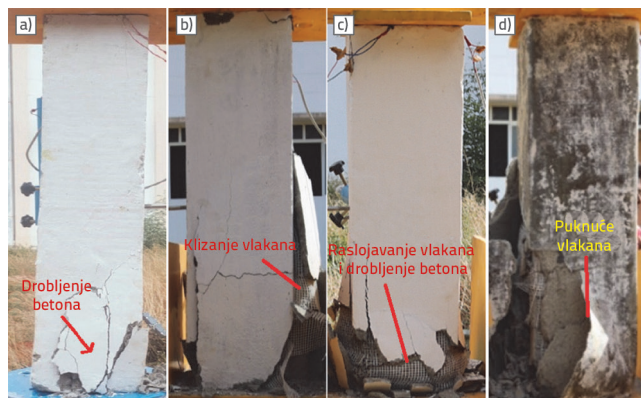
### 4.4. Deformacija spojeva

Maksimalna lokalna točkasta naprezanja na srednjim i krajnjim spojevima svakog uzorka navedena su u tablici 8. Uočeno je da je, zbog koncentracije reakcije na kraju stupa, doprinos srednjeg spoja manji od doprinosa krajnjeg spoja. Zbog ojačanja uzorka stupa, svi ojačani uzorci imali su niže vrijednosti deformacije od običnog uzorka (SCC) zahvaljujući utjecaju ovijenosti FRP-a. Hibridno ojačani uzorci (tj. SC1GMGW i SC1CMCW) imali su niže vrijednosti deformacija od uzoraka jednostruko/dvostruko ojačanih FRCM-om (tj. SC1GM, SC2GM, SC1CM i SC2CM) zbog doprinosa vanjskog FRP omatanja primijenjenom opterećenju. Deformacije uzoraka ojačanih ugljičnim FRP-om bile su manje od deformacija staklenih uzoraka.

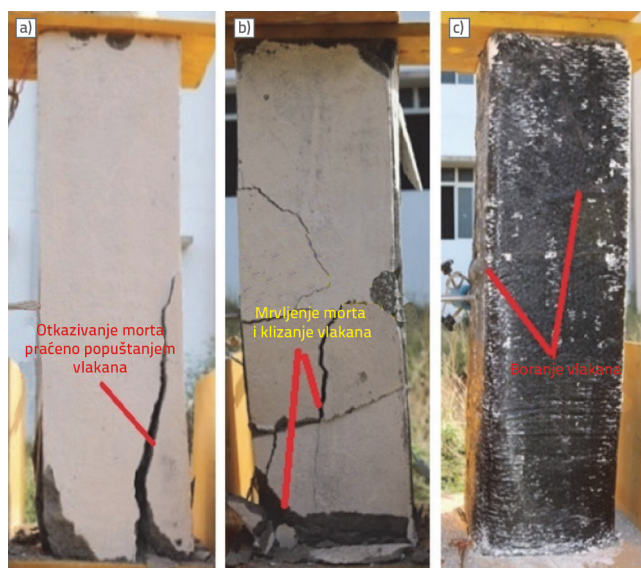
### 4.5. Obrazac sloma

Obrasci slomova običnih i ojačanih uzoraka prikazani su na slikama 15. i 16. U slučaju običnog uzorka, došlo je do sloma zbog drobljenja betona, čemu je prethodilo širenje vidljivih pukotina na dnu stupa, odnosno točki reakcije. Kod uzoraka ojačanih jednoslojnim ili dvoslojnim FRCM-om, kao što su SC1GM, SC2GM, SC1CM i SC2CM došlo je do popuštanja vlakana nakon čega je uslijedilo odvajanje/klizanje slojeva, a na kraju je došlo do sloma zbog drobljenja betonske jezgre, kao što je prikazano na slikama 15. a i 15.c te slikama 16.b i 16.c. Slom sloja FRCM-a počeo je na kraju stupa zbog visoke koncentracije naprezanja. Kod hibridno ojačanih uzoraka SC1GMGW i SC1CMCW došlo je do sloma zbog kidanja FRP omotača i pucanja epoksidnih veza, kao što je prikazano na slikama 15.d i 16.c. U hibridno ojačanom uzorku, vanjski FRP omotač ovio je sloj FRCM-a i eliminirao preuranjeno odvajanje sloja FRCM-a. Nakon pucanja FRP omotača, u slojevima FRCM-a došlo je do unutarnjeg naprezanja te je anorganska matrica počela pucati, nakon čega je uslijedilo drobljenje betona. U stupovima SC1GMGW i SC1CMCW, nabori su uočeni u vanjskom FRP ovijanju. Ti nabori ukazuju na odvajanje FRP-a ili pucanje epoksidnog sloja. Kod svih ojačanih i kontrolnih uzoraka na kraju je došlo do sloma zbog drobljenja betona na ovijenom kraju stupa. Razlog može biti niži stupanj upotrijebljenih omjera mješavine.





Slika 15. Obrazac sloma uzoraka: a) SCC; b) SC1GM; c) SC2GM; d) SC1GMGC



Slika 16. Obrazac sloma uzoraka: a) SC1CM; b) SC2CM; c) SC1CMCC

## 5. Zaključak

U ovom se radu ispitalo ponašanje sloma hibridno ojačanih AB kvadratnih stupova primjenom FRCM/EB-FRP tehnike s eksperimentalnim i analitičkim metodama. Svi su stupovi ispitani pod aksijalnim tlakom. Iz rasprave su doneseni sljedeći glavni zaključci:

- Eksperimentalno ispitivanje potvrdilo je da je ovijanje svih ojačanih uzoraka rezultiralo većom nosivošću i duktilnošću nego u slučaju neovijenog uzorka. Hibridni su uzorci pokazali 25 % do 65 % veću graničnu čvrstoću od jednoslojnog/dvoslojnog FRCM-a. Hibridna se metoda pokazala učinkovitijom od same FRCM metode.
- Ugljični FRP zbog veće je vlačne čvrstoće više pridonio ojačanju od staklenog FRP-a. U ovim eksperimentima, hibridno ojačani uzorci ojačani su istom vrstom vlakana koja se primjenjuju u FRCM-u i vanjskom FRP-u. Hibridni uzorak s ugljičnim vlaknima pokazao je bolju izvedbu u smislu čvrstoće i krutosti od hibridnog uzorka sa staklenim vlaknima.
- Hibridna tehnika ojačanja pomoću FRCM-a/EP-FRP-a pokazala je da se broj slojeva FRCM-a može smanjiti primjenom vanjskog FRP spajanja, čime se smanjuje debljina sloja stupa ojačanog FRCM-om.
- Hibridno ojačani stupovi kod kojih se primjenjuju staklo i ugljik pokazali su slično ponašanje. Čvrstoća i krutost ugljičnih uzoraka bile su veće zbog njihove veće vlačne nosivosti.
- Kod svih ojačanih uzoraka došlo je do sloma zbog puknuća vlakana, nakon čega je uslijedilo drobljenje betona. Slom uzorka ojačanog FRCM-om dogodio se zbog klizanja vlakana, a smanjeno je ovijanje vanjskog FRP omotača u hibridnoj metodi. Efekt rubova u kvadratnom stupu smanjen je polumjerom kuta.
- Predložena hibridna metoda pokazala je bolje karakteristike deformacije od ostalih apsorbirajući više energije. To potvrđuje da vanjsko FRP spajanje ograničava sloj FRCM-a i povećava apsorpciju energije.
- Učinkovitost hibridnog FRP ojačanja može se poboljšati osiguravanjem FRP lamela s višim modulom elastičnosti. Stoga se aksijalni tlačni kapacitet može poboljšati.

## LITERATURA

- [1] Saini, A., Prakash, S.S.: Analytical study on the effectiveness of hybrid FRP strengthening on behaviour of slender reinforced concrete square columns, *Structures*, 33 (2021), pp. 4218-4242
- [2] Chellapandian, M., Prakash, S.S., Sharma, A.: Experimental and finite element studies on the flexural behavior of reinforced concrete elements strengthened with hybrid FRP technique, *Composite Structures*, 208 (2019), pp. 466-478
- [3] Fossetti, M., Alotta, G., Basone, F., Macaluso, G.: Simplified analytical models for compressed concrete columns confined by FRP and FRCM system, *Materials and Structures*, 50 (2017), pp. 1-20
- [4] Mohsen, D., Alireza, M., Mohammad, S.R., Jafar, A.M.: Performance of reinforced engineered cementitious composite square columns, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 13-21, <https://doi.org/10.14256/JCE.3503.2022>
- [5] Harba, I.S., Abdulridha, A.J.: Numerical analysis of RC columns under cyclic uniaxial and biaxial lateral load, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 10, pp. 979-994, <https://doi.org/10.14256/JCE.2889.2020>
- [6] Kernou, N., Messaoudene, L., Lyacine, B.: Effects of column damage on the reliability of reinforced concrete portal frames, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 53-63, <https://doi.org/10.14256/JCE.3588.2022>
- [7] El-Hacha, R., Mashrik, M.A.: Effect of SFRP confinement on circular and square concrete columns, *Engineering Structures*, 36 (2012), pp. 379-393
- [8] Faleschini, F., Zanini, M.A., Hofer, L., Pellegrino, C.: Experimental behavior of reinforced concrete columns confined with carbon - FRCM composites, *Construction and Building Materials*, 243 (2020), Paper 18296
- [9] Arabshahi, A., Tavakkolizadeh, M.: Predictive model for slenderness limit of circular RC columns confined with FRP wraps, *Structural Concrete*, 23 (2022) 2, pp. 849-875
- [10] Faleschini, F., Gonzalez-Libreros, J., Zanini, M.A., Hofer, L., Sneed, L., Pellegrino, C.: Repair of severely-damaged RC exterior beam-column joints with FRP and FRCM composites, *Composite Structures*, 207 (2019), pp. 352-363

- [11] Jawdhari, A., Adheem, A.H., Kadhim, M.M.: Parametric 3D finite element analysis of FRCM-confined RC columns under eccentric loading, *Engineering Structures*, 212 (2020), Paper 110504
- [12] Ebead, U., Wakjira, T.G.: Behaviour of RC beams strengthened in shear using near surface embedded FRCM, *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [13] Gonzalez-Libreros, J.H., Sneed, L.H., D'Antino, T., Pellegrino, C.: Behavior of RC beams strengthened in shear with FRP and FRCM composites, *Engineering Structures*, 150 (2017), pp. 830-842
- [14] Ombres, L., Verre, S.: Numerical modeling approaches of FRCMs/ SRG confined masonry columns, *Frontiers in Built Environment*, 5 (2019), pp. 143
- [15] Chellapandian, M., Prakash, S.S., Rajagopal, A.: Analytical and finite element studies on hybrid FRP strengthened RC column elements under axial and eccentric compression, *Composite Structures*, 184 (2018), pp. 234-248
- [16] Hasan, H., Pascu, R., Georgescu, D.P.: Experimental and numerical investigation of plain concrete columns strengthening by FRCM composite material, *InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021.
- [17] Toska, K., Faleschini, F.: FRCM-confined concrete: monotonic vs. cyclic axial loading, *Composite Structures*, (2021), pp. 268
- [18] Gonzalez-Libreros, J., Zanini, M.A., Faleschini, F., Pellegrino, C.: Confinement of low-strength concrete with fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) composites, *Composites, Part B: Engineering*, (2019), pp. 177
- [19] Donnini, J., Spagnuolo, S., Corinaldesi, V.: A comparison between the use of FRP, FRCM and HPM for concrete confinement, *Composites, Part B: Engineering*, 169 (2019), pp. 586-594
- [20] Jiang, T., Teng, J.G.: Behavior and design of slender FRP-confined circular RC columns, *Journal of Composites for Construction*, 17 (2013) 4, pp. 443-453
- [21] Pessiki, S., Harries, K.A., Kestner, J.T., Sause, R., Ricles, J.M.: Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets, *Journal of composites for Construction*, 5 (2001), pp. 237-245
- [22] Toutanji, H., Han, M., Gilbert, J., Matthys, S.: Behavior of large-scale rectangular columns confined with FRP composites, *Journal of Composites for Construction*, 14 (2010), pp. 62-71
- [23] Sharma, S.S., Dave, U.V., Solanki, H.: FRP wrapping for RC columns with varying corner, *Procedia engineering*, 51 (2013), pp. 220-229
- [24] Xiao, Y., Wu, H.: Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets, *Journal of materials in civil engineering*, 12 (2000), pp. 139-146
- [25] Kyaure, M., Abed, F.: Finite element parametric analysis of RC columns strengthened with FRCM, *Composite Structures*, 275 (2021), Paper 114498
- [26] Abu Obaida, F., El-Maaddawy, T., El-Hassan, H.: Bond behavior of carbon fabric-reinforced matrix composites: Geopolymeric matrix versus cementitious mortar, *Buildings*, 11 (2021), Paper 207
- [27] Wei, L., Ueda, T., Matsumoto, K., Zhu, J.H.: Experimental and analytical study on the behavior of RC beams with externally bonded carbon-FRCM composites, *Composite Structures*, 273 (2021), Paper 114291
- [28] Tello, N., Alhoubi, Y., Abed, F., El Refai, A., El-Maaddawy, T.: Circular and square columns strengthened with FRCM under concentric load, *Composite Structures*, 255 (2021), Paper 113000
- [29] Colajanni, P., De Domenico, F., Recupero, A., Spinella, N.: Concrete columns confined with fibre reinforced cementitious mortars: Experimentation and modelling, *Construction and Building Materials*, 52 (2014), pp. 375-384
- [30] Colajanni, P., Fossetti, M., Macaluso, G.: Effects of confinement level, cross-section shape and corner radius on the cyclic behavior of CFRCM confined concrete columns, *Construction and Building Materials*, 55 (2014), pp. 379-389
- [31] Triantafyllou, T.C., Papanicolaou, C.G., Zissimopoulos, P., Laourdekis, T.: Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets, *ACI Structural Journal*, 103 (2006) 1, Paper 28
- [32] Feng, R., Li, Y., Zhu, J.H., Xing, F.: Behavior of corroded circular RC columns strengthened by C-FRCM under cyclic loading, *Engineering Structures*, 226 (2021), Paper 111311
- [33] Zhu, J.H., Chen, J., Feng, Y., Liu, C.B.: Compression tests of C-FRCM jacket confined hollow section RC columns, *Structures*, 31 (2021) 6, pp. 961-969
- [34] Trapko, T., Musiał, M.: Effect of PBO-FRCM reinforcement on stiffness of eccentrically compressed reinforced concrete columns, *Materials*, 13 (2020) 5, Paper 1221
- [35] Chellapandian, M., Prakash, S.S., Mahadik, V., Sharma, A.: Experimental and numerical studies on effectiveness of hybrid FRP strengthening on behavior of RC columns under high eccentric compression, *Journal of Bridge Engineering*, 24 (2019) 6, pp. 04019048
- [36] Ispir, M., Dalgic, K.D., Ilki, A.: Hybrid confinement of concrete through use of low and high rupture strain FRP, *Composites, Part B: Engineering*, 153 (2018), pp. 243-255
- [37] Noroozieh, E., Mansouri, A.: Lateral strength and ductility of reinforced concrete columns strengthened with NSM FRP rebars and FRP jacket, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11 (2019) 2, pp. 195-209
- [38] Wakjira, T.G., Ebead, U.: Hybrid NSE/EB technique for shear strengthening of reinforced concrete beams using FRCM: Experimental study, *Construction and Building Materials*, 164 (2018), pp. 164-177
- [39] Ebad, U., Wakjira, T.G.: NSE/EB-FRCM technique for strengthening of RC beams in shear, *Proceedings of the 8th Euro-American Congress on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, REHABEND, Granada, Spain, 2020.*
- [40] El-Sherif, H., Wakjira, T.G., Ebead, U.: Flexural strengthening of reinforced concrete beams using hybrid near-surface embedded/ externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix, *Construction and Building Materials*, 238 (2020). pp. 117748
- [41] Ali, D., Yiğit, I., Taha, Y.A.: Experimental and numerical investigation of RC beams strengthened with CFRP composites, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021), pp. 605-616
- [42] Sumathi, M., Greeshma, S.: Experimental investigation of exterior reinforced concrete beam - column joints strengthened with hybrid FRP laminates, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021), pp. 365-379
- [43] Hognestad, E., Hanson, N.W., McHenry, D.: Concrete stress distribution in ultimate strength design, *ACI Journal Proceedings*, 52 (1955), pp. 475-479
- [44] Hognestad, E.: A study of combined bending and axial load in RC members, *Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1951., Bulletin 339.*
- [45] Lam, L., Teng, J.G.: Design oriented stress strain model for FRP confined concrete in rectangular columns, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22 (2003), pp. 1149-1186
- [46] Lam, L., Teng, J.G.: Design oriented stress strain model for FRP confined concrete, *Construction Building Materials*, 17 (2003), pp. 471-489
- [47] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical  $\sigma$ - $\epsilon$  model for confined concrete, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114 (1988) 8, pp. 1804-1826
- [48] Popovics, S.: Numerical approach to the complete  $\sigma$ - $\epsilon$  relation for concrete, *Cement and concrete composites*, 3 (1973) 5, pp. 583-599