

Primljen / Received: 19.7.2020.

Ispravljen / Corrected: 10.9.2021.

Prihvaćen / Accepted: 26.1.2022.

Dostupno online / Available online: 10.3.2022.

# Ponašanje valjkastih uzoraka betona ovijениh CFRP-om - laboratorijska studija

## Autori:



<sup>1</sup>Prof. G. Nechevska-Cvetanovska  
golubka@pluto.iziis.ukim.edu.mk

Autor za korespondenciju



<sup>2</sup>Artur Roshir, dipl.ing.građ.  
artur.roshir@yahoo.com



<sup>3</sup>Doc.dr.sc. Jordan Bojadžiev  
bojadziev@gmail.com



<sup>1</sup>Izv.prof.dr.sc. Julijana Bojadžieva  
jule@iziis.ukim.edu.mk



<sup>4</sup>Mr.sc. Zoran Trajcevski  
trajcevskizoran92@gmail.com

<sup>1</sup>Sveučilište Sv. Ćirila i Metodija u Skoplju - UKIM  
Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku  
seizmologiju - IZIS, Skoplje, Sj. Makedonija

<sup>2</sup>Metropolitan Sveučilište, Tirana, Albanija

<sup>3</sup>Međunarodno balkansko sveučilište, Skoplje,  
Sj. Makedonija

<sup>4</sup>Chakar&Partners, Skoplje, Sj. Makedonija

Prethodno priopćenje

[Golubka Nechevska-Cvetanovska, Artur Roshir, Jordan Bojadžiev, Julijana Bojadžieva, Zoran Trajcevski](#)

## Ponašanje valjkastih uzoraka betona ovijениh CFRP-om - laboratorijska studija

U ovom se radu istražuje primjena inovativnih materijala za potrebe sanacije i pojačanja AB stupova građevina smještenih u seizmički aktivnim područjima. U Institutu za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIS, Skoplje) provedena su analitička i laboratorijska ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betonskih valjaka ovijениh CFRP-om (polimerom armiranim vlaknima) kako bi se odredile mogućnosti i koristi od upotrebe tih materijala. U radu su prikazani odabrani rezultati laboratorijskih ispitivanja ugrađenih materijala kao i djelomični analitički rezultati kvazistatičkih ispitivanja projektiranih AB stupova ovijениh CFRP-om.

### Ključne riječi:

inovativni materijali, CFRP, laboratorijska ispitivanja, tlačna čvrstoća, ovijenost, duktilnost

Research Paper

[Golubka Nechevska-Cvetanovska, Artur Roshir, Jordan Bojadžiev, Julijana Bojadžieva, Zoran Trajcevski](#)

## Performance of CFRP-confined concrete cylinder specimens - laboratory study

The research presented in this paper focuses on the application of innovative materials for the repair and strengthening of RC columns of buildings in seismically active regions. The analytical and laboratory research for defining the compressive strength and elastic modulus of concrete cylinders confined with CFRP (Fibre Reinforced Polymers) was carried out at the Skoplje-based Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIS in order to present the possibilities and benefits of using these materials. Selected results from laboratory testing of built-in materials, and some analytical results from the designed CFRP-confined RC columns for quasi static tests, are presented in this paper.

### Key words:

innovative materials, CFRP, laboratory tests, compressive strength, confined, ductility

## 1. Uvod

Ponašanje konstrukcija postojećih armiranobetonskih građevina tijekom njihova trajanja, kao i u potresu, ovisi o brojnim faktorima. S jedne strane, na njihovo ponašanje utječu vanjski faktori, tj. opterećenja koja djeluju na građevinu (uz glavna opterećenje, tu su i dodatna opterećenja te učinci mogućih eksplozija, požara, potresa itd.). S druge

strane, na njihovo ponašanje utječu i faktori koji izravno ovise o samoj konstrukciji građevine (konstrukcijski sustav, vrsta, količina i kvaliteta materijala korištenih u izgradnji građevine, broj katova, vrsta temeljenja itd.). Svi ti faktori izravno utječu na čvrstoću i deformabilnost pojedinih elemenata konstrukcije te na konstrukcijski sustav u cjelini.

Seizmičko pojačanje armiranobetonskih elemenata konstrukcije jedna je od metoda koje se u današnje vrijeme primjenjuju kako bi se povećala seizmička otpornost oštećenih ili neoštećenih građevina. Čvrstoća konstrukcije se na taj način može u manjoj ili većoj mjeri povećati, a može se i poboljšati duktilnost građevine. Drugim riječima, može se ustvrditi da koncept pojačanja obuhvaća a) povećanje čvrstoće, b) povećanje čvrstoće i duktilnosti i c) povećanje duktilnosti.

Iako se za sanaciju, pojačanje i obnovu postojećih AB građevina uobičajeno primjenjuju tradicionalne metode (koje najčešće uključuju oblaganje elemenata), u novije se vrijeme ipak sve češće upotrebljavaju novi inovativni materijali te posebne tehnologije građenja i sanacije građevina [1-3]. Mogućnosti primjene takvih inovativnih materijala još uvijek su predmet istraživanja diljem svijeta, naročito u pogledu mogućnosti njihove primjene u seizmički aktivnim područjima.

Kao doprinos razvoju i primjeni novih inovativnih materijala u inženjerskoj praksi, u Laboratoriju za dinamička ispitivanja tvrtke UKIM-IZIIS smještene u Skoplju (R.S. Makedonija) provedena su odgovarajuća eksperimentalna kvazistatička ispitivanja, dok su laboratorijska ispitivanja materijala provedena u Institutu za ispitivanje materijala – ZIM, AD Skoplje, R.S. Makedonija [4].

U radu su prikazani odabrani rezultati laboratorijskih ispitivanja ugrađenih materijala, te dio analitičkih rezultata isto kao i dio kvazistatičkih eksperimentalnih istraživanja na modelima koji su projektirani i izvedeni uz primjenu FRP materijala.

## 2. Laboratorijsko ispitivanje modelskih uzoraka provedeno u okviru eksperimentalnih istraživanja u tvrtki UKIM-IZIIS

### 2.1. Priprema valjkastih uzoraka betona za ispitivanje

Za potrebe eksperimentalnih kvazistatičkih ispitivanja projektirana su i izvedena dva modela, tj. model M1 i model M2. Usvojene su identične dimenzije pojedinačnih modela (50/50/116 za nosivu gredu tj. 30/30/200 za stup) izvedenih



Slika 1. Fotografije postupka izrade uzoraka

u mjerilu 1:1. Primijenjen je isti razred betona jer su modeli betonirani istovremeno. Primijenjena je ista tehnologija i metodologija postavljanja FRP-a, a variran je postotak vertikalne i poprečne armature u modelima, uz konstantnu vertikalnu osnu silu na stupovima. Kako je bila potrebna relativno mala količina betona, Sintek-Specific odlučio je upotrijebiti samozbijajući beton tipa SIBET. Odlučeno je da se modeli izvedu vertikalno kako bi se omogućila što jednostavnija ugradnja FRP-a.

Na slici 1. prikazane su fotografije snimljene tijekom betoniranja temeljne grede i stupova za oba modela. U prvoj su fazi betonirani oslonci-temelji, a u drugoj su izvedena oba stupa.

Tijekom izrade uzoraka temeljnih greda, pripremljena su tri uzorka – betonske kocke dimenzija 15/15/15 cm, dok su tri kocke dimenzija 15/15/15 cm pripremljene prilikom izrade uzoraka stupova, kao i devet (9) valjaka dimenzija 15/30 cm (slika 2.). Laboratorijska ispitivanja za definiranje tlačne čvrstoće i razreda betona provedena su u dioničarskom društvu GIM – Skoplje (za kocke) te u tvrtki ZIM – Skoplje (za valjke). Ispitivanja za definiranje modula elastičnosti ugrađenog betona provedena su u tvrtki ZIM – Skoplje.



Slika 2. Fotografije betonskih uzoraka (kocke i valjci)

Na valjkastim uzorcima betona provedene su tri serije ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti:

- serija 0: betonski valjci bez FRP-a – običan beton
- serija 1: betonski valjci obavijeni jednim slojem FRP-a
- serija 2: betonski valjci obavijeni s dva sloja FRP-a

Na slikama 3. i 4. prikazane su fotografije snimljene tijekom pripreme betonskih valjaka za dodatna ispitivanja.



Slika 3. Postavljanje tenzometara na betonske valjke



Slika 4. Obavijanje betonskih uzoraka CFRP-om za laboratorijska ispitivanja u ZIM-u, Skoplje

## 2.2. Rezultati ispitivanja razreda betona

Za sve tri serije betonskih valjkastih uzoraka određene su vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Laboratorijska ispitivanja provedena su u Institutu za ispitivanja materijala i razvoj novih tehnologija ZIM Skoplje AD Skoplje. Slijedi prikaz rezultata ostvarenih tijekom ispitivanja provedenih na tri serije betonskih valjaka.

### 2.2.1. Tlačna čvrstoća betonskih valjaka

Tlačna čvrstoća betona utvrđena je na valjkastim uzorcima dimenzija 15/30 cm monotonim nanošenjem tlačne sile uz postupno povećavanje tlaka sve do sloma. Uzorkovanje je provedeno 4. listopada 2019., a laboratorijska ispitivanja na 6 (šest) valjaka provedena su 15. studenoga 2019. godine. Preostala tri valjka ispitana su 29. studenoga 2019. Ispitivanja u laboratoriju ZIM u Skoplju provedena su nakon više od 28 dana (tj. 43. i 57. dana) jer su ispitivanja trebala biti vremenski bliska datumima kvazistatičkog ispitivanja modela u tvrtki UKIM-IZIIS koja su provedena 20. i 22. studenoga 2019. (tj. 48 i 50 dana nakon lijevanja uzoraka).

Fotografije laboratorijskih ispitivanja tlačne čvrstoće betona prikazane su za sve tri serije na slikama 5. do 11. Treba naglasiti da su uzorci koji pripadaju prvoj i drugoj seriji popustili eksplozivno, uz snažno pucanje betona obavijenog CFRP-om. To je bilo naročito izraženo u seriji 2 u kojoj je beton obavijen s dva sloja CFRP-a. Stoga se pri nanošenju sile dio betona trebao zaštititi čeličnom pločom kako bi se izbjegle neželjene posljedice.



Slika 5. Ispitivanje tlačne čvrstoće običnog betona (serija 0 - bez CFRP-a)



Slika 6. Ispitivanje tlačne čvrstoće običnog betona (serija 0 - bez CFRP-a)



Slika 7. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona obavijenog s jednim slojem CFRP-a, serija 1



Slika 8. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona obavijenog s jednim slojem CFRP-a, serija 1



Slika 11. Fotografije valjkastih uzoraka korištenih u tri serije ispitivanja



Slika 9. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona obavijenog s dva sloja CFRP-a, serija 2

### 2.2.2. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betonskih valjaka

Paralelno s ispitivanjima na tri serije uzoraka zabilježeni su i tablično iskazani rezultati dobiveni ispitivanjem sile sloma i tlačne čvrstoće na sve tri serije betonskih valjaka (tablica 1.). Iz rezultata se vidi da sila koja dovodi do sloma betonskih valjaka bez CFRP-a iznosi 296.0 kN. Kod valjka s jednim slojem CFRP-a ta sila iznosi 670.0 kN, a kod valjka s dva sloja CFRP-a ona iznosi 955.0 kN. Tlačna čvrstoća u tri serije iznosi 16,8 MPa u prvoj, 37,0 MPa u drugoj te 54,1 MPa u trećoj seriji. Ti su rezultati grafički prikazani na slikama 12. i 13.



Slika 10. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona obavijenog s dva sloja CFRP-a, serija 2

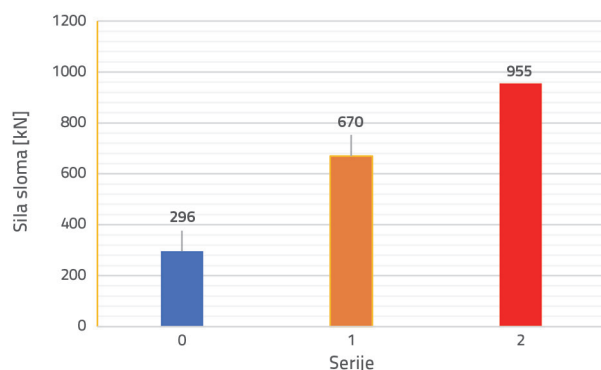


Tablica 1. Rezultati tlačne čvrstoće za tri serije betonskih valjaka

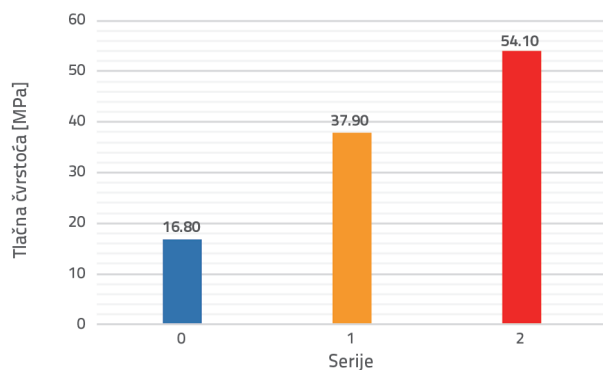
		Datum ugradnje betona: 4.10.2019. Datum ispitivanja: 15.11.2019. Betonski valjci CC (3 serije) 15/30 cm				
		Serija	Dimenzije H/D [cm]	Težina [g]	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]
Uzorc	0	Valjci bez CFRP-a	30/15	12200	296,0	16,8
	1	Valjci s jednim slojem CFRP-a	30/15	12700	670,0	37,9
	2	Valjci s dva sloja CFRP-a	30/15	12800	955,0	54,1

Tablica 2. Modul elastičnosti za tri serije betonskih uzoraka

Datum ugradnje betona: 4.10.2019. Datum ispitivanja: 15.11.2019. Betonski valjci CC (3 serije) 15/30 cm						
Serije		Dimenzije H/D [cm]	Težina [g]	Sila sloma [kN]	Modul elastičnosti [MPa]	
Uzorci	0	Valjci bez FRP-a	30/15	12200	296,0	28200,0
	1	Valjci s jednim slojem FRP-a	30/15	12700	670,0	33000,0
	2	Valjci s dva sloja FRP-a	30/15	12800	955,0	43500,0



Slika 12. Grafički prikaz sile sloma u pojedinim serijama



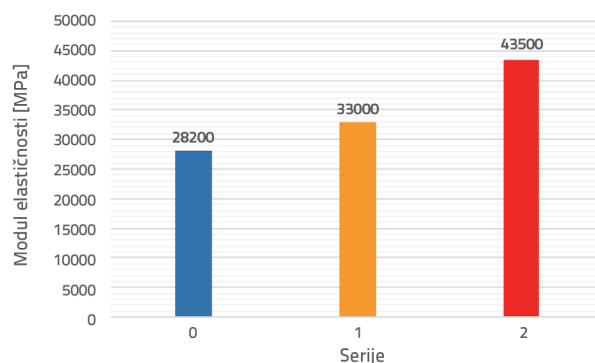
Slika 13. Grafički prikaz tlačne čvrstoće u pojedinim serijama

### 2.2.3. Rezultati ispitivanja modula elastičnosti

U laboratoriju Instituta za ispitivanje materijala, ZIM – Skoplje AD ispitani su i moduli elastičnosti svake serije (0, 1, 2) uzoraka. Ispitivanja statičkog modula elastičnosti pod tlakom provedena su prema normi MKS U.M1.025. Srednja vrijednost rezultata dobivenih na tenzometrima nakon sloma u posljednjem ciklusu smatra se najprikladnijom za određivanje statičkog modula elastičnosti. Fotografije ispitivanja provedenog na tri serije betonskih valjaka prikazane su na slici 14. Rezultati dobiveni ispitivanjem triju serija betonskih valjaka prikazani su u tablici 2. Općenito se može zaključiti da modul elastičnosti raste s povećanjem broja FRP slojeva. Vrijednosti elastičnog modula dobivene tijekom laboratorijskog ispitivanja grafički su prikazane na slici 15.



Slika 14. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti za sve tri serije uzoraka



Slika 15. Dijagram modula elastičnosti za sve tri serije

Može se općenito zaključiti da su vrijednosti dobivene ispitivanjem betonskih valjaka s jednim i dva sloja CFRP-a više od vrijednosti dobivenih za betonske valjke bez CFRP-a.

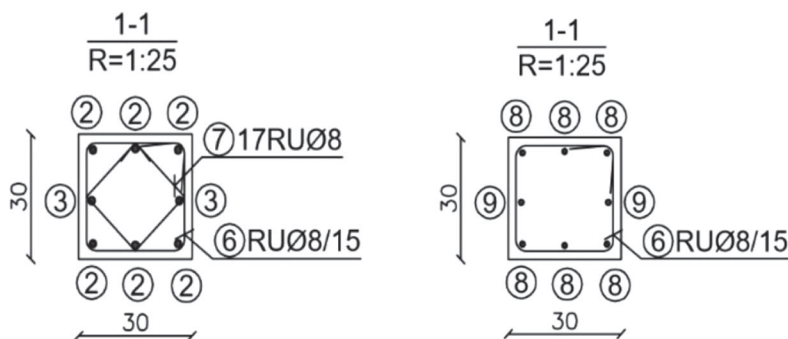
### 3. Eksperimentalna kvazistatička ispitivanja AB stupova s CFRP-om

Za potrebe ovog istraživanja definiran je originalan program istraživanja koji uključuje eksperimentalna istraživanja na seriji od dva elementa – modela (stupa). Istraživanje je provedeno kao doprinos naporima za definiranje zajedničkog ponašanja betona, armature i CFRP-a u nelinearnom području, te kao doprinos razvoju metodologije i kriterija za primjenu tih materijala u seizmički aktivnim područjima, [32]. Osnovni cilj istraživačkog programa bio je definiranje čvrstoće i deformabilnosti elemenata izrađenih od inovativnih materijala u funkciji broja odabranih parametara koji su varirani tijekom provedbe eksperimenata. Postotak uzdužne i poprečne armature variran je u okviru eksperimentalnog programa provedenog u tvrtki UKIM-IZIIS. U oba je modela korišten isti razred betona i isti tip CFRP-a. Ponašanje modela podvrgnutih cikličnom opterećenju do sloma (kvazistatička ispitivanja) istraživano je vizualnim promatranjem pojave pukotina i razvoja mehanizma sloma.

Dva stupna elementa projektirana su za potrebe eksperimentalnih istraživanja. Modeli tih stupova projektirani su kao upeti konzolni nosači nepromjenjive dužine od 200 cm

(stup je tretiran samo do točke infleksije, tj. do polovice ukupne visine) s poprečnim presjekom od 30/30 cm. U oba su modela kao varijabilni parametri usvojeni postotak uzdužne i poprečne armature te osne sile. Razred betona, tj. tlačna čvrstoća betona i vrsta CFRP-a, isti je kod oba modela. Elementi su projektirani u geometrijskom mjerilu 1:1. Osnovna sila za simuliranje gravitacijskog opterećenja iznosila je 500 kN za model M1, tj. 300 kN za model M2. Način simuliranja upetosti stupnih elemenata također je definiran tijekom projektiranja modela stupova. Upetosti razmatranih modela izvedeni su na identičan način. Za te je potrebe projektiran AB oslonac čija širina i visina iznosi 50 cm a dužina 116 cm. Taj je oslonac armiran na način koji omogućuje potpuno učvršćenje modela. Osnovna uzdužna armatura stupnog modela spojena je s osloncem tako da nema gubitka kontakta tijekom eksperimenta. Stupni su modeli s čeličnim osloncem spojeni vijcima pomoću osam čeličnih prednapetih vijaka (po četiri na svakoj strani). Ukupna težina čitavog sklopa (stup + oslonac za fiksiranje modela) iznosila je 1,2 tone (slika 16.).

Karakteristike materijala (beton, armatura i vrsta CFRP-a) korištenih u projektiranju i izvođenju modela, te postoci armature, prikazani su u tablicama 3. i 4.



Slika 16. Projektiranje stupnih modela i poprečni presjeci (model M1 - lijevo, model M2 - desno)

Tablica 3. Karakteristike materijala korištenih u projektiranju stupnih modela

Uzorak	CC [MPa]	b/h [cm]	Uzdužna armatura		Poprečna armatura	
			Vrsta čelika	$A_{tension}$ [cm <sup>2</sup> ]	Vrsta čelika	s [cm]
Model M1	25/30	30/30	RA 400/500	7,63	RA 400/500	7,5
Model M2	25/30	30/30	RA 400/500	4,62	RA 400/500	15,0

Tablica 4. Karakteristike materijala korištenih u izvedenim stupnim modelima

Uzorak	CC [MPa]	b/h [cm]	Uzdužna armatura		Poprečna armatura	
			Vrsta čelika	$A_{tension}$ [cm <sup>2</sup> ]	Vrsta čelika	s [cm]
Model M1	16/20	30/30	RA 504/642	7,63	RA 595/696	7,5
Model M2	16/20	30/30	RA 513/637	4,62	RA 595/696	15,0
CFRP	S&P C-folija 240, 300 g/m <sup>2</sup>					

## 4. Analiza rezultata dobivenih tijekom analitičkih istraživanja

Za analizu kapaciteta projektiranih stupova korišteno je nekoliko matematičkih modela uz primjenu CSI programa SAP 2000, tj. modula za proračun presjeka [18, 31, 33]. Stupovi su modelirani na bazi materijalnih svojstava definiranih tijekom ispitivanja. Proračun kapaciteta presjeka proveden je na temelju analize vlakana poprečnog presjeka stupa uzimajući u obzir geometrijska svojstva, detalje armature te različite vrijednosti osnih sila. Primijenjen je uobičajeni ojačani model betona prema Manderu i dr. [34], a za čeličnu armaturu korišten je elastični savršeno plastični model s otvrdnjavanjem pri deformaciji. Dijagram idealnih osnih napreznja i deformacija prema radu Olivova i dr. [8] korišten je za armirani beton omotan CFRP folijom.

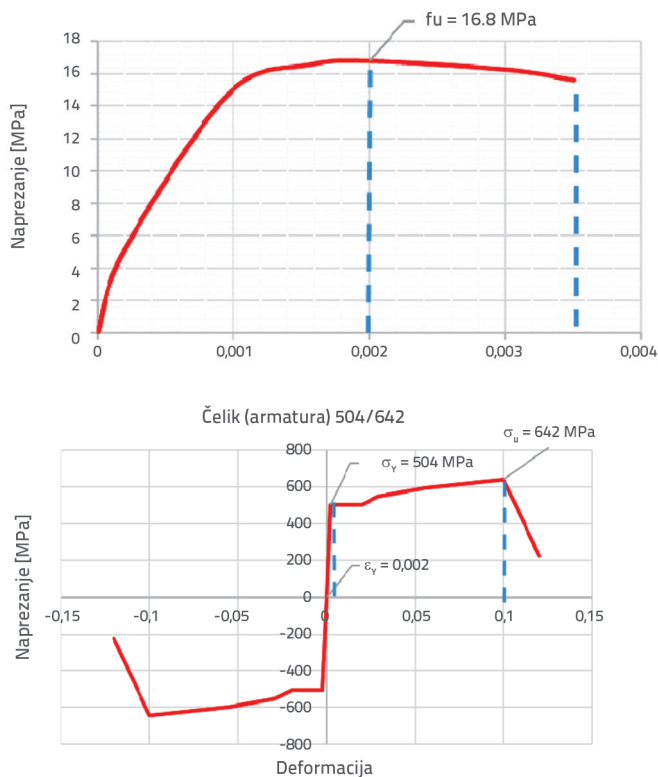
### 4.1. Definiranje stvarne čvrstoće i deformabilnosti stupnih modela

Za definiranje stvarne nosivosti i deformabilnosti izvedenih stupnih modela korištene su vrijednosti kvalitete ugrađenog betona i armature koje su dobivene za vertikalnu i poprečnu armaturu te vrsta korištene CFRP folije (prema prikazu iz tablice 4.). U prvoj je fazi izračunan stvarni odnos  $M-\Phi$  (odnos momenta i zakrivljenosti) poprečnog presjeka stupova uz pomoć osne sile, tj. dijagrami stvarnog odnosa  $M-N$ , nakon čega su na bazi dobivenih dijagrama  $M-\Phi$  za svaki model izračunane vrijednosti čvrstoće i deformabilnosti.

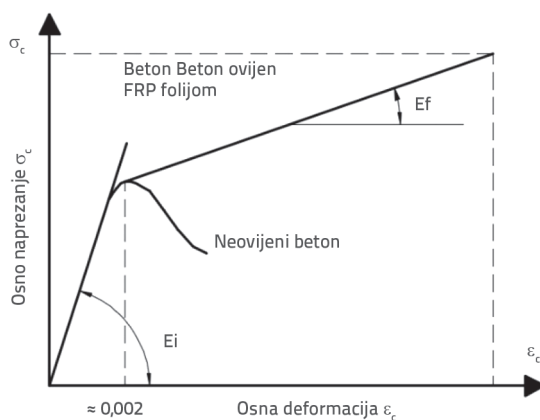
Karakteristike čvrstoće i deformabilnosti ( $M-N$ ) i ( $M-\Phi$ ) na razini poprečnog presjeka analitički su definirane pomoću računalnog programa SAP2000. Provedene su sljedeće analize:

- Za model M1, definiran je dijagram  $M-\Phi$  za  $N_v = 500$  kN (slika 20.) te dijagram  $M-N$  (slika 19.) za sljedeće vrijednosti:
  - za razred projektiranog betona (DC) (EC-25/30) s kvalitetom i količinom armature prema tablici 3. serija O1.
  - za razred ugrađenog betona (CC) (EC-16/20) s kvalitetom i količinom armature prema tablici 4., serija O2.
  - za razred ugrađenog betona s jednim slojem CFRP-a (CC-FRP) (38/46) s kvalitetom i količinom armature prema tablici 4., serija O3.
- Za Model M2, definiran je dijagram  $M-\Phi$  za  $N_v = 300$  kN (slika 22.) te dijagram  $M-N$  (slika 21.) za sljedeće vrijednosti:
  - za razred projektiranog betona (DC) (EC-25/30) s kvalitetom i količinom armature prema tablici 3., serija O1.
  - za razred ugrađenog betona (CC) (EC-16/20) s kvalitetom i količinom armature prema tablici 4., serija O2.
  - za razred ugrađenog betona s jednom slojem CFRP-a (CC-FRP) (38/46) s kvalitetom i količinom armature prema tablici 4., serija O3.

U svim analizama AB poprečnih presjeka bez CFRP-a korišteni su radni dijagrami ( $\sigma-\epsilon$ ) za beton te radni dijagrami za čelik prema slici 17. Sve analize provedene su uzimajući u obzir učinak ovijenosti poprečnog presjeka poprečnom armaturom. Za beton ovijen CFRP-om korišten je radni dijagram prikazan na slici 18. [8]. Rezultati dobiveni tijekom tih analiza prikazani su kako slijedi.



Slika 17. Odnos napreznje – deformacija za beton C16/20 (gore) i armaturu RA 504/642 (dolje) za nelinearnu analizu konstrukcije

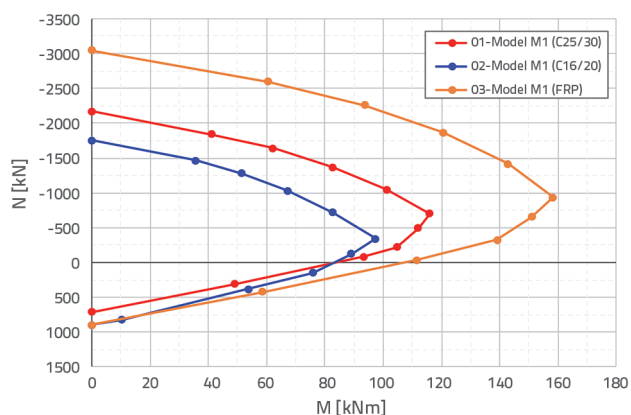


Slika 18. Idealni dijagram osnih napreznja i deformacija  $\sigma_c-\sigma_c$  za beton ojačan CFRP folijom

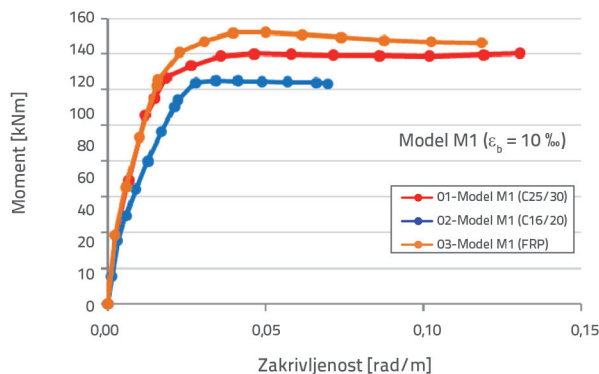
### 4.2. Odnos M-N i M-Φ za model M1

Za model M1 prikazani su rezultati analiza triju serija (O1, O2, O3) provedenih za definiranje vrijednosti M-N te triju serija za dijagrame M-Φ. Svi prikazani dijagrami izvedeni su pomoću programa SAP2000 [18, 31, 33]. Na dijagramima interakcije M-N koji su prikazani na slici 19. jasno se uočava razlika između triju serija analiza.

Iz dobivenih se rezultata mogu izvesti sljedeći zaključci: na temelju usporedne analize triju krivulja – serije O1, O2 i O3 – prema slikama 19. i 20., može se zaključiti da je duktilnost poprečnog presjeka s CFRP-om veća za 39,9 % od duktilnosti poprečnog presjeka bez CFRP-a ako postignuta deformacija betona iznosi  $\epsilon_c = 10 \text{ ‰}$ .



Slika 19. Dijagram odnosa M-N za model M1 – usporedni prikaz



Slika 20. Dijagram odnosa M-Φ za model M1 – usporedni prikaz

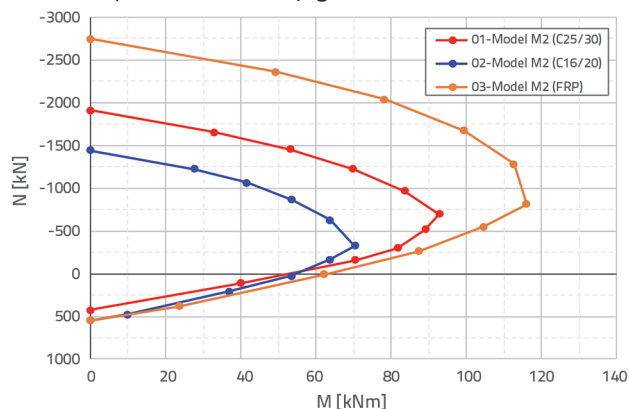
Što se tiče rezultata za deformaciju od  $\epsilon_c = 20 \text{ ‰}$ , može se zaključiti da je deformacija armature vrlo visoka te da dostiže vrijednost i do 53,50 i 38,5 ‰ (za poprečni presjek s CFRP-om). Osim toga, uočava se i izrazita nelinearnost koja se očituje kao izvijanje armature, te su zbog toga daljnje analize poprečnog presjeka s CFRP-om provedene za vrijednosti deformacije od 15 ‰. U tom je slučaju vrijednost duktilnosti modela M1 s CFRP-om veća za 98 % od vrijednosti duktilnosti poprečnog presjeka bez CFRP-a.

Kapacitet za moment postignut za seriju O3 (poprečni presjek s CFRP-om) veći je za 68 % od odgovarajuće vrijednosti poprečnog presjeka 0.20 (serija s ugrađenim betonom razreda 16/20). Kapacitet za osne sile dobiven za seriju O3 (poprečni presjek s CFRP-om) veći je za 71 % od odgovarajućeg kapaciteta poprečnog presjeka 0.2 (serija s ugrađenim betonom razreda 16/20).

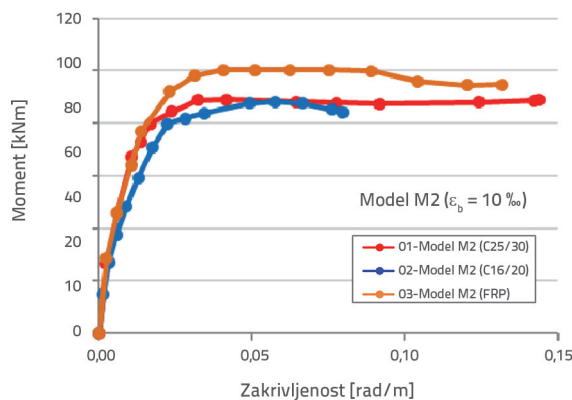
### 4.3. Odnos M-N i M-Φ za model M2

Za model M2 prikazani su rezultati triju serija analiza (serije O1, O2 i O3) za definiranje dijagrama M-N i M-Φ. Svi prikazani dijagrami izvedeni su pomoću programa SAP 2000 [18, 31, 33]. Na dijagramima interakcije (slike 21. i 22.) jasno se vidi razlika između pojedinih serija analiza. Kapacitet za moment serije O3 (poprečni presjek s CFRP-om) veći je za 63 % od odgovarajućeg kapaciteta serije O2 (serija s ugrađenim betonom razreda 16/20). Kapacitet za osne sile za seriju O3 (poprečni presjek s CFRP-om) veći je za 59,5 % od odgovarajućeg kapaciteta za O2 (serija s ugrađenim betonom razreda 16/20).

Iz rezultata se mogu izvesti sljedeći zaključci: usporedna analiza triju krivulja – za serije O1, O2 i O3 koje su prikazane na slikama 21. i 22. – jasno pokazuje da dijagram za poprečni presjek s CFRP-om ima najbolje karakteristike čvrstoće i deformacije kada se usporedi s ostalim dijagramima.



Slika 21. Dijagram odnosa M-N za model M2 – usporedni prikaz



Slika 22. Dijagram odnosa M-Φ za model M2 – usporedni prikaz



Tablica 5. Kapacitet rotacije i pomaka za model M1 i model M2

Uzorak	Rotacija		Duktilnost	Pomak		Duktilnost
	$\Phi_y$ [rad/m]	$\Phi_u$ [rad/m]	$D\Phi$	$d_y$ [cm]	$d_u$ [cm]	$Dd$
Model M1-02	0,0127	0,0696	5,48	1,056	2,626	2,487
Model M1-03	0,0154	0,1730	11,23	1,281	5,631	4,306
Model M2-02	0,0128	0,0663	5,18	1,065	2,542	2,387
Model M2-03	0,0231	0,1963	8,50	1,922	6,702	3,487

Tablica 6. Kapacitet posmika i momenta savijanja za model M1 i model M2

Uzorak	Moment		Dužina	Posmik	
	$M_y$ [kNm]	$M_u$ [kNm]	$L$ [m]	$Q_y$ [kN]	$Q_u$ [kN]
Model M1-02	80,00	123,39	1,58	50,02	78,09
Model M1-03	122,00	149,27	1,58	77,20	94,47
Model M2-02	59,25	87,50	1,58	37,50	55,38
Model M2-03	92,00	94,26	1,58	57,20	59,65

Na temelju usporedbe rezultata može se zaključiti da je duktilnost poprečnog presjeka s CFRP-om za 83,7 % veća od duktilnosti poprečnog presjeka bez CFRP-a u slučaju ostvarene deformacije betona od 10‰. Kada se analiziraju rezultati za  $\varepsilon_c = 20$  ‰, može se zaključiti da su u tom slučaju vrijednosti deformacije u armaturi vrlo visoke, tj. da dosežu vrijednosti i do 55,0 i 41,2 ‰ (u slučaju poprečnog presjeka s CFRP-om). Ti rezultati upućuju na izrazitu nelinearnost i nisu realni, te je stoga u daljnjim analizama za beton usvojena vrijednost od 15 ‰. U ovom je slučaju kapacitet duktilnosti modela M2 s CFRP-om veći za 64,0 % od odgovarajuće vrijednosti za poprečni presjek bez CFRP-a.

Kapacitet za moment u seriji 03 (poprečni presjek s CFRP-om) za 63 % je veći od odgovarajućeg kapaciteta poprečnog presjeka 02 (serija s ugrađenim betonom razreda 16/20). Kapacitet za osne sile u seriji 03 (poprečni presjek s CFRP-om) za 59,5 % je veći od odgovarajuće vrijednosti za poprečni presjek 02 (serija ugrađenim betonom razreda 16/20). Svi su rezultati prikazani u tablicama 5. i 6.

Na temelju analize rezultata prikazanih u tablici 5. može se zaključiti da je duktilnost u odnosu na rotaciju modela M1 za 2,049 veća kod modela s CFRP-om, a duktilnost u odnosu na pomak veća je za 76,7 % u odnosu na model M1 bez CFRP-a. Što se tiče modela M2, duktilnost u odnosu na rotaciju veća je za 64 % u slučaju modela s CFRP-om, a duktilnost u odnosu na pomak veća je za 46,1 % u usporedbi s modelom M2 bez CFRP-a.

## 5. Zaključak

Na temelju rezultata sveobuhvatnih laboratorijskih ispitivanja provedenih na betonskim valjcima za seriju 0 – betonski valjci bez CFRP-a (običan beton), seriju 1 – betonski valjci obavijeni s jednim slojem CFRP-a, te seriju 2 – betonski valjci obavijeni s

dva sloja CFRP-a, može se zaključiti da sila koja dovodi do sloma betonskih valjaka bez CFRP-a iznosi 29,6 t, tj. 296 kN. Za valjak s jednim slojem CFRP-a, ta sila iznosi 67,0 t tj. 670 kN, a kod valjka s dva sloja CFRP-a sila popuštanja iznosi 95,5 t tj. 955 kN. Tlačna čvrstoća iznosi 16,8 MPa za prvu seriju, 37,0 MPa za drugu seriju te 54,1 MPa za treću seriju. Može se zaključiti da su vrijednosti sile sloma i tlačne čvrstoće za 2,26 i 3,23 puta veće kod serija 1 i 2 u odnosu na silu sloma kod valjaka bez FRP-a. Postignuti rezultati pokazuju da modul elastičnosti betonskih valjaka bez CFRP-a iznosi 28200 MPa. Kod valjka s jednim slojem CFRP-a modul elastičnosti iznosi 33000 MPa, dok taj modul iznosi 43500 MPa kod valjka s dva sloja CFRP-a. Može se zaključiti da je modul elastičnosti valjka obavijenog s jednim slojem CFRP-a veći za 17 % u odnosu na valjak bez CFRP-a, tj. da je modul elastičnosti valjka s dva sloja CFRP-a veći za 61 % u odnosu na valjak bez CFRP-a. Analitičke analize uzoraka provedene su kako bi se definirala čvrstoća i deformabilnost (M-N) i (M- $\Phi$ ) na razini poprečnog presjeka i u tu je svrhu korišten računalni program SAP2000 [18, 31, 33]. Za svaki su model vrijednosti čvrstoće i duktilnosti definirane na bazi izvedenih dijagrama M- $\Phi$ .

Kapacitet za moment dobiven za poprečni presjek modela M1 s CFRP-om veći je za 21,07 % u odnosu na poprečni presjek bez CFRP-a. Kapacitet za moment dobiven za poprečni presjek modela M2 s CFRP-om veći je za 7,7 % u odnosu na poprečni presjek bez CFRP-a.

U slučaju Modela M1, duktilnost u odnosu na rotaciju veća je za 98 % kod modela s CFRP-om, a duktilnost u odnosu na pomak, prema autorima Park i Poulay [15], veća je za 76,7 % u usporedbi s modelom M2 bez CFRP-a.

U slučaju modela M2, duktilnost u odnosu na rotaciju veća je za 64 % kod modela s CFRP-om, a duktilnost u odnosu na pomak, prema autorima Park i Poulay [15], veća je za 46,1 % u usporedbi s modelom M2 bez CFRP-a.

Može se općenito zaključiti da sustavi FRP predstavljaju izuzetno praktično sredstvo za pojačanje i obnovu betonskih konstrukcija te da su pogodni za savojno ojačanje, posmično ojačanje, ovijanje stupova i poboljšanje duktilnosti. Laboratorijska i eksperimentalna istraživanja

provedena u ovom radu originalan su znanstveni doprinos na polju sanacije i pojačanja AB stupova primjenom inovativnih materijala, a rezultati ovog istraživanja mogu se u velikoj mjeri primijeniti u praksi u području graditeljstva i potresnog inženjerstva.

## LITERATURA

- [1] Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, 2004
- [2] CEN 2004, European Standard EN 1998-3: 2005 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings.
- [3] Eurocode – 2: Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
- [4] Nechevska-Cvetanovska, G.: Non-Linear Analysis and Design of RC Cross-Section Resistance of RC Buildings, published September 1998.
- [5] Ozcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Akyuz, U., Erduran, E.: Rehabilitation of Existing RC Structures Using CFRP Fabrics, Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 1393 (2004).
- [6] Abbas, M.: Earthquake Resistant Structures-Design, Assessment and Rehabilitation, Published online February 2012, published in print edition February 2012.
- [7] Sarafraz, M., Danesh, F.: Flexural Enhancement of RC Columns with FRP, the 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12 – 17, 2008, Beijing, China.
- [8] Olivova, K., Bilcik, J.: Strengthening of Concrete Columns with CFRP, Slovak Journal of Civil Engineering, 17 (2009) 1, pp. 1-9.
- [9] Necevska-Cvetanovska, G., Petrusevska- Apostolska, R., Terzic, U.: Displacement – Based Design Approach for Design of RC Frame Building Structures, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, (a joint event of the 13<sup>th</sup> ECEE & 30<sup>th</sup> General Assembly of the ESC), 3-8 September 2006, Geneva, Switzerland.
- [10] SikaWrap FRP <https://www.youtube.com/watch?v=vsE5eOuLMg8>.
- [11] Yan, Z., Pantelides, C.P.: Design-Oriented Model for Concrete Columns Confined with Bonded FRP Jackets or Post-Tensioned FRP Shells, In: Triantafillou TC (ed) 8<sup>th</sup> International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, GR, paper 6-1, 2007.
- [12] Fajfar, P., Eeri, M.: A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design, Earthquake Spectra, 16 (2000) 3, pp. 573 – 592.
- [13] Chopra, A.K.: Dynamic of Structures” 2<sup>nd</sup> ed, Theory and Application to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- [14] Paulay, T., Priestly, M.J.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Wiley & Sons, ISBN 0 – 471 – 54915 – 0, 1992.
- [15] Park, R., Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, Wiley & Sons, 1975
- [16] Necevska-Cvetanovska, G., Petrushevska, R.: Methodology for Seismic Design of R/C Building Structures, 12WCEE, New Zeland, 2000.
- [17] Folić, R., Zenunović, D., Liolios, A.: Recommendation for Seismic Upgrading of Damaged RC Structures, Int. Conf. Structural Faults and Repair, June 2014, Edinburgh, Scotland, Proc. Editor: Professor M C Forde.
- [18] Wilson and Habibullah, SAP2000: Structural Analysis Programme, CSI, Berkeley, California, 2006.
- [19] Necevska-Cvetanovska, G., Apostolska, R.: Methodology for Seismic Assessment and Retrofitting of RC Building Structures, Proc. of 15 World Conference on Earthquake Engineering (Paper ID 2149), 24-28 September 2012, Lisboa, Portugal.
- [20] Necevska-Cvetanovska, G., Roshi, A., Bojadzieva, J.: Seismic Strengthening of Existing RC Building Structures Using Concrete Jacketing and FRP Materials, Journal E-GFOS, Osijek, Croatia, 19 (2019) 193.
- [21] Wang, X., Liu, L., She, W., Zhou, H.: CFRP Reinforced Foam Concrete Subjected to Dynamic Compression at Medium Strain Rate, MDPI Journal, 2019.
- [22] Rey Castillo, E., Griffith, M., Ingham, J.: Seismic Behaviour of RC Columns Flexurally Strengthened with FRP Sheets and FRP Anchors, Composite Structures Journal, July 2018.
- [23] Krstevska, L., Nechevska- Cvetanovska, G.: Quasi-static testing of column models strengthened by FRP, UKIM-IZIIS, IZIIS Report, 2019-75.
- [24] Necevska – Cvetanovska, G., Roshi, A.: Rehabilitation of RC Buildings in Seismically Active Regions Using Traditional and Innovative Materials, Journal Building Materials and Structures, Novi Sad, Serbia, 62 (2019) 3, pp. 19-30.
- [25] FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency): Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, FEMA, 2000.
- [26] Seismic Evaluation Handbook - Federal Emergency Management Agency, FEMA 310, 1999.
- [27] Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, FEMA-440”, 2005.
- [28] Roshi, A., Nechevska- Cvetanovska, G.: Repair and Strengthening of RC Buildings using Traditional and Innovative Materials, 18<sup>th</sup> International Symposium organized by Macedonian Association of Structural Engineers (MASE), October 4-7, 2019, Ohrid, Macedonia
- [29] Chapragovski, G., Necevska-Cvetanovska, G.: CFRP for Seismic Strengthening of Existing Frame Buildings, 14<sup>th</sup> International Scientific Conference (INDIS), Novi Sad, Serbia, 21-23 November, 2018.
- [30] Hatemi, I., Necevska-Cvetanovska, G.: Reduction of Seismic Performance of RC Vertical Elements due to Low Quality of Concrete, 14<sup>th</sup> International Scientific Conference (INDIS), Novi Sad, Serbia, 21-23 November, 2018.
- [31] CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®, November 2017
- [32] Nechevska-Cvetanovska, G., Roshi, A., Bojadjieva, J., Bojadjiev, J., Trajcevski, Z.: Quasi-static tests on RC building columns strengthened with CFRP, GRAĐEVINAR, 73 (2021) 8, pp. 805-818, doi: <https://doi.org/10.14256/ICE.3087.2020>
- [33] CSI America. SAP2000 v20.0.0. <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- [34] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical stress–strain model for confined concrete, J Struct Eng, 114 (1988), pp. 1804-1826.