

Primljen / Received: 29.10.2020.

Ispravljen / Corrected: 5.3.2021.

Prihvaćen / Accepted: 10.4.2021.

Dostupno online / Available online: 10.9.2021.

Kvazistatička ispitivanja CFRP-om pojačanih stupova AB građevina

Autori:



¹Prof. G. Nechevska-Cvetanovska
golubka@pluto.iziis.ukim.edu.mk

Autor za korespondenciju



²Dr.sc. Artur Roshi
artur.roshi@yahoo.com



¹Izv.prof.dr.sc. Julijana Bojadjieva
jule@iziis.ukim.edu.mk



³Doc.dr.sc. Jordan Bojadjiev
bojadjiev@gmail.com



⁴Mr.sc. Zoran Trajcevski
trajcevskizoran92@gmail.com

¹Sveučilište Sv. Ćirila i Metoda u Skoplju - UKIM
Institut za potresno inženjerstvo i inženjersku
seizmologiju - IZIS, Skoplje, Sj. Makedonija

²Metropolitan Sveučilište, Tirana, Albanija

³Međunarodno balkansko sveučilište, Skopje,
Sj. Makedonija

⁴Chakar&Partners, Skopje, Sj. Makedonija

Prethodno priopćenje

[Golubka Nechevska-Cvetanovska](#), [Artur Roshi](#), [Julijana Bojadjieva](#), [Jordan Bojadjiev](#),
[Zoran Trajcevski](#)

Kvazistatička ispitivanja CFRP-om pojačanih stupova AB građevina

Kako bi se istražile mogućnosti i prednosti primjene CFRP-a (ugljičnim vlaknima armiranih polimera) za pojačavanje AB stupova građevina, u Institutu za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju u Skoplju (IZIS) provedena su kvazistatička ispitivanja (na tlak i savijanje) variranjem razreda betona i koeficijentata armiranja, te primjenom raznih tehnologija pojačanja. U radu se daju preporuke i rezultati u pogledu korištenog pristupa i tehnologije te zaključci koji su doneseni kao rezultat praktične primjene tih materijala. Na temelju analize vrijednosti dobivenih pomoću nelinearnih statičkih analiza i nelinearnih vremenskih proračuna može se zaključiti da je duktilnost na pomak modela pojačanog s CFRP-om veća za 60 % u odnosu na model bez CFRP-a, a čvrstoća mu je veća za 7,7 %. Općenito se može zaključiti da su sustavi CFRP izuzetno praktična sredstva za pojačavanje i obnovu betonskih konstrukcija jer mogu znatno poboljšati savojnu nosivost, posmičnu nosivost, ovijanje stupova i njihovu duktilnost.

Ključne riječi:

AB stupovi građevina, kvazistatička ispitivanja, inovativni materijali, CFRP, nosivost, duktilnost

Research Paper

[Golubka Nechevska-Cvetanovska](#), [Artur Roshi](#), [Julijana Bojadjieva](#), [Jordan Bojadjiev](#),
[Zoran Trajcevski](#)

Quasi-static tests on RC building columns strengthened with CFRP

To explore the possibilities and benefits of using CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers) in strengthening RC building columns, quasi-static tests (compression and bending) were carried out at the Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology - IZIS, Skopje by variation of concrete class, reinforcement percentage and by using various strengthening technologies. Some recommendations and outcomes regarding the approach, technology and conclusions drawn from practical application of these materials, are given. Based on the analysis of values obtained from nonlinear static and nonlinear time history analyses, it can be concluded that the ductility capacity for displacement of model strengthened with CFRP is greater by 60 %, while its strength capacity is greater by 7.7 % when compared to the values obtained for the model without CFRP. It can generally be concluded that CFRP systems are a very practical tool for strengthening and retrofitting concrete structures, as they can extensively improve flexural strengthening, shear strengthening, column confinement, and ductility.

Key words:

RC building columns, quasi-static tests, innovative materials, CFRP, strength, ductility

1. Uvod

Iako je u ovom području u R.S. Makedoniji i u široj regiji zabilježen značajan napredak u pogledu definiranja tehnologije građenja, kontrole materijala koji se ugrađuju (vrsta cementa, punilo, voda), prijevoza i ugradnje betona u slojevima, treba napomenuti da se u mnogim slučajevima ipak ne postiže projektom zadan razred betona. Ponekad su takva odstupanja prilično velika te se trebaju predvidjeti i provesti odgovarajuće mjere sanacije i pojačanja na pojedinim elementima konstrukcije, a ponekad čak i na čitavoj građevini. Isti se problem javlja i na dogradnjama, tj. pri izvođenju dodatnih katova ili proširenja u slučajevima kada postojeći nosivi sustav ne može udovoljiti dodatnim zahtjevima nosivosti, krutosti i deformabilnosti.

U R.S. Makedoniji, a i u široj regiji, za sanaciju i pojačanje konstrukcija najviše se koriste konvencionalne metode utemeljene na primjeni tradicionalnih materijala (najčešće se radi o oblaganju elemenata armaturom i torkretiranju). Međutim, u novije vrijeme, a učestalije u protekla dva desetljeća, bilježi se ubrzan razvoj novih građevnih materijala posebno namijenjenih za pojačavanje i projektiranje konstrukcija. Ti su materijali poznati kao vlaknima armirani polimeri (eng. *Fiber reinforced concrete* – FRP). Oni se odlikuju posebnim svojstvima, naročito u pogledu mehaničke otpornosti. Mogućnosti primjene takvih materijala još uvijek su predmet istraživanja diljem svijeta, posebice u vezi s njihovom primjenom u seizmički aktivnim područjima.

Istraživanja provedena u mnogim državama u okviru brojnih istraživačkih studija [1-5] pokazala su da pojačanje građevina pomoću tradicionalnih građevnih materijala (betona i armature) omogućuje povećanje nosivosti, krutosti i duktilnosti građevina, ali su također otkrila da je taj postupak vrlo složen i dugotrajan. Pojačanje pomoću FRP kompozita ne samo da omogućuje postizanje značajne duktilnosti već ima i druge prednosti kao što je npr. kraće vrijeme izvođenja radova. U današnje se vrijeme bilježi kontinuirani razvoj naprednih tehnologija za proizvodnju FRP kompozita koje se temelje na sofisticiranim proizvodnim postupcima. Osim toga, polimeri armirani vlaknima omogućuju proizvodnju kvalitetnijih laminata s minimalnim udjelom šupljina te točan raspored vlakana, a sve to uz prihvatljivu cijenu (u početku su cijene tih materijala bile znatno više).

U radu [6] navode se rezultati i usporedbe provedene tijekom opsežnog eksperimentalnog istraživačkog programa u okviru kojeg su ispitani uzorci običnog betona i betona pojačanog FRP-om.

U radu [7] autori Wang Lu Liu i dr. istraživali su 2019. g. učinkovitost pojačanja pomoću ugljičnim vlaknima armiranih polimera (eng. *Carbon FRP* – CFRP). Oni su eksperimentalno istražili i usporedili odziv, način sloma i apsorpciju energije pjenastog betona s pojačanjem pomoću CFRP-a i bez tog pojačanja nakon nanošenja kvazistatičkog i dinamičkog opterećenja. Tijekom tog istraživanja autori su izveli nekoliko značajnih zaključaka:

- Načini odziva i sloma pjenobetona variraju od posmika i cijepanja (bez CFRP-a) do drobljenja (s CFRP-om).
- Otpornost i sposobnost apsorpcije energije raste s porastom opterećenja, i to bilo da se radi o pjenobetonu pojačanim CFRP-om ili o pjenobetonu bez CFRP-a.
- Tlačna čvrstoća i sposobnost apsorpcije energije bitno rastu u slučaju pjenobetona pojačanog CFRP-om. Tako tlačna čvrstoća raste za otprilike deset puta, a specifična apsorpcija energije pri deformaciji od 0,5 raste također za otprilike deset puta.
- Tlačna čvrstoća i sposobnost apsorpcije energije pjenobetona pojačanog CFRP-om viša je za otprilike 300 % pri kvazistatičkom opterećenju, tj. za otprilike 150 % pri dinamičkom opterećenju, u odnosu na odgovarajuće vrijednosti kombinacije samog CFRP-a i pjenobetona.

Koncept sanacije i pojačanja pomoću kompozitnih materijala u prošlosti je analiziran u okviru brojnih istraživačkih projekata, što uključuje i pokuse na potresnom stolu te kvazistatička ispitivanja provedena u Institutu za potresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju u Skoplju (IZIS) [8-10]. U osnovnim načelima metodologije sanacije i pojačanja naglasak se stavlja na povećanje krajnjeg pomaka te na povećanje duktilnosti građevina, kao što je i navedeno u brojnim normama i publikacijama [11-24].

Rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka pokazuju da se predloženim postupcima sanacije može poboljšati ponašanje ove vrste građevina i to u smislu povećanja njihove nosivosti i duktilnosti. Eksperimentalna su istraživanja u velikoj mjeri pridonijela razvoju u području pojačanja građevina pomoću CFRP-a.

Postupci sanacije AB stupova pomoću CFRP-a analizirani su u većem broju radova kao npr. u radovima [25, 26]. Rezultati provedenih analiza pokazuju da se obavljanjem armiranobetonskih stupova FRP-om povećava duktilnost i nosivost AB stupova na tlak. Za AB stupove pojačane FRP-om razlikujemo tri stupnja ponašanja:

- elastično ponašanje
- neelastično očvršćavanje
- neelastični gubitak nosivosti, nakon čega slijedi povratak na odziv definiran ponašanjem prvotne, nepojačane konstrukcije.

Prof. dr. Alper Ilki proveo je sa svojim timom na sveučilištu ITU u Turskoj ispitivanje uspješnosti sanacije pomoću CFRP-a u okviru projekta "Djelotvornost seizmičke sanacije CFRPS-om kroz ispitivanje ispodstandardnih AB građevina" [27]. Nakon eksperimentalnih istraživanja, utvrđeno je da nesanirane građevine otkazuju pri međukatnom pomaku od 0,0135, dok sanirane građevine ne otkazuju čak ni kod vrijednosti međukatnog pomaka većih od 0,15.

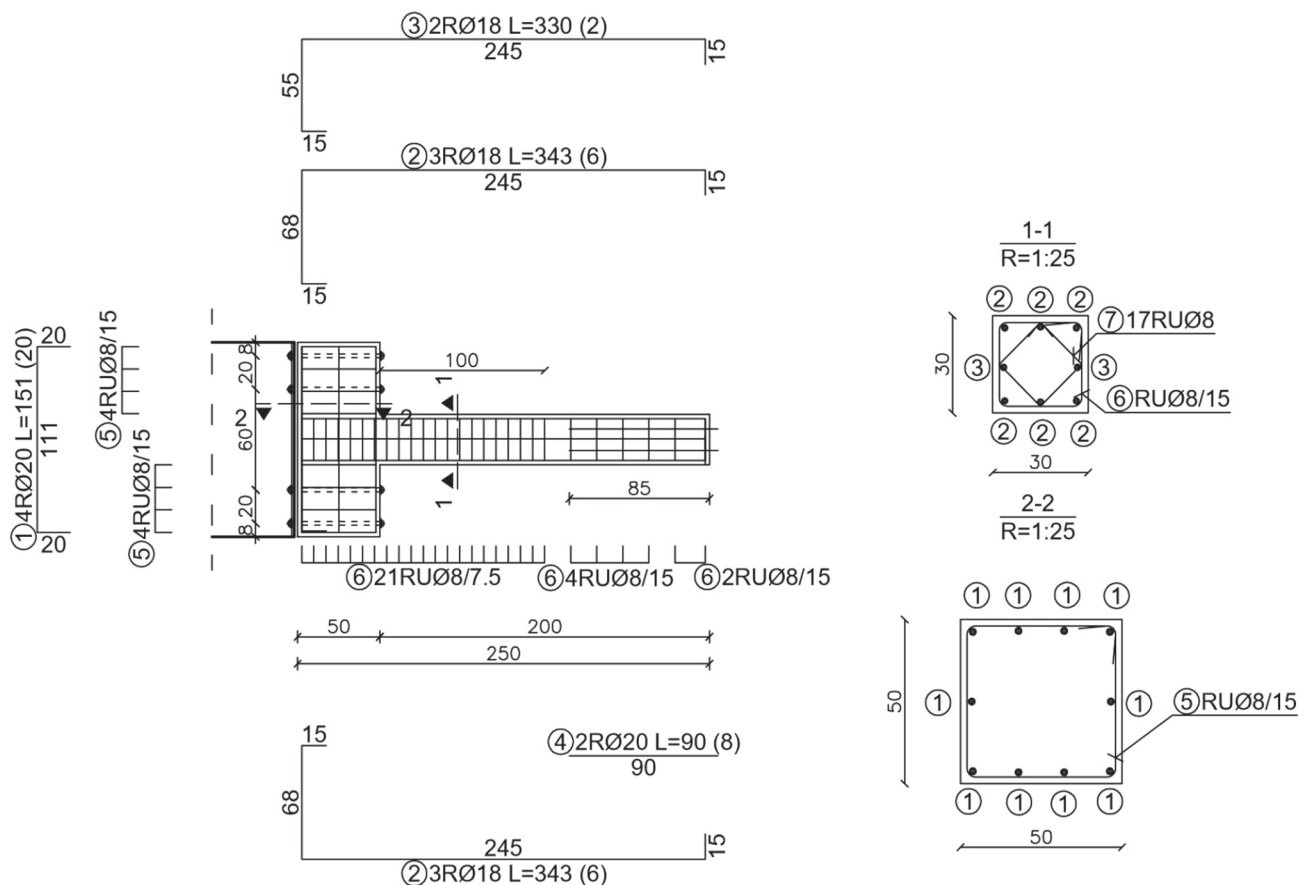
Opsežna laboratorijska istraživanja provedena su u brojnim radovima, primjerice u [28-34], kako bi se definirale karakteristike takvih materijala te eksperimentalno istražila

svojstva AB stupova pojačanih FRP-om. Pritom je osnovni cilj bio ostvariti izvorna znanja o mogućnostima i prednostima uporeba tih inovativnih građevnih materijala u pojačanju kako konstrukcijskih elemenata građevina tako i čitavih građevinskih konstrukcija. U ovom su radu prikazani značajni aspekti takvih eksperimentalnih istraživanja.

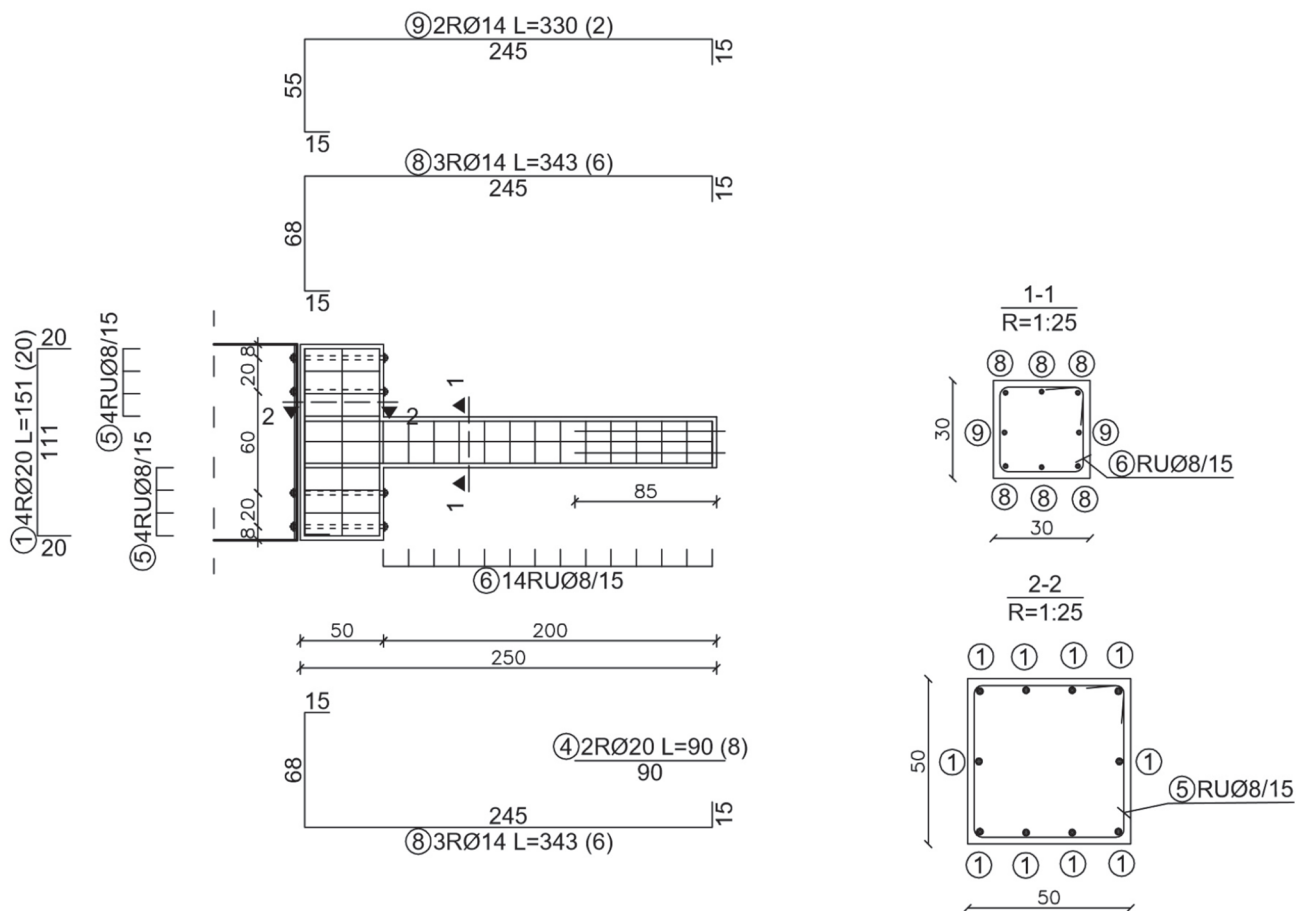
Definiran je izvorni istraživački program u okviru kojeg su provedena eksperimentalna istraživanja serije od dva elementa – modela (stupova) kako bi se omogućilo što jasnije definiranje zajedničkog ponašanja betona, armature i CFRP-a u nelinearnom rasponu, te razvila metodologija i kriteriji za primjenu tih materijala u seizmički aktivnim područjima. Osnovni cilj istraživačkog programa sastojao se u definiranju nosivosti i deformabilnosti elemenata sastavljenih od inovativnih materijala u funkciji odabranih parametara koji su varirani tijekom provedbe eksperimenata. Koeficijent armiranja uzdužnom i poprečnom armaturom variran je tijekom eksperimentalnog programa provedenog u Institutu UKIM-IZIIS. U oba modela korišten je isti razred betona te ista vrsta CFRP-a. Ponašanje modela izloženih cikličnom opterećenju do sloma (u okviru kvazistatičkih ispitivanja) definirano je vizualnim promatranjem pojave pukotina i razvoja mehanizma sloma.

2. Projektiranje modela stupova

Za potrebe eksperimentalnih istraživanja projektirana su dva stupna elementa. Modeli stupova projektirani su kao upeti konzolni nosači konstantne dužine 200 cm (stup se razmatra samo do točke infleksije, tj. do polovice ukupne visine) a dimenzije poprečnog presjeka su 30/30 cm. Koeficijent armiranja uzdužnom i poprečnom armaturom i uzdužna sila su u oba modela varijabilni parametri. U oba modela korišten je isti razred betona, tj. tlačne čvrstoće betona su jednake, te ista vrsta CFRP-a. Modeli su projektirani u geometrijskom mjerilu od 1:1. Uzdužna sila za simuliranje gravitacijskog opterećenja iznosila je 500 kN za model M1, tj. 300 kN za model M2. U okviru projektiranja modela stupova, projektiran je i način simuliranja povezivanja stupnih elemenata. Na identičan je način provedeno i povezivanje (fiksiranje) modela. Projektiran je AB vezni stup duljine 116 cm i poprečnog presjeka dimenzija 50/50 cm. Vezni stup je armiran tako da se postigne potpuna upetost modela. Osnovna uzdužna armatura modela stupa usidrena je u vezni stup kako bi se izbjegao gubitak priranjaja tijekom eksperimenta. Modeli stupova spojeni su, posredstvom veznog stupa, na čeličnu podlogu pomoću osam prednapetih čeličnih vijaka (četiri na svakoj strani). Ukupna težina čitavog sustava (stup + stup za povezivanje modela) iznosi 1,2 tone (slike 1. i 2.).



Slika 1. Detalj geometrije i armature modela stupa (model M1)



Slika 2. Detalj geometrije i armature modela stupa (model M2)

Pri betoniranju modela uzeti su uzorci, i to devet valjaka dimenzija 15/30 cm te tri kocke dimenzija 15/15/15 cm. Na valjcima su provedene tri serije ispitivanja tlačne čvrstoće te ispitivanja za određivanje modula elastičnosti ugrađenog betona. Pritom je primjenjen sljedeći postupak:

- serija 0: betonski valjci bez FRP-a – obični beton

- serija 1: betonski valjci ovijeni jednim slojem FRP-a
- serija 2: betonski valjci ovijeni s dva sloja FRP-a

U tablicama od 1. do 3. prikazane su karakteristike materijala (beton, armatura i CFRP) korištenih u projektiranju i izradi modela, te koeficijenti armiranja.

Tablica 1. Karakteristike materijala korištenih za projektiranje modela stupova

Uzorak	f _c [MPa]	b/h [cm]	Uzdužna armatura		Poprečna armatura	
			Vrsta čelika	A _{vlak} [cm ²]	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-Sheet 240, 300 g/m ²					

Tablica 2. Karakteristike materijala korištenih za projektiranje modela stupova

Uzorak	f _c [MPa]	b/h [cm]	Uzdužna armatura		Poprečna armatura	
			Vrsta čelika	A _{vlak} [cm ²]	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 3. Vrijednosti tlačne čvrstoće za tri serije betonskih valjaka

Datum betoniranja: 4.10.2019.; Datum ispitivanja: 15.11.2019.; Betonski valjci CC (3 serije) 15/30 cm						
Serije		Dimenzije D/H [cm]	Težina [g]	Sila sloma [t]	Tlačna čvrstoća [MPa]	
Uzorci	0	Valjci bez CFRP-a	15/30	12200	29,6	16,8
	1	Valjci s jednim slojem CFRP-a	15/30	12700	67	37,9
	2	Valjci s dva sloja CFRP-a	15/30	12800	95,5	54,1

Na temelju laboratorijskih ispitivanja zaključeno je da je umjesto C25/30 postignut razred betona od samo C16/20. U vezi s ispitanim valjcima, ustanovljeno je da su vrijednosti sile sloma i tlačne čvrstoće za seriju 1 (valjak ovijen jednim slojem CFRP-a) i seriju 2 (valjak ovijen s dva sloja CFRP-a) bile za 2,26 tj. 3,23 puta veće od sile sloma za slučaj valjka bez FRP-a. Modul elastičnosti valjaka ovijenih s jednim slojem CFRP-a i dva sloja CFRP-a bio je za 17 % tj. 61 % veći od vrijednosti zabilježene na valjku bez CFRP-a.

Sve dodatne analize na referentnom modelu provedene su s nazivnim vrijednostima u skladu s razredom betona C 25/30 i C16/20, razredom armature i svojstvima CFRP-a.

3. Izrada modela za eksperimentalna istraživanja

Građevinska tvrtka SINTEK-SPECIFIC DOO sa sjedištem u Skoplju izradila je modele (model M1 i model M2) te je postavila CFRP (što uključuje i zadavanje tehnologije postavljanja). Čitav postupak pripremanja i izrade modela za eksperimentalna istraživanja proveden je u laboratoriju UKIM-ZIIS-a. Izrada i njega modela provedena je u istom laboratoriju, pa su tako izbjegnuti rizici koji bi mogli nastati tijekom prijevoza modela s jedne lokacije na drugu.

Tijekom betoniranja modela uzeti su uzorci u obliku devet betonskih valjaka dimenzija 15/30 cm te triju kocaka dimenzija 15/15/15, koji su zatim korišteni za definiranje karakteristika ugrađenog betona. Ispitivanja na kockama i definiranje karakteristika ugrađene armature provedeni su u Građevinskom institutu – Makedonija, koji djeluje kao dioničarsko holding društvo (AD GIM Skoplje), a valjci su ispitani u tvrtki ZIM-Skopje AD. Svi rezultati dobiveni tijekom ispitivanja ugrađenih materijala (betona, armature i CFRP materijala) prikazani su u poglavlju 5. ovog rada.

Pripreme su započele 23. rujna 2019. za izradu modela te pripreme za armiranje oba modela. Modeli su postavljeni u vertikalni položaj kako bi se olakšalo postavljanje CFRP materijala. Betoniranje modela provedeno je u

dvije faze. Prvo su betonirani temelji (potpore stupova) za oba modela, a u drugoj su fazi betonirani stupovi za oba modela. U betoniranju je korišten samozbijajući beton (SIBET). Betoniranje potpora – temelja provedeno je 25. rujna 2019., a stupovi su betonirani u drugoj fazi 4. listopada 2019. kada je provedeno i uzorkovanje (9 valjaka i 3 kocke). Fotografije snimljene tijekom izrade modela (modela M1 i modela M2) prikazane su na slici 3.

3.1. Postavljanje CFRP-a na modele

Nakon betoniranja modela, tj. 25. listopada 2019. godine, postavljen je proizvod od ugljičnih vlakana S&P C-Sheet 204, 300 g/m². Za postavljanje je primijenjen sljedeći postupak:

- Skidanje cementnog mlijeka dijamantnom brusilicom (25. listopad 2019.).
- Zaobljavanje rubova stupa i spajanje s potporom – temeljem (25. listopad 2019.).
- Nanošenje osnovnog premaza od epoksidnog kompozita Sikacarbon H (25. listopad 2019.).
- Nanošenje ljepila na proizvod od ugljičnih vlakana pomoću spiralnog valjka (28. listopad 2019.).
- Nakon 24 sata, nanošenje novog sloja Sikacarbon B (29. listopada 2019.).



Slika 3. Izrada modela stupova (model M1 i model M2) za eksperimentalna ispitivanja



Slika 4. Fotografije snimljene tijekom nanošenja CFRP-a na modele i betonske valjke



Slika 5. Fotografije snimljene tijekom nanošenja CFRP-a na modele i betonske valjke

Paralelno s nanošenjem proizvoda od ugljičnih vlakana na modele, isti je postupak primijenjen i za tretman betonskih uzoraka – valjaka 15/30. Treba napomenuti da se na modele i uzorke (valjke) lijepi tenzometri prije nanošenja osnovnog sloja epoksidnog kompozita. Oni su potrebni za daljnja laboratorijska i kvazistatička ispitivanja i valjaka i modela. Cjelokupnog postupak nanošenja proizvoda od ugljičnih vlakana prikazan je na slikama 4. i 5.

4. Kvazistatička ispitivanja – oprema, uređaji i tijekom ispitivanja

4.1. Oprema, postav i uređaji za modele

U laboratoriju za dinamička ispitivanja UKIM-IZIIS-a provedena su kvazistatička ispitivanja cikličnog opterećenja. Opremu za

provođenje takvih eksperimentalnih istraživanja čine:

- oprema za nanošenje sile ili ostvarivanje pomaka
- uređaji za mjerenje sile i deformacije
- oprema za automatsku kontrolu eksperimenata
- sustav za prikupljanje podataka.

Oprema za nanošenje i prijenos sila i/ili za ostvarivanje pomaka sastoji se od tri hidraulične preše i tri čelična oslonca. Preše i oslonci povezani su s AB podnom pločom pomoću prednapetih vijaka. Na slici 6. prikazan je raspored modela stupova tijekom provođenja ispitivanja. Model stupa spaja se preko stupa za povezivanje (pomoću osam prednapetih vijaka) na jedan čelični oslonac. Kako se ispituje složeno stanje naprezanja koje se sastoji od tlačne i savojne komponente, za nanošenje opterećenja koriste se dvije preše. Kapacitet prve preše je 100 tona, a on služi za unos konstantne uzdužne sile od 500 kN (za model M1) tj. 300 kN (za model M2) na slobodni kraj stupa. Druga preša kapaciteta 50 tona služi za unos ciklične poprečne sile na slobodni kraj elementa. Element koji se ispituje spaja se s obje preše pomoću čeličnih reduktora.

Uređaji na stupovima osmišljeni su tako da omogućuju prikupljanje potrebnih podataka o deformaciji i ponašanju modela u raznim fazama nanošenja opterećenja. Točnost i iskoristivost izmjerenih vrijednosti ovisi o načinu postavljanja i raspoređivanja uređaja. U ovom eksperimentalnom istraživanju

korištene su dvije vrste uređaja: unutarnji i vanjski.

Unutarnji uređaji za modele sastoje se od tenzometara postavljenih na uzdužnu armaturu. Tenzometri se postavljaju na mjesta na kojima se očekuju maksimalna izduženja armature. Oni se lijepi na armaturu i zaštićuju u laboratorijskim uvjetima. Tenzometri se obostrano lijepi na površinu betona stupova kako bi se uspješno provelo mjerenje deformacija u betonu. Ti se tenzometri smatraju unutarnjim uređajima jer se CFRP postavlja iznad njih. Vanjski uređaji postavljaju se tako da omogućuju dobivanje podataka o silama i bočnim pomacima u smjeru nanošenja sile (na slobodnom kraju modela). Za te se potrebe koriste uređaji LC za mjerenje sile (LC 1 i LC 2) (slika 7.) te uređaji LVDT (s bazom od tri inča, 1 inč = 2,54 cm) za mjerenje pomaka. Ti uređaji služe za kontrolu nanošenja sile i pomaka na slobodnom kraju modela. U betonu i armaturi deformacija se

mjeri u području u kojem se očekuje pojava plastičnog zgloba. Treba napomenuti da se četiri tenzometra postavljaju na uzdužnu armaturu svakog modela (po dva na svaku stranu), a dodatna dva tenzometra postavljaju se na beton, na obje strane stupova.



Slika 6. Raspored elemenata modela stupova i opreme tijekom eksperimenta



Slika 7. Raspored mjernih točaka



Slika 8. Oprema za automatsko kontroliranje eksperimenta

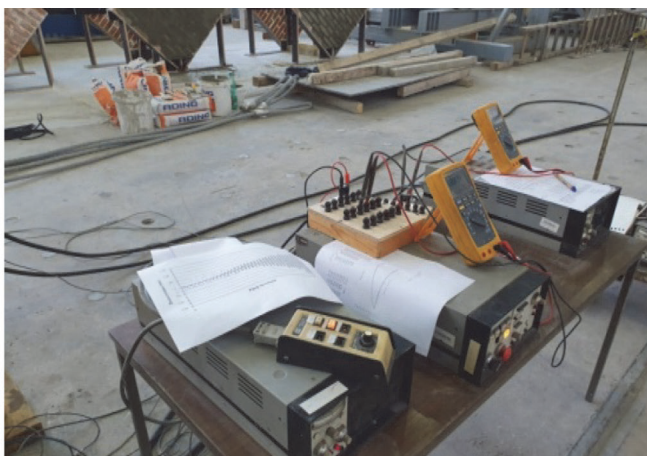
Za prikupljanje podataka izmjerenih pomoću uređaja razvijen je integralni sustav za automatsku kontrolu, mjerenje i prikupljanje podataka, s pretvaranjem signala iz analognih u digitalne (putem A/D pretvarača). Sustav se sastoji od tri kontrolne jedinice za hidraulične preše, jedne kontrolne jedinice za automatsko kontroliranje, digitalnog indikatora izmjerenih vrijednosti koje se mogu kontinuirano pratiti na računalu, te od uređaja za grafičko prikazivanje svih rezultata (slika 8.).

Tijekom čitavog ispitivanja, vrijednosti horizontalnih cikličnih sila i pomaka na slobodnom kraju modela prate se pomoću digitalnih indikatora.

4.2. Program nanošenja opterećenja i tijek eksperimenata

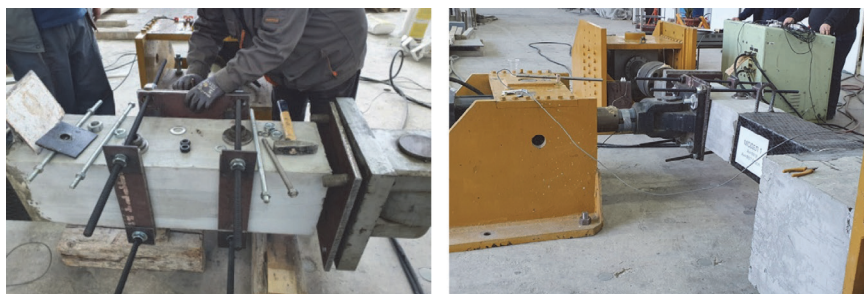
Program za nanošenje opterećenja definiran je kako bi se omogućilo realiziranje eksperimentalnih ispitivanja na modelima. Na temelju usvojene geometrije modela i kvalitete i kvantitete ugrađenih materijala (betona i armature) provedeni su preliminarni analitički proračuni nosivosti i deformabilnosti modela za razna stanja naprezanja i deformacija. Dobiveni parametri predstavljaju referentne vrijednosti za definiranje programa opterećenja za eksperimentalna istraživanja. Treba spomenuti da su približne količine, bazirane na eksperimentalnim i analitičkim istraživanjima prikazanim u međunarodnoj literaturi, usvojene kao granične vrijednosti deformacija za elemente izrađene s CFRP materijalima.

Program nanošenja opterećenja sastojao se od pomaka ili sile koji su ponavljani dva ili tri puta za istu razinu intenziteta. Postupnim povećavanjem intenziteta nanosene sile, element je prelazio iz elastičnog u neelastično stanje, tj. uspostavljeno je granično stanje nosivosti, što je u konačnici dovelo do sloma. Razina sile pri kojoj je element postizao karakteristična stanja naprezanja i deformacije varirala je ovisno o definiranoj nosivosti i kapacitetu deformacije projektiranih modela.





Slika 9. Montaža oslonaca i modela u laboratoriju UKIM-IZIIS-a



Slika 10. Montaža čeličnih spojeva za nanošenje sile i opreme za eksperimentalna ispitivanja

4.3. Pripremanje modela za eksperimentalna ispitivanja

Nakon postavljanja modela i uređaja, pokrenut je postupak ispitivanja i u prvoj je fazi obavljena kontrola funkcioniranja cjelokupnog sustava pri kvazistatičkom ispitivanju, nakon čega je provedena kontrola programa za nanošenje opterećenja. Slijede fotografije snimljene tijekom postavljanja oslonaca i modela te tijekom postavljanja čeličnih spojeva za prijenos cikličnih i uzdužnih sila na modele, kao i fotografije opreme za kvazistatička ispitivanja (slike 9. i 10.).

5. Rezultati eksperimentalnih istraživanja

U okviru eksperimentalnih istraživanja provedena su kvazistatička ispitivanja na seriji od dva modela stupova (model M1 i model M2).

Takav tijek eksperimenata uvjetovan je geometrijom modela, tj. nije bilo potrebno mijenjati raspored modela ili opremu. Dva različita modela stupova podvrgnuta su djelovanju cikličnih horizontalnih sila rastućeg intenziteta, a na slobodni kraj stupa nanosena je konstantna uzdužna tlačna sila ($N = 500$ kN za

model M1 tj. $N = 300$ kN za model M2). Eksperimenti su provedeni nanošenjem opterećenja na slobodne krajeve modela. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja prikazani su u obliku histereznih krivulja sile i pomaka, sile i deformacije (u betonu ili u armaturi u odabranim kanalima) i prikaza promjene pomaka na slobodnom kraju modela tijekom vremena. Također su prikazane i fotografije (snimljene tijekom ispitivanja) kako bi se dobila vizualna predodžba o pojavi i opsegu oštećenja.

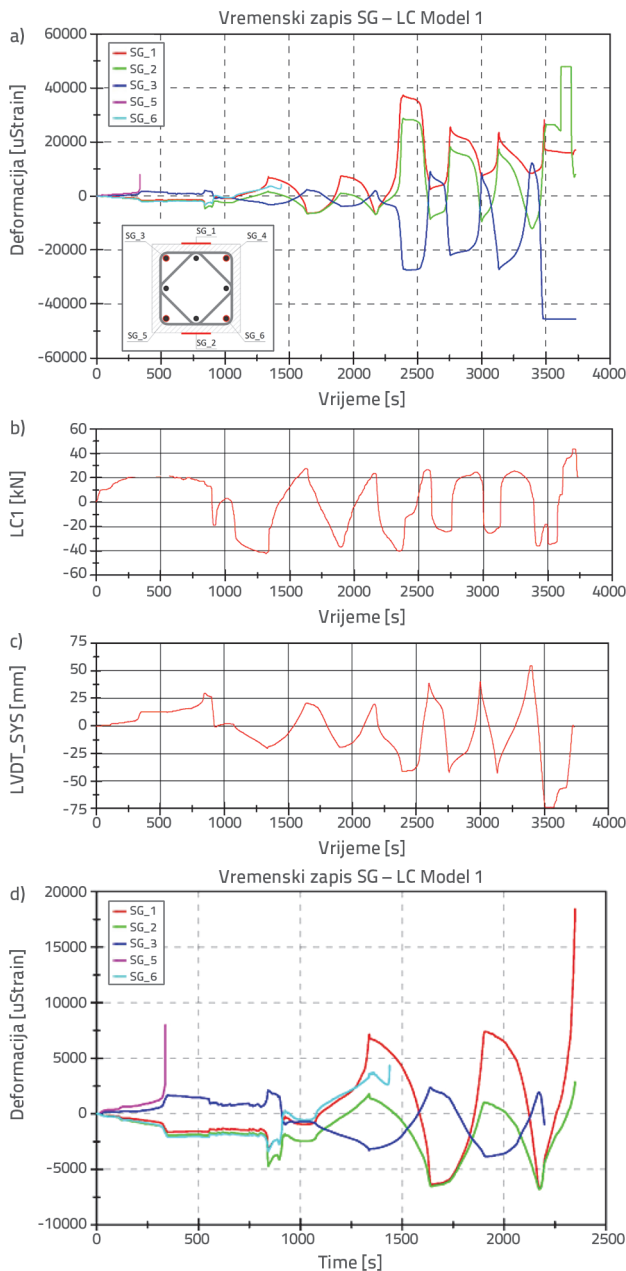
Treba napomenuti da postupak nanošenja opterećenja nije prekidan tijekom eksperimenata kako bi se označile pukotine u ugljičnim vlaknima. Tome je razlog činjenica da su te pukotine bile zanemarive i nisu se mogle zamijetiti golim okom. Neposredno prije potpunog sloma i raspucavanja vlakana čuo se prilično glasan zvuk pucanja. Do pucanja je došlo zbog sloma ugljičnih vlakana CFRP-a. Nakon toga je nastupio eksplozivni slom u području pojave plastičnog zgloba, a istovremeno je zabilježeno pucanje ugljičnih vlakana i potpuno gnječenje betona ispod ugljičnih vlakana. Ta ista pojava zabilježena je u oba modela.

Prikazane su i fotografije snimljene tijekom ispitivanja kako bi se vizualno predočila pojava i opseg oštećenja. Također su prikazani i određeni rezultati eksperimentalnih ispitivanja provedenih na oba modela (tj. na modelu M1 i modelu M2).

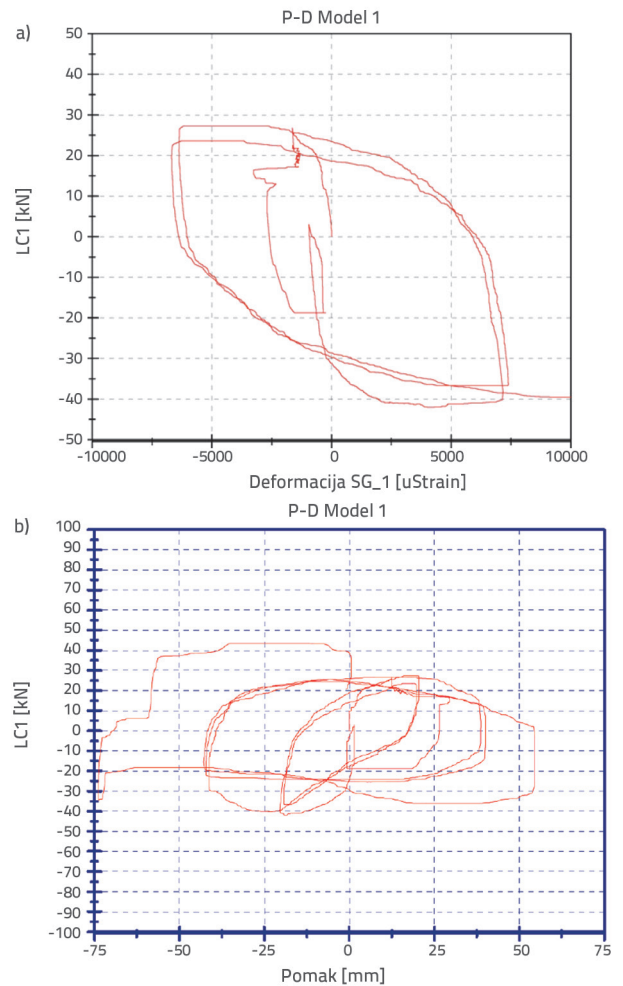
5.1. Model AB stupa – model M1

Na model M1 (slika 6.) nanosena su ciklična horizontalna opterećenja rastućeg intenziteta, a konstantna uzdužna sila od $N = 500$ kN nanosena je na slobodnom kraju stupa. Eksperiment je proveden uz kontrolu pomaka, a istovremeno je kontrolirana i razina horizontalne sile nanosene na slobodan kraj modela kroz čelične ploče na udaljenosti od 158 cm od oslonca stupa. Prije početka eksperimenta, definiran je program za praćenje ponašanja modela u linearnoj fazi pa sve do stanja značajne nelinearnosti. Eksperiment je započeo s nanošenjem uzdužne sile na stup, počevši od 0,0 pa sve do 500 kN. Nakon što je dosegnuta vrijednost od 500 kN, na tenzometrima su očitane vrijednosti deformacije za beton i armaturu. Na početku je utvrđeno da jedan tenzometar u armaturi (SG_4) ne radi jer se na njemu nisu mogle očitati nikakve vrijednosti. Vrijednosti izmjerene u betonu pomoću tenzometara SG_1 i SG_2 pri sili od $N_v = 500$ kN iznosile su $\varepsilon_{c1} = 0,809$ ‰, tj. $\varepsilon_{c2} = 0,336$ ‰, a

vrijednosti izmjerene u armaturi pomoću tenzometara SG_3 i SG_6 iznosile su $\varepsilon_{s3} = 0,765 \text{ ‰}$ i $\varepsilon_{s6} = 0,367 \text{ ‰}$ (slika 11.). Nakon što su na tenzometrima očitane te početne vrijednosti za beton i armaturu, nanosena je horizontalna sila uz istovremenu kontrolu vrijednosti pomaka. Postupak je počeo s nanošenjem tri ciklusa pomaka od po 2 mm na slobodnom kraju stupa, dok su u kasnijem tijeku eksperimenta vrijednosti pomaka povećane. Vremenski zapisi s tenzometara (SG_1, SG_2, SG_3, SG_5 i SG_6), tj. horizontalna sila, odgovarajući pomak i odnos sile i pomaka, prikazani su za model M1 na slikama 11. i 12.



Slika 11. Model M1: a) vremenski zapisi deformacija do 4000 s; b) horizontalna sila; c) odgovarajući pomak tijekom ispitivanja, d) vremenski zapisi deformacija do 2500 s



Slika 12. LC1-SG_1, Odnos sile i pomaka, model M1

Fotografije snimljene tijekom kvazistatičkih ispitivanja na modelu M1 te fotografije karakterističnih oštećenja prikazane su na slikama 13. i 14.



Slika 13. Fotografije snimljene tijekom kvazistatičkog ispitivanja modela stupa – modela M1



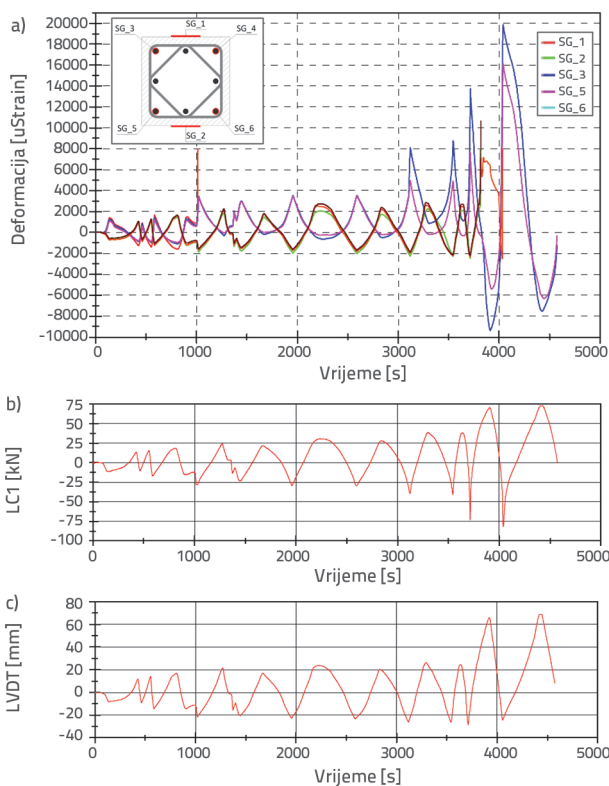
Slika 14. Fotografije snimljene tijekom kvazistatičkog ispitivanja modela stupa – modela M1

5.2. Model AB stupa – model M2

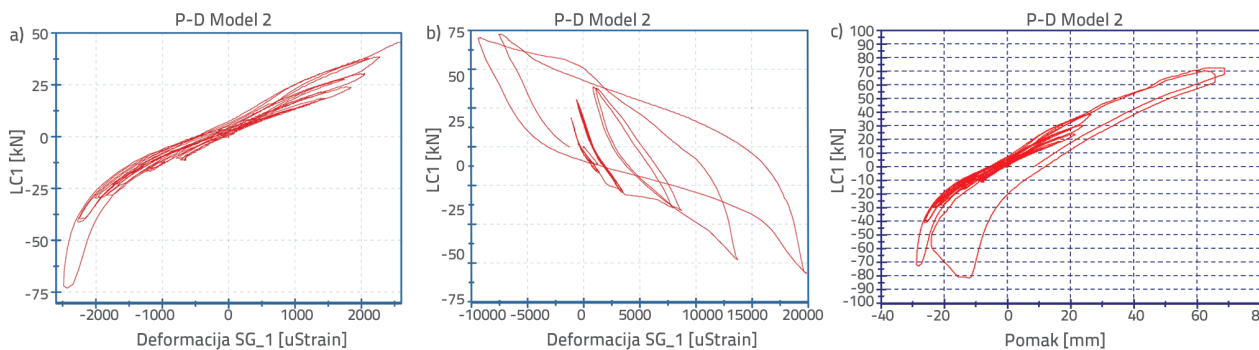
Vremenski zapisi deformacija, horizontalnih sila, odgovarajućeg pomaka i odnosa sile i pomaka prikazani su za model M2 na slikama 15. i 16.

Opsežno gnječenje betona ispod ugljičnih vlakana tijekom otkazivanja modela M1 potvrđuje da je kvaliteta ugrađenog betona vrlo loša te da odgovara vrijednostima koje su dobivene u tvrtki ZIM "Skopje" iz Skoplja. U vezi s tim odlučeno je da se smanji vertikalna uzdužna sila u stupu. Stoga se na model M2 nanosila sila od najviše 300 kN. Pri toj sili, vrijednosti ϵ za beton i ϵ za čelik iznosile su $\epsilon_{c1} = 0,553 \text{ ‰}$ tj. $\epsilon_{c2} = 0,293 \text{ ‰}$. Na ovom modelu nisu zabilježena oštećenja na tenzometrima u armaturi i betonu. Drugim riječima, svih šest tenzometara bilo je u funkciji, tj. sg-1 i sg-2 za beton i sg3, sg4, sg5 i sg6 za armaturu. Program nanošenja opterećenja bio je isti kao i za model M1. Tijekom eksperimenta, svi su rezultati zabilježeni pri 4500 točaka. Maksimalni pomak iznosio je 69,28 mm, kada je došlo do potpunog sloma ugljičnih vlakana te do gnječenja betona. Zabilježeno je i znatno savijanje armature. Osim toga, na tenzometrima SG_1 i SG_3 zabilježeni su rezultati histereznih odnosa za silu LC1, što uključuje i odnose sile i pomaka.

Fotografije snimljene tijekom kvazistatičkih ispitivanja na modelu M2 te fotografije karakterističnih oštećenja prikazane su na slikama 17. i 18.



Slika 15. Vremenski zapisi deformacija, horizontalnih sila i odgovarajućeg pomaka tijekom ispitivanja, model M2



Slika 16. LC1-SG_2, LC1_SG_3, Odnos sile i pomaka, model M2



Slika 17. Fotografije snimljene tijekom kvazistatičkih ispitivanja na modelu stupa – model M2

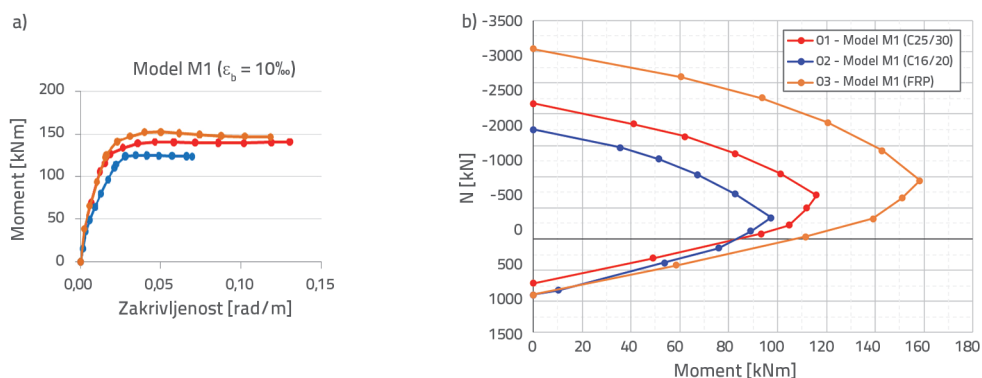


Slika 18. Fotografije snimljene tijekom kvazistatičkih ispitivanja na modelu stupa – Model M2

6. Analiza analitičkih i eksperimentalnih rezultata

Opsežno analitičko istraživanje provedeno je pomoću računalnog programskog paketa SAP2000. Najprije je primijenjena metodologija koju su razvili "Park & Paulay" (1975.). Nakon toga su provedene nelinearne analize, statička metoda postupnog guranja te dinamičke analize vremenskih zapisa. Slika 19. prikazuje krivulju momenta savijanja – zakrivljenosti do $\epsilon_b = 10\%$ i M-N za model 1 te usporedbu s referentnim modelom bez CFRP-a. U tablici 4. je dan sažet prikaz vrijednosti pomaka i duktilnosti dobivenih pomoću analitičkih i eksperimentalnih istraživanja na modelu 1 i modelu 2. Grafička usporedba rezultata pomaka i duktilnosti prikazana je na slici 20.

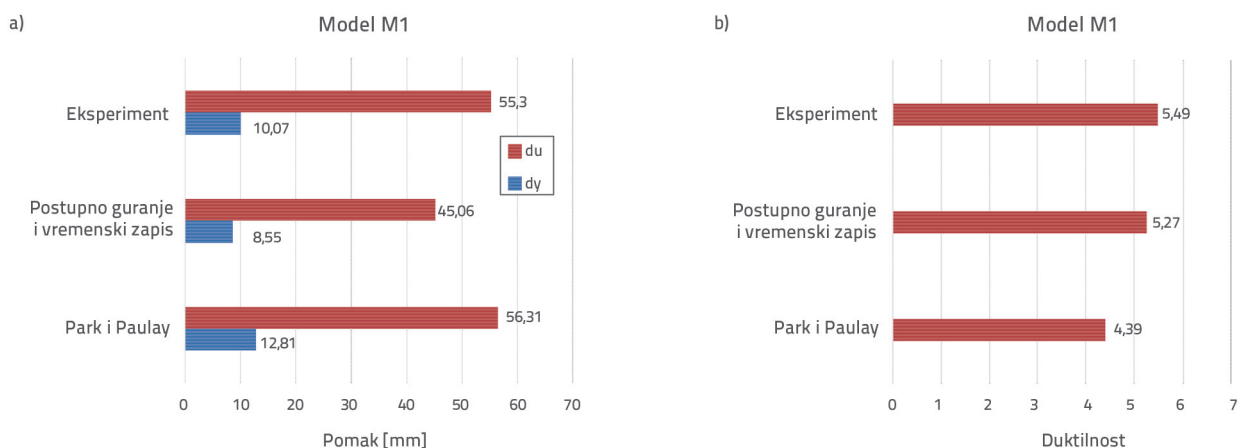
Dijagram interakcije M-N
Usporedba



Slika 19. a) Krivulja momenta savijanja – zakrivljenosti; b) dijagram M-N za model 1 (analitički rezultati)

Tablica 4. Sažeti prikaz vrijednosti pomaka i duktilnosti baziranih na analitičkim i eksperimentalnim rezultatima

Uzorak	Park & Paulay (1975) [35]		Postupno guranje i analiza vremenskih zapisa pomoću programa SAP2000 [36, 37]		Eksperiment	
	dy [mm]	du [mm]	dy [mm]	du [mm]	dy [mm]	du [mm]
Model M1-03	12,81	56,31	8,55	45,06	10,065	55,30
Duktilnost		4,39		5,27		5,49
Model M2-03	19,22	67,02	9,04	48,03	10,73	69,28
Duktilnost		3,49		5,31		6,45



Slika 20. Usporedba pomaka i duktilnosti, Model M1 – dobivena pomoću tri metode

7. Zaključak

Na temelju rezultata dobivenih na MODELU M1 mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Maksimalni pomak izmjeren na slobodnom kraju modela u pozitivnom smjeru iznosio je 55,3 mm.
- Vrijednosti zabilježene pomoću tenzometara maksimalne su vrijednosti koje je bilo moguće izmjeriti, tj. zabilježen je pomak od približno 40 mm te horizontalna sila od približno 38 kN.
- U intervalu pomaka (0-35,3 mm) u kojem su dobiveni stvarni zapisi ciklične sile i pomaka, za model je zabilježeno duktilno histerežno ponašanje te rasap energije sa širokom histereznom petljom.
- Model se ponašao nelinearno, a pukotine su se pojavljivale u blizini upetog spoja. Treba naglasiti da je slom ugljičnih vlakana bio eksplozivan, sa značajnim gnječenjem betona u tom trenutku, kao što se može i vidjeti na priloženim slikama.
- Na temelju analize vrijednosti dobivenih pomoću nelinearnih statičkih analiza i nelinearnih vremenskih proračuna može se zaključiti da je duktilnost na pomak modela M1 pojačanog s CFRP-om veća za 64,6 % u odnosu na model bez CFRP-a, a čvrstoća mu je veća za 21,1 %.
- Na temelju rezultata dobivenih na MODELU M2 mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Maksimalni pomak izmjeren na slobodnom kraju modela u pozitivnom smjeru iznosio je 69,28 mm.
- Vrijednosti zabilježene pomoću tenzometara maksimalne su vrijednosti koje je bilo moguće izmjeriti, tj. zabilježen je pomak od približno 37 mm te horizontalna sila od približno 45 kN.
- U intervalu pomaka (0-37,5 mm) u kojem su dobiveni stvarni zapisi ciklične sile i pomaka, za model je zabilježeno duktilno histerežno ponašanje te rasap energije sa širokom histereznom petljom.
- Model se ponašao nelinearno, a pukotine su se pojavljivale u blizini upetog spoja. Potrebno je naglasiti da je slom ugljičnih vlakana bio eksplozivan, sa značajnim gnječenjem betona u tom trenutku, kao što se može i vidjeti na priloženim slikama.
- Na temelju analize vrijednosti dobivenih pomoću nelinearnih statičkih analiza i nelinearnih vremenskih proračuna može se zaključiti da je duktilnost na pomak Modela M2 pojačanog s CFRP-om veća za 60 % u odnosu na model bez CFRP-a, a čvrstoća mu je veća za 7,7 %.

Vrijednosti pomaka i duktilnosti dobivene tijekom kvazistatičkih eksperimentalnih istraživanja u točki popuštanja i krajnjoj graničnoj točki vrlo su bliske vrijednostima pomaka dobivenima u skladu s metodologijom Park & Pauley te statičkom nelinearnom analizom naguravanja i nelinearnom

analizom vremenskih zapisa. Pri značajnoj nelinearnosti, razlike variraju od 2,3 % do 20 %. Za te su vrijednosti kvazistatičkim ispitivanjem ostvareni dobri rezultati. Općenito se može zaključiti da CFRP sustavi predstavljaju

izuzetno praktično sredstvo za pojačanje i sanaciju betonskih građevina, te da su prikladni za povećavanje otpornosti na savijanje i posmik, za ovijanje stupova te za poboljšanje duktilnosti.

LITERATURA

- [1] 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) 8th International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), Patras, GR, paper 6-1, 2007.
- [2] Olivova, K., Bilcik, J.: Strengthening of Concrete Columns with CFRP, Slovak Journal of Civil Engineering, 17 (2009), pp. 1-9.
- [3] Ozcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Akyuz, U., Erduran, E.: Rehabilitation of Existing RC Structures Using CFRP Fabrics, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 1393, 2004.
- [4] 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.
- [5] Abbas, M.: Earthquake Resistant Structures-Design, Assessment and Rehabilitation, Published online February 2012, published in print edition February 2012.
- [6] <https://www.youtube.com/watch?v=vsE5e0uLMg8>.
- [7] Wang, X., Liu, L., Shen, W., Zhou, H.: CFRP Reinforced Foam Concrete Subjected to Dynamic Compression at Medium Strain Rate. Materials, 13 (2020) 1, 10.
- [8] NATO SfP 977231 Project: "Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings", NATO Science Series.
- [9] Micov, V., Tashkov, Lj., Krstevska, L., Salic, R., Jekic, G.: Diagnosis of Existing State and Strengthening Solution for 180 m High Reinforced Concrete Chimney, 14 ECEE, Ohrid 30.08.2010-03.09.2010.
- [10] Krstevska, L., Tashkov, Lj., Gramatikov, K., Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F., Mazzolani, F.: Large Scale Experimental Investigation on Mustafa-Pasha Mosque, Journal of Earthquake Engineering, 14 (2010), pp. 842-873.
- [11] Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, 2004
- [12] CEN 2004, European Standard EN 1998-3: 2005 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings.
- [13] Eurocode - 2: Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
- [14] FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency) (2000): Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, FEMA.
- [15] Seismic Evaluation Handbook - Federal Emergency Management Agency, "FEMA 310" (1999)
- [16] Nečevska-Cvetanovska, G.: High Strength Concrete-Macedonian research. Građevinar, 56 (2004) 9, pp. 531-537.
- [17] Nečevska-Cvetanovska, G.: Non-Linear Analysis and Design of RC Cross-Section Resistance of RC Buildings, published September 1998.
- [18] Necevska-Cvetanovska, G., Petrushevska- 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 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), 3-8 September 2006, Geneva, Switzerland.
- [19] Fajfar, P., Eeri, M.: A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design, Earthquake Spectra, 16(2000) 3, pp. 573 - 592.
- [20] Chopra, A.K.: Dynamic of Structures, 2nd ed. Theory and Application to Earthquake Engineering. Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- [21] Paulay, T., Priestly, M.J.: Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures". Wiley & Sons, ISBN 0 - 471 - 54915 - 0, 1992.
- [22] Necevska-Cvetanovska, G., Petrushevska, R.: Methodology for Seismic Design of R/C Building Structures, 12WCEE, New Zeland, 2000.
- [23] Wilson and Habibullah, SAP2000 Structural Analysis Programme, CSI, Berkeley, California, 2006.
- [24] 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.
- [25] Sarafraz, M., Danesh, F.: Flexural Enhancement of RC Columns with FRP. In The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.
- [26] del Rey Castillo, E., Griffith, M., Ingham, J.: Seismic Behaviour of RC Columns Flexurally Strengthened with FRP Sheets and FRP Anchors. Composite Structures, 203 (2018), 382-395.
- [27] Demonstration of Efficiency of Seismic Retrofit with CFRPS trough Full Scale Site Testing of Substandard RC Structures <https://www.youtube.com/watch?v=Mul9fNgvi2A>
- [28] 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.
- [29] Krstevska, L., Necevska- Cvetanovska, G.: Quasi-Static Testing of Column Models Strengthened by FRP, UKIM-IZIIS, IZIIS Report 2019-75, 2019.
- [30] 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.
- [31] Roshi, A., Necevska-Cvetanovska, G.: Repair and Strengthening of RC Buildings using Traditional and Innovative Materials, 18th International Symposium organized by Macedonian Association of Structural Engineers (MASE), October 4-7, 2019, Ohrid, Macedonia, 2019.

- [32] Chapragovski, G., Necevska-Cvetanovska, G.: CFRP for Seismic Strengthening of Existing Frame Buildings, 14 International Scientific Conference (INDIS), Novi Sad, Serbia, 21-23 November, 2018.
- [33] Hatemi, I., Necevska-Cvetanovska, G.: Reduction of Seismic Performance of RC Vertical Elements due to Low Quality of Concrete, 14 International Scientific Conference (INDIS), Novi Sad, Serbia, 21-23 November, 2018.
- [34] Roshi, A.: Application of Innovative Building Materials for Repair and Strengthening of RC Columns in Seismically Active Regions, doctoral dissertation, mentor Nechevska-Cvetanovska, G., Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology – IZIS, Skopje, N.Macedonia, 2020.
- [35] Park, R., Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, Wiley & Sons, 1975.
- [36] CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®, November 2017.
- [37] CSI America. SAP2000 v20.0.0. <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>