

primljen: 03.01.2025.

Izvorni naučni rad

korigovan: 04.03.2025.

UDK : 624.072.2

prihvaćen: 04.04.2025.

<https://doi.org/10.62683/NiP28.1>

NUMERIČKA ANALIZA PONAŠANJA GREDA T-PRESJEKA OJAČANIH KARBONSKIM TRAKAMA

Nataša Kopitović Vuković¹, Nikola Baša², Radomir Zejak³

Rezime: Ovaj rad proučava efikasnost spoljašnjeg sistema ojačanja prostih greda, kroz numeričku analizu sprovedenu pomoću softvera ANSYS. Ojačanje je izvedeno u vidu traka postavljenih na rebro T-presjeka. Primijenjene su različite šeme ojačanja i vrste opterećenja, kako bi se utvrdio uticaj ovih parametara na ukupno ponašanje uzoraka za ispitivanje. Odgovor ovakvog sistema ojačanja analiziran je kroz njegovo naponsko-deformacijsko stanje, te kroz poređenje s neojačanim kontrolnim uzorcima.

U cilju verifikacije dobijenih rezultata, sprovedeno je eksperimentalno istraživanje na prostim AB gredama u punoj veličini, koje su bile u eksploataciji više od 10 godina. Utvrđeno je zadovoljavajuće slaganje sa numerički dobijenim vrijednostima, budući da je u računarskom modeliranju neophodno uvoditi određena pojednostavljenja, pa su i razlike u vrijednostima karakteristika kojima se opisuje naponsko-deformacijsko stanje posmatranog elementa očekivane.

Ključne riječi: T-grede, CFRP trake, numerička analiza, ponašanje pri savijanju, eksperiment

NUMERICAL BEHAVIOR ANALYSIS OF THE T-SECTION BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON STRIPS

Nataša Kopitović Vuković¹, Nikola Baša², Radomir Zejak³

Abstract: This paper studies the effectiveness of the external strengthening system of simple beams, through the numerical analysis conducted using the ANSYS software. The strengthening is carried out in the form of carbon strips, placed on the T-section rib. Strengthening schemes and load types were varied to determine the influence of these parameters on the testing specimens overall behaviour. The response of such systems was analysed through basic stress-strain effects and through their comparison with the unstrengthened control samples.

In order to verify the obtained results, an experimental research was conducted on simple full size RC beams, which were in use for more than 10 years. Satisfactory agreement with the numerically obtained values was found, since certain simplifications need to be introduced into the computer modeling, and therefore differences in the characteristics values describing the observed element stress-strain state are expected.

Key words: T-beams, CFRP strips, Numerical analysis, Flexural behaviour, Experiment

¹ Dr, docent, Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, nataly@ucg.ac.me, ORCID 0000-0002-6152-4073

² Dr, docent, Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, nikola.basa@ucg.ac.me, ORCID 0000-0003-0151-6888

³ Dr, profesor, Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, rzejak@ucg.ac.me, ORCID N/A

1. UVOD

Rekonstrukcija objekta je kompleksan zadatak i za projektante i za izvođače, u nekim slučajevima čak i zahtjevniji od izgradnje nove konstrukcije. Jedan od problema je izbor materijala za rekonstrukciju. Takođe i način na koji će oni biti upotrijebljeni ne smije uticati na eksploataciju konstrukcije koja se ojačava. Upotreba kompozitnog materijala (CFRP) kao spoljašnjeg ojačanja dala je više nego zadovoljavajuće rezultate i dobra rješenja za navedene probleme.

CFRP se pojavio u građevinskoj industriji kao kompozitni materijal visokih performansi. Njegova izuzetna svojstva, među kojima su visoke vrijednosti čvrstoće na zatezanje i modula elastičnosti, kao i visok odnos čvrstoće i težine, čine ga superiornim u odnosu na tradicionalne materijale, kao i na ostale FRP kompozite, a samim tim i vrlo poželjnim za razne konstruktivne primjene [1],[2],[3]. Efikasna primjena ove tehnike kod armirano-betonskih greda se vidi kroz veliki broj sprovedenih eksperimenata [4],[5].

Obimna numerička i eksperimentalna istraživanja sprovedena su tokom posljednje dvije decenije, u cilju utvrđivanja ključnih karakteristika betonskih greda ojačanih FRP materijalom [6],[7]. Pri tom su varirane kombinacije brojnih parametara koji utiču na ponašanje uzoraka.

Ranijim numeričkim istraživanjima je utvrđen doprinos CFRP ojačanja povećanju granične nosivosti AB grede od 10 do 160% [8], dok su ojačane stvarne veličine imale najmanje 99% veći granični moment nosivosti u odnosu na neojačane [9]. Do sličnih zaključaka su došli i autori u radu [10], istražujući ojačanje AB greda s CFRP lamelama. Osim toga, prethodne numeričke studije pokazale su izuzetne karakteristike veze beton-CFRP, u slučaju kratkotrajnih opterećenja [11].

Dužina ojačanja je parametar koji igra značajnu ulogu u čvrstoći ove veze, a samim tim i u mehanizmu loma ojačanih greda [12],[13]. Rezultati istraživačkog rada [14] pokazuju da povećanje dužine CFRP traka i lamela, bilo da se radi o ojačanju na smicanje ili savijanje, povećava nosivost grede. Efikasnost ove tehnike na savijanje u gredama varirala je u zavisnosti od ovog parametra, s obzirom na to da je glavni način loma u tim gredama odvajanje ojačanja [15],[16],[17], [18].

U radu je dat kratak osvrt na sam tok eksperimenta i eksperimentalne rezultate, kako bi se mogla

adekvatno razumjeti sprovedena uporedna analiza sa rezultatima numeričke analize.

2. METODOLOGIJA

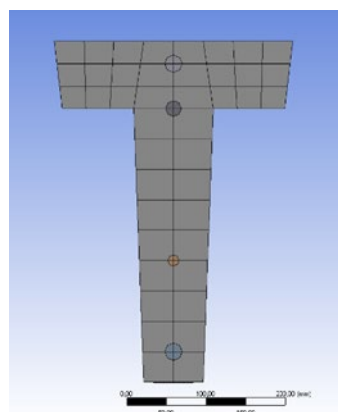
2.1. NUMERIČKA ANALIZA

Prilikom planiranja i izvođenja bilo kog eksperimenta logično je izvršiti odgovarajuće modeliranje, kako bi se definisali glavni uticajni parametri. ANSYS predstavlja najrasprostranjenije softversko rješenje u raznim industrijskim oblastima. Korišćen je kod ispitivanja armirano-betonskih konstrukcija ojačanih FRP lamelama, uglavnom za analizu strukturnog ponašanja greda i mostova [19].

Metodologija zastupljena u ovom radu je ujedno i najčešće primjenjivana [7], i u njoj se za modeliranje betona, armature i FRP lamele koriste elementi SOLID65, LINK180 i SOLID46, respektivno.

Modeliranje je izvršeno korišćenjem linearne i nelinearne analize. Nelinearni model uključuje znatno veći broj elemenata. Nelinearne deformacije određene su na osnovu σ - ϵ dijagrama dobijenog na kontrolnim tijelima materijala korišćenih u eksperimentu.

Za definisanje geometrije korišćen je program Design Modeler u sklopu ANSYS programskog paketa. Ovaj program je pogodan zbog mogućnosti definisanja parametara i zavisnosti pojedinih geometrijskih veličina. Sa druge strane, alternativa je moguća u primjeni modula SpaceClaim ili bilo kog 3D orijentisanog CAD softvera, pri čemu se importovanje geometrije uglavnom sprovodi korišćenjem STEP, ACIS ili PARASOLID formata.



Slika 1 - Izgled poprečnog presjeka nosača

U cilju omogućavanja numeričke konvergencije, materijalne karakteristike čelika se uglavnom modeliraju u vidu bilinearne zavisnosti napona i dilatacija. U predmetnom radu, podužne šipke grede

modelirane su korišćenjem diskretnog jednoaksijalnog 2-čvornog elementa LINK180. Uzengije su modelirane kao razmazana armatura, koja se definiše kao dio betonskog elementa SOLID65. S obzirom na pretpostavku da ne postoji proklizavanje čelika unutar betonskog presjeka, primijenjena je permanentna veza čelika sa betonom. Diskretizacija armature sprovedena je u pojednostavljenom obliku, koncentrisanjem armature ekvivalentne površine u osovini poprečnog presjeka betonskog elementa. Ovo je sprovedeno iz razloga omogućavanja kompatibilnosti deformacija, jer pravilna proračunska procedura podrazumijeva definisanje mreže konačnih elemenata armature i betonskog presjeka sa zajedničkim čvorovima. Kao što je poznato, element SOLID65 ne pojeđuje unutrašnje čvorove (slika 1), pa bi pravilno definisanje mreže konačnih elemenata bilo prilično otežano. U slučaju predmetne geometrije, broj konačnih elemenata bi eksponencijalno rastao ukoliko bi se stvarni položaj armature modelirao unutar presjeka. Sa druge strane, za probleme čistog savijanja, ovakav pristup ne utiče značajno na ponašanje grednog elementa, a u velikoj mjeri pozitivno utiče na proračunske performanse. Ne treba zaboraviti da se u ovom slučaju radi o iterativnom postupku sa definisanom materijalnom nelinearnošću betona i mogućnošću pojave prslina i loma, a ove osobine same po sebi zahtijevaju izuzetno ekstenzivnu proračunsku proceduru. Stoga je svako inženjerski razumno pojednostavljenje opravdano.

U pogledu modeliranja FRP trake, u radu je primijenjena diskretizacija putem elementa SOLID46 uz definisanje slijepljenog spoja sa betonskim presjekom primjenom MPC (*Multi-Point Constraint*) formulacije. Vezano za pristup modeliranju ovih elemenata, uočava se i alternativna metodologija koja podrazumijeva primjenu konačnih elemenata tipa ljuske [20], [21]. Ovaj pristup donekle pojednostavljuje numeričku formulaciju, dok sa druge strane realistično predviđa koncentraciju napona u betonu na krajevima FRP traka.

ANSYS se nije pokazao kao najbolji odabir programa za modelovanje betona. Glavni razlog kod donošenja ovog zaključka je što se proračun zasniva na vrlo „primitivnom“ modelu William-Warnkea, koji podrazumijeva potpuni gubitak nosivosti ispucalog elementa. U cilju dostizanja konvergencije moguće je aktivirati fiktivnu krutost elementa. Pri tom se primjenjuje faktor koji inženjer sam mora da odredi, tj. da definiše koliko nosi „ispucali element“, kako bi se u koracima, tj. iterativno riješio problem. U radu je ovaj koeficijent variran u iznosu od 0.1 do 0.3. Međutim, u jednom trenutku, pri većim

opterećenjima, ova opcija ne može da nadomijesti pojavu prslina i lom u većoj zoni. Čak i dodavanje sile malog reda veličine dovodi do eksponencijalnog rasta ugiba.

Koeficijenti transfera smicanja za otvorene i zatvorene prsline (β_c i β_t) imaju vrijednost između nule i jedan, gdje nula definiše glatku pukotinu sa potpunim gubitkom prenosa smicanja, a vrijednost jedan znači da gubici u prenosu smicanja ne postoje (aggregate effect). Iako ovi parametri igraju važnu ulogu u samom ponašanju materijala, ne postoji univerzalno pravilo kako bi se isti mogli usvojiti, već samo preporuka [23]. Ova preporuka je usvojena u radu, tako da je koeficijent transfera smicanja za otvorenu pukotinu usvojen u iznosu 0.3, a za zatvorenu prslinu 0.9. Uočava se da i ovdje postoji potencijal za dalje istraživanje u cilju kalibracije numeričkih modela.

Budući da je u računarskom modeliranju neophodno uvoditi određena pojednostavljenja, očekivane su razlike u vrijednostima karakteristika kojima se opisuje naponsko-deformacijsko stanje posmatranog elementa. Nesavršenost numeričkog postupka, približne vrijednosti svojstava upotrijebljenih materijala i veliki broj pretpostavki ima uticaja na dobijeni naponsko-deformacijski odgovor. Primijenjeni nelinearni modeli armirano-betonskih ojačanih elemenata, u zavisnosti od određenog problema, uvode odgovarajuće empirijske parametre, koji moraju biti sračunati za specifične proračunske situacije [22].

Moguće imperfekcije od geometrijskih idealizovanih veličina modela, čak iako su napravljeni u strogo kontrolisanim laboratorijskim uslovima, mogu imati efekta na adekvatnu simulaciju. Određena odstupanja koja se javljaju nisu za zabrinutost, s obzirom da se konstruktivni elementi projektuju sa koeficijentima sigurnosti.

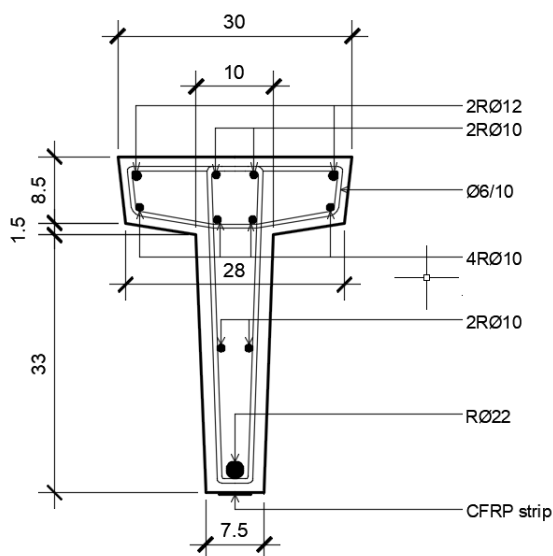
2.2. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

2.2.1. Plan eksperimentalnog istraživanja

Pregledom literature utvrđeno je da su podaci o eksperimentalnom ispitivanju ojačanih uzoraka realnih dimenzija veoma oskudni. Najveći broj radova na ovu temu odnosi se na ispitivanja na modelima, tj. uzorcima malih dimenzija [24], [25]. Imajući u vidu principe modeliranja, ispitivanja na takvim uzorcima nisu uvijek dovoljno reprezentativna i primjenljiva na elemente realnih dimenzija [26]. Takođe je najveći broj ispitivanja izvršen na gredama pravougaonog poprečnog presjeka, i to uglavnom na novim

modelima. Ispitivanja na ojačavanju uzoraka T – poprečnog presjeka su veoma rijetka.

Zbog toga je prije više od 10 godina za ovu namjenu napravljeno deset armirano-betonskih uzoraka sistema proste grede, raspona 7.5 m. Grede su T-presjeka, visine 43 cm, izrađene od betona klase C25/30. Za armiranje uzoraka upotrijebljena je rebrasta čelična armatura B500B, i to podužna prečnika 22 mm u zategnutoj zoni i 12 mm u pritiskutoj zoni, dok su uzengije bile prečnika 6 mm, postavljene na rastojanju od 100 mm (slika 2). Zatim su uzorci skladišteni vani, opterećeni sopstvenom težinom, do ispitivanja.



Slika 2 - Poprečni presjek ispitivanih uzoraka (u cm)

Dvije od ovih ostarjelih greda korištene su kao neojačane – kontrolne grede. Ostale grede su sa spoljašnje strane ojačane CFRP trakama kako bi prihvatile moment savijanja na zategnutoj strani poprečnog presjeka. Zatim su četiri grede ispitane na dejstvo kratkotrajnog opterećenja, dok su preostale četiri ispitivane na dejstvo dugotrajnog opterećenja, što nije predmet ovog rada.

Priprema površine greda za postavljenje traka izvršena je u skladu sa uputstvima proizvođača. Geometrijske i mehaničke karakteristike karbonske trake date su u tabeli 1.

Tabela 1 - Karakteristike CFRP trake

debljina / širina (mm)	1.4 / 50
dužina (m)	4 or 6
čvrstoća na zatezanje (MPa)	3300
modul elastičnosti (GPa)	165
sadržaj vlakana (%)	65-70

CFRP trake su postavljane na rebro T-presjeka, sa donje strane, i to u središnjem rasponu, na dužini od 4 m, odnosno 6 m, bez upotrebe poprečnog ukrucenja. Ovo je zona sa koncentracijom najvećih napona i u njoj su uočene najveće prsline pri ispitivanju kontrolnog, neojačanog uzorka. Svi uzorci su njegovani najmanje 3 dana da bi se ostvarilo odgovarajuće prijanjanje. Obezbeđivanje veze između betona i FRP trake je neophodno za uspješno ojačanje [27].

Cjelokupno eksperimentalno istraživanja sprovedeno je u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Podgorici, na postojećoj opremi, uz potrebne modifikacije.

2.2.2. Postupak ispitivanja

Uzorci su postavljeni na betonske oslonce, na rasponu od 7.5 metara, a zatim opremljeni instrumentima za mjerenje ugiba u sredini i četvrtinama raspona. Opterećenje je nanošeno na dva načina: kao koncentrisano, preko hidraulične prese (slika 3) i kao ravnomjerno raspoređeno, preko čeličnih tegova težine 5 kN (slika 4).



Slika 3 - Ispitivanje greda opterećenih koncentrisanom silom



Slika 4 - Ispitivanje greda pod dejstvom ravnomjernog opterećenja

Tabela 2 - Karakteristike ispitivanih greda

Oznaka grede	Tip ojačanja	Vrsta opterećenja	Granična nosivost P (kN) / q (kN/m')	Granični moment savijanja M_u (kNm)	^c Porast graničnog momenta savijanja (%)	Ugib u (cm)	^a Dilatacija u zategnutom betonu ϵ_{max} (‰)	Dilatacija u pritisnutom betonu ϵ_{max} (‰)	Dilatacija karbonske trake ϵ_{max} (‰)	Širina prslina α_{max} (mm)	Tip loma
G1a	neojačana	koncentrisano	35.0	65.6	/	7.96	13.46	6.79	/	3.00	lom po betonu na savijanje
G2	CFRP ($l=4m$)	koncentrisano	67.0	125.5	91.3	6.80	6.53	7.59	6.59	0.75	kritična dijagonalna prslina + lom po betonu na savijanje
G3	CFRP ($l=6m$)	koncentrisano	74.0	138.7	111.4	7.80	8.17	7.96	7.45	0.55	kritična dijagonalna prslina + lom po betonu na savijanje
G1b	neojačana	^b ravnomjerno	9.2	76.9	/	9.40	11.88	5.11	/	2.50	lom po betonu na savijanje
G4	CFRP ($l=4m$)	^b ravnomjerno	13.5	119.4	55.3	9.00	6.29	1.17	6.15	0.90	lom po zaštitnom sloju betona, a djelimično duž trake
G5	CFRP ($l=6m$)	^b ravnomjerno	14.1	128.8	67.5	11.10	7.88	1.41	7.20	0.80	lom po betonu na savijanje
^a izmjerene vrijednosti date su za presjek sa prslinom											
^b pretežno ravnomjerno opterećenje											
^c porast je dat u odnosu na kontrolne grede G1a i G1b											

Mjerenje dilatacija u betonu izvršeno je na 2 načina, pomoću mjernih traka i mehaničkog deformetra. Napravljena je šema mjernih mjesta, na međusobnom rastojanju od 100 mm, čime je postignuto tzv. „opasivanje presjeka“, a kao merodavni usvojeni su prosječni rezultati mjerenja sa obje strane grede.

Praćenje pojave i razvoja prslina vršeno je vizuelnim putem, dok je za njihovo mjerenje u kritičnim presjecima korišćena lupa, sa tačnošću od 0.025 mm.

2.2.3. Eksperimentalni rezultati

Analiza parametara koji utiču na ponašanje greda ojačanih CFRP trakama usmjerena je na uticaje položaja spoljašnjeg ojačanja i vrste kratkotrajnog opterećenja.

U tabeli 2. date su maksimalne vrijednosti karakterističnih parametara za šest ispitanih greda. Dimenzije svih greda bile su iste, dok su se dužina ojačanja i način opterećenja razlikovali.

Kao rezultat toga, pojavile su se značajne razlike u krajnjim nosivostima, ugibima, deformacijama i

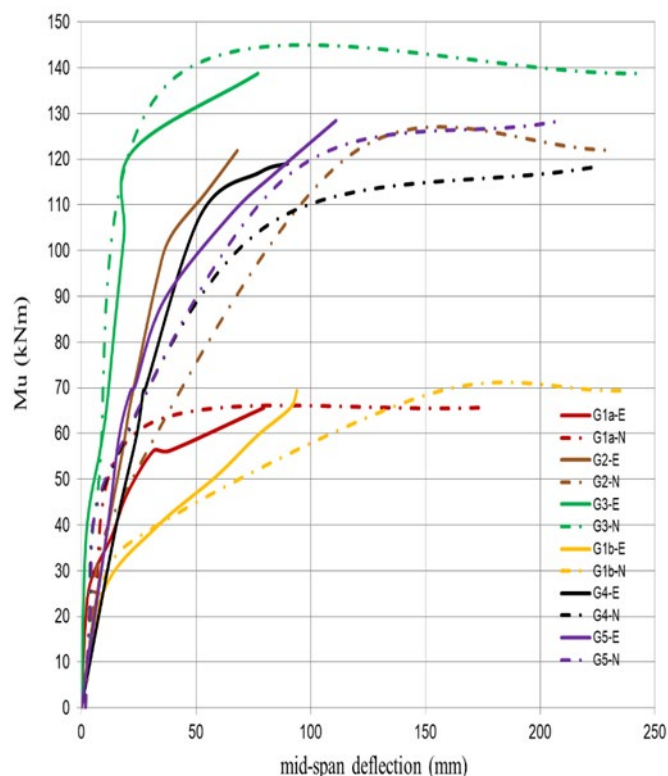
vrstama loma. Te su razlike bile posebno izražene u odnosu na kontrolne grede, ali i između samih greda. Pojedinačni rezultati prikazani su dijagramima i detaljno analizirani u radu [28].

3. UPOREDNA ANALIZA REZULTATA

3.1. ANALIZA UGIBA

Na osnovu dobijenih rezultata analizirani su ugibi iz ova dva modela. Opšti zaključak je da numerički model sa nelinearnim ponašanjem relativno tačno predviđa odgovor ispitivanih armirano-betonskih greda (slika 5). Istovremeno su na ovim dijagramima prikazane eksperimentalno dobijene vrijednosti ugiba, radi preglednije komparacije, odnosno uporedne analize. Korišćene su oznake: E – za eksperimentalno dobijene veličine ugiba i N – za rezultate dobijene nelinearnom analizom.

Sa prikazanih dijagrama se može uočiti da je poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata u prihvatljivim granicama, naročito kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem.

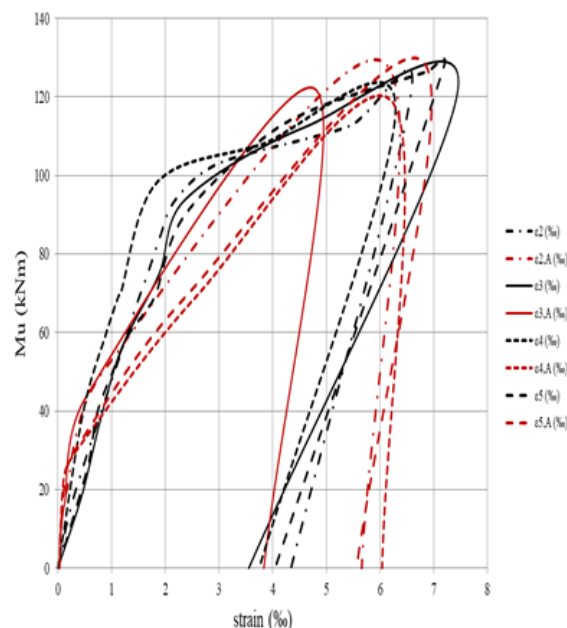


Slika 5 - Dijagrami ugiba ispitivanih greda

Eksperimentalno dobijene veličine dilatacija prikazane su crnom bojom, dok su rezultati dobijeni pomoću programskog paketa ANSYS prikazani crvenom bojom. Dobijene vrijednosti plastičnih deformacija iz simuliranog modela su značajno veće u odnosu na rezultate eksperimenta.

3.2. ANALIZA DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI

Uniformni rezultati dobijeni ispitivanjem dilatacija u karbonskim trakama ukazuju na njihov elasto-plastični karakter (slika 6).

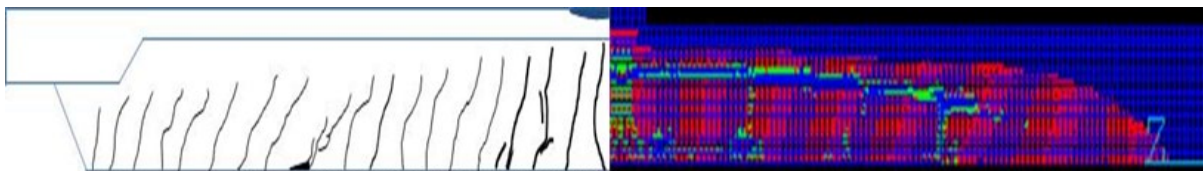


Slika 6 - Dijagrami dilatacija karbons

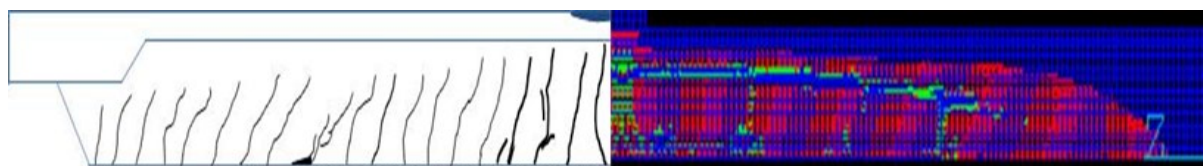
3.3. ANALIZA SLIKE PRSLINA

Na slikama 7 i 8 prikazani su modeli neojačane grede G1a i grede G2, ojačane na dužini od 4 metra. Na lijevoj polovini slike vidi se raspored prslina i pukotina pri lomu dobijen eksperimentom, a na drugoj, desnoj polovini prikazana je slika prslina i pukotina dobijena numeričkom simulacijom. Crvenom bojom označene su prsline, a lom je označen zelenom/plavom bojom.

Evidentno je dobro poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata. To poklapanje je bolje kod neojačanih nego kod ojačanih greda. Korektno poklapanje je prisutno kod analize stanja prslina na krajevima traka, gdje je prisutna velika koncentracija napona.



Slika 7 - Šema prslina za gredu G1a



Slika 8 - Šema prslina za gredu G1a

4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Ojačanje armirano-betonskih elemenata karbonskim materijalima ima brojne prednosti u odnosu na tradicionalne sisteme sanacije konstrukcija, bez obzira na primijenjeni sistem i ekonomski aspekt.

Ispitivanje prikazano u ovom radu potvrdilo je zaključke prethodnih istraživanja [29],[30],[31] da primijenjeni tip ojačanja značajno povećava nosivost greda, istovremeno vršeći redukciju veličine ugiba i širine prslina. Takođe utiče na ponašanje ovih elemenata pod opterećenjem i na njihov mehanizam loma, shodno zaključku iz rada [32].

U okviru predmetne analize, utvrđeni su uticaji različitih šema ojačanja i dva tipa opterećenja, koncentrisanog i jednako podijeljenog kratkotrajnog opterećenja, kako bi se ocijenila efikasnost CFRP sistema ojačanja primijenjenog na ove grede. Izvedeni su sljedeći zaključci:

- Spoljašnje ojačanje AB greda dovelo je do značajnog povećanja čvrstoće na savijanje u poređenju sa kontrolnim gredama, posebno za one ojačane dužim trakama i izložene koncentrisanom opterećenju.
- Ovakvim načinom ojačanja greda smanjena je veličina ugiba u odnosu na kontrolne grede. Veći konačni ugibi zabilježeni su kod greda ojačanih dužim trakama i izloženih jednako podijeljenom opterećenju, u skladu sa povećanjem nosivosti.
- Deformacije u karbonskim trakama bile su vrlo slične za sve grede, gotovo nezavisne od uticaja dva ispitivana parametra.
- U ojačanim gredama uočen je veći broj prslina, ali manje širine u odnosu na kontrolne grede.
- Vidljiva je pojava dijagonalnih pukotina na krajevima kraćih traka, koje su s povećanjem opterećenja postale glavni uzroci loma ojačanih prostih greda.

Dobijeni eksperimentalni rezultati su djelimično u saglasnosti sa rezultatima i zaključcima drugih autora. Razlike postoje, uglavnom zbog toga što su u ovom slučaju ispitivanja sprovedena na uzorcima realnih dimenzija.

Rezultati eksperimentalog istraživanja pokazuju zadovoljavajuću saglasnost sa podacima dobijenim iz numeričke analize primjenom programskog paketa Ansys. Nešto slabije poklapanje je uočeno kod plastičnih dilatacija u karbonskim trakama.

Glavni razlozi zbog kojih se javljaju određena odstupanja u rezultatima su sljedeći:

- Geometrija presjeka T-elementa je nepovoljna za modeliranje zbog projektovanih odstupanja od

horizontalnih i vertikalnih ravni, koja su neophodna pri skidanju oplate;

- Geometrijska pojednostavljenja koja su uvedena kod modeliranja armature;
- Parametri nelinearnosti betona koji se usvajaju iskustveno;
- Materijalne karakteristike koje su stohastičke prirode;
- Imperfekcije koje su neizbježne kod modela realnih dimenzija.

Naznačeni razlozi neminovno će dovesti do pomenutih odstupanja. Ovo je posebno izraženo ako se imaju na umu brojni uticajni parametri razmatranog multikompozitnog sistema.

LITERATURA

- [1] Folić Radomir, Malešev Mirjana: **Održavanje i sanacija konstrukcija**. *Materijali i konstrukcije*, Vol.48, No.4, 62-80, 2005.
- [2] Hag-Elsafi Osman, Alampalli Sreenivas, Kunin Jonathan: **Applications of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structure**. *Journal of Composite Structures*, Vol.52, No.3-4, 453-466, 2001.
- [3] Dhanasingh Sivalinga Vijayan, Arvindan Sivasuriyan, Parthiban Devarajan, Anna Stefańska, Łukasz Wodzyński, Eugeniusz Koda: **Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application - A Comprehensive Review**. *Buildings*, Vol.13, No.6, 1509, 2023.
- [4] Grace Nabil F., Sayed, G.A., Soliman, A.K., Saleh K.R: **Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates**. *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.5, 865-875, 1999.
- [5] Sobuz Rahman Habibur, Ahmed Ehsan, Hasan Noor, Uddin Alhaz: **Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending**. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, Vol.2, No.1, 67-84, 2012.
- [6] Hawileh Rami, Musto Hazem, Abdalla Jamal, Naser Mohannad: **Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates**. *Composites Part B Engineering*, Vol.173, 106952, 2019.
- [7] Naser Mohannad, Hawileh Rami, Abdalla Jamal: **Modeling Strategies of Finite**

- Element Simulation of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP: A Review.** *Journal of composite science*, Vol.5, No.19, 2021.
- [8] Khaloo Ali R., Gharachorlou Ali: **Numerical analysis of RC beams flexurally strengthened by CFRP laminates.** *Iranian Journal of Civil Engineering*, Vol.3, No.1, 1-9, 2005.
- [9] Kachlakev Damian, Mc Curry D.D.: **Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates.** *Composites Part B: Engineering*, Vol.31, No.6, 445-452, 2000.
- [10] Obaidat Yasmeen: **Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer.** Licentiate Dissertation, *Lund University*, Sweden, 2010.
- [11] Holmer Nathan Peter: **Parametric Study of the Bond Between Fiber Reinforced Polymers and Concrete using Finite Element Analysis.** Master's thesis, *Marquette University*, Wisconsin, USA, 2010.
- [12] Karbhari Vistasp: **Durability of FRP composites for civil infrastructure myth, mystery or reality.** *Advances in Structural Engineering*, Vol.6, No.3, 243-255, 2003.
- [13] Thomsen Henrik, Spacone Enrico, Limkatanyu Suchart, Camata Guido: **Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers.** *Journal of Composites for Construction*, Vol.8, No.2, 123-131, 2004.
- [14] Malek Amir, Saadatmanesh Hamid, Ehsani Mohammad: **Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end.** *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.2, 142-152, 1998.
- [15] Casas Joan, Pascual Jordi: **Debonding of FRP in bending: Simplified model and experimental validation.** *Construction and Building Materials*, Vol.21, No.10, 1940-1949, 2007.
- [16] Yao Jinxuan, Teng J.G.: **Plate end debonding in FRP-plated RC beams - I: Experiments.** *Engineering Structures*, Vol.29, No.10, 2457-2471, 2007.
- [17] Da Silva Duarte Pedro Colaco Franjoso: **Reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: an experimental study on the effect of crack repair.** Licentiate Dissertation, *Instituto Superior Tecnico, Universidade Tecnica di Lisboa*, Lisbon, 2011.
- [18] Obaidat Yasmeen Taleb, Heyden Susanne, Dahlblom Ola, Abu-Farsakh Ghazi, Abdel-Jawad Yahia: **Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates.** *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.2, 591-597, 2011.
- [19] Kachlakev Damian, Miller Thomas, Yim Solomon, Chansawat Kasidit, Potisuk Tanarat: **Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates.** Final Report SPR 316, *Oregon department of transportation*, USA, 2001.
- [20] Hawileh Rami, Naser Mohannad, Abdalla Jamal: **Finite element simulation of reinforced concrete beams externally strengthened with short-length CFRP plates.** *Composites Part B Engineering*, Vol.45, No.1, 1722-1730, 2009.
- [21] Mirmiran Amir, Zagers Kenneth, Yuan Wenqing: **Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites.** *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.35, No.1, 79-96, 2000.
- [22] Džolev Igor, Rašeta Andrija, Ladinović Đorđe, Radujković Aleksandra and Starčević Anka.: **Influence of tensile stress softening in nonlinear concrete modelling.** *18th International Symposium of MASE at Ohrid*, North Macedonia, 1234-1242, 2019.
- [23] Luo Ru-deng: **Values of shear transfer coefficients of concrete element Solid 65 in Ansys.** *Journal of Jiangsu University*, Vol.29, No.2, 169-172, 2008.
- [24] Lee Stephen, Moy S.s.J: **Prediction of flexural strength of RC beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer.** *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol.14, No. 3, 169-180, 2007.
- [25] Sim Jongsung, Park Cheolwoo, Moon Do-Young: **Structural performance of concrete T-beam bridge strengthened with fiber reinforced plastics, CFS, GFRP and AFS.** *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol.13, No.1, 1-11, 2006.
- [26] Ramos Gonzalo, Casas Joan, Alarcón A.: **Normalized Test for Prediction of Debonding Failure in Concrete Elements Strengthened with CFRP.** *Journal of Composites for Construction*, Vol.10, No.6, 509-519, 2006.

- [27] Sen Rajan, Shahawy Mohsen, Mullins Gray, Spain John: **Durability of carbon fiber-reinforced polymer/epoxy/concrete bond in marine environment.** *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.6, 906-914, 1999.
- [28] Kopitović-Vuković Nataša, Jevrić Marija, Zejak Radomir: **Experimental analysis of RC elements strengthened with CFRP strips.** *Mechanics of Composite Materials*, Vol.56, No.1, 75-84, 2020.
- [29] Smith Scott Thomas, Teng, J.G.: **FRP strengthened RC beams. I: Review of debonding strength models.** *Engineering Structures*, Vol.24, No.4, 385-395, 2002.
- [30] Chami Ghfran, Theriault, M., Neale, K.W.: **Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams.** *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.4, 1640–1652, 2009.
- [31] Valivonis Juozas, Skuturna Tomas, Daugevičius Mykolas: **The load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite in the tension zone subjected to temporary or sustained loading.** *The 10th International Conference "Modern building materials, structures and techniques"*, Vilnius, Lithuania, 818-825, 2010.
- [32] Gao Bo, Leung Christopher K.Y., Kim Jang-Kyo: **Failure diagrams of FRP strengthened RC beams.** *Composite Structures*, Vol.77, No.4, 493–508, 2007.