

Primljen / Received: 7.9.2020.

Ispravljen / Corrected: 7.3.2021.

Prihvaćen / Accepted: 9.5.2021.

Dostupno online / Available online: 10.7.2021.

Eksperimentalno i numeričko ispitivanje armiranobetonskih greda pojačanih CFRP kompozitom

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Ali Demir**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
ali.demir@cbu.edu.tr
Autor za korespondenciju



Yiğit İnce, dipl.ing.građ.
Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
tavigit.ince@cbu.edu.tr



Taha Yasin Altıok, dipl.ing.građ.
Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
taha.altiok@cbu.edu.tr

Prethodno priopćenje

Ali Demir, Yiğit İnce, Taha Yasin Altıok

Eksperimentalno i numeričko ispitivanje armiranobetonskih greda pojačanih CFRP kompozitom

U ovom radu naglasak je na pojačanju armiranobetonskih greda nedovoljnog posmičnog kapaciteta uporabom polimera armiranih ugljičnim vlaknima (Carbon Fibre Reinforced Polymer - CFRP) i inovativnih načina sidrenja. Predlaže se, također, i inovativna metoda za pojačanje greda na kontaktu dviju konstrukcija. Rezultati ispitivanja pokazali su da se dodavanjem CFRP-a poboljšava ponašanje greda. Nelinearni proračun proveden je primjenom metode konačnih elemenata (FE) te američkih i talijanskih smjernica s ciljem procijene teoretskog kapaciteta greda. Zaključak je da se predložene metode mogu pouzdano primjenjivati, a projektiranje armiranobetonskih greda pojačanih na taj način može se provesti uz pomoć jednostavnih metoda proračuna.

Ključne riječi:

armiranobetonska greda, pojačanje, posmik, CFRP, sidrenje, proklizavanje

Research Paper

Ali Demir, Yiğit İnce, Taha Yasin Altıok

Experimental and numerical investigation of RC beams strengthened with CFRP composites

This study aims to strengthen reinforced concrete (RC) beams having insufficient shear capacity using Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) members and innovative anchorages. An innovative method is also proposed for strengthening beams in interaction site of adjacent structures. Test results show that the behaviour of beams has been improved with CFRP elements. The nonlinear finite element (FE) method, as well as American and Italian guidelines, are used to estimate theoretical capacity of the beams. Test results are compared with theoretical results. It can be concluded that proposed methods can be used reliably, and that the design of RC beams strengthened with these methods can be performed by design engineers based on simple calculations.

Key words:

RC beam, strengthening, shear, CFRP, anchorages, debonding

1. Uvod

Armiranobetonske konstrukcije i konstrukcijski elementi mogu se oštetiti zbog potresa, vjetrova, slijeganja tla, nestručne izvedbe te nekvalitetnih materijala, a to sve mijenja namijenjenu svrhu konstrukcije. Te bi se konstrukcije trebale pojačati prikladnim metodama koje su u skladu sa seizmičkim normama. Kada je riječ o problemima bočne krutosti u konstrukcijama, odgovor konstrukcije poboljšavaju AB posmični zidovi, čelični kosnici, izolatori podnožja ili prigušivači. U mnogim postojećim konstrukcijama, AB elementi imaju nisku čvrstoću betona, nedovoljnu uzdužnu i poprečnu armaturu te nedovoljnu duljinu sidrenja. Ti se elementi najčešće pojačavaju dodavanjem vanjskih elemenata. To su metode oblaganja AB-om/čelikom ili ovijanja CFRP-om [1-3]. Osim toga, vanjske se čelične obujmice koriste kako bi poboljšale ponašanje konstrukcijskih elemenata na posmiku [4, 5]. Ipak, te metode imaju neke nedostatke poput težine, niske otpornosti na koroziju i požar te na proklizavanje [6]. Metoda oblaganja armiranom betonom je zahtjevnija, teška za izvedbu, uzima puno vremena i povećava težinu konstrukcije. Što se tiče pojačavanja i popravka, elementi CFRP-a jedna su od najučinkovitijih i najrasprostranjenijih metoda korištenih u građevinarstvu tijekom zadnja tri desetljeća [7-13]. Iako kao materijal ima veliku čvrstoću, krutost i trajnost, lagan je te se lako ugrađuje, CFRP ima neke nedostatke. Jedna od negativnih GFRP karakteristika njegovo je linearno ponašanje do loma (krti lom), odnosno njegovo neduktilno ponašanje. Proklizavanje i delaminacija elemenata CFRP-a i dalje su poprilično značajni problemi. Prijašnja su istraživanja pokazala da učinkovitost te metode ovisi o tome kako se pojačanje (armatura) povezuje s površinom betona [14]. AB grede mogu se oštetiti u posmiku zbog proklizavanja [15, 16]. Prilično je važno dogoditi ili izbjeći probleme proklizavanja i delaminacije posmičnog pojačanja AB konstrukcija u [17]. U mnogim su istraživanjima razvijene različite metode s ciljem sprječavanja proklizavanja elemenata CFRP-a na površini greda [18]. Proklizavanje je posljedica velikih površinskih naprezanja koja ovisi o Youngovom modulu elastičnosti, debljini, širini i duljini elemenata CFRP-a. Ako su površinska naprezanja veća od čvrstoće prijanjanja betona ili ljepila, element proklizava po površini. Općenito, proklizavanje se događa na površini betona budući da je čvrstoća prijanjanja betona manja od čvrstoće ljepila. Kako bi se riješio taj problem, predlažu se metode mehaničkog sidrenja (odnosno vijci ili čavli) [19].

Ipak, ti načini sidrenja općenito ne mogu spriječiti prerano odljepljivanje traka. Sidra mogu smanjiti problem sidrenja prenošenjem površinskih naprezanja u beton [18]. Preuranjeno odljepljivanje traka CFRP-a spriječilo se uporabom čeličnih šipki i adhezivnih sidara, kako se navodi u [18]. Upotreba je sidara poboljšala nosivost grede i ponašanje grede pri lomu. Razaqpur i dr. [20] istražili su odgađanje preuranjenog odljepljivanja s π -CFRP sidrima i postizanje veće nosivosti greda ojačanih CFRP trakama. Rezultati su pokazali učinkovitost π sustava sidrenja te moguću učinkovitu upotrebu

korištenja snažnih i gustih traka kao elemenata pojačanja. Mohamed i dr. [21] razvili su sustav sidrenja s epoksidnom smolom kako bi se odgodio problem odljepljivanja. Zaključilo se da je sustav sidrenja s epoksidnom smolom odgodio odljepljivanje traka CFRP-a te povećao posmični kapacitet greda. Mohamed i dr. [22] istražili su vanjsko pojačanje AB greda nedovoljno jakih u posmiku postavljanjem CFRP traka i lamela u utore na površini. Oni su postigli povećanje posmične nosivosti u odnosu na kontrolnu gredu do 112 % za lamele, odnosno do 141 % za trake. Osim toga, razvili su se modeli predviđanja posmične nosivosti, a temeljeni su na modelu posmičnog ponašanja prikazanom u ACI440.2R-17. Chalioris i dr. [14] istražili su ponašanje T-greda pojačanih trakama CFRP-a i mehaničkim sidrenjem. Nosivost greda u kojima je korišteno mehaničko sidrenje povećala se za 72 % u usporedbi s kontrolnom gredom. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s trima različitim standardima. Navedeno je da standardi omogućavaju sigurne procjene. Bocciarelli i dr. [23] ispitali su posmik AB elemenata pojačanih različitim konfiguracijama CFRP traka. Rezultati ispitivanja uspoređeni su s rezultatima dobivenim iz talijanskih smjernica te ACI smjernica. Zaključili su da talijanske smjernice treba revidirati u izračunima nosivosti na posmik posve ovijenih elemenata. Primjenom metode konačnih elemenata simulirao se i predvidio odnos opterećenja i pomaka AB greda. Osim toga, primjena se predloženih eksperimentalnih metoda može potvrditi metodom konačnih elemenata. Nistico i dr. [24] proveli su numerička istraživanja AB greda pojačanih CFRP-om u posmiku. Koristili su mikroravninski model za betonsku i polimernu matricu. Proučavala se raspodjela naprezanja kada je došlo do pukotine u betonu i kada se ona širila. Rezultati ispitivanja oslanjali su se na numeričko istraživanje. Salih i dr. [25] istražili su eksperimentalno i numerički ponašanje AB greda s otvorima koje su pojačane CFRP-om. Eksperimenti su potvrdili rezultate analize metodom konačnih elemenata. Kaya i Yaman [26] istražili su utjecaj broja sidara na lamele GFRP-a koje su spojene s površinom armiranobetonskih T-greda uz pomoć metode konačnih elemenata. Zaključili su da je program koji se temelji na metodi konačnih elemenata bio neprikladan u modeliranju AB uzoraka u posmiku. Svrha je istraživanja pojačati AB grede manjkave u posmiku i to uporabom elemenata CFRP-a te odgoditi odljepljivanje i delaminaciju CFRP tkanina uz pomoć CFRP sidara u obliku ventilatora. Sidrenje (učvršćivanje) CFRP-a u obliku ventilatora jeftina je i lako primjenjiva metoda u odnosu na druge tehnike učvršćivanja. CFRP tkanine su korištene kako bi se povećala posmična nosivost greda. Osim CFRP tkanina, lamele CFRP-a primijenjene su da se poboljša posmični i savojni kapacitet greda. Potvrđeni su rezultati ispitivanja koji su u skladu s onima dobivenim iz američkih [27] i talijanskih [28] smjernica, kao i na temelju nelinearnih analiza konačnih elemenata. Iz tog se razloga predlažu jednostavni pristupi za projektante i znanstvenike.

Tablica 1. Mehanička svojstva čeličnih šipki

Uzorak	Broj	Granica popuštanja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Youngov modul elastičnosti [MPa]
Ø6	3	480	590	212000
Ø10	3	470	575	210000
Ø16	3	435	540	202000

2. Materijali i metode

2.1. Materijal

Težilo se da tlačna čvrstoća betona bude 16 MPa u etapi projektiranja greda. Tijekom proizvodne etape greda za svaki su element grede uzeta tri uzorka valjka betona. Zatim su se ti uzorci podvrgnuli ispitivanjima jednoosne tlačne čvrstoće betona, a određena je srednja tlačna čvrstoća betona od 16 MPa. U skladu s uvjetima iz TS708 [29], proizvedena su tri seta uzoraka za svaku čeličnu šipku i to promjera 6, 10 i 16 mm za vlačno ispitivanje čelika. Rezultati ispitivanja odredili su vrijednost granice popuštanja (f_y), vlačne čvrstoće (f_u) i Youngova modula elastičnosti (E_s) čeličnih šipki kao što to prikazuje tablica 1.

Posebna se vrsta epoksidne smole koristila za spoj elemenata CFRP-a i površinu AB greda. Sedmodnevna tlačna čvrstoća epoksidne smole veća je od 60 MPa, vlačna je čvrstoća veća od 50 MPa, a čvrstoća prijanjanja veća je od 3 MPa. Masa po jedinici volumena iznosi 1080 kg/m³. Epoksidna je smola nanijeta na površinu grede u sloju približne debljine 1 mm, a u skladu s vrstom i tehnikom primjene.

Jednoosne CFRP tkanine i lamele CFRP-a (od ugljičnih vlakana) često se upotrebljavaju da bi se povećao posmični, odnosno savojni kapacitet greda. CFRP tkanina koja se koristi u ovom istraživanju širine je 500 mm, debljine 0,111 mm, čija masa po jedinici volumena iznosi 230 g/m², te vlačne čvrstoće koja iznosi 4900 MPa. Produljenje pri slomu iznosi 2,1 %. Youngov modul elastičnosti iznosi 230000 MPa. Lamelle CFRP-a koje se koriste u ovom istraživanju širine su 100 mm, debljine 1,2 mm te vlačne čvrstoće koja iznosi 3000 MPa. Produljenje pri slomu iznose 1,5 %. Youngov modul elastičnosti iznosi 165000 MPa.

2.2. Specifikacije uzoraka

Proizvedeno je šest AB greda nedovoljne nosivosti na poprečnu silu kako bi se odredilo njihovo ponašanje pod opterećenjem. Jedna od greda s nedovoljnim sponama (referentna greda)

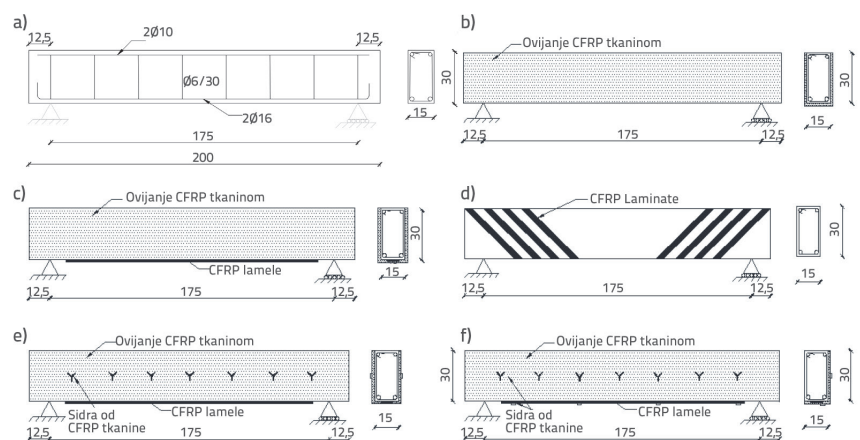
ispitana je bez pojačanja. Sve su pojačane tkaninama i lamelama CFRP-a, i to primjenom različitih tehnika. Tablica 2. prikazuje sve grede i njihova svojstva. REF predstavlja referentnu gredu, a GK1, GK2, GK3, GK4, GK5 predstavljaju grede pojačane tkaninama i lamelama CFRP-a.

Sve su grede podvrgnute ispitivanju savijanjem u četiri točke pod opterećenjem koje se jednolično povećava. Opterećenje se unijelo u gredu upotrebom hidrauličnog klipa i čelične grede na udaljenosti od 585 mm od oba oslonca. Sve grede koje su se koristile u ovom istraživanju imale su ista geometrijska svojstva, bile su duljine 2000 mm, visine poprečnog presjeka od 300 mm te širine 150 mm. Sve su grede armirane čeličnim šipkama 2Ø16 u vlačnom području i čeličnim šipkama 2Ø10 u tlačnom području. Korištene su spone Ø6/300 mm. Udaljenost između dva oslonca bila je 1750 mm. Slika 1.a. prikazuje poprečni presjek, geometriju i svojstva armiranja REF grede. Kada je riječ o gredama s pojačanjem, konfiguracije CFRP-a međusobno su se razlikovale. Slika 1.b. prikazuje GK1 koja je

Tablica 2. Opća svojstva greda

Greda	Tkanine CFRP-a	Lamelle CFRP-a	Sidrenje CFRP-a
REF	-	-	-
GK1	+	-	-
GK2	+	+	-
GK3	-	+	-
GK4	+	+	+
GK5	+	+	+

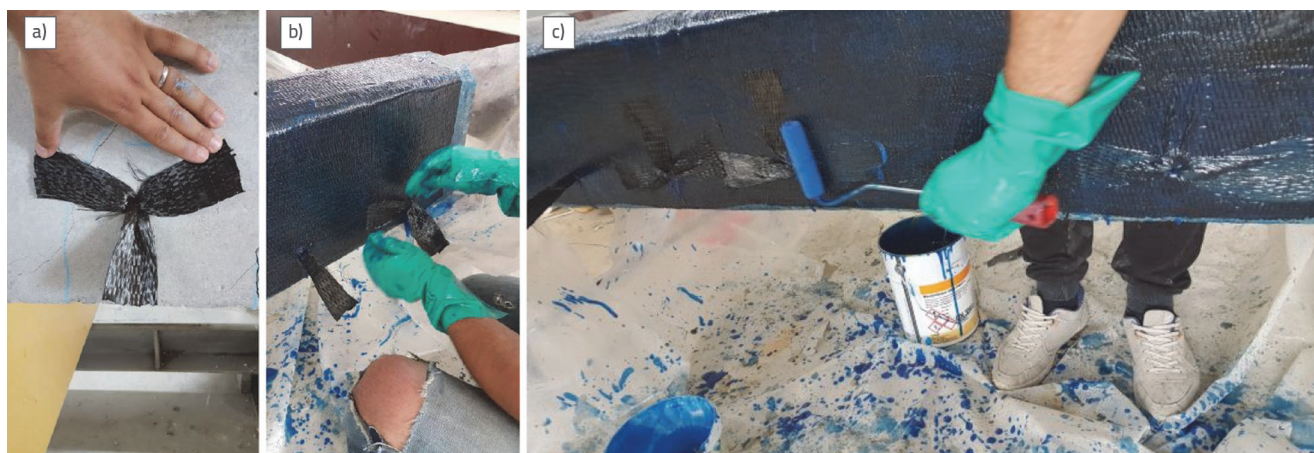
-: nije izvedeno, +: izvedeno



Slika 1. Detalji svih greda: a) REF; b) GK1; c) GK2; d) GK3; e) GK4; f) GK5



Slika 2. Priprema uzoraka: a) GK1; b) GK2; c) GK3; d) GK4; e) GK5



Slika 3. Ručno napravljena sidra CFRP-a u obliku ventilatora

ovijena CFRP tkaninom u obliku slova U. GK2 je CFRP tkaninom u obliku slova U te lamelama CFRP-a kao što to prikazuje slika 1.c. U slučaju grede GK3, lamele CFRP-a su široke 5 cm i duge 40 cm, a prijanjaju na obje strane površine grede (na slici 1.d). Odljepljivanje je jedan od najvažnijih problema kada je u pitanju pojačanje elementima CFRP-a [16]. Koristila su se sidra u obliku ventilatora od CFRP tkanina kako bi se odgodili ili spriječili ti problemi u GK4 i GK5. GK4 se pojačala CFRP tkaninom u obliku slova U te lamelama CFRP-a (na slici 1.e). GK5 prikazuje gredu na mjestu gdje se susjedni elementi AB konstrukcije dodiruju. Zato se GK5 pojačala ovijanjem tkaninom u obliku slova L i lamelama CFRP-a koji su pričvršćeni na dnu grede (na slici 1.f). GK1, GK2 i GK4 pojačane su ovijanjem tkaninom u obliku slova U, kao što to prikazuje slika 2.a do 2.d. Površine grede se čiste i popravljaju prije primjene CFRP-a. Nakon toga, tkanina se CFRP-a pričvršćuje na površinu grede i natapa epoksidnom smolom. Lamela CFRP-a također se pričvršćuje na donji dio grede u slučaju GK4. Kad je riječ o GK3, bočne površine dijagonalno su izgledale hrapave, kao što to prikazuje slika 2.c., a lamele su pričvršćene na tim površinama uz pomoć epoksidne smole. GK5 se pojačala CFRP tkaninama, a lamela se pričvrstila na površinu dna, kao što to prikazuje slika 2.e.

GK4 i GK5 su pojačane tkaninama i lamelama CFRP-a, kao i sidrima CFRP-a u obliku ventilatora kao što to prikazuje slika 3. Vlačna naprezanja prenose se preko sidara s CFRP tkanine na površinu betona. Sidra u obliku ventilatora proizvedena su od CFRP tkanina (na slici 3.a). Zatim su natopljena epoksidnom smolom (na slici 3.b). Prije ugrađivanja ventilatora CFRP-a, rupe su popunjene epoksidnom smolom te su sidra umetnuta u prethodno izbušene rupe. Epoksidna je smola nanosena na površinu grede kao što to prikazuje slika 3.c.

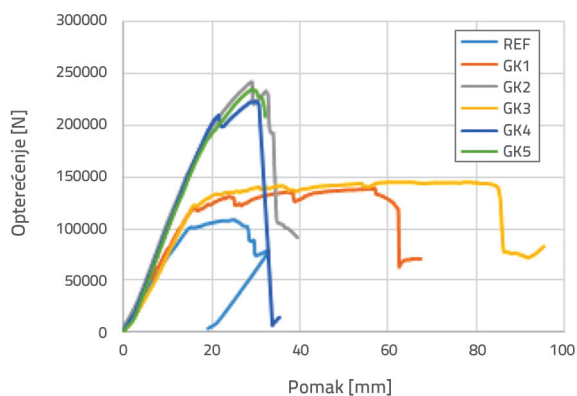
2.3. Rezultati ispitivanja i rasprava

Ispitivanjima se dobio odnos opterećenja i pomaka, kapacitet trošenja energije, početna krutost te vrijednost duktilnosti za sve grede. Tablica 3. prikazuje opterećenje i pomak pri popuštanju, silu i pomak pri slomu te početnu krutost grede. Slika 4. prikazuje odnose opterećenja i pomaka. Tablica 4. usporedno prikazuje varijacije u nosivosti i kapacitetu pomaka. GK2, GK4 i GK5, koje su pojačane tkaninama i lamelama CFRP-a, postigle su najveće nosivosti u usporedbi s REF gredom. Najveći rast opterećenja pojavio se kod GK2. GK3 je postigla najveće povećanje pomaka i to za 159 %. Dijagonalne lamele CFRP-a

Tablica 3. Početna krutost, opterećenje i pomak ispitanih greda

Greda	Sila pri popuštanju [kN]	Pomak pri popuštanju [mm]	Sila pri slomu [kN]	Pomak pri slomu [mm]	Početa krutost [kN/m]
REF	105	14	109	33	7,8
GK1	119	16	140	62	7,7
GK2	190	19	242	32	10,1
GK3	122	16	146	85	7,4
GK4	210	21	224	35	9,8
GK5	185	19	235	32	8,1

koje se koriste u GK3 povećale su kapacitet pomaka. Pomak pri slomu u slučaju GK2 i GK5 nije se povećao u usporedbi s REF gredom. U slučaju GK4, pomak pri slomu povećao se za 7 %. Pomak pri slomu u slučaju GK1 povećao se za 88 %, a u slučaju GK3 za 159 %.



Slika 4. Odnosi opterećenja-pomaka za sve grede

Tablica 4. Varijacije nosivosti i kapaciteta pomaka pojačanih greda u usporedbi s REF gredom

Greda	Sila pri popuštanju [%]	Pomak pri popuštanju [%]	Sila pri slomu [%]	Pomak pri slomu [%]
REF	-	-	-	-
GK1	14	16	28	88
GK2	82	40	122	-3
GK3	17	22	34	159
GK4	101	59	105	7
GK5	77	37	115	-2

Tablica 5. prikazuje vrijednosti koeficijenta duktilnosti svih greda. Koeficijent duktilnosti za GK1 i GK3 značajno se povećao u odnosu na REF gredom, i to za 62 %, odnosno 113 %. Iako su lamele CFRP-a poboljšale nosivost grede, njihova se duktilnost smanjila. Koeficijent duktilnosti grede GK2 smanjio se za 31 %, u slučaju GK4 se smanjio za 33 %, te u slučaju GK5 za 29 % u odnosu na REF gredom.

Tablica 5. Koeficijent duktilnosti greda

Greda	Pomak pri popuštanju [mm]	Pomak pri lomu [mm]	Duktilnost (δ_u/δ_v)
REF	14	33	2,4
GK1	16	62	3,9
GK2	19	32	1,7
GK3	16	85	5,2
GK4	21	35	1,6
GK5	19	32	1,7

Sposobnost trošenja energije greda određuje se računanjem područja ispod krivulje opterećenje-pomak, a prikazana su u tablici 6. Sposobnost trošenja energije svih pojačanih greda poboljšala se u usporedbi s REF gredom. Najveće povećanje bilo je u GK3. U usporedbi s REF gredom najveće povećanje sposobnosti trošenja energije je 177 % u slučaju GK1, 54 % u slučaju GK2, 317 % u slučaju GK3, 48 % u slučaju GK4 te 46 % u slučaju GK5. Zaključak je da su dijagonalne lamele CFRP-a poprilično učinkovite kada je u pitanju duktilnost greda.

Tablica 6. Sposobnost trošenja energije greda

Greda	Sposobnost trošenja energije [Nm]	Povećanje [%]
REF	2290	-
GK1	6341	177
GK2	3532	54
GK3	9562	317
GK4	3400	48
GK5	3350	46

2.4. Načini sloma greda

Slika 5. prikazuje rezultate ispitivanja, odnosno načine sloma svih greda. Slika 5.a. prikazuje posmični oblik sloma REF grede, a slika 5.b. prikazuje savojni oblik sloma GK1. Zbog CFRP tkanine došlo je do promjene oblika sloma GK1 iz posmičnog u savojni. Došlo je do



Slika 5. Stanje oštećenosti greda nakon ispitivanja: a) REF; b) GK1; c) GK2; d) GK3; e) GK4; f) GK5

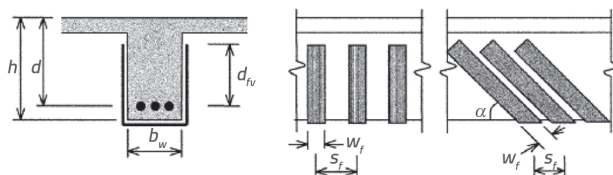
otkazivanja CFRP tkanine pri krajnjem opterećenju. U slučaju GK1 nije se uočilo odljepljivanje. GK2 je podnijela veliko opterećenje, no oblik sloma je posmični. Slika 5.c. prikazuje uočeno odljepljivanje i delaminaciju u slučaju GK2. Slika 5.d. prikazuje da se GK3 slomila savojnim oblikom. Kada je riječ o posmičnom pojačanju, upotrebom lamela CFRP-a značajno se poboljšalo posmično ponašanje GK3. Pri velikim opterećenjima pojavila se delaminacija u slučaju GK3. Pomak GK4 pri slomu zbog sidara je nešto veći nego u slučaju GK3 koja ima ista obilježja, osim sidara. Sila pri popuštanju GK4 je 10,34 % veća nego u slučaju GK2. U slučaju GK4 došlo je do odgode odljepljivanja i delaminacije u odnosu na GK2. Slika 5.e. prikazuje da je oblik sloma GK4 posmični. GK5 se slomila posmično poput GK2 i GK4 (na slici 5.f). Iako se CFRP tkanina koristila za ovijanje u obliku slova L dviju površina, GK5 je pokazala ponašanje slično GK4 koja je ovijena u obliku slova U. Ta je situacija dokaz da su sidra u obliku ventilatora pokazala željeno ponašanje prilikom ispitivanja jer se odljepljivanje i delaminacija nisu pojavile do velikih opterećenja. Stoga se može zaključiti da se grede mogu pojačati ovom metodom na mjestu gdje se susjedne konstrukcije dodiruju. CFRP tkanine su gredama povećale duktilnost i sposobnost trošenja energije prilikom ispitivanja. Iako

su tkanine i lamela CFRP-a povećale nosivost greda, njihova je kombinacija smanjila duktilnost

3. Analitičko istraživanje

3.1. Nosivost greda prema smjernicama ACI 440.2R-17 i CNR-DT 200 R1/2013

Primjenom potpunog ili djelomičnog ovijanja CFRP tkaninama povećava se posmični kapacitet AB greda. Kako bi grede sigurno podnijele opterećenje tijekom projektiranja, sile posmika ne smiju premašiti posmičnu nosivost greda pojačanih CFRP tkaninama, izraz (1). Dimenzijske varijable koje se koriste u gredama pojačanim elementima CFRP-a prikazane su na slici 6.



Slika 6. Omatanje greda CFRP tkaninama [27]

U ovom istraživanju dobivena je posmična nosivost greda primjenom smjernica ACI 440.2R-17 (2017) i CNR-DT 200 R1/2013 [28]. Proračunska posmična nosivost treba se izračunati množenjem nazivne posmične nosivosti i faktora smanjenja nosivosti ϕ , kao što je navedeno u ACI 318-05 [31], izraz (1):

$$\phi V_n \geq V_u \quad (1)$$

ACI 440.2R-17 [27] se temelji na nacrtu jednadžbi koje su dobili Khalifa i dr. [7]. Nazivna posmična nosivost AB greda pojačanih CFRP-om dobiva se iz izraza (2), a koji je u skladu s ACI 440.2R-17 [27].

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (2)$$

gdje su V_c i V_s izračunani primjenom ACI 318-05 [31]. Prema ACI 440.2R-17 [27], preporuča se faktor smanjenja Y_f koji iznosi 0.85 za ovijanje u obliku slova U CFRP tkaninama. Doprinos CFRP-a posmičnoj čvrstoći (V_f) dobiva se prema izrazu (3) koji je u skladu s ACI 440.2R-17 [27].

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (3)$$

gdje je $A_{fv} = 2n_t w_f$ ploština površine CFRP-a; d_f je efektivna visina CFRP-a; w_f je širina, a s_f razmak između traka CFRP-a. U slučaju kontinuirane tkanine $s_f = w_f$; a je kut između smjera vlakana i longitudinalne osi elementa; $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$ je efektivna proračunska čvrstoća CFRP-a; $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,4$ % je efektivna relativna deformacija CFRP-a; ε_{fu} je granična relativna deformacija pri slomu CFRP-a; k_v je koeficijent smanjenja zbog proklizavanja koji ovisi o tlačnoj čvrstoći betona, f_c , vrsti pojačanja i krutosti CFRP-a:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11910 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (4)$$

gdje je $k_1 = (f_c / 254)^{2/3}$; $k_2 = (d_f - L_e) / d_f$ (za ovijanje u obliku slova U), a $L_e = 23300 / (n_t E_f)^{0.58}$. Izraz (3) stoga se može zapisati u obliku:

$$V_f = d_f f_{fe} 2(n_t f) \left(\frac{w_f}{s_f} \right) (\sin a + \cos a) \quad (5)$$

Posmična se nosivost greda također računa primjenom CNR-DT 200 R1/2013 [28]. Posmična nosivost greda pojačanih CFRP-om ($V_{Rd,r}$) može se izračunati uz pomoć izraza (6) u CNR-DT 200 R1/2013 [28].

$$V_{Rd,r} = \min(V_{Rd,s} + V_{Rd,f} + V_{rd,max}) \quad (6)$$

gdje je $V_{Rd,f}$ doprinos U omatanja CFRP-a posmičnoj čvrstoći. Doprinos posmičnog pojačanja CFRP-a računa se uz pomoć izraza (7) koja se temelji na Mörschovoj analogiji.

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \frac{0.9d}{p_f} f_{fed} \times 2t_f \times b_f \times (\cot \theta + \cot \beta) \quad (7)$$

gdje je θ nagib pukotine betona u odnosu na os grede, β je nagib traka CFRP-a u odnosu na os grede, d je statička visina (udaljenost od tlačnog ruba do težišta vlačne armature), $\gamma_{Rd} = 1.2$ je parcijalni faktor, p_f je razmak, a f_{fed} efektivna čvrstoća traka CFRP-a (f_{fed}) umjesto površine poprečnog presjeka čelika (A_{sw}) dobivene izrazom (8).

$$f_{fed} = f_{fd} \left[1 - \frac{1}{3} \frac{l_{ed} \times \sin \beta}{\min\{0.9d, h_w\}} \right] \quad (8)$$

gdje je f_{fd} proračunska čvrstoća odljepljivanja CFRP-a, h_w je visina nosača koji je posve ovijen, a l_{ed} je proračunska duljina sidrenja.

Kako bi se posmično pojačale, grede su bile ovijene jednim slojem CFRP tkanine u obliku slova U. Kako bi se savojno pojačale, lamele CFRP-a postavljene su na donju površinu grede uz pomoć epoksidne smole. U slučaju posmičnog pojačanja GK3 grede, lamele CFRP-a dijagonalno su pričvršćene na hrbat unutar posmičnog raspona. Radi određivanja posmične nosivosti GK3 grede, usvojena je metoda proračuna koja se primjenjuje na CFRP tkanine, te su se koristila mehanička svojstva lamela CFRP-a u tom izračunu. Rezultati ispitivanja grede pojačane CFRP tkaninama bili su jako blizu analitičkim rezultatima, kao što je prikazano u tablici 7. Rezultati ispitivanja grede pojačane tkaninom i lamelama CFRP-a iznosili su 57.2 % više u GK2 te 45,4 % više u GK4 nego vrijednosti predviđene jednadžbom za posmik prema ACI 440.2R-17 [27]. Taj je odnos iznosio 94,8 % u GK2, odnosno 80,1 % u GK4 u usporedbi s

Tablica 7. Usporedba rezultata ispitivanja i analitičkih rezultata

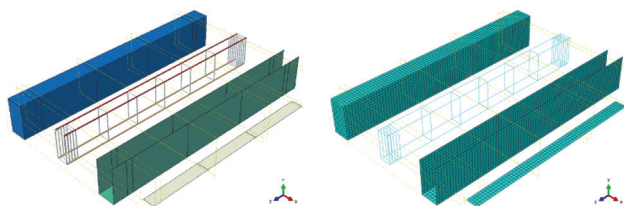
Greda	Ispitivanje [kN]	ACI440,2R-17 (posmični slom) [kN]	CNR-DT 200 R1/2013 (posmični slom) [kN]	P_{test} / P_{ACI}	P_{test} / P_{CNR}
REF	109	105	97	4,1	12,7
GK1	140	154	124	-9,4	12,2
GK2	242	154	124	57,2	94,8
GK3	146	152	179	-4,1	-18,7
GK4	224	154	124	45,4	80,1

jednadžbom za posmik prema CNR-DT 200 R1/2013 [28]. Iako su te razlike velike, proračunom određene procjene su na strani sigurnosti. Uočeno je da se načini loma dobiveni ispitivanjem i metodama ACI440.2R-17 ne podudaraju. Zaključilo se da tijekom projektiranja projektanti mogu koristiti uvjete ACI 440.2R-17 [27] i CNR-DT 200 R1/2013 [28] kako bi pojačali AB grede predloženim metodama.

4. Metoda konačnih elemenata

4.1. Modeliranje

Nelinearna analiza metodom konačnih elemenata primjenjena je na gredama upotrebom programa ABAQUS [32]. U ovom istraživanju korištena je metoda konačnih elemenata s ciljem da se simulira i predvidi odnos opterećenje-pomak pojačane AB grede. Mnoga istraživanja koja se tiču modeliranja pukotina, drobljenja i mehanizama oštećenja betona provedena su primjenom programa ABAQUS [11, 33, 34]. U modelima se koristila nelinearna statička analiza. U radu je najveći vremenski inkrement za svaki korak iznosio 0.001 sekundu. U analizama se koristila standardna Newton-Raphsonova metoda iteracije kako bi se riješio nelinearni sustav jednadžbi ravnoteže metodom konačnih elemenata. Beton se modelirao upotrebom krutih elemenata s osam čvorova po tri stupnja slobode, a to se zove C3D8R. Beton je modeliran kao plastičan i homogen materijal. Uzdužni čelik i spone ugrađeni su u mrežu konačnih elemenata betona uporabom ugrađenih ograničenja područja. Čelična šipka modelirana je kao element rešetke s dva čvora i tri stupnja slobode za svaki čvor, a to se zove T3D2. Ponašanje čelika je modelirano kao elastično-idealno plastično. Spoj između čelične šipke i betona je modeliran kao savršen (nema proklizavanja). Kako bi se modelirala tkanina i lamele CFRP-a, koristili su se plošni "shell" elementi s četiri čvora koji se zovu S4R, a koji imaju šest stupnjeva slobode po čvoru. Ponašanje CFRP-a smatralo se linearno elastičnim do sloma. Otkazivanje CFRP-a kontrolirano je čvrstoćom CFRP-a u vlaknu. Odnos naprezanje-proklizavanje između CFRP-a i betona modelirano je pristupom iz [35]. Između betona i elemenata CFRP-a primijenjen je element sučelja s osam čvorova za pretvaranje posmičnih naprezanja u sile čvorova [36, 37]. Slika 7. pokazuje trodimenzionalni model konačnih elemenata koji sadržava geometriju, čelik, tkaninu i lamelu CFRP-a, kao i mrežu konačnih elemenata korištenu u ovom istraživanju.



Slika 7. Trodimenzionalni model konačnih elemenata grede

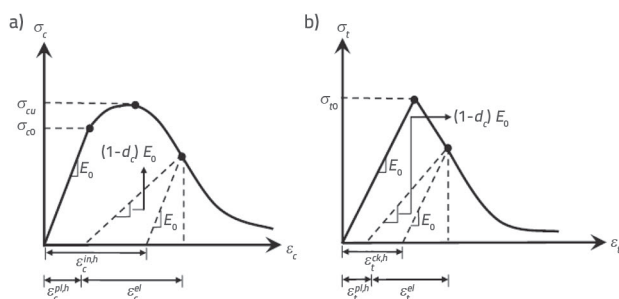
4.1.1. Plastične deformacije betona

Modeliranje i analize konačnih elemenata poprilično su složene budući da beton pokazuje nelinearno ponašanje pri tlaku i vlaknu. Oštećenje betona popraćeno je očvršćivanjem ili omekšavanjem, što je poprilično teško i komplicirano modelirati. Iz tog razloga u analizama deformacije često se koristi model plastične deformacije betona koji se temelji na teoriji plastičnosti i mehanici loma [11, 34, 38]. U tom je modelu oštećenje u betonu određeno ekvivalentnim plastičnim vlačnim (ε_c^{ckh}) i tlačnim (ε_c^{plh}) relativnim deformacijama. U modelu plastične deformacije betona koristile su se zadane vrijednosti u sljedećem iznosu: ekscentričnost = 0,1, kut dilatacije = 36, viskoznost = 0, f_{b0}/f_{c0} = 1,16 te $K = 0,667$.

4.1.2. Jednoosno tlačno i vlačno ponašanje betona

U modelu plastične deformacije betona odnos između relativne deformacije i tlačnog naprezanja betona određuje se plastičnim očvršćivanjem (ε_c^{plh}) u tlaku (na slici 8.a). U ovom se istraživanju razmatrao odnos naprezanje-relativna deformacija AB elemenata prema Eurokodu 2 [39], a koristile su se izrazi koje je predložio Majewski [40] s ciljem da se modelira jednoosno ponašanje betona u tlaku. Parametar tlačnog oštećenja (d) može se izraziti kao što to prikazuje izraz (9).

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (9)$$



Slika 8. Ponašanje betona izloženog jednoosnom opterećenju [32]: a) tlak; b) vlak

Vlačna čvrstoća betona ($f_{ctm} = \sigma_{t0}$) dobiva se kao što je prikazano izrazom (10). ε_{0t}^{el} je relativna deformacija pri doseganju vlačne čvrstoće, prema (11).

$$f_{ctm} = \sigma_{t0} = 0.30 (f_{cm})^{2/3} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_{t0}}{E_0} \quad (11)$$

U modelima plastične deformacije betona, ε_c^{ckh} je relativna deformacija izazvana pucanjem u vlaknu (na slici 8.b) i dobivena kao što to prikazuje izraz (12).

Tablica 8. Svojstva betona u modelu plastične deformacije betona

Tlačno ponašanje betona			Vlačno ponašanje betona		
Naprezanje [MPa]	Neelastična relativna deformacija	Parametar oštećenja	Naprezanje [MPa]	Relativna deformacija pri raspucavanju	Parametar oštećenja
10,2	0,00049	0	1,90	0	0
14	0,00092	0	1,35	0,00012	0,287
15	0,00114	0	1,12	0,00023	0,405
16	0,00149	0	0,84	0,00054	0,557
15	0,00192	0,060	0,63	0,00115	0,667
14	0,00206	0,108	0,44	0,00285	0,767
12	0,00235	0,248	0,33	0,00566	0,822
10,5	0,00249	0,339	0,26	0,01006	0,859
7,9	0,00270	0,503	0,19	0,02106	0,895
5,9	0,00285	0,630	0,18	0,02606	0,903
2,4	0,00306	0,855	0,17	0,03106	0,910

$$\varepsilon_t^{ck,h} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_{t0}}{E_0} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (12)$$

Parametar vlačnog oštećenja (d) može se izraziti na sljedeći način:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \quad (13)$$

Wang i Hsu [41] odredili su odnos između naprezanja i relativne deformacije betona u vlaknu, kao što to prikazuje izraz (14).

$$\sigma_t = \sigma_{t0} \left(\frac{\varepsilon_{0t}^{el}}{\varepsilon_t} \right)^n \quad \varepsilon_t > \varepsilon_{0t}^{el} \quad (14)$$

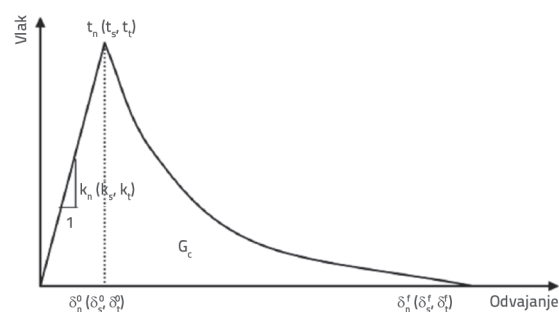
n , koji predstavlja mjeru slabljenja, a predloženo je da iznosi 0.4 prema [41]. Tlačno i vlačno ponašanje betona određeno je u skladu s formulacijama o plastičnosti deformacije koja je prethodno spomenuta u ovom poglavlju, a parametri modela plastične deformacije betona prikazani su u tablici 8.

4.1.3. Modeliranje interakcije između betona i CFRP-a

Epoksidna smola koja se koristila kako bi se učvrstila tkanina i lamele CFRP-a na AB gredu tanki je viskozni sloj. Postiže se kontakt ploha-na-plohu između CFRP-a i AB grede zbog epoksidne smole. To se ponašanje modelira kao čvrsti kontakt. Izraz (15) prikazuje linearno elastični odnos prijanjanja i proklizavanja. U skladu s ABAQUS [32], prijanjajući sloj na kontaktu konačne je debljine i općenito se modelira kohezivnim ponašanjem plohe.

$$K_n(K_s, K_t) = \frac{E_{resin}}{t_{adhesion}} \quad (15)$$

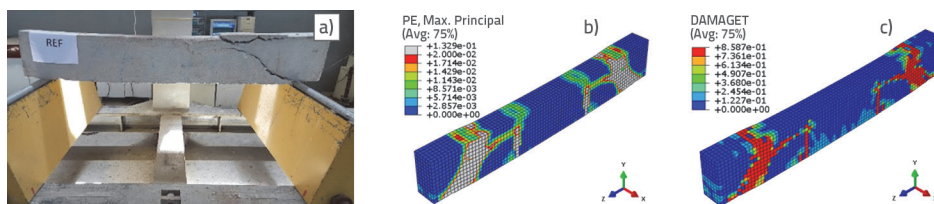
Kriterij početka oštećenja i zakon o razvoju oštećenja poprilično su značajni za procjenu loma. Količina $t_n(t_s, t_t)$ i posljednje odvajanje koje ovisi o zakonu o razvoju oštećenja, a koji je na slici 9. prikazan kao količina energije ispod krivulje, utječu na početak oštećenja u modelu s epoksidnim slojem.



Slika 9. Uobičajeni odnos prijanjanja i proklizavanja s eksponencijalnim razvojem oštećenja [32]

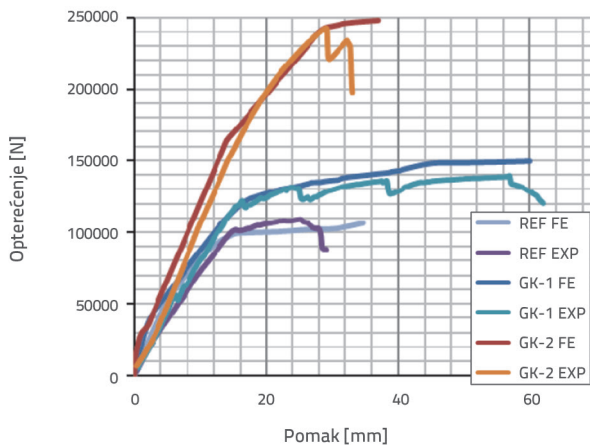
4.2. Rezultati analize modela i rasprava

Slike 10. do 12. prikazuju raspodjelu naprezanja i oštećenja za beton, čelik, tkanine CFRP-a i lamele CFRP-a. Slike 10.c, 11.c, i 12.c prikazuju obris oštećenja u vlačnom području koji odgovara oštećenju zbog premašenja vlačne čvrstoće betona. Slika 10. prikazuje rezultate ispitivanja i rezultate analize konačnih elemenata REF grede. Rezultati ispitivanja REF grede pokazali su poklapanje s rezultatima analize konačnih elemenata. U ispitivanju se greda slomila u obliku dijagonalnih posmičnih pukotina. Jednako tako, parameter oštećenja u vlaknu dosegno je 0,85, a greda se slomila zbog posmičnih naprezanja u analizi konačnih elemenata. Slika 11. prikazuje rezultate ispitivanja i analize konačnih elemenata, vlačna naprezanja te oštećenja



Slika 10. Rezultati analize REF grede: a) rezultat eksperimenta; b) raspodjela naprezanja samo u gredi (MPa); c) oštećenja u vlaku

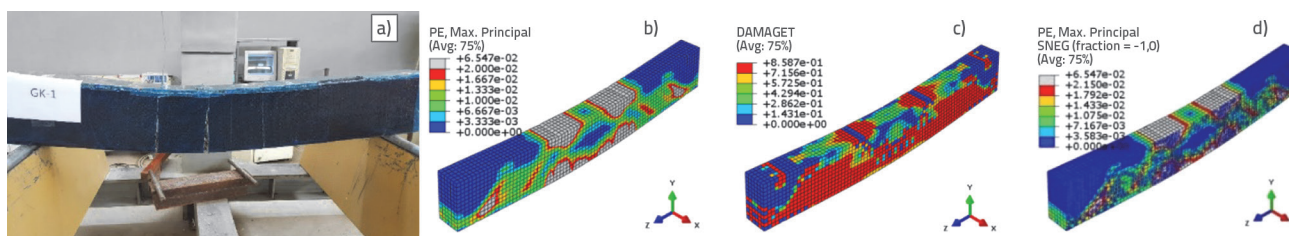
betona i elemenata CFRP-a GK-1. U ispitivanju je došlo do loma grede koja je imala savojne pukotine. U analizi konačnih elemenata oštećenje u vlaku GK-1 iznosilo je 0,85, a pojavile su se i savojne pukotine. Rezultati dobiveni ispitivanjem i rezultati dobiveni analizom konačnih elemenata GK-1 pokazali su dobro međusobno poklapanje. Slika 12. prikazuje rezultate ispitivanja i rezultate analize konačnih elemenata GK-2. Greda je podnijela veliko opterećenje zbog djelovanja lamela i tkanina CFRP-a u ispitivanju, a došlo je do posmičnog oblika sloma. Maksimalna vrijednost oštećenja vlačne armature zabilježena je za GK-2, no došlo je do posmičnog sloma grede u analizi konačnih elemenata kao što to prikazuje slika 12.c. Rezultati dobiveni ispitivanjem i rezultati dobiveni analizom konačnih elemenata GK-2 pokazali su dobro međusobno poklapanje. Slika 13. prikazuje usporedbu krivulja opterećenje-pomak na sredini grede koje su dobivene ispitivanjem i analizama konačnih elemenata tih greda. U ispitivanjima i analizama konačnih elemenata grede su pokazale dobro međusobno poklapanje u smislu odnosa opterećenje-pomak. Tablica 9. sažeto prikazuje vrijednosti opterećenja dobivenih primjenom obiju metoda. Maksimalna opterećenja dobivena analizama konačnih elemenata bila su vrlo slična rezultatima ispitivanja. Vrijednost $P_{max, FE} / P_{max, test}$ REF grede bila je 0,97, dok je ta vrijednost u slučaju GK-1 iznosila 1,07, odnosno 1,02 u slučaju GK-2.



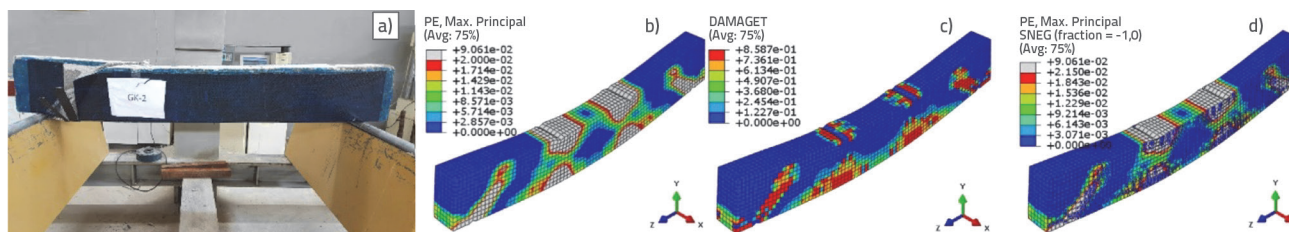
Slika 13. Krivulja opterećenje - pomak dobivena rezultatima ispitivanja i konačnih elemenata

Tablica 9. Usporedba ispitivanja i rezultata analize konačnih elemenata

Greda	$P_{max, FE}$ [kN]	$P_{max, test}$ [kN]	$P_{max, FE} / P_{max, test}$
REF	106	109	0,97
GK-1	149	140	1,07
GK-2	248	242	1,02



Slika 11. Rezultati analize grede GK1: a) rezultat eksperimenta; b) raspodjela naprezanja samo u gredi (MPa); c) oštećenja u vlaku; d) raspodjela naprezanja u gredi ojačanoj tkaninom CFRP-a (MPa)



Slika 12. Rezultati analize grede GK2: a) rezultat eksperimenta; b) raspodjela naprezanja samo u gredi (MPa); c) oštećenja u vlaku; d) raspodjela naprezanja u gredi ojačanoj tkaninom CFRP-a (MPa)

5. Zaključak

U ovom istraživanju ispitalo se ponašanje AB greda s nedovoljnom posmičnom nosivosti i koje su pojačane tkaninama i lamelama CFRP-a. Opterećenje pri slomu greda ovijenih CFRP tkaninama neznatno se povećalo, no njihova duktilnost se značajno poboljšala. U ispitivanju se proučavalo odljepljivanje i delaminacija elemenata CFRP-a kad su podnijeli najveće opterećenje. Sidra CFRP-a u obliku ventilatora pridonijela su povećanju sile pri popuštanju i pomaka pri slomu. Ipak, krajnje se opterećenje smanjilo. Primjena dijagonalnih lamela CFRP-a na bočne plohe grede značajno je poboljšala duktilnost grede, došlo je do promjene načina sloma grede iz posmičnog u savojni. U smislu izrade, ta je metoda jeftinija i jednostavnija nego primjena CFRP tkanine. Zato se može zaključiti da se predložena metoda može jednostavno primijeniti na pojačanje AB greda s nedovoljnom posmičnom nosivosti. Greda ovijena u obliku slova L CFRP tkaninom pokazala je vrlo slično ponašanje kao i greda koja je ovijena tkaninom u obliku slova U. Krajnje opterećenje

grede značajno je poraslo. Zato se može zaključiti da se grede mogu pouzdano pojačati predloženom metodom na mjestu dodira susjednih AB konstrukcija.

Rezultati ispitivanja podudaraju se s rezultatima dobivenim u skladu s američkim [27] i talijanskim [28] smjernicama. Eksperimentalni i analitički načini loma su se podudarali. Projektanti mogu pouzdano koristiti te smjernice za predložene metode. Analize konačnih elemenata provedene su u ovom istraživanju kako bi simulirale i predvidjele odnos opterećenje-pomak pojačanih greda. U analizama konačnih elemenata odredili su se krajnje opterećenje, odnos opterećenje-pomak i oštećenja greda. Rezultati dobiveni analizama konačnih elemenata podudaraju se s rezultatima ispitivanja. U istraživanju su oštećenja uspješno predviđena primjenom nelinearne analize metodom konačnih elemenata. Moguće je zaključiti da se AB grede s nedovoljnom nosivosti na posmik mogu pojačati predloženim metodama. Prepoznavanjem nedostataka elemenata AB konstrukcije, projektanti mogu izabrati najprikladniju metodu pojačavanja.

LITERATURA

- [1] Zhang, D., Ueda, T., Furuuchi, H.: Concrete cover separation failure of overlay strengthened reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 26 (2012), pp. 735-745, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.082>.
- [2] Yang, S. Cao, S., Gu, R.: New technique for strengthening reinforced concrete beams with composite bonding steel plates, *Steel and Composite Structures*, 19 (2015) 3, pp. 735-757, <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.3.735>.
- [3] Lavorato, D., Bergami, A.V., Fiorentino, G., Fiore, A., Santini, S. Nuti, C.: Experimental tests on existing RC beams strengthened in flexure and retrofitted for shear by C-FRP in presence of negative moments, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10 (2018), pp. 211-232, <https://doi.org/10.1007/s40091-018-0193-1>.
- [4] Altin S., Tankut, T., Anil, Ö. Demirel, Y.: Response of reinforced concrete beams with clamps applied externally: an experimental study, *Engineering Structures*, 25 (2003), pp. 1217-1229, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00082-8).
- [5] Demir, A., Ercan, E., Dönmez Demir, D.: Strengthening of reinforced concrete beams using external steel members, *Steel and Composite Structures*, 27 (2018) 4, pp. 453-464, <https://doi.org/10.12989/scs.2018.27.4.453>.
- [6] Abdalla, H.A.: Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composite Structures*, 56 (2002), pp. 63-71, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00188-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00188-X).
- [7] Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A., AbdelAziz, M.I.: Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members, *Journal of Composites for Construction*, 2 (1998) 4, pp. 195- 203, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:4\(195\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(195)).
- [8] Khalifa, A., Nanni, A.: Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites, *Construction and Building Materials*, 16 (2002) 3, pp. 135-146, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00002-8).
- [9] Monti, G., Liotta, M.: Tests and design equations for FRP - strengthening in shear, *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 799-809, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.023>.
- [10] Boussselham, A., Chaallal, O.: Maximum shear strength of RC beams retrofitted in shear with FRP composites, *Journal of Composites for Construction*, 13 (2009) 4, pp. 302-314, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-2688\(2009\)13:4\(302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-2688(2009)13:4(302)).
- [11] Bsisu, K.D. Hussein, H.H., Sargand, S.M.: The Use of Hashin Damage Criteria, CFRP-Concrete Interface and Concrete Damage Plasticity Models in 3D Finite Element Modeling of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42 (2017), pp. 1171-1184, <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2356-3>.
- [12] Gao, R., Cao, Q., Hu, F., Gao, Z., Li, F.: Experimental study on flexural performance of reinforced concrete beams subjected to different plate strengthening, *Composite Structures*, 176 (2017), pp. 565-581, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.052>.
- [13] Lee, D.H., Han, S.J., Kim, K.S., LaFave, J.M.: Shear strength of reinforced concrete beams strengthened in shear using externally-bonded FRP composites, *Composite Structures*, 173 (2017), pp. 177-187, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.025>.
- [14] Chalioris, C.E., Zapris, A.G., Karayannis, C.G.: U-Jacketing Applications of Fiber-Reinforced Polymers in Reinforced Concrete T-Beams against Shear—Tests and Design, *Fibers*, 8 (2020), pp. 13, <https://doi.org/10.3390/fib8020013>.
- [15] Alsayed, S.H., Siddiqui, N.A.: Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP strips, *Construction and Building Materials*, 42 (2013), pp. 238-247, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.024>.
- [16] Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Ashraf, M.: Shear strengthening of reinforced concrete beams using fiber-reinforced polymer sheets with bonded anchorage, *ACI Structural Journal*, 101 (2004) 5, pp. 660-668.

- [17] Jabbar, A.S.A., Alam, A., Mustapha, K.N.: A New Approach of Shear Connectors to Delay Debonding of CFRP Laminates Used for Shear Strengthening of RC Beams, *Materials Science Forum*, 895 (2017), pp. 61-66, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.895.61>.
- [18] Chen, J.F., Teng, J.G.: Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding, *Construction and Building Materials*, 17 (2003), pp.27-41, [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00091-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00091-0).
- [19] Koutas, L., Triantafillou, T.C.: Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP, *Journal of Composites for Construction*, 17 (2012), pp. 101-107, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000316).
- [20] Razaqpur, A.G., Cameron, R., Mostafa, A.A.B.: Strengthening of RC beams with externally bonded and anchored thick CFRP laminate, *Composite Structures*, 233 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111574>.
- [21] Mohamed, K., Abdalla, J.A., Hawileh, R.A., Nawaz, W.: Using bore-epoxy anchorage to delay debonding of CFRP plates strengthened concrete beams. In *Proceedings of the ASET 2018 First Multi Conference on Advances in Science and Engineering Technology-Advanced Materials, Design and Manufacturing International Conference*, Dubai, UAE, 6-7 February 2018; Available online: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8376863> (accessed on 20 August 2018).
- [22] Mohamed, K., Abdalla, J.A., Hawileh, R.A., Nawaz, W.: Experimental and Analytical Investigations of the Use of Groove-Epoxy Anchorage System for Shear Strengthening of RC Beams Using CFRP Laminates, *Materials*, 13 (2020), 4350; doi:10.3390/ma13194350.
- [23] Bocciarelli, M., Gambarelli, S., Nisticò, N., Pisani, M.A., Poggi, C.: Shear failure of RC elements strengthened with steel profiles and CFRP wraps, *Composites Part B: Engineering*, 67 (2014), pp. 9-21, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.06.009>.
- [24] Nisticò, N., Ožbolt, J., Polimanti, G.: Modeling of reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP: Microplane-based approach, *Composites Part B: Engineering*, 90 (2016), pp. 351-364, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.009>.
- [25] Salih, R., Zhou, F., Abbas, N., Mastoi, A.K.: Experimental Investigation of Reinforced Concrete Beam with Openings Strengthened Using FRP Sheets under Cyclic Load, *Materials*, 13 (2020), 3127, doi:10.3390/ma13143127.
- [26] Kaya, M., Yaman, C.: Modelling the reinforced concrete beams strengthened with GFRP against shear crack, *Computers and Concrete*, 21 (2018), pp. 127-37, <https://doi.org/10.12989/CAC.2018.21.2.127>
- [27] ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331, USA, 2017.
- [28] CNR-DT 200 R1/2013: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National Research Council: Roma, Italy, 2014.
- [29] TS708: Steel Bars for Concrete, Ankara, Turkish Standards Institution (in Turkish), 2010.
- [30] Alia, A., Abdalla, J., Hawileh, R., Galala, K.: CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure, *Physics Procedia*, 55 (2014), pp.10 - 16.
- [31] ACI 318-05: Building code requirements for structural concrete, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Mich, 2005.
- [32] ABAQUS 6.12. Simulia Inc., Providence, RI, 2012.
- [33] Aktas, M., Sumer, Y.: Nonlinear finite element analysis of damaged and strengthened reinforced concrete beams, *Journal of Civil Engineering and Management*, 20 (2014) 2, pp. 201-210, <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.801889>.
- [34] Hafezoghlorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M.S.B., Karimzade, K.: Simplified Damage Plasticity Model for Concrete, *Structural Engineering International*, 27 (2017) 1, pp. 68-78, <https://doi.org/10.2749/101686616X1081>.
- [35] Nakaba, K., Kanakubo, K., Furuta, T., Yoshizawa, K.: Bond behavior between fiber reinforced polymer laminates and concrete, *ACI Structural Journal*, 98 (2001), pp. 359-367.
- [36] Shahbazpanahi, S., Abang, A., Aznieta, F., Kamgar, A., Farzadnai, N.: A theoretical method for fracture resistance of shear strengthened RC beams with FRP, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (2014) 5, pp. 3591-3597, <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1024-8>.
- [37] Shahbazpanahi, S., Abang, A., Kamgar, A., Farzadnia, N.: Fracture mechanic modeling of fiber reinforced polymer shear-strengthened reinforced concrete beam, *Composites Part B: Engineering*, 68 (2014), pp. 113-120, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.041>.
- [38] Grassl, P., Lundgren, K., Gylltoft, K.: Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law, *International Journal of Solids and Structures*, 39 (2002) 20, pp. 5205-5223, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00408-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00408-0).
- [39] Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings, Brussels, 2004.
- [40] Majewski, S.: The mechanics of structural concrete in terms of elasto-plasticity, Silesian Polytechnic Publishing House, Gliwice, 2003.
- [41] Wang, T., Hsu, T.T.C.: Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models, *Computers and Structures*, 79 (2001) 32, pp. 2781-2791, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00157-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00157-2).