

**PONAŠANJE AB KONSTRUKCIJA OJAČANIH KOMPOZITNIM ...**

Similarity Index

By: **Natasa Kopitovic**As of: Jun 10, 2020 2:16:34 PM  
61,621 words - 233 matches - 105 sources**11%**

Mode: Similarity Report ▼

**paper text:**

UNIVERZITET CRNE GORE GRAĐEVINSKI FAKULTET Nataša Kopitović Vuković PONAŠANJE AB KONSTRUKCIJA OJAČANIH KOMPOZITNIM MATERIJALIMA POD DUGOTRAJNIM OPTEREĆENJEM doktorska disertacija Podgorica, 2020. godine UNIVERSITY OF MONTENEGRO FACULTY OF CIVIL ENGINEERING Nataša Kopitović Vuković BEHAVIOUR OF RC STRUCTURES STRENGTHENED WITH COMPOSITE MATERIALS UNDER THE LONG-TERM LOAD Doctoral Dissertation Podgorica, 2020 Doktorand: Ime i prezime: Nataša Kopitović Vuković, dipl. inž. građ. Datum i mjesto rođenja: 17. 07. 1975. god, Podgorica, Crna Gora Postdiplomske studije: Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore Postdiplomske magistarske akademske studije, Studijski program Građevinarstvo, Konstruktivni smjer, 2008. god. Mentor:

**Prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ. Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore**

84

Komisija za ocjenu podobnosti doktorske teze i kandidata: prof. dr Radenko Pejović, dipl. inž. građ. Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ. Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl. inž. građ. Redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu Datum odbrane: Zahvalnost Zadovoljstvo mi je da nakon završetka jednog ovako kompleksnog i zahtjevnog zadatka, zahvalim svima koji su doprinijeli da on bude uspješno okončan i da rad na njemu predstavlja drago sjećanje. Prije svega, moja zahvalnost pripada mentoru prof. dr Radomiru Zejaku, redovnom profesoru na Građevinskom fakultetu u Podgorici. Zahvaljujući njegovim sugestijama sam na samom početku svog naučnog istraživanja došla do savremene i aktuelne teme. Ova disertacija je, između ostalog, rezultat njegove nesebične podrške tokom pripreme i izrade disertacije, a posebno u dijelu eksperimentalnog istraživanja. Priprema eksperimenta i rad na toj fazi istraživanja predstavljali su zahtjevan ali najinteresantniji dio posla, koji bi bilo nemoguće obaviti bez podrške ljudi neposredno uključenih u proces rada u laboratoriji, a to su Dimo, Zoran i Dragan. U realizaciji eksperimentalnog istraživanja od velikog značaja bila je finansijska podrška Inženjerske komore Crne Gore, kao i preduzeća „Fidija“ iz Podgorice, na čemu sam im veoma zahvalna. Magistru Svetislavu Popoviću od srca zahvaljujem na stručnoj i nesebičnoj pomoći pri korišćenju programskog paketa ANSYS. Za finalni izgled i tehničku obradu ove disertacije zahvalnost dugujem dragoj kolegini i prijateljici Mariji Jevrić, čije su sugestije i podrška tokom rada bile dragocjene. Posebnu zahvalnost dugujem kolektivu Građevinskog fakulteta u Podgorici, na čelu sa dekanom prof. dr Marinom Rakočević, koji su uvijek našli riječi razumijevanja i prijateljske podrške. Na kraju, najvažnije i najveće hvala mojoj porodici na razumijevanju i bezrezervnoj podršci tokom nastajanja ovog rada. PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI Naziv doktorskih studija: Doktorske studije Univerziteta Crne Gore Građevinski fakultet Studijski program -

Građevinarstvo Naslov doktorske disertacije: Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem Rezime:

**Korozija, zamor i nedostatak pravilnog održavanja su** u većini slučajeva **glavni uzročnici propadanja konstrukcija.**

1

Za njihovu rekonstrukciju primjenjuju se različite tehnologije, u zavisnosti od vrste elementa koji se ojačava, od njegovog naponskog stanja, kao i od upotrijebljenog materijala. Spoljašnje CFRP ojačanje zategnutog pojasa betonske grede pokazalo se kao uspješna alternativa mnogo skupljoj zamjeni ovih elemenata. Visoka čvrstoća na zatezanje i modul elastičnosti čine ovaj materijal atraktivnim i praktičnim za ojačanje postojećih elemenata. Ovaj rad je nastao kao rezultat eksperimentalnog istraživanja, sprovedenog kako bi se utvrdio doprinos kompozitnog materijala povoljnijem ponašanju greda T-presjeka, realnih dimenzija i određene starosti, u eksploatacionim uslovima, pod uticajem dva tipa kratkotrajnog i dva nivoa dugotrajnog opterećenja. Kako je pregledom literature utvrđeno da su takva eksperimentalna ispitivanja veoma rijetka, u tu svrhu je prije više od 10 godina napravljeno deset predmetnih uzoraka. Oni su ojačavani karbonskim trakama različitih dužina na donjoj, zategnutoj ivici rebra, a zatim su ispitivani na dejstvo koncentrisanog kratkotrajnog i ravnomjernog kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja. Utvrđen je uticaj oba tipa opterećenja kao i različitih dužina ojačanja, kako na mehanizam loma ispitivanih uzoraka, tako i na redukciju njihovih graničnih nosivosti, veličine ugiba, širine prslina i sl. Samim tim, ispitivanje uticajnih parametara na ponašanje uzoraka ojačanih FRP materijalom, fokusirano je na: – uticaj položaja i dužine spoljašnjeg ojačanja; – uticaj tipa kratkotrajnog opterećenja za 2 neojačane i 4 ojačane grede; – uticaj nivoa i dužine trajanja dugotrajnog opterećenja za 4 ojačane grede. Ponašanje armirano-betonskih greda, pri dejstvu dugotrajnog konstantnog opterećenja, u uslovima nivoa napona od 55% do 85% čvrstoće na kratkotrajno opterećenje, bio je predmet proučavanja u ovom radu. Sve četiri grede su opterećene ravnomjernim opterećenjem po cijeloj dužini, u trajanju od 6 mjeseci. Ovo opterećenje je iznosilo 55%, odnosno 60% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, za grede ojačane dužom, odnosno kraćom trakom. Nakon analize rezultata na kraju tog perioda, bilo je evidentno da predmetni uzorci ne reaguju značajno na taj nivo opterećenja, što je bilo očekivano, s obzirom da su grede bile stare 10 godina u trenutku ojačavanja i proces tečenja betona se u najvećoj mjeri završio. Što se tiče vremenskih deformacija karbonskih traka, poznato je da su one, u poređenju sa staklenim ili aramidnim, najmanje podložne tečenju. Kako efikasnost spoljašnjeg ojačanja slabi sa porastom nivoa opterećenja, ono je u sljedećoj fazi povećano na 75-85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, u zavisnosti od dužine trake. Ovo opterećenje je održavano konstantnim u trajanju od 4 mjeseca, sve do stabilizacije procesa. Nakon sopstvenog eksperimentalnog istraživanja i obrade i analize rezultata, sprovedena je uporedna analiza sa rezultatima istraživanja drugih autora, u cilju donošenja validnih zaključaka. Odgovor ovako definisanih sistema je analiziran preko osnovnih naponsko-deformacijskih efekata i njihove komparacije sa neojačanim kontrolnim uzorcima. Ovo ispitivanje je pokazalo 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. Opsežnim ispitivanjem na dugotrajna dejstva dokazano je da za armirano-betonske grede određene starosti, ojačane karbonskim trakama minimalne dužine 0.8 l, ne postoji opasnost da u toku vremena, u eksploatacionim uslovima, mogu biti dovedene u granično stanje loma. Rezultati numeričke analize primjenom programskog paketa ANSYS, pokazuju zadovoljavajuću saglasnost sa sopstvenim eksperimentalnim podacima. Na osnovu navedenog, a uzevši u obzir inertnost CFRP

materijala na kombinovani uticaj sredine i mehaničkog dejstva, kao i brojne druge prednosti, treba naglasiti da je moguće uspješno, brzo i jednostavno ojačati proste armirano-betonske grede određene starosti, održavajući zahtijevani nivo nosivosti na savijanje i upotrebljivosti. Dobijeni su korisni rezultati koji, pored ostalog, mogu dobro poslužiti i u savremenoj inženjerskoj praksi, imajući u vidu da su ispitivanja starih uzoraka stvarnih dimenzija veoma rijetka. Ključne riječi: kompozitna T-greda, realni modeli, CFRP traka, ponašanje na savijanje, eksperiment, dugotrajno opterećenje, tečenje betona Naučna oblast: Građevinarstvo Uža naučna oblast: Konstrukcije UDK broj: THE DATA OF DOCTORAL DISSERTATION Name of doctoral studies: Doctoral studies at the University of Montenegro Faculty of Civil Engineering Study program – Civil Engineering Title of doctoral dissertation: Behaviour of RC structures strengthened with composite materials under the long-term load Abstract:

**Corrosion, fatigue and lack of proper maintenance are** generally **the** main **causes** of the 97  
structure **deterioration.**

Various technologies, depending on the type of elements, stresses and materials used, are applied to improve reinforced concrete structures. The external CFRP strengthening of the concrete beams tensioned side

**has proven to be a successful alternative to the much more expensive replacement of these** 4  
**structures. High tensile strength and modulus of** elasticity **make this material attractive and**  
**practical** to strengthen the **existing elements.**

**This work is the result of experimental research conducted** in order **to determine the** 4  
**contribution of composite material to** favorable **behavior of old, full-size reinforced** concrete **T-**  
**beams in** exploited **conditions, under the** influence **of** two types of **short-term**

load and two levels of long-term load. The total of ten beams were specifically designed for this purpose 10 years ago, after literature reviewal finding that data on the experimental testing of strengthened full-size T-samples of certain age were not so common. The tensioned sides of the ribs were strengthened by different lengths of carbon strips. Testing was then performed to determine the effects of a strengthening length, then the effect of concentrated and uniformly distributed short-term load, as well as uniformly distributed long-term load. This was related to the increase of the ultimate

**capacities of** the **tested samples, then to** the reduction of **deflections, strains, crack widths,** 4  
**and also to** the **change** of **their fracture mechanism. Thus,** the **study** of parameters  
influencing **the** behavior **of**

these samples had a focus

**on: - the effect of** position and **length of** the external **strengthening; - the** influence **of** 25  
**the**

short-term load type for 2 unstrengthened and 4 strengthened beams; - the influence of the long-term load level and the duration of load for 4 strengthened beams. Behavior of strengthened reinforced concrete beams, under the effect of long-term constant load, at stress level of 55% to 85% of the short-term capacity, was the subject of study in this dissertation. All four beams were loaded with a uniform load over the entire length, for the period of 6 months. This load was 55% and 60% of the short-term load capacity, for beams strengthened by longer or shorter strips, respectively. After analyzing the results at the end of that period, it was evident that the examined specimens did not react significantly to the considered load level. That was expected, since the beams were

**more than 10 years old at the time of** strengthening hence **the** 104

concrete creep process was mostly completed. Also, the carbon strips are the least susceptible to the creep deformations, compared to glass or aramid ones. As the effectiveness of the external strengthening weakens with the load increase, its level was in the next phase increased to about 75-85% of short-term capacity, depending on the length of the strip. This load was kept constant for 4 months until the process was stabilized. In relation to the considered,

**a detail analysis of the obtained experimental results is done. A comparative analysis with previous** 4  
**research studies was then carried out, in order to verify their conclusions.**

The response of such systems is analyzed through basic stress-strain effects and through their comparison with unstrengthened control samples. The examination has

**shown that this type of strengthening significantly increases the ultimate** beam **capacity, while** 4  
**reducing** the size of **deflections and width of cracks. It also affects the behavior of these elements**  
**under load and**

influences the change in their mechanism of fracture. Extensive long-term testing has shown that reinforced concrete beams loaded with uniform constant load, strengthened with carbon strips of a minimum length of 0.8 l, are not in the risk of fracture over time. The results of numerical analysis using the ANSYS software show satisfactory agreement with obtained experimental data. Based on all of the above stated and considering CFRP material inertness at the

combined influence of the environment and the mechanical action, as well as its many other advantages, it should be emphasized that simply supported

**reinforced concrete beams of a certain age can be** rapidly and **successfully strengthened with CFRP strips, while maintaining the required level of flexural capacity and serviceability.**

4

**The results obtained from this experiment** are viable and **may be of use in modern engineering practices, especially because tests conducted on old, full-size samples are very rare.**

4

Key words:

**composite T-beams, full size, CFRP strip, flexural behavior, experiment, long -term load,**

4

creep of concrete Scientific area: Civil Engineering Narrow scientific area: Constructions UDK number: SADRŽAJ

**1. Uvodna razmatranja..... 1 1.1.**  
**Predmet, cilj i značaj istraživanja..... 2 1.2.**

91

Kratak pregled doktorske disertacije.....	3
2. Opšte o kompozitnim materijalima.....	6
2.1. Uvod.....	6
2.2. Istorijski razvoj.....	6
2.3. Karakteristike FRP kompozitnih materijala.....	8
2.3.1. Karakteristike komponenti FRP materijala.....	8
2.3.1.1. Karakteristike vlakana.....	8
2.3.1.2. Karakteristike matrice.....	9
2.3.2. Karakteristike FRP kompozita za ojačanje.....	9
2.3.3. Prednosti FRP materijala.....	9
2.3.4. Nedostaci FRP materijala.....	10
2.3.5. Proizvodnja FRP materijala.....	12
2.3.6. Primjena FRP materijala.....	13
2.3.7. Zaključna razmatranja o značaju primjene FRP materijala.....	14
2.4. FRP materijali za sanacije konstrukcija.....	15
2.4.1. Uvod.....	17
2.4.2. Pripreme radnje prije početka sanacije.....	17
2.4.3. Tipovi FRP sistema za ojačanje.....	18
2.4.4. Područje primjene FRP materijala za ojačanje.....	19
3. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda opterećenih na	20

savijanje.....	23	3.1. Uvod .....	23	3.2. Teorijske
osnove i istorijat prethodnih istraživanja.....	23	3.2.1. Grede ojačane podužnim FRP		
ojačanjem.....	23	3.2.2. Grede ojačane podužnim i poprečnim FRP		
ojačanjem.....	26	3.2.2.1. Uvod.....	26	3.2.2.2.
Efikasnost primjene FRP poprečnih ukrućenja.....	27	3.3. Tipovi loma kod ojačanih armirano-		
betonskih greda.....	31	3.3.1. Lom koji nastaje bez gubitka veze betona i		
kompozita.....	31	3.3.2. Lom koji nastaje usljed gubitka veze betona i kompozita.....	33	
3.3.2.1. Lom koji nastaje odvajanjem FRP ojačanja od betona .....	33	3.3.2.2. Lom koji nastaje u zoni		
interakcije betona i FRP ojačanja .....	35	3.4. Ispitivanje uticaja parametara na ponašanje ojačanih greda		
.....	36	3.4.1. Debljina FRP ojačanja .....	36	3.4.2. Širina FRP
ojačanja.....	38	3.4.3. Dužina FRP		
ojačanja.....	39	3.4.4. Debljina lijepka za ojačanje		
.....	39	3.4.5. Čvrstoća		
betona.....	40	3.4.6. Modul elastičnosti		
.....	40	3.4.6.1. Uticaj modula elastičnosti betona		
.....	40	3.4.6.2. Uticaj modula elastičnosti FRP materijala .....	40	
3.4.7. Procenat armiranja .....	41	3.4.7.1. Uticaj procenta armiranja		
čelika .....	41	3.4.7.2. Uticaj procenta armiranja FRP materijala		
.....	41	3.4.8. Prisustvo prslina .....	42	3.4.9.
Fleksibilno lijepljenje.....	42	3.4.10. Krutost FRP ojačanja		
.....	43	3.4.11. Vrsta		
opterećenja.....	44	3.5. Dimenzionisanje na savijanje presjeka ojačanih		
FRP materijalom .....	44	3.5.1. Dimenzionisanje prema Pravilniku ACI 440.2R-08 .....	44	3.5.2.
Dimenzionisanje prema Pravilniku CEB-FIP 2001 .....	52	3.5.2.1. Postupak proračuna armirano-		
betonskog elementa ojačanog spoljašnjim FRP ojačanjem .....	52	3.5.2.2. Proračun prema graničnom stanju upotrebljivosti (GSU).....	53	3.5.2.3. Proračun prema graničnom
stanju nosivosti (GSN).....	56	3.6. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda opterećenih na savijanje		
u toku vremena.....	60	3.6.1. Deformacije betona u		
toku vremena .....	60	3.6.1.1. Uvod u reologiju betona		
.....	60	3.6.1.2. Skupljanje i tečenje		
betona.....	61	3.6.1.3. Faktori koji utiču na deformacije betona u toku		
vremena.....	66	3.6.1.4. Deformacije betona u toku vremena prema Pravilniku Evrokod 2 .....	67	3.6.1.5.
Deformacije FRP materijala u toku vremena prema Pravilniku CEB-FIP Bulletin 2007		.....	74	3.6.2. Deformacije armirano-betonskih greda ojačanih
.....	74	3.6.2. Deformacije armirano-betonskih greda ojačanih		
FRP materijalom u toku vremena .....	76	3.6.3. Analiza		
prethodnih eksperimentalnih istraživanja .....	78	3.7. Opšti zaključak o dosadašnjim		
istraživanjima.....	80	4. Sopstveno eksperimentalno istraživanje		
.....	82	4.1. Uvod		
.....	82	4.2. Materijali upotrijebljeni u eksperimentu		
.....	82	4.2.1. Karakteristike upotrijebljene armature.....		

82 4.2.2. Karakteristike upotrijebljene karbonske trake .....	84 4.2.3. Karakteristike komponenti
betonske mješavine .....	84 4.2.3.1. Agregat za spravljanje betona
.....	84 4.2.3.2. Cement za spravljanje betona.....
86 4.2.3.3. Voda za spravljanje betona .....	87 4.2.4. Karakteristike upotrijebljenog
betona .....	87 4.3. Eksperimentalni modeli
.....	88 4.4. Tehnologija izvođenja radova na ojačanju
.....	89 4.5. Tok eksperimenta.....
93 4.6. Program eksperimentalnog istraživanja.....	95 4.6.1. Aparatura za ispitivanje
.....	96 4.6.1.1. Aparatura za ispitivanje kontrolnih uzoraka
.....	96 4.6.1.2. Aparatura za nanošenje kratkotrajnog opterećenja .....
98 4.6.1.3.	Aparatura za nanošenje dugotrajnog opterećenja.....
99 4.6.2. Mjerna tehnika	.....
.....	99 4.6.2.1. Mjerenja na kontrolnim uzorcima
.....	99 4.6.2.2. Mjerenja na gredama .....
101	4.6.2.3. Ostala mjerenja.....
104 4.7. Rezultati ispitivanja	.....
.....	105 4.7.1. Rezultati ispitivanja greda opterećenih kratkotrajnim
opterećenjem.....	105 4.7.2. Rezultati ispitivanja greda opterećenih dugotrajnim opterećenjem .....
106 5. Analiza	rezultata dobijenih dejstvom kratkotrajnog opterećenja.....
108 5.1. Granična nosivost greda	.....
.....	108 5.2. Ugibi u sredini grede
.....	.....
.....	109 5.3. Deformacije u betonu
.....	.....
.....	110 5.3.1. Deformacije u zategnutom betonu
.....	.....
.....	110 5.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu .....
111 5.3.3. Deformacije karbonske trake .....	112 5.4. Prsline u betonu
.....	.....
.....	113 5.5. Mehanizam loma
grede.....	113 5.6. Zaključna razmatranja
.....	.....
.....	116 5.6.1. Granični momenat
savijanja.....	116 5.6.2. Ugibi
.....	.....
.....	116 5.6.3.
Deformacije.....	117 5.6.4. Prsline
.....	.....
.....	117 5.6.5. Mehanizam
loma.....	118 6. Analiza rezultata dobijenih dejstvom dugotrajnog
opterećenja.....	119 6.1. Ponašanje ojačanih AB greda u funkciji graničnog momenta.....
119	6.1.1. Granična nosivost greda.....
119 6.1.2. Ugibi u sredini	grede.....
120 6.1.3. Deformacije u	betonu.....
121 6.1.3.1. Deformacije u zategnutom betonu	.....
.....	121 6.1.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu.....
122	6.1.3.3. Deformacije karbonske trake .....
123 6.1.4. Prsline u	betonu.....
124 6.1.5. Mehanizam loma	grede.....
124 6.1.6. Zaključna	razmatranja.....
127 6.1.6.1. Granični momenat	savijanja.....
127 6.1.6.2.	.....

Ugibi.....	127 6.1.6.3.
Deformacije.....	127 6.1.6.4.
Prsline.....	127 6.1.6.5. Mehanizam
loma.....	128 6.2. Uporedna analiza rezultata dobijenih dejstvom
kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja.....	128 6.2.1.
Granična nosivost greda.....	128 6.2.2. Ugibi
.....	129 6.2.3. Deformacije u zategnutom betonu
.....	129 6.2.4. Deformacije u pritisnutom betonu .....
130 6.2.5. Deformacije karbonske trake .....	131 6.2.6. Prsline u
betonu.....	131 6.3. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda
usljed vremenskih deformacija 132 6.3.1. Uvod.....	132
6.3.2. Rezultati ponašanja ojačanih uzoraka usljed vremenskih deformacija.....	133 6.3.3. Analiza rezultata sopstvenog
eksperimentalnog istraživanja.....	135 6.3.4. Ispitivanje tečenja starih betonskih uzoraka
.....	138 6.3.5. Zaključna razmatranja.....
140 7.	
Numerička analiza ojačanih greda .....	141 7.1. Uvod u numeričku analizu
primjenom programskog paketa ANSYS.....	141 7.1.1. Beton
.....	142 7.1.2. Čelična armatura
.....	148 7.1.3. FRP kompoziti
.....	148 7.2. Geometrija i definisanje mreže konačnih elemenata
.....	150 7.3. Analiza rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS.....
151 7.3.1.	
Analiza slike prslina.....	152 7.3.2. Analiza dijagrama ugiba
.....	153 7.3.3. Analiza dilatacija u karbonskoj traci
.....	155 7.4. Kritička analiza razmatranih parametara.....
155 8. Zaključna razmatranja .....	157 Granični momenat savijanja
.....	158 Ugibi
.....	158 Deformacije
.....	159 Prsline
.....	159 Mehanizam loma
.....	160 Deformacije u toku vremena
.....	160 Literatura
.....	163 Prilog A
.....	172 Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom
kratkotrajnog opterećenja.....	172 Prilog B
.....	181 Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom
dugotrajnog opterećenja .....	181 Prilog C
.....	198 Slika prslina
.....	198 Prilog D
.....	203 Komparativna analiza eksperimentalnih i
rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS	
.....	203 Prilog E



.....	207 Radni dijagram betona
.....	207 Prilog F
.....	210 Dimenzionisanje na savijanje poprečnog presjeka ojačanih greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja .....
210 Prilog G.....	213 Proračun ugiba greda pod dejstvom dugotrajnog opterećenja.....
H.....	213 Prilog
.....	221 Spisak slika
.....	221 Prilog I
.....	224 Spisak tabela
.....	224 Biografija autora
.....	225 1. UVODNA RAZMATRANJA Građevinski objekti se grade uglavnom od tradicionalnih vrsta materijala – drveta, zidarije, čelika i betona, i ta primjena im najčešće obezbjeđuje uobičajeni životni vijek od oko 100 godina. Kao najviše korišćen

**građevinski materijal na svijetu (10-12 milijardi tona godišnje)** izdvaja **se** beton. Gotovo vijek **93**  
i

po,

**koliko se primjenjuje, pokrivaio je oko 70% potreba u građenju i postao infrastrukturna i urbana** **12**  
**osnova** savremenog **života. Današnji ubrzani razvoj u svim područjima života ljudi prati**  
neizbježno **i razvoj u građevinarstvu, koji nameće nove zahtjeve kao što su veća** otpornost, lakša gradnja,  
**veća** ekonomičnost **i** naročito **veća** trajnost **građevinskih konstrukcija.**

Glavni uzročnici propadanja upotrijebljenog materijala u konstrukcijama su uglavnom korozija, zamor i nedostatak pravilnog održavanja. To je uslovilo intezivna istraživanja na području dobijanja novih, boljih građevinskih materijala, koji bi mogli zadovoljiti novonastale zahtjeve. Takođe,

**savremeni vid projektovanja, praćen zahtjevima nove moderne tehnike,** uslovio **je izmjene** **1**

postojećih propisa. Međutim, prihvatanje inovacija u građevinarstvu je veoma spor proces – dešavalo se da prođe 10-25 godina dok neka nova ideja prođe i postane prihvaćena od strane građevinske industrije. To je jedna od prepreka u primjeni novih materijala na tržištu. Njihovu primjenu takođe otežava i značajan nedostatak ulaganja u razvoj novih tehnologija i istraživanja. Za ojačanje elemenata armirano-betonskih konstrukcija primjenjivale su se razne tehnologije, u zavisnosti od vrste elementa, naprezanja i upotrijebljenog materijala. Sasvim neočekivano, inovacija u FRP (Fiber reinforced polymer)

**kompozitnim materijalima osamdesetih godina prošlog vijeka, ostvarila je prilično brz napredak u građevinarstvu.**

1

Posljednjih par decenija ovi materijali su sve više zastupljeni u građevinarstvu, naročito tanki FRP proizvodi za spoljašnje ojačavanje konstrukcija. Prednosti u odnosu na tradicionalne materijale čine ovaj materijal atraktivnim i praktičnim za ojačanje postojećih elemenata [1], [2]. Njegova pojava dovela je do razvoja novih tehnologija građenja, kao i postupaka analize i projektovanja, a samim tim i do promjena u filozofiji projektovanja sanacija. Brojna eksperimentalna i teorijska istraživanja pokazala su da spoljašnja FRP ojačanja zategnute strane betonskih greda značajno povećavaju čvrstoću na savijanje, smanjuju ugibe i redukuju širinu prslina [3], [4], [5]. Takođe utiču na promjenu ponašanja ovih elemenata pod opterećenjem, odnosno mijenjaju im mehanizam loma [6]. U idealnom slučaju, do loma FRP ojačanih armirano-betonskih greda došlo bi simultanim lomom pritisnutog betona i pucanjem FRP trake. U stvarnosti se lom najčešće dešava usljed odvajanja FRP ojačanja od betonske podloge, pa se ne može iskoristiti puni kapacitet nosivosti ovako ojačanog elementa [7], [8], [9]. Utvrđeno je da se to odvajanje uglavnom dešava na krajevima trake, na kontaktu sa betonom, izazvano središnjom ili dijagonalnom prslinom [10]. Zato se može reći da

**uspješnost ove metode ojačavanja zavisi prvenstveno od kvaliteta i ispravnosti veze kompozitni materijal - beton, kao i od**

1

efikasnosti upotrijebljenog lijepka. Karakteristike ove veze određuju ponašanje ojačanih betonskih presjeka [11]. 1.1. Predmet, cilj i značaj istraživanja Obimna eksperimentalna istraživanja sprovedena su tokom posljednje dvije decenije, u cilju utvrđivanja ključnih karakteristika betonskih greda ojačanih FRP materijalom. Pri tom su varirane kombinacije brojnih parametara koji utiču na ponašanje uzoraka, pa je zaključeno da su ovakva ispitivanja veoma zahtjevna. Zato i nije iznenađujuće što je pregledom literature utvrđeno 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 [12], [13]. Imajući u vidu principe modeliranja, ispitivanja na takvim uzorcima nijesu uvijek dovoljno reprezentativna i primjenljiva na elemente realnih dimenzija [14]. Takođe je najveći broj ispitivanja izvršen na gredama pravougaonog poprečnog presjeka, i to uglavnom na novim modelima. Ispitivanja ojačanih uzoraka T - poprečnog presjeka su veoma rijetka [15]. Ista zapažanja su prisutna i kada se radi o ispitivanju ponašanja FRP ojačanih armirano-betonskih elemenata u toku vremena. Osim toga, pregledom literature je utvrđeno da se mali broj radova odnosi na ispitivanja u stvarnim vremenskim okvirima. Naime, većina do sada sprovedenih eksperimentalnih istraživanja u svijetu bila je usmjerena na ispitivanja reoloških svojstava ovih elemenata u laboratorijskim uslovima, koji su, u uslovima povećane temperature i vlažnosti, simulirali postizanje ubrzanog starenja (accelerated tests). Korelaciju između ovih rezultata i onih dobijenih u realnim vremenskim okvirima je moguće sprovesti, ali ne sa zadovoljavajućom pouzdanošću. Stoga je predmet sopstvenog istraživanja, u užem smislu, upravo ponašanje grednih nosača T-presjeka, stvarnih dimenzija, značajne starosti, ojačanih CFRP trakama i ispitanih u realnom vremenu na dejstvo kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja. Centralno mjesto u programu istraživanja zauzima sopstvena eksperimentalna analiza, pri čemu je formulisan precizan plan i program tog istraživanja na osnovu prethodnih iskustava drugih autora, kao i

sopstvenih. Ispitivanje uticajnih parametara na ponašanje uzoraka ojačanih FRP materijalom, fokusirano je na: – uticaj položaja i dužine spoljašnjeg ojačanja; – uticaj tipa kratkotrajnog opterećenja; – uticaj nivoa i dužine trajanja dugotrajnog opterećenja. Dakle, cilj istraživanja je da se, kroz eksperimentalno i teorijsko istraživanje, utvrdi uticaj različitih dužina ojačanja, zatim uticaj dva tipa kratkotrajnog opterećenja, koncentrisanog i ravnomjernog, kao i dva nivoa dugotrajnog ravnomjernog opterećenja. Navedeni uticaji razmatrani su u odnosu na redukciju granične nosivosti, ugiba, deformacija, širine prslina, kao i u odnosu na mehanizam loma. Nakon sopstvenog eksperimentalnog istraživanja i obrade i analize rezultata, sprovedena je uporedna analiza sa rezultatima istraživanja drugih autora, u cilju donošenja validnih zaključaka. 1.2. Kratak pregled doktorske disertacije Doktorska disertacija se sastoji od osam poglavlja. Prvo poglavlje obuhvata uvodna razmatranja, u kojima je predstavljen predmet, cilj i značaj istraživanja ove disertacije, kao i kratak pregled sadržaja u pojedinim poglavljima. U drugom poglavlju je dat hronološki pregled razvoja i primjene kompozitnih materijala. Bliže su definisane karakteristike FRP materijala, sa osvrtom na konstitutivne materijale, proizvodni proces i primjenu u AB konstrukcijama. Posebna pažnja je posvećena materijalima za sanacije konstrukcija, kao užoj oblasti autorovog interesovanja. Treće poglavlje daje kratak prikaz dosadašnjih istraživanja iz predmetne oblasti, u svijetu i kod nas. U posebnim tačkama ovog poglavlja predstavljeni su karakteristični tipovi loma ojačanih armirano-betonskih greda i dat je kritički osvrt u odnosu na pojedine uticajne parametre. Takođe su data i teorijska predviđanja ponašanja na savijanje elemenata ojačanih FRP materijalom, uz algoritme za dimenzionisanje, preporučene od strane odgovarajućih Pravilnika. Posebna pažnja je posvećena ponašanju kompozitnog materijala u toku vremena, i to ponašanju njegovih komponenti, zatim kompozita u cjelini i na kraju greda ojačanih ovim materijalom. U četvrtom poglavlju su prikazana sopstvena eksperimentalna istraživanja, počevši od prikaza kompletnog programa ispitivanja sa svim relevantnim karakteristikama opreme i materijala, upotrijebljenih za izradu eksperimentalnih modela. U okviru zasebnih tačaka date su geometrijske karakteristike modela, karakteristike uređaja za njihovo ispitivanje, mjerne veličine, mjerna tehnika,

**kao i detaljna procedura koja je sprovedena tokom ispitivanja** modela. **U**

14

petom poglavlju je, kroz dijagrame zavisnosti razmatranih veličina u odnosu na granični momenat savijanja, izvršena analiza ponašanja sopstvenih eksperimentalnih modela pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja. Opisani su mehanizmi loma i proces deformacije i destrukcije ispitivanih modela, sa prikazom fenomena koji su se manifestovali u toku ispitivanja.

**Istovremeno je analiziran odgovor sistema u odnosu na pojedine uticajne parametre koji su varirani u ovom eksperimentu.**

73

Napomena: Svi izmjereni podaci dobijeni ispitivanjem modela na dejstvo kratkotrajnog opterećenja dati su u Prilogu A1 na kraju disertacije. Dijagrami analizirani u ovom poglavlju dobijeni su na osnovu tabela iz Priloga A2. U njima su prikazani najvažniji izmjereni podaci u eksperimentu, sa karakterističnim rezultatima ispitivanja za sve modele. Ove maksimalne/mjerodavne vrijednosti pojedinih veličina, date su u odnosu na nivo i karakter opterećenja. U šestom poglavlju zadržan je isti princip analize ponašanja ojačanih modela kao u prethodnom poglavlju, s tim što je razmatran

uticaj dugotrajnog opterećenja. Posebna pažnja se poklanja analizi rezultata dobijenih usljed dejstva većeg nivoa dugotrajnog opterećenja. Napomena: Svi izmjereni podaci dobijeni ispitivanjem modela na dejstvo dugotrajnog opterećenja dati su u Prilogu B1 na kraju disertacije. Dijagrami analizirani u ovom poglavlju dobijeni su na osnovu tabela sa karakterističnim rezultatima ispitivanja iz Priloga B2. Sedmo poglavlje odnosi se na numeričku analizu problema ojačanih armirano-betonskih greda, napregnutih na savijanje pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja, kako bi se izvršila verifikacija dobijenih sopstvenih eksperimentalnih rezultata. Za analizu je korišćena metoda konačnih elemenata uz primjenu savremenog softvera ANSYS. U ovom dijelu disertacije dat je opis i način modeliranja greda u navedenom programskom paketu, uključujući opis materijala i tipove elemenata, faze modeliranja i interakciju između elemenata. Takođe je data uporedna analiza rezultata ispitivanja dobijenih eksperimentalnim i numeričkim putem. Ova analiza je data u pogledu kapaciteta nosivosti, veličine ugiba, dilatacija u karbonskim trakama i slike formiranih prslina. U posljednjem, osmom poglavlju, data su zaključna razmatranja i predlozi za buduća istraživanja. Pri tome se u formulaciji zaključaka autor najviše oslanjao na sopstvene rezultate istraživanja. Naime, bez obzira na aktuelnost teme, veoma je oskudan broj sličnih istraživanja, koja bi mogla poslužiti u svrhu poređenja sa dobijenim rezultatima. Zato se u ovom radu i ne pretenduje na donošenje "izričitih" generalizovanih zaključaka, već se više ukazuje na kvalitativnu prirodu problema. Eventualna primjena ovih zaključaka u inženjerskoj praksi predstavljala bi njihovu svojevrsnu provjeru. Na kraju ove disertacije dat je spisak korišćene literature, spisak slika i tabela i kratka biografija autora. Dati su i prilozi sa rezultatima ispitivanja svih deset eksperimentalnih modela.

## 2. OPŠTE O KOMPOZITNIM MATERIJALIMA 2.1. Uvod

### Termin FRP, odnosno polimeri ojačani vlaknima,

**pokriva ogroman broj** različitih **materijala** čije **osobine ne zavise samo od** komponenti, već **5**  
**veoma** često **i u veoma velikoj mjeri i od**

tehnologije proizvodnje.

**Jedinstvene karakteristike FRP kompozita mogu biti iskorišćene na više načina:** - za formiranje **1**  
**konstrukcija izrađenih samo od FRP kompozita; - u kombinaciji s drugim inženjerskim materijalima za**  
**poboljšanje krutosti, čvrstoće i trajnosti samog kompozita; - za** novu generaciju **FRP građevinskih**  
**elemenata.**

Prije analize postojećih i budućih kompozitnih konstrukcijskih sistema

**u građevinarstvu, važno je poznavati karakteristike materijala koje ga čine atraktivnim u nekim** **1**  
**oblastima gradnje, kao i druge karakteristike koje se moraju poboljšati u cilju postizanja** većeg  
stepena **povjerenja u materijal.**

Od početka ovog vijeka, veliki napor je uložen u kreiranje standarda i procedura za analizu strukturnih kapaciteta FRP materijala i njegovih komponenti. Ove procedure se uglavnom zasnivaju na eksperimentalnim podacima pa samim tim

predstavljaju samo okvirne smjernice. 2.2. Istorijski razvoj FRP kompoziti predstavljaju najnoviju verziju vrlo stare ideje stvaranja boljeg kompozitnog materijala, kombinovanjem dva različita materijala. Naime, čovjek je od davnina bio svjestan osnovnog načela da kompozitni materijal ima bolja svojstva od njegovih komponenti. Drevne civilizacije su na primjeru gline i slame - gline kao matrice, i slame kao vlaknastog ojačanja utvrdili da je dobijeni kompozit jači od same gline (npr. pečene kocke od gline i slame, 3000 g.p.n.e). Uključivanje FRP kompozitne tehnologije u industrijske tokove nije starije od jednog vijeka. U nekim početnim primjenama kompoziti su se koristili kao sekundarne konstrukcije, tj. mali djelovi zgrada, kao što su prozori, vrata, nadstrešnice, fasade i sl., pri čemu se noseća konstrukcija radila od tradicionalnog građevinskog materijala. Prvi poznati FRP proizvod je trup broda proizveden sredinom 30-ih godina, kao dio proizvodnog eksperimenta, korišćenjem tkanine od staklenih vlakana i poliestera [16]. Cijevi od staklenih vlakana su, na primjer, prvi put predstavljene na tržištu 1948. godine, nakon čega su našle najširu primjenu u naftnoj industriji. Razvoj FRP materijala ogleda se u značajno povećanoj upotrebi kompozita nakon Drugog svjetskog rata. Automobilaska industrija je prva uvela kompozite pedesetih godina prošlog vijeka, i od tada se mnogo djelova današnjih vozila izrađuju od kompozita. Primjena FRP kompozitnih materijala je revolucionizovala cijele industrije, uključujući avio, pomorsku, elektro, automobilsku itd. Vazduhoplovna industrija je počela koristiti FRP kompozite kao lagane materijale dobre otpornosti i krutosti, i na taj način se redukovala težina aviona. Najpoznatiji primjer je američki „nevidljivi“

vojni avion - Stealth, koji je u potpunosti izgrađen od ovog materijala.

5

FRP materijal se nije razmatrao kao održivo rješenje i nije bio komercijalno dostupan do kraja sedamdesetih godina. U tom periodu je rad na primjeni kompozitnih materijala predstavljao rezultat individualnih napora istraživača. Prva ozbiljnija eksperimentalna istraživanja na upotrebi kompozita u građevinarstvu započeta su 1978. godine u Njemačkoj. FRP materijal je prvi put upotrijebljen 1982. godine za izgradnju mosta u Kini, dok je 1986. jedan kompletan most u Diseldorfu prethodno napregnut kablovima

od ovog materijala. Karbonski FRP kablovi za prethodno naprezanje su prvi put korišćeni 1991. godine za

5

izgradnju jednog mosta, takođe u Njemačkoj. Prva upotreba karbonskih traka za spoljašnje ojačanje konstrukcija zabilježena je iste godine za ojačanje mosta u Švajcarskoj i od tada su široko zastupljene u sanacijama građevinskih konstrukcija. Samo do 1997. godine, više od 1500 betonskih konstrukcija ojačano je elementima od FRP materijala. 2.3. Karakteristike FRP kompozitnih materijala 2.3.1. Karakteristike komponenti FRP materijala FRP kompozitni materijal se sastoji od osnove, koju čini polimerno-smolasti materijal, koji sadrži duga vlakna drugog materijala, dajući mu tako kombinovane karakteristike osnovnih materijala. 2.3.1.1. Karakteristike vlakana U tabeli 2.1 prikazane su karakteristike vlakana u zavisnosti od primijenjenog tipa. Prečnik vlakana se kreće uglavnom od 0,01 do 0,1 mm. Ona zauzimaju više od 70% ukupne zapremine kompozita. Vlakna mogu biti staklena (GFRP), karbonska (CFRP), aramidna (AFRP) i bazaltna (BFRP), a takođe se koriste i njihove kombinacije. Svojstva vlakana se poboljšavaju raznim premazima, kao i tretmanima fizičke i hemijske prirode, kojima se poboljšava prionljivost sa osnovom - matricom. Tabela 2.1 Karakteristike vlakana [17] Tip vlakana Čvrstoća na zatezanje (MPa) Modul elastičnosti (GPa) Granična dilatacija (%) Karbonska vlakna visoke

čvrstoće - HS 3500-4800 215-235 1.4-2.0 veoma visoke čvrstoće - UHS 3500-6000 215-235 1.5-2.3 visokog modula elastičnosti - HM 2500-3100 350-500 0.5-0.9 veoma visokog modula elastičnosti - UHM 2100-2400 500-700 0.2-0.4 Staklena vlakna E 1900-3000 70 3.0-4.5 S 3500-4800 85-90 4.5-5.5 Aramidna vlakna niskog modula elastičnosti - LM 3500-4100 70-80 4.3-5.0 visokog modula elastičnosti - HM 3500-4000 115-130 2.5-3.5 2.3.1.2. Karakteristike matrice Za povezivanje vlakana koristi se epoksidna smola, rjeđe poliester i vinilester. Njihove karakteristike date su u tabeli 2.2. Vezivni materijali ne poboljšavaju nosivost završnog proizvoda ali utiču na njegov modul elastičnosti, kao i na čvrstoću na pritisak. Oni se po pravilu doziraju u najmanjim mogućim količinama koje pružaju dobru zaštitu od spoljnjih

**uticaja i doprinose ukupnoj** čvrstoći **na smicanje, koja je kod vlakana** inače **veoma**

5

mala. Tabela 2.2 Karakteristike polimerne matrice [18] Tip matrice Čvrstoća na zatezanje (MPa) Modul elastičnosti (GPa) Zapreminska masa (kg/m<sup>3</sup>) Epoksidna smola 55-130 2.8-4.1 1200-1400 Poliester 35-104 2.1-3.5 1200-1400 Vinilester 73-81 3.0-3.5 1150-1350 2.3.2. Karakteristike FRP kompozita za ojačanje Mehaničke i fizičke karakteristike kompozita variraju u zavisnosti od vrste vlakana koja se koriste. Do sada su najširu primjenu našli stakleni (GFRP) kompoziti, kao najjeftiniji, uprkos najmanjoj čvrstoći na zatezanje i najnižem modulu elastičnosti u odnosu na ostale kompozite na tržištu (tabela 2.3). Međutim, kao suprotnost ovom tipu FRP materijala, sve više su zastupljeni karbonski (CFRP) kompoziti. Iako su nekoliko puta skuplji od GFRP materijala, svoju široku primjenu nalaze zahvaljujući najvećoj čvrstoći na zatezanje i najvećem modulu elastičnosti, kao i velikoj otpornosti na spoljašnje uticaje sredine. Karakteristike tipičnih komercijalnih proizvoda u obliku prefabrikovanih CFRP traka date su u tabeli 2.4, gdje su date i karakteristike čelika, radi poređenja. Tabela 2.3 Karakteristike FRP materijala [17] Tip ojačanja Čvrstoća na zatezanje (MPa) Modul elastičnosti (GPa) Granična dilatacija (%) CFRP 600-3500 100-580 0.5-1.7 GFRP 450-1600 35-60 1.2-3.7 AFRP 1000-2500 40-125 1.9-4.4 BFRP 900-2600 35-90 2.0-3.2 Tabela 2.4 Karakteristike CFRP traka za ojačanje i poređenje sa čelikom [19] Tip ojačanja Čvrstoća na zatezanje (MPa) Modul elastičnosti (GPa) Granična dilatacija (%) CFRP trake niskog modula elastičnosti 2800 170 1.6 visokog modula elastičnosti 1300 300 0.5 Čelik 400 200 25 2.3.3. Prednosti FRP materijala FRP materijali su zbog svojih prednosti (mala težina, jednostavnost ugradnje, niska cijena održavanja, otpornost na koroziju, visoki koeficijent

**konstrukcione povoljnosti i** niska cijena **u odnosu na vijek trajanja)** sve više zastupljeni **u** **građevinarstvu.**

1

U cilju poređenja sa čelikom, na slici 2.1 prikazani su radni dijagrami za različite vrste FRP traka i lamela za ojačanje pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja [19]. Jedina vidljiva dobra karakteristika sa slike 2.1, a zbog koje su FRP materijali veoma poželjni za mnoštvo primjena u građevinarstvu, je njihova izuzetno visoka čvrstoća na zatezanje - čak 4 do 8 puta veća nego kod običnih čelika. Slika 2.1 Radni dijagrami FRP materijala za spoljašnje ojačanje Mala specifična težina ovog materijala, iako ne predstavlja njegovu najveću prednost sa stanovišta upotrebe u građevinarstvu, može u određenim situacijama znatno smanjiti težinu samog objekta, a time i efekte statičkih i dinamičkih dejstava. FRP materijali pokazuju potpunu magnetnu i električnu neutralnost, koje su od značaja u agresivnim sredinama. Kompozitni materijali posjeduju otpornost na hemijske uticaje i veliku otpornost na zamor. Ona je kod FRP materijala sa aramidnim i

karbonskim vlaknima čak do 3 puta veća nego kod čelika, dok kod onih sa staklenim vlaknima može biti manja nego kod čelika.

**I na kraju, proces proizvodnje koji se odvija pod ne tako visokim temperaturama, kao i vlaknasta priroda gotovog proizvoda, ostavljaju dosta prostora za ugrađivanje raznih vrsta mjerača i senzora u** 5

sami materijal, što predstavlja značajan

**korak ka tzv. „inteligentnim“ konstrukcijama, koje bi praktično same izvještavale o svom trenutnom stanju** 5

tokom eksploatacije. Analiza potrošnje energije u toku proizvodnje ukazuje na prednost FRP materijala u odnosu na ostale materijale koji koriste najmanje dva puta veću količinu energije [20]. FRP je takođe proglašen favoritom nakon procjene uticaja materijala na životnu sredinu [21]. Korišćenje FRP kompozita omogućuje brzu zamjenu kolovozne konstrukcije, smanjenje stalnog opterećenja i redukciju troškova budućeg održavanja. Prednosti prefabrikacije koja bi se mogla postići korišćenjem FRP kompozita uključuje, na primjer, izradu kompletnog mosta u fabrici, a zatim i brzo i jednostavno postavljanje. Iako početni troškovi za FRP most mogu biti i znatno veći nego kod čelika,

**kada se u obzir uzme životni vijek konstrukcije i dugotrajnost materijala, cijena njegovog korišćenja je uglavnom niža od cijene tradicionalnih materijala.** 1

Smatra se da će FRP opcija i nakon 15 godina, tj. nakon prvog premazivanja čelične konstrukcije i dalje biti ekonomičnija. 2.3.4.

**Nedostaci FRP materijala Pored svih svojih dobrih karakteristika postoje razlozi zbog kojih kompozitni materijali mogu biti upotrebljavani samo uz značajnu dozu opreza.** 5

**Glavni nedostaci FRP kompozita leže u njihovoj relativno krhkoj prirodi u odnosu na tradicionalne građevinske materijale, kao i u nedovoljnom iskustvu nekih od FRP projekatata i izvođača konstrukcije, što je rezultiralo upotrebom visokih sigurnosnih faktora u projektovanju. Visoke cijene ovog materijala su još jedan faktor koji donekle ograničava njegovu veću primjenu.** 1

**Sa slike 2. 1. je evidentno da FRP materijali ne posjeduju**

99

tačku tečenja kao čelik, već se do tačke kidanja ponašaju

**potpuno linearno. To potpuno odsustvo** duktilnosti, odnosno **nepostojanje zone** plastičnosti **je veoma** važna **osobina FRP** materijala **i ona ima** najveće posljedice **po** njegovu manju **upotrebu**

5

u armirano-betonskim konstrukcijama. Sljedeća bitna karakteristika koja se uočava sa dijagrama je niska dilatacija na granici kidanja kod nekih proizvoda. Značajan nedostatak ovog materijala, sa stanovišta projektovanja, predstavlja i problem povezan sa njegovim prijanjanjem za beton, a koji je evidentiran u većem broju eksperimentalnih istraživanja. Protivpožarna otpornost FRP materijala je, pored čvrstoće i modula elastičnosti, značajan podatak za projektovanje, mada je još uvijek nedovoljno ispitana. Vlakna su stabilni materijali čak i na visokim temperaturama. Smole, međutim, imaju ograničenu otpornost na temperaturu, s tim što postoje i otporne smole koje su veoma skupe. Smola ne smije biti podložna zapaljenju, ali pri zagrijavanju iznad kritične temperature gubi mehanička svojstva i integritet i javljaju se različiti mehanizmi oštećenja i degradacije. Najveći broj organskih smola se naglo degradira već na temperaturama 300 – 400oC, pa se njenom izboru mora pokloniti puna pažnja. Sa stanovišta zaštite životne sredine FRP otpad izaziva veliku zabrinutost. Njegovo spaljivanje iziskuje intenzivne troškove, a ujedno izaziva i zagađenje vazduha. Istražuju se mogućnosti reciklaže i prerade ovog otpada, na primjer mljevenje u cilju dobijanja punila za nove materijale, koji bi se koristili za posebne građevinske svrhe. Pored navedenih,

**ovi materijali posjeduju** još **niz drugih** nedostataka, **a neki od njih su:**

5

- znatno niža čvrstoća na smicanje nego kod čelika; - nedovoljna ispitatnost ponašanja u uslovima dinamičkih opterećenja; - relativno visoka cijena; - ultra-violentna zračenja mogu prouzrokovati oštećenja na materijalu; - granična čvrstoća pri dugotrajnim opterećenjima im je nedovoljno ispitana; - nepoznanice vezane za uticaj na životnu sredinu; - nepostojanje standarda za projektovanje. Aktualna istraživanja u svijetu pokušavaju da rasvijetle

**neke od ovih nepoznanica.** Stoga **se, sa** priličnom sigurnošću, **mogu** očekivati **i dalja** poboljšanja svojstava **samog materijala.**

5

2.3.5. Proizvodnja FRP materijala Kao što je prethodno rečeno, suštinu



**FRP materijala** čini **kombinacija vlakana i veziva**. Mehaničke i fizičke **osobine vlakana u ogromnoj mjeri** određuju **karakteristike** gotovog **proizvoda**. 5

Veživa se

**oblikuju temperaturom, pri** čemu **neka od njih mogu biti** čak **i pretapana i njihov oblik naknadno mijenjan**. 5

Osobine kompozitnih materijala

**ne zavise samo od sastojaka,** već **veoma** često **i u velikoj mjeri od** 5

načina proizvodnje. Proces spajanja veziva i vlakana je od suštinske važnosti za kvalitet kompozitnog materijala. Može biti izveden na više načina: • proces provlačenja vlakana kroz „termalno kupatilo“, napunjeno tečnim vezivom; • proces mašinskog ili ručnog

**polaganja vlakana zajedno sa vezivom u slojeve** različitih **debljina koji se mogu naknadno kidati u željene oblike;** • **proces namotavanja vlakana** prethodno **natopljenih vezivom na kalupe** željenih **dimenzija** - najčešće **se koristi pri dobijanju uzengija, pri** čemu one **imaju presjek zavisno od oblika kalema na koji se namotavaju i mogu se kidati u proizvoljnim** 5

širinama. Ova tri procesa proizvodnje omogućavaju proizvodnju FRP materijala u obliku traka i tkanina za ojačavanje postojećih armirano-betonskih elemenata, zatim armaturnih šipki, kablova za prednaprezanje, armaturnih mreža, uzengija i slično. Završni proizvod je

**heterogene prirode (zbog prisustva konstitutivnih materijala sa** različitim **osobinama) i anizotropan**. 5

2.3.6.

**Primjena FRP materijala Hibridni konstruktivni sistem, sastavljen od optimalno kombinovanih FRP kompozita i tradicionalnih materijala kao što su beton i/ili čelik, su trenutno glavna tema interesovanja sa stanovišta upotrebe kompozitnih materijala u izgradnji novih konstrukcija. Navedene kombinacije mogu** 1

**obrazovati razne strukturne** forme, **kao što su: - kolovozna ploča i gornji stroj mosta izrađeni od FRP kompozita; - sanacija** armirano-betonskih **greda**

direktnom montažom FRP šipki na spoljnu površinu elementa ili tankim proizvodima za spoljašnje ojačanje konstrukcija, od kojih se primjenjuju trake, lamele i tkanine u jednom ili dva smjera; -

**sanacija čeličnih greda spoljašnjim ojačanjem** FRP **pločama; - sanacija** armirano-betonskih **stubova korišćenjem FRP kompozita; - armiranje** armirano **-betonskih greda i ploča korišćenjem FRP šipki i**

1

traka.

**Ojačanje betonskih konstrukcija** može **se** uspješno **obaviti spoljašnjim oblaganjem pomoću** kompozitnih materijala. Ova tehnika se pokazala kao uspješna alternativa mnogo skupljoj zamjeni ovih konstrukcija. Njena **efikasna primjena kod** armirano- betonskih **greda se vidi kroz veliki broj sprovedenih eksperimenata**

1

[3], [22], [23].

**Strukturalna analiza i projektovanje ovih sistema u načelu ne predstavlja problem, dok odgovarajućim ispitivanjem, konstrukcijom i izradom, FRP kompoziti mogu produžiti životni vijek i značajno smanjiti troškove održavanja u odnosu na konstrukciju od tradicionalnih materijala.**

1

**Budućnost primjene FRP kompozita, kao i načini** monitoringa **konstrukcija tokom njihovog životnog vijeka,**

1

zavise od inovativnosti ideja koje bi ukazale na mogućnosti upotrebe FRP kompozita tamo gdje tradicionalni materijali nijesu pogodni. 2.3.7. Zaključna razmatranja o značaju primjene FRP materijala FRP materijali su svoju najveću primjenu našli u avionskoj, automobilskoj i elektro industriji, zatim u procesu modeliranja, kao i u građevinskoj industriji. Poznato je da je glavna upotreba kompozitnih materijala u području građevinarstva uglavnom bila u njihovom spoju sa tradicionalnim materijalima. FRP materijali su svoje mjesto našli najviše u području

**prednapregnutih konstrukcija, traka za naknadno, spoljne** ojačavanje **presjeka kao i u** području izrade **gotovih** proizvoda različitih **presjeka.**

5

Istovremeno, oni nude značajan potencijal za veću primjenu u zgradama, uključujući i velike noseće konstrukcije, imajući u vidu da iste moraju biti efikasno projektovane i konstruisane, da bi bile isplative. Osnovne prednosti kompozita leže u smanjenju sopstvene težine nosive konstrukcije, te u izvrsnoj otpornosti na koroziju i truljenje, koji su glavni uzročnici smanjene trajnosti konstrukcija izgrađenih od drveta i čelika. Lakši materijali olakšavaju rukovanje tokom proizvodnje, smanjuju troškove instalacije, kao i troškove prevoza. Manje održavanja i popravki znači smanjenje troškova životnog ciklusa. Kompoziti takođe nude veću slobodu oblikovanja, što omogućava stvaranje složenih oblika.

**Upšteno, prednost FRP kompozita je njegova mogućnost da produži životni vijek postojećih konstrukcija, kao i da razvije nove, mnogo otpornije na uticaje starenja, atmosferilija i degradacije u agresivnim uslovima sredine. Sada je**

1

moguće izgraditi mnogo veće objekte korišćenjem FRP kompozita, uključujući i kompletnu nosivu konstrukciju. Prednosti značajne uštede na težini će sasvim izvjesno biti još izraženije na konstrukcijama velikih raspona, a arhitektonske slobode u upotrebi kompozita omogućiće izvođenje novih atraktivnih oblika, uključujući i nove membranske konstrukcije.

**Na osnovu ranijih zaključaka, jasno je da bi glavni fokus istraživanja u primjeni FRP kompozita trebao biti na području izgradnje novih, racionalnih hibridnih struktura, inovativnih oblika, visokih**

1

performansi. Budući da su FRP strukturni elementi, u većini slučajeva skuplji od onih od konvencionalnog građevinskog materijala, moraju se na tržištu ponuditi za rješenja problema koja njihovi konkurenti ne mogu pružiti. Stoga je potrebno promijeniti metodologiju građenja kako bi se upotrebom FRP materijala osigurala efikasnija rješenja nego što su trenutno dostupna s tradicionalnim materijalima. Takođe je neophodno usvajanje novih

**propisa i standarda, koji uključuju razmatranja o sigurnosti, izvođenju i održivosti, potrebnih za** tranfer tehnologija **iz laboratorije na tržište.**

1

Velika prepreka značajnijem korišćenju kompozita leži u nedostatku svijesti i prihvaćanja od strane građevinske industrije. Naime, usvajanje i racionalna upotreba FRP materijala će biti izazov za tradicionalne arhitekta i inženjere, koji se moraju upoznati sa materijalima i proizvodnim procesima, u cilju projektovanja efikasnih FRP konstrukcija. Ono što takođe zabrinjava jeste činjenica da je najčešći način rukovanja FRP otpadnim materijalima još uvijek u vidu odlaganja, mada se očekuje da će u bliskoj budućnosti, odluke zakonodavstva, kao i povećanje troškova odlaganja, uticati na intenziviranje procesa recikliranja i smanjenje količine otpada. Za sada ne postoji tržište za FRP reciklirani materijal, što otvara prostor naučnicima za nova istraživanja. Pilot projekti su pokazali da je moguće reciklirati FRP materijal, ali pouzdani lanac snabdijevanja mora biti uspostavljen. U ovom poglavlju naglašeno je da će većina klijenata, uprkos

brojnim raspravama o koštanju životnog ciklusa, ipak izabrali materijal koji u proračunu konstrukcije daje najniže početne troškove, tako da je cijeli proračun koštanja životnog ciklusa često nerealan. Međutim, korišćenje FRP materijala je ekonomično u drugim oblastima, kao što su popravka i ojačanje konstrukcija, a povećana upotreba je u ovim slučajevima bazirana isključivo na početnim troškovima. Jasno je da FRP materijali neće zamijeniti konvencionalne materijale gradnje u svim područjima, ali će naći povećanu primjenu u potencijalno velikom tržišnom sektoru.

**U budućnosti će vjerojatno najveća upotreba strukturnih kompozitnih FRP materijala biti u području građevinskih elemenata namijenjenih za projekte iskorišćavanja energije iz vjetra, talasa, vode, geotermalne i solarne energije.**

1

Ovo je sektor sa značajnim potencijalom rasta, u kome se očekuje uzbudljivi razvoj u budućnosti. 2.4. FRP materijali za sanacije konstrukcija 2.4.1. Uvod U Crnoj Gori se prate savremeni trendovi u oblasti sanacija konstrukcija ali nešto manje u oblasti održavanja, dijelom zbog nedostatka sredstava, a dijelom zbog tradicije. Posljedice neadekvatnog održavanja građevinskih objekata su: pojava prslina i deformacija, pogoršanje izgleda objekata, kao i skraćenje njihovog eksploatacionog vijeka. Samim tim su i kasnije popravke sve skuplje, što vremenom dovodi do ekonomskih gubitaka. Neophodno je obezbijediti sigurnost i funkcionalnost objekta, a to se postiže blagovremenim otkrivanjem i otklanjanjem uzroka oštećenja. Najveći broj podataka ovih istraživanja odnosi se na betonske konstrukcije. Razlog za to je što su betonske konstrukcije najbrojnije, pa su i aktivnosti u oblasti održavanja i sanacija betonskih konstrukcija najviše zastupljene. Konstrukciju je potrebno ojačati u sljedećim slučajevima: - ako je došlo do promjene namjene građevine, odnosno zbog povećanog opterećenja; - ukoliko projektovana

**nosivost elementa ili cijele konstrukcije nije postignuta pri građenju zbog podbačaja kvaliteta materijala, prvenstveno betona;**

8

- zbog lošeg izvođenja, grešaka u proračunu ili postavljanju armature u projektovani položaj konstruktivnih elemenata; - usljed neusklađenosti seizmičke otpornosti sa novim propisima. Iz tih

**razloga potrebno je izvršiti detaljna ispitivanja ugrađenih materijala i analizu statičkih uticaja. Na osnovu ovih rezultata donosi se odluka o vrsti, načinu i tipu sanacije konstrukcija. Za ojačanje elemenata**

50

armirano-betonskih konstrukcija primjenjivale su se razne tehnologije, u zavisnosti od vrste elementa, naprezanja i upotrijebljenog materijala. Za povećanje nosivosti elemenata konstrukcije do skoro su se primjenjivale nalijepljene čelične lamele.

**Tehnologija je vrlo brza i jednostavna, uz minimalno povećanje težine i dimenzija. Međutim, primijećeno je da su takve lamele, naročito u agresivnoj sredini,**

8

sklone koroziji. To se nepovoljno odražava

**na prionljivost betona i lamele, odnosno** lijepka, koji **je obično** epoksidna **smola. Najčešće posljedice ove pojave su odvajanje lamele od betona, čime se gubi predviđena svrha ojačavanja. Osim što su teške, čelične lamele se proizvode ograničene dužine pa se ponekad moraju nastavljati, što je još jedan od nedostataka zbog kojih se sve manje primjenjuju. Zbog navedenih teškoća s upotrebom čeličnih lamela, u posljednje vrijeme se sve više koriste FRP tanki proizvodi**

8

za ojačanje. Njihova pojava je dovela do razvoja novih tehnologija građenja, kao i postupaka analize i projektovanja, a samim tim i do promjena u filozofiji projektovanja sanacija. 2.4.2. Pripremne radnje prije početka sanacije Prije sprovođenja sanacionih zahvata na objektu neophodna je realna procjena njegovog stanja. Nju je moguće dati samo ukoliko postoji redovno nadgledanje objekta [1]. Potreba procjene vezuje se za: - veliki procenat oštećenja, - velike deformacije-ugibe, - neadekvatnu primjenu materijala, - promjenu vlasnika/korisnika, odnosno namjene prostora i - rušenje susjednih objekata. Obavljaju se kontrole: - stabilnosti, nosivosti i upotrebljivosti elemenata konstrukcije, - trajnosti i nepropustljivosti na vlagu i - vatrootpornosti. Svojstva materijala upotrijebljenog za sanaciju treba da budu kompatibilna sa svojstvima materijala objekta koji se sanira, i to u pogledu koeficijenta termičke dilatacije, čvrstoće na pritisak i smicanje, modula elastičnosti i dr. Tradicionalna sanacija elemenata betonskih konstrukcija obavlja se: - dodavanjem nove armature, - dodavanjem naknadno napregnutih kablova i - dodavanjem čeličnih ploča u zategnutoj zoni. Pri tom se zahtijeva da površine budu očišćene od prašine, prljavštine, masnoća i boja, pjeskarenjem ili metalnim četkama. Obavezno je i uklanjanje nevezanih ili loše vezanih djelova materijala, sve do zdravog betona. Posljednjih godina se za ojačavanje i betonskih i zidanih konstrukcija primjenjuju trake ili lamele od FRP kompozita. U ovom poglavlju daje se osvrt na ojačanje betonskih konstrukcija, gdje se najčešće primjenjuju karbonska vlakna u formi različitih traka i tkanina, njihovim lijepljenjem za beton specijalnim lijepkom. Mogu se ojačavati presjeci i u donjoj i u gomjoj zoni. 2.4.3. Tipovi FRP sistema za ojačanje U građevinarstvu je zastupljena široka paleta FRP proizvoda [1]. • FRP sistemi za suhu montažu: Prefabrikovana lamelirana FRP folija, mrežica ili ljuska za zakrivljene elemente. • FRP sistemi za mokro polaganje: Tkanina ili folija sa vlaknima, koja se na mjestu ugradnje impregnira polimernom smolom. • FRP sistemi ojačanja ugrađivanjem FRP šipki: Prefabrikovane šipke ugrađuju se u izdubljene žljebove, koji se naknadno zapune malterom ili epoksidnom smolom. • - - - Prednapregnuti FRP sistemi: Trake od aramidnih vlakana i lamele od karbonskih vlakana. FRP tkanine: Ovaj materijal dobija se tkanjem konaca formiranih od vlakana. Mogu biti nosive u jednom ili

**više pravaca, u zavisnosti od načina tkanja, i to: Monoaksijalne trake – tkanine, koje imaju vlakna samo u jednom pravcu; Biaksijalne trake imaju vlakna (tkanje) u dva međusobno upravna pravca; Trake sa dijagonalnim tkanjem, gdje vlakna sa osom trake zaklapaju**

3

ugao 450. • FRP lamele i trake: Vlakna postavljena u jednom uzdužnom smjeru, međusobno slijepljena odgovarajućim epoksidnim sredstvom. GFRP materijali su pogodni za sanacije istorijskih objekata i zidanih elemenata, AFRP za ojačanja od udarnih opterećenja, dok su CFRP materijali najviše primjenjivani za sanacije objekata u građevinarstvu.

**Karbonske trake se proizvode u praktično neograničenim dužinama. Imaju debljine do oko 2 mm i širine do 200 mm.** Kada se primjenjuju **trake,**

3

s obzirom da su nosive samo u jednom pravcu, mogu se postaviti i dodatne trake upravno

**na raspon kako bi se još više povećala nosivost na savijanje.**

8

Slika 2.2 Uzorak trake-lamele prije i nakon ispitivanja na zatezanje 2.4.4. Područje primjene FRP materijala za ojačanje Područje primjene FRP kompozitnih materijala kod ojačanja konstruktivnih elemenata je veoma široko: - Čvrstoća na savijanje konstruktivnih elemenata pojačava se lijepljenjem FRP traka u zategnutoj zoni.

**Tehnologija je vrlo brza i jednostavna, uz minimalno povećanje težine i dimenzija;**

7

- Smičuća čvrstoća povećava se lijepljenjem FRP lamela ili traka i to: na stranice greda, u obliku slova U ili obmotavanjem oko grede; - Otpornost na izvijanje može se poboljšati korištenjem FRP materijala, iako kod samog kompozita dolazi do izvijanja pri relativno malim opterećenjima; - Ojačanjem greda povećava se otpornost na savijanje i smicanje, kao i duktilnost, dok dolazi do smanjenja deformacija i ugiba, čime se ograničavaju i prsline; - Ojačanjem zidova povećava se otpornost na savijanje u ravni i izvan nje, kao i na pritisak i na smicanje; - Ojačanjem stubova povećava se duktilnost, otpornost na savijanje, izvijanje, smicanje, kao i dinamička čvrstoća. Slika 2.3 Ojačanje greda i ploča na savijanje i smicanje [19] 3. PONAŠANJE OJAČANIH ARMIRANO-BETONSKIH GREDA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE 3.1. Uvod Mnogo je eksperimentalnog istraživanja sprovedeno u posljednje dvije decenije, u cilju utvrđivanja brojnih ključnih karakteristika betonskih greda ojačanih FRP materijalom. Pri tom su varirane kombinacije brojnih parametara koji utiču na ponašanje uzoraka, pa je zaključeno da su ovakva ispitivanja veoma zahtjevna. Kao dobra alternativa, pogodna za uštedu vremena i novca, nameću se razni softveri za proračun. Kod elemenata ojačanih spoljašnjim ojačanjem, najviše pažnje posvećeno je vezi između betona i FRP materijala. Ukoliko dođe do popuštanja ove veze, gube se mnoge konstruktivne prednosti upotrebe FRP kompozita. Zato treba imati u vidu da kvalitet ove veze određuje ponašanje ojačanih betonskih presjeka [24]. 3.2. Teorijske osnove i istorijat prethodnih istraživanja 3.2.1. Grede ojačane podužnim FRP ojačanjem Najjednostavnija varijanta povećanja nosivosti greda ogleda se u ojačavanju trakama i lamelama konstantnog presjeka, upotrebom GFRP, CFRP i AFRP materijala nalijepljenih epoksidnom smolom na zategnuti pojas grede. Pri takvom načinu ojačavanja dolazi do značajnog povećanja čvrstoće na savijanje [25]. To povećanje iznosilo je 10 do 160% [26], mada, uzevši u obzir ograničenja data propisima u vezi ojačavanja, duktilnosti i

upotrebljivosti, povećanje čvrstoće do 40% predstavlja razumnu granicu. Dokazano je da upotrebom CFRP ili GFRP materijala za spoljašnje ojačavanje betonskih greda, dolazi do značajnog povećanja momenta nosivosti oštećene grede [27]. Kod ojačanih greda T-presjeka stvarnih dimenzija utvrđeno je povećanje nosivosti od 50% u odnosu na neojačanu gredu [15]. Ojačavanjem greda stvarnih dimenzija pravougaonog poprečnog presjeka povećanje graničnog momenta nosivosti iznosilo je 99% u odnosu na neojačane grede [28]. Slični zaključci su donijeti i u radu [10], u kom je istraživano ojačanje oštećenih armirano-betonskih greda stvarnih dimenzija lamelama od karbonskih vlakana (CFRP). Zaključeno je da ovako ojačane grede dostižu vrijednosti nosivosti i krutosti koje su jednake ili veće nego kod neojačanih greda. Ova granica je pomjerena u radu [29] u kome je, primjenom CFRP ojačanja, utvrđen porast nosivosti ojačanih greda od 170% u odnosu na kontrolnu gredu [15]. U slučaju primjene podužnog ojačanja FRP lamelama

**potrebno je, iz** uslova **nosivosti na savijanje**, sračunati **potrebnu površinu lamele a** zatim **7**  
**provjeriti** najveće **lokalne** smičuće **i normalne napone na krajevima lamele,**

s obzirom da je kontaktna površina FRP-beton izložena tim naponima odnosno mješovitom režimu opterećenja.

**Naime, istraživanja** sprovedena **u nekoliko zemalja pokazala su da zbog ovih napona može** **7**  
doći **do odvajanja krajeva** lamele pa **je dokaz lokalne nosivosti sastavni dio proračuna ojačavanja**  
[30]. Prslina **u**

toj zoni može biti izložena jednom od tri tipa opterećenja: zatezanju, smicanju u ravni i van nje (torziji). Za razmatranje jačine veze FRP-beton, najznačajnija su prva dva tipa opterećenja, odnosno njihova kombinacija [31]. Lom se najčešće dešava usljed odvajanja FRP ojačanja od betonske podloge, ukoliko se ne preduzmu određene mjere. Kritični faktor od koga zavisi odvajanje trake od betona je međuprostorno naprezanje između zategnute čelične armature i kompozitne ploče/trake (zaštitnog sloja betona, ako je traka dovoljno široka). Ako je širina trake mala u odnosu na širinu grede, onda se odvajanje trake može kontrolisati međuprostornim naprezanjima između FRP trake i betona. Sigurnost veze FRP materijala i betona neophodna je za uspješno ojačanje, pa se istraživanjima tog tipa posvećuje naročita pažnja. U daljem tekstu navedeni su najvažniji zaključci tih istraživanja: • Kvalitet obrade površine betona, na koju će se lijepiti FRP proizvod, predstavlja preduslov dobrog prijanjanja. Ono neće biti ugroženo ukoliko se objekat ne nalazi u izuzetno nepovoljnoj sredini ili ukoliko se primjenjuje epoksidna smola visoke otpornosti na hemijska dejstva [32]. • Veza FRP-beton pokazala je izvanredne karakteristike pri kratkotrajnim opterećenjima [31]. Lom ojačanih uzoraka dešavao se uglavnom unutar betona, a ne u samoj vezi. Potvrđen je raniji zaključak da ojačanje CFRP lamelama povećava krutost i graničnu otpornost greda. Maksimalno povećanje nosivosti nakon ojačanja iznosilo je 120% u odnosu na kontrolnu gredu. Duktilnost ojačanih greda se tada smanjila i do 70%. Karakteristike CFRP materijala uslovljavale su nivo redukcije [26]. • U radu [8] izvršeno je 21 ispitivanje na savijanje na prostim gredama, ojačanim tankom FRP pločom, pri čemu je 10 testova izvršeno savijanjem sa dvije koncentrisane sile (4-point load), a 11 testova sa jednom koncentrisanom silom (3-point load). Prvih 10 uzoraka doživjeli su lom usljed odvajanja FRP trake od betona, uz odvajanje zaštitnog sloja betona. Kod preostalih 11 uzoraka uočena su 4 različita tipa loma: - odvajanje zaštitnog sloja betona (u 6 testova); - međuprostorne prsline koje su izazvale razdvajanje (u 2 testa); - lom izazvan kritičnom dijagonalnom pukotinom (u 1

testu) i - lom usljed savijanja neojačanih uzoraka (u 2 testa). Samo je u prvom i trećem slučaju prisutno odvajanje trake. U oba slučaja lom je nastupio nakon pojave velike smičuće pukotine. • U eksperimentalnim ispitivanjima na prostim armirano-betonskim gredama, T- presjeka, ojačanim trakama i tkaninama u zategnutoj zoni [33] ispitivane su sljedeće šeme ojačanja: - 1: greda bez ojačanja (kontrolna greda); - 2: greda ojačana sa donje strane GFRP trakom duž cijelog raspona; - 3: greda ojačana sa donje strane GFRP trakom u središnjem rasponu, na polovini dužine; - 4: greda ojačana GFRP tkaninom duž cijelog raspona, cijelom visinom presjeka, do ploče; - 5: greda ojačana GFRP tkaninom u središnjem rasponu, na polovini dužine, cijelom visinom presjeka, do ploče; - 6: šema ojačanja ista kao i šema 5, ali je greda prije ojačanja ispitana kratkotrajnim opterećenjem do pojave prve prsline; - 7: šema ojačanja je ista kao i šema 4, ali je greda prije ojačanja ispitana kratkotrajnim opterećenjem do pojave prve prsline. Lom usljed otkazivanja materijala (pucanje trake, cijepanje tkanine) nastupio je u slučajevima 2, 4 i 5. U slučaju 3 i 6 došlo je do odvajanja FRP materijala od grede, dok je u slučaju 7 nastupio kombinovani lom (cijepanje i odvajanje tkanine). Najveća nosivost postignuta je ojačavanjem u slučaju 4, dok je najmanje ugibe doživjela greda 5, u poređenju sa ostalim neispucalim gredama. Prethodno ispucale grede 6 i 7 su doživjele manje krajnje ugibe u poređenju sa identičnim neispucalim 5 i 4, respektivno. U pogledu uticaja dužine ojačanja na veličinu ugiba, na osnovu rezultata istraživanja, zaključeno je da ojačanje u središnjem rasponu dopušta manje ugibe, u odnosu na ojačanje na cijeloj dužini raspona. Ovo važi i u slučaju primjene traka i tkanina, a takođe važi i kod ispucalih i neispucalih presjeka. Međutim, samo u slučaju ojačanja tkaninom neispucalog presjeka, došlo je do iskorišćenja nosivosti FRP materijala, dok je u ostalim slučajevima došlo do preranog odvajanja. • U istraživanjima lokalnog loma na gredama ojačanim CFRP lamelama primijećeno je da se

osim odvajanja lamele na krajevima od donjeg pojasa grede, javlja i više slučajeva loma ispitanih greda.

7

Takvi lomovi se dešavaju između CFRP ojačanja i glavne čelične armature. Zaključeno je da su glavni uzročnici ovakvih lomova smičući i normalni naponi koncentrisani na krajevima ojačanja, kao i naponi savijanja koji izazivaju pukotine na spoju epoksidne smole i karbonske lamele. Kao dostupno rješenje ovakvih problema nameću se poprečna ukrućenja podužnih ojačanja [34]. 3.2.2. Grede ojačane podužnim i poprečnim FRP ojačanjem 3.2.2.1. Uvod Mogućnosti brzog nanošenja FRP ojačanja, naročito karbonskih, uz minimalno ometanje u radu konstrukcije i bez vidljivih izmjena u težini ili geometriji ojačanog elementa, čini FRP materijal atraktivnim i praktičnim za ojačanje postojećih elemenata. Međutim, mnogi istraživači smatraju da se ne može iskoristiti puni kapacitet nosivosti ovog sistema ojačanja, ukoliko se FRP trake ne učvrste (ankeruju) dodatnim elementima – konektorima, jer će doći do preranog odvajanja podužne kompozitne trake. FRP trake U-profila sa mehaničkim ankerovanjem su pogodne kada želimo postići povećanje čvrstoće podužne veze traka-beton, kao i smičuće čvrstoće grede. Takođe se sprječava nepoželjno odvajanje podužne trake od betona i time dobija znatno pouzdaniji sistem ojačanja [22], [35]. Od ključnog značaja za ponašanje FRP sistema ojačanja je i ispravna montaža. Potrebno je obezbijediti čistu i glatku betonsku površinu za postavljanje FRP ploče, da bi se eliminisale izbočine u kojima bi moglo doći do koncentracije napona, kao i zbog kontrole širenja prsline, odnosno poboljšanja ukupne efikasnosti sistema. Na slici 3.1. prikazani su neki od načina ojačavanja konstrukcijskih elemenata: a) U-poprečna traka, ankerovana za rebro grede; b) poprečna traka duž cijele visine presjeka, preklapljen na pritisnutoj strani; c) ankerovana U-poprečna traka i dodatni vertikalni anker. Slika 3.1 Načini ojačavanja konstrukcijskih elemenata [35] 3.2.2.2. Efikasnost primjene FRP poprečnih ukrućenja Brojni istraživači su se bavili primjenom kompozitnog



materijala za ojačanje konstrukcija: • Eksperimentalna i teorijska istraživanja ukazala su na značaj položaja ojačanja u ukupnoj čvrstoći, mehanizmu loma i duktilnom ponašanju grede [36]. Zapažena su značajna povećanja nosivosti na savijanje greda u funkciji mjesta ojačanja, u poređenju sa kontrolnom neojačanom gredom. Poprečno ukrućenje služi kao osiguranje od preranog odvajanja trake na donjem pojasu grede. Uticaj tog parametra na mehanizam loma evidentan je s obzirom da su grede sa ojačanjem na donjem pojasu doživjele lom usljed odvajanja trake, dok je u slučaju dodatnog ojačanja na stranama grede nastupio kombinovani lom - odvajanje traka sa strana grede i drobljenje betona. Zaključeno je da konstrukcije ojačane trakama i lamelama, bez dodatnog poprečnog ukrućenja, mogu doživjeti iznenadan krti lom [23]. Kroz obimna istraživanja ispitana je opravdanost ojačavanja greda tankim kompozitnim proizvodima [22]. Korišćen je CFRP materijal u obliku traka i tkanina armiranih vlaknima u jednom i dva smjera. Zaključeno je da su se sve grede ojačane tankim karbonskim proizvodima ponašale nedovoljno fleksibilno, što ukazuje na potrebu za većim faktorom sigurnosti. Njihovom primjenom se uglavnom povećava nosivost greda, a takođe se redukuju ugibi i prsline. Primijećeno je da primjena poprečnih ukrućenja značajno utiče na poboljšano ponašanje ojačanih greda. • U radu [35] predložen je način spoljašnjeg ojačanja betonskih greda pomoću FRP lamele postavljene na zategnutu stranu grede. U cilju sprječavanja odvajanja lamele od betona, predloženo je njeno učvršćivanje FRP trakama U oblika. Na taj način se povećava podužna snaga veze, kao i smičuća čvrstoća grede. • U radu [37] ispitivano je ojačavanje greda opterećenih na savijanje nalijepljenim staklenim (GFRP) lamelama raznih oblika. Kod greda koje su bile ojačane samo podužno došlo je

do odvajanja lamele na krajevima zbog lokalnih normalnih i smičućih napona.

7

Razmatrana su i dva tipa poprečnog ukrućenja - sidrenje zavrtnjem i tzv. I-jacket plate, kod koga se CFRP traka na krajevima završava proširenjem potrebnim za obmotavanje presjeka. U prvom slučaju

nije došlo do odvajanja krajeva lamele, ali je do loma došlo zbog glavnih kosih zatežućih napona.

7

Međutim, u drugom slučaju došlo je do povećanja nosivosti i redukcije širine prsline uz zadovoljavajuću duktilnost i pojavu loma dostizanjem nosivosti na savijanje u zategnutoj zoni grede. Ovakvo poželjno ponašanje greda se objašnjava dobrim sidrenjem primijenjene lamele za ojačanje. • Ispitivana je i primjena CFRP ankerovanog sistema ojačanja na T-gredama i I- nosačima stvarnih dimenzija [38]. Grede ojačane podužnim CFRP neankerovanim trakama su eksperimentalnim ispitivanjima pokazala povećanje smičuće čvrstoće od samo 5%, u odnosu na neojačanu gredu. CFRP poprečna ojačanja korišćena u ovom eksperimentu omogućila su u potpunosti iskorišćenje nosivosti CFRP traka, pa je tako spriječen lom usljed njenog odvajanja. Efikasnost primjene CFRP ankera se ogledao u povećanju predmetne čvrstoće i do 50%. Oni su uspješno aktivirali pun kapacitet CFRP traka sve do njihovog kidanja i time doveli gredu do željenog mehanizma loma. • U radu [36] sprovedena je nelinearna analiza povećanja nosivosti armirano- betonskih greda, metodom konačnih elemenata. Razmatrani su sljedeći slučajevi: - greda bez ojačanja (kontrolna greda); - 1: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom; - 2: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 4 U- trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod uglom od 90o, a njihova visina se smanjuje od oslonca

ka sredini; - 3: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 3 U- trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod uglom od 45o i konstantne su visine; - 4: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 3 U- trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod različitim uglovima (45 o, 60 o i 90o) i konstantne su visine; - 5: greda ojačana sa donje strane karbonskom trakom, a bočno sa po 4 U- trake na obje polovine grede. Bočna ojačanja postavljena su pod uglom od 90o, a njihova visina se smanjuje od sredine ka osloncima. Na slici 3.2. prikazana je zavisnost sila-ugib za sve šeme ojačanja, kao i za kontrolnu gredu. Analizom dobijenih dijagrama jasno je da je nosivost kontrolne grede manja od nosivosti ojačanih greda, ali je deformabilnost znatno veća. Povećanje maksimalnog opterećenja prije loma iznosilo je od 12.5% (model 1) do 35.4% (model 3), u odnosu na kontrolnu gredu. Rezultati ovog istraživanja su pokazali dobro poklapanje sa rezultatima nekih ranijih eksperimentalnih ispitivanja. Dodatne FRP trake U-profila predstavljaju ankere za podužnu FRP traku, a taj sistem ojačanja povećava mogućnost ranijeg otkazivanja betona (modeli 2 i 5), dok u nekim slučajevima do loma po betonu nikada ne dođe, zbog ranijeg odvajanja trake (model 1). Ovo ankerovanje, međutim, nema značajan uticaj na pojavu i širenje prslina. Naponi nastali u poprečnom smjeru su mali u poređenju sa onim nastalim od savijanja grede. To znači da prve prsline nastaju upravo na pravac pružanja grede, gdje poprečna ukrućenja nemaju uticaj. Slika 3.2 Zavisnost veličine ugiba od opterećenja • Rezultati eksperimentalnog istraživanja na armirano-betonskim gredama T-presjeka, ojačanim sa spoljne strane FRP trakama, prikazani su u radu [6]. I ovdje je efikasnost spoljašnjeg ojačanja utvrđena ispitivanjem na gredama sa i bez ankerovanja. Porast nosivosti greda u odnosu na kontrolnu iznosio je 25% za ojačanu neankerisanu gredu, odnosno 50% za ojačanu ankerisanu gredu. • • Na osnovu istraživanja [39], autori zaključuju da ankerovanje smanjuje koncentraciju napona i povećava snagu veze. Nosivost na savijanje ojačanih greda sa i bez ankerovanja podužnog ojačanja razlikuje se i do 35%. U radu [23] zaključeno je da se mehanizmi loma neojačane i ojačane grede značajno razlikuju (vidjeti kratak prikaz istraživanja u tački 3.4.1). Grede sa CFRP ojačanjem se ponašaju elastično, skoro do loma. U početku, dok najveći dio zatezanja prima unutrašnja, čelična armatura, sve grede se ponašaju kao kontrolna. Kada dođe do tečenja čelika, dodatnu silu zatezanja prima FRP sistem ojačanja i dolazi do povećanja nosivosti elementa. Dodatni slojevi CFRP ojačanja značajno utiču na povećanje nosivosti i krutosti grede. Radni dijagrami greda sa i bez poprečnog ukrućenja su veoma slični, s tim što u prvom slučaju postoji značajan porast granične nosivosti, mada ipak uz određeni stepen odvajanja ojačanja neposredno prije loma. Povećanje nosivosti na savijanje kod grede sa poprečnim ukrućenjem iznosilo je 82% u odnosu na kontrolnu gredu, a 23% u odnosu na gredu ojačanu samo podužnim ojačanjem. 3.3. Tipovi loma kod ojačanih armirano-betonskih greda Jačina veze između FRP ojačanja i betona predstavlja ključni faktor u kontroli različitih tipova loma [40]. Brojni testovi sprovedeni na ojačanim armirano-betonskim gredama i pločama ukazuju na odvajanje trake kao na najčešći tip loma. Ono se dešava na spoju sa betonom, na krajevima trake, kao i na mjestu središnje ili dijagonalne pukotine koja uslovljava razdvajanje. Takav tip loma nastupa naglo, na krt način, čime se redukuje čvrstoća i smanjuje duktilnost elementa. Kod greda ojačanih tankim FRP proizvodima postoji nekoliko modela loma, što zavisi od vrste proizvoda (traka, tkanina), vrste opterećenja i od

**mjesta ojačavanja. Kada se ojačava greda zbog nedovoljne nosivosti na savijanje, što je predmet ovoga rada, tanki** proizvodi **se lijepe na** zategnuti **pojas tako da su im vlakna paralelna rasponu grede.**

7

Kod ovako ojačane grede do otkazivanja nosivosti može doći na dva načina - savijanjem grede na mjestu maksimalnog momenta tj. lokalnim lomom, koji se manifestuje odvajanjem krajeva lamele od pojasa ili u obliku smičućeg loma između lamele i zategnute armature grede. 7

Dodatne lamele ili tkanine kojima su vlakna upravna na osovini grede mogu prihvatiti kose napone zatezanja, pa time povećati nosivost na savijanje 8

[30]. U nastavku je dat pregled tipova loma ojačanih elemenata napregutih na savijanje. 3.3.1. Lom koji nastaje bez gubitka veze betona i kompozita Tečenje čelika, praćeno lomom betona: Ovo je slučaj kada je dostignuta nosivost grede na savijanje, uz tečenje čelične armature, praćeno lomom betona u pritisnutoj zoni. FRP traka u ovom slučaju ostaje neiskorišćena. Ova vrsta loma se dešava pri relativno niskim procentima armiranja i neojačane i ojačane grede. Lom betona, prije tečenja čelika: Kada imamo veoma visoke procenete armiranja, doći će do loma pritisnutog betona prije otkazivanja armature i prije loma FRP ojačanja. Ovaj tip loma je krt i nepoželjan. Tečenje čelika, praćeno lomom FRP ojačanja: U slučaju niskog procenta armiranja i unutrašnje i spoljašnje armature, lom na savijanje se može javiti usljed tečenja čelika, praćeno lomom FRP ojačanja, a sve to prije loma betona. Da bi se ovakav lom dogodio FRP ojačanje mora biti dobro usidreno. Smičući lom: Ovaj tip loma je karakterističan za betonske grede koje nijesu propisno armirane za osiguranje od smicanja. U slučaju kada je moment nosivosti grede povećan spoljašnjim FRP ojačanjem, moguće je da greda prije dostigne nosivost na smicanje nego na savijanje. Tečenje čelika u presjecima bez FRP ojačanja: Za grede ojačane veoma kratkim trakama, tečenje čelika može dospjeti do mjesta na gredi gdje nema FRP ojačanja, a gdje se pojavila prslina u betonu, pri čemu dolazi do formiranja plastičnog zgloba na krajevima ojačanja. Pri tome se ne gubi veza između betona i FRP ojačanja. Slika 3.3 Mehanizam loma grede bez gubitka veze betona i FRP ojačanja [40]: (a) lom pritisnutog betona; (b) lom FRP trake; (c) lom usljed smicanja 3.3.2. Lom koji nastaje usljed gubitka veze betona i kompozita Lomovi ovog tipa su najčešće zastupljeni, a opet nijesu u potpunosti shvaćeni, uglavnom zbog visokih troškova ponovljenih esperimentalnih istraživanja. Zbog toga raste broj analitičkih istraživanja. Ovaj tip loma je karakterističan za grede ojačane kratkim trakama, i po svojoj prirodi je veoma krt. 3.3.2.1. Lom koji nastaje odvajanjem FRP ojačanja od betona Ovaj tip loma prikazan je na slici 3.4: (a) odvajanje u središnjem rasponu; (b) odvajanje izazvano kritičnom dijagonalnom prslinom; (c) lom izazvan kritičnom dijagonalnom prslinom uz odvajanje zaštitnog sloja betona; (d) lom usljed odvajanja zaštitnog sloja betona; (e) odvajanje zaštitnog sloja betona usljed čistog savijanja; (f) odvajanje na krajevima ojačanja Slika 3.4 Mehanizam loma grede usljed odvajanja FRP ojačanja [8] Pravilnici se zasnivaju na sljedećim tipovima loma: Odvajanje u središnjem rasponu: Ovaj tip loma uzrokovan je prenošenjem napona smicanja sa FRP ojačanja na beton. Počinje od prsline nastale usljed savijanja u zoni najvećih uticaja. Smatra se u određenoj mjeri duktilnim lomom, jer se greda dovodi do tog nivoa koji omogućava tečenje čelične armature, uz prisustvo velikih deformacija. Odvajanje na krajevima ojačanja: Ovaj tip loma takođe je uzrokovan prenošenjem napona smicanja sa FRP ojačanja na beton. Počinje na krajevima FRP ojačanja, i pri tom se sloj betona odvaja zajedno sa FRP trakom. Količina betona koja se odvaja se kreće od nekoliko milimetara do cijelog zaštitnog sloja. U cilju sprječavanja loma usljed odvajanja, razvijene su različite metode, kao što su U- sidrenja, L-ploče i sidrenja zavrtnjevima. Međutim, ovim metodama se samo osigurava veza na krajevima elementa. Prsline nastale usljed savijanja ili smicanja mogu izazvati

odvajanje FRP ojačanja unutar središnjeg raspona elementa. 3.3.2.2. Lom koji nastaje u zoni interakcije betona i FRP ojačanja Ovaj tip loma nastaje odvajanjem dva elementa ili lomom unutar nekog od slojeva ostvarene veze (slika 3.5): Slika 3.5 Mehanizam loma u zoni interakcije betona i FRP ojačanja 1: Lom u betonu duž oslabljenog dijela ili na kontaktu sa čeličnom armaturom; 2: Lom usljed razdvajanja na spoju beton-lijepak; 3: Lom unutar sloja lijepka; 4: Lom usljed razdvajanja na spoju FRP-lijepak; 5: Lom usljed odvajanja FRP ojačanja. Ovakvi tipovi loma sprečavaju iskorišćenje punog potencijala FRP materijala. Lomovi tipa 1 i 4 su najzastupljeniji, dok se ostali tipovi javljaju rjeđe, što naročito važi u slučajevima kada je izbor materijala i njihova primjena u skladu sa određenim standardima i procedurama. Kada je betonska greda sa spoljašnjim FRP ojačanjem izložena savijanju, tada betonski sloj na kontaktnoj površini s lijepkom biva izložen velikim naponima zatezanja i smicanja. Zbog njih se i dešava odvajanje FRP materijala od betona. Najslabiji dio veze predstavlja sloj betona koji joj je najbliži. Zone visoke koncentracije napona obuhvataju i krajeve FRP ojačanja, kao i mjesta oko prslina nastalih usljed savijanja i smicanja. To su ujedno i mjesta gdje počinje odvajanje FRP materijala. Iz navedenog se može zaključiti da do razdvajanja u FRP ojačanim elementima može doći u samom materijalu, kao i na kontaktnim površinama upotrijebljenih materijala, po putanji koja iziskuje najmanju količinu energije. Usljed naglog gubitka veze dolazi do lomova konstrukcija katastrofalnih razmjera. Obezbeđivanjem dobrog prijanjanja kompozitnog materijala za betonsku površinu sprečava se preuranjeni i nagli gubitak nosivosti ojačanih elemenata. 3.4. Ispitivanje uticaja parametara na ponašanje ojačanih greda Kroz obimna eksperimentalna i teorijska istraživanja sprovedena širom svijeta, ispitan je uticaj brojnih parametara na mehanizam/tip loma, i izvedeni su značajni zaključci u pogledu njihovog doprinosa nosivosti ojačanog elementa. 3.4.1. Debljina FRP ojačanja U radu [41] autori su istraživali spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda lamelama od karbonskih vlakana (CFRP). Došli su do zaključka da lamele pozitivno utiču na prsline u betonu, što doprinosi povećanju nosivosti i trajnosti konstrukcije, a to su ujedno i osnovni ciljevi kod ojačavanja. Takođe zaključuju da dodavanje lamela, odnosno povećanje debljine ojačanja, smanjuje duktilnost grede. Ta redukcija duktilnosti dešava se kod svih nivoa opterećenja i veća je ukoliko je lamela deblja. Uticaj debljine ojačanja na porast graničnog opterećenja pri lomu ( $P_{max}$ ) vidi se na slici 3.6. U istraživanju prikazanom u radu [31] modelirano je šest različitih debljina FRP ojačanja:

**3 mm, 2.5 mm, 2.0 mm** (kontrolni uzorak), **1.5 mm, 1.0 mm** i **0.5 mm.**

72

Slika 3.6 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba grede od debljine ojačanja po Holmeru [31] Što je tanje ojačanje, kompozitna greda postaje fleksibilnija. Nakon dostizanja graničnog opterećenja, FRP počinje da se odvajati od betonske podloge. Kod modela sa debljinom ojačanja od 0.5 mm odvajanje je nastalo pri sili od 299 N. Međutim kod ovog modela do pojave prve prsline dolazi tek pri ugibu od skoro 7 mm. Nasuprot njemu, kod modela sa debljim ojačanjem značajno se povećava nosivost. Međutim, na slici 3.6 uočava se odvajanje cijele trake pri ugibu od 5.3 mm (za traku debljine 3 mm), odnosno pri ugibu od 6.54 mm (za traku debljine 2.5 mm). Ove podatke treba imati u vidu pri odabiru debljine ojačanja. Uticaj debljine lamele na ponašanje ojačanih greda ispitan je i u radu [23]. Ispitivanje je izvršeno na pet prostih greda dimenzija 15x20cm i raspona 1.90 m, ojačanih lamelama različitih debljina. Prva greda je neojačana, kontrolna (CB), a tri su ojačane lamelama od 1, 2 i 3 sloja (FB-1L, FB-2L i FB-3L). Posljednja greda je ojačana sa jednoslojnom lamelom, koja je na krajevima ukrućena U-trakama (FB-1LU). Povećanje graničnog opterećenja iznosilo je 54%, 73% i 85% za grede FB-1L, FB-2L i FB-3L, respektivno, u odnosu na gredu CB. Povećanje nosivosti na savijanje kod grede FB-1LU iznosilo je 82% u odnosu na gredu CB, a 23% u odnosu na gredu FB-1L bez poprečnog ukrućenja. Dobijeni

rezultati potvrđuju značajan uticaj koji debljina lamele i njena poprečna ukrućenja imaju na ponašanje ojačanih greda (slika 3.7). Slika 3.7 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba grede od debljine ojačanja po Sobuzu [23] Autori rada [37] došli su do zaključka da će se kod slabo armiranih presjeka ojačanih tankim FRP trakama javiti lom usljed njihovog kidanja. Povećanjem debljine traka za ojačanje, mehanizam loma se manifestuje kroz naglo odvajanje cijele trake ili njenih krajeva. Do sličnih zaključaka došli su i u radu [42]. Autori su ukazali na neophodan oprez prilikom povećanja debljine ojačanja, jer se lom pomjera ka krajevima grede, uz povećanje normalnih i smičućih napona.

### 3.4.2. Širina FRP ojačanja

U radu [40] prikazan je uticaj širine FRP ojačanja na tip loma grede. Šira traka omogućava bolje iskorišćenje njene čvrstoće, redukuje napon na kontaktu beton-FRP, i time obezbjeđuje veću nosivost grede na savijanje. Duktilnost grede je veća kod primjene širih traka, i može biti veća nego kod neojačanih. Dakle, sa porastom širine ojačanja raste i duktilnost, sve dok mehanizam loma ne pređe u lom usljed središnjeg odvajanja, i to bez daljeg porasta duktilnosti. Šira traka će, u slučaju nepromjenljive krutosti elementa, uvijek obezbijediti veću nosivost [43].

### 3.4.3. Dužina FRP ojačanja

Položaj veze FRP-beton utiče na deformaciju odvajanja. Ukoliko je veza ostvarena isključivo u zoni savijanja, doći će do pojave velikih deformacija, pa će do odvajanja doći kasnije, nego u slučaju da je ta veza ostvarena u zoni savijanja i smicanja, gdje bi bila izložena aksijalnom naponu zatezanja i naponu smicanja [11]. Zaključuje da je dužina ojačanja parametar koji igra značajnu ulogu kod mehanizma loma ojačanih greda. Rezultati istraživanja rada [43] ukazali su na to da povećanje dužine CFRP ojačanja, bilo da se radi o ojačanju na smicanje ili savijanje, povećava kapacitet nosivosti grede. U slučaju kada se ojačavanje vrši kratkim trakama, maksimalne vrijednosti napona su na krajevima trake, dok duže trake dopuštaju tečenje čelične armature i na taj način izazivaju veće napone pod dejstvom koncentrisanog opterećenja.

### 3.4.4. Debljina lijepka za ojačanje

U radu [31] izvršeno je 5 testova, sa debljinama lijepka od 0.5, 1, 1.2 (kontrolni uzorak), 2 i 3 mm. S obzirom da je lijepak dio ojačanja, njegov uticaj na graničnu nosivost pri odvajanju je sličan uticaju od FRP materijala, mada ne u tolikoj mjeri. Granična nosivost pri odvajanju,  $P_{max}$ , raste sa povećanjem debljine lijepka. Nasuprot tome, što je debljina lijepka manja, to je kompozitna greda duktilnija. Testirani modeli su ostvarili nosivost od 414 N (debljina lijepka 0.5 mm) do 640 N (debljina lijepka 3 mm), i time dokazali da veća debljina lijepka kod FRP ojačanja obezbjeđuje veću nosivost ojačane grede. Ovi rezultati se podudaraju sa istraživanjima drugih naučnika [44]. Debljina lijepka, međutim, nema značajan uticaj na veličinu ugiba. To znači da se, bez obzira na razlike u nosivostima ovih modela, širenje prslina odvija pri približno istim veličinama ugiba. Kod modela sa lijepkom debljine 2 i 3 mm pri određenom ugibu dolazi do potpunog odvajanja FRP trake. Stoga, bez obzira na želju za povećanjem nosivosti, treba biti oprezan pri nanošenju sloja lijepka velike debljine, jer se time dobijaju krući sistemi, kod kojih se širenje prslina odvija znatno bržim tempom.

### 3.4.5. Čvrstoća betona

Porast čvrstoće betona odlaže odvajanje CFRP traka i povećava deformaciju na mjestu veze. Ona ima značajan uticaj na granično opterećenje ojačanih elemenata [11]. U radu [31] izvršena je parametarska analiza, u kojoj je ispitivano 6 modela sa različitim čvrstoćama betona, od 6.9 do 41.4 MPa. Pri promjenama čvrstoće od 13.8 do 21.4 MPa, došlo je do porasta nosivosti od 15.7%. Međutim za veći raspon čvrstoće od 21.4 do 41.4 MPa, taj porast je iznosio samo 11.7%. Kao što je i ranije zaključeno, krući materijali će formirati jaču vezu i tako se bolje oduprijeti početnom odvajanju. Većim čvrstoćama betona odgovara manji ugib na mjestu potpunog odvajanja.

### 3.4.6. Modul elastičnosti

#### 3.4.6.1. Uticaj modula elastičnosti betona

Uticaj ovog parametra je isti kao i prethodnog, s obzirom da su čvrstoća betona i njegov modul elastičnosti u direktnoj zavisnosti.

#### 3.4.6.2. Uticaj modula elastičnosti FRP materijala

Postoji mnogo različitih vrsta FRP materijala sa različitim modulom elastičnosti. Normalne karbonske trake imaju modul elastičnosti između 155 i 170 GPa, a staklene oko 41 GPa. Upoređujući trake sa visokim modulom elastičnosti (oko 300 GPa) sa kontrolnim uzorcima (139 GPa), registruje se povećanje nosivosti od samo 12.8% iako je krutost udvostručena. Dolazi i do smanjenja ugiba prije pojave širenja prslina i to u iznosu od 30% [31].

Sljedeća uporedna analiza razmatrala je staklenu traku (41 GPa) i karbonsku traku (300 GPa), gdje je došlo do povećanja krutosti za više od 700%. U ovom slučaju nosivost je porasla za 33%, a zabilježena je redukcija ugiba od 54%. Ovako mali doprinos modula elastičnosti FRP materijala povećanju nosivosti sistema potvrdio je rezultate nekih ranijih istraživanja [45]. Autori ovog rada došli su do zaključka da sa porastom krutosti FRP materijala za ojačanje, dolazi do neznatnog povećanja nosivosti veze, uz smanjenje duktilnosti sistema.

### 3.4.7. Procenat armiranja

#### 3.4.7.1. Uticaj procenta armiranja čelika

Utvrđen je izuzetan uticaj podužne čelične armature na karakter veze FRP-beton, kao i na vrstu loma. Njeno prisustvo mijenja mehanizam loma od trapeznog (za nearmirane uzorke), do skoro horizontalnog duž čelične armature ili malo ispod nje, za armirane uzorke [11]. Parametarska analiza, izvršena u radu [26], ukazala je na to da povećanje mehaničkog procenta armiranja čelikom sa 0.013% na 0.032% smanjuje doprinos ojačanja sa 98% na 26%, u odnosu na kontrolnu gredu. U radu [46] ispitivan je doprinos spoljašnjeg ojačanja nosivosti elementa, a u funkciji procenta armiranja. U slučaju niskog procenta armiranja čelikom (1%) to povećanje je iznosilo od 26 do 50%, dok je u slučaju visokog procenta armiranja (1.5%) to povećanje iznosilo od 17 do 33%.

#### 3.4.7.2. Uticaj procenta armiranja FRP materijala

Utvrđeno je da na povećanje nosivosti utiču: površinska zastupljenost kompozita, procenat armiranja, kao i veza postignuta između FRP ojačanja i betona. Porast procenta armiranja kompozitom rezultira smanjenjem deformacije veze CFRP-beton [11]. Ispitivan je odnos između površine poprečnog presjeka kompozita i površine armature radi utvrđivanja uticaja tog parametra na povećanje nosivosti i na mehanizam loma [6]. Jako armirani presjeci doživljavaju manje ugibe, ali je doprinos graničnoj nosivosti od FRP ojačanja manji. U ovom slučaju lom nastaje usljed drobljenja pritisnutog betona, koje je praćeno pojavom smičućih prslina između čelične armature i FRP ojačanja. Gubitak nosivosti kod slabo armiranih greda će se desiti kao rezultat odvajanja FRP ojačanja.

### 3.4.8. Prisustvo prslina

Prisustvo prslina ima značajan uticaj na čvrstoću veze između betona i FRP materijala. Ta čvrstoća opada i za 25% ukoliko su na mjestu ojačanja registrovane prsline. Čvrstoća betona na zatezanje utiče na brzinu pucanja i širenje prslina, što uzrokuje početak razdvajanja na mjestu ojačanja. Odnos  $s/le$  je dobar indikator uticaja prslina u elementu, gdje  $s$  predstavlja rastojanje između prslina, a  $le$  efektivnu dužinu veze [7]. Ako je  $s/le < 2$ , prisustvo većeg broja prslina pojačava razdvajanje i to 50-60% u odnosu na slučaj sa jednom prslinom. Ovo se dešava kod elemenata čija je visina poprečnog presjeka manja od 50 cm. Ako je  $s/le > 4$ , prisustvo većeg broja prslina ne utiče na vrijednost granične deformacije, zato što je rastojanje između prslina suviše veliko, pa se ponašanje elementa može predvidjeti modelirajući samo jednu prslinu. Ovaj slučaj je prisutan kod elemenata visine veće od 1-1.5 m, opterećenih na savijanje (mostovski nosači).

### 3.4.9. Fleksibilno lijepljenje

Kod veze FRP-beton, koja je ostvarena sistemom fleksibilnog lijepljenja, potrebna je znatno veća dužina sidrenja da bi se u potpunosti ostvarila nosivost veze. Uz dovoljno dugo ankerovanje, ovaj sistem vezivanja postiže bolju nosivost na izvlačenje (čupanje). Ojačanje ostvareno normalnim ili fleksibilnim lijepljenjem pokazuje značajne razlike u ponašanju ostvarene veze. Sistem fleksibilnog lijepljenja ima nižu krutost veze, ali može da ublaži lokalnu koncentraciju napona i podnese veliko međupovršinsko proklizavanje. Na taj način se može značajno poboljšati granična nosivost ojačanih greda u odnosu na normalno lijepljenje, te na još efikasniji način iskoristiti visoka vrijednost čvrstoće FRP materijala, koja je inače jedna od njegovih bitnih prednosti. Mehanizam loma kod ovako ojačanih greda se mijenja od odvajanja FRP trake do odlamanja zaštitnog sloja betona. Ovaj tip loma je uglavnom izazvan tečenjem čelične armature, a rjeđe koncentracijom napona na kontaktnim površinama FRP-beton. Znači da sistem ojačanja fleksibilnim lijepkom izaziva duktilan lom. Takođe, ovaj sistem ima jednaku, pa čak i bolju otpornost na zamor od sistema sa normalnim lijepkom. Međutim, sve prednosti ovog sistema mogu biti poništene upotrebom velike količine FRP materijala, kao i kod kraćih raspona opterećenih na smicanje. Zaključujemo da je primjena ojačanja upotrebom fleksibilnog lijepka naročito poželjna kod vitkih armirano- betonskih elemenata velikih raspona. Ovako spregnut sistem

na efikasan način postiže visoke čvrstoće FRP materijala i opstaje kao cjelina sve do loma, koji je duktilan. U radu [45] ostvaren je porast granične nosivosti od 29% (sistem sa jednom trakom) i 36% (sistem sa dvije trake) za uzorke sa fleksibilnim lijepljenjem, u odnosu na obične lijevke. Maksimalne deformacije u CFRP trakama su porasle skoro duplo ukoliko se umjesto jedne trake koriste dvije. Međutim, porast nosivosti je zanemarljiv kada postavimo tri trake (8%), čak je dobijena granična nosivost u ovom slučaju manja nego u sistemu sa dvije trake. Mehanizam loma T-greda ojačanih sa CFRP trakama, pri čemu je veza ostvarena fleksibilnim lijepljenjem, manifestovao se kroz drobljenje pritisnutog betona, nakon tečenja armature [45]. Nije došlo do odvajanja CFRP ojačanja, iako je njegova maksimalna deformacija dostigla 80% od granične deformacije za CFRP. Grede su održale svoj integritet, sve do drobljenja betona, nakon čega je, iz sigurnosnih razloga, ispitivanje prekinuto. Korišćenje sistema fleksibilnog lijepljenja rezultiralo je povećanjem granične nosivosti u iznosu od 14.6%. 3.4.10. Krutost FRP ojačanja Aksijalna krutost sistema FRP-lijepak ima značajnu ulogu u savijanju ojačanih betonskih greda. Što je sistem fleksibilniji to je veća strukturna čvrstoća sistema. Eksperimentalno je potvrđeno da su kruta ojačanja (trake, lamele) više sklona lomu usljed odvajanja, nego fleksibilna [7]. Međuprostorna krutost ima veliku ulogu u prenosu napona, nivou pada opterećenja nakon početka odvajanja, kao i na cjelokupnu duktilnost pri lomu. Međutim, povećanje krutosti CFRP ojačanja dovodi do povećanja granične nosivosti ojačanog elementa samo do određenog nivoa, nakon čega ona opada [43]. Visoka krutost FRP ojačanja donje strane grede je i glavni razlog nastanka smičućeg loma (duž vlakana). Ova visoka krutost povećava smicanje između betona i FRP trake. Analizom ponašanja greda ojačanih FRP materijalom niske krutosti uočeno je da odvajanje FRP ojačanja i drobljenje betona nastaju skoro istovremeno [36]. 3.4.11. Vrsta opterećenja Ojačane armirano-betonske grede se bolje ponašaju pod ravnomjernim opterećenjem nego pod koncentrisanim, jer ono ne izaziva diskontinuitet u sili ploče duž raspona. Taj diskontinuitet je odgovoran za odvajanje FRP trake u središnjem rasponu, a pri koncentrisanom opterećenju [40]. Međutim, u slučaju kraćih traka za ojačanje, mehanizam loma je sličan u oba slučaja opterećenja – odvajanje trake na krajevima. Kada se za ojačanja armirano-betonskih greda koriste duže trake, njihov lom se dešava zbog iskorišćenja nosivosti trake i njenog pucanja. 3.5. Dimenzionisanje na savijanje presjeka ojačanih FRP materijalom 3.5.1. Dimenzionisanje prema Pravilniku ACI 440.2R-08 Ovaj metod uzima u obzir krutost FRP materijala, karakteristike vezujućeg materijala, čvrstoću betona i ispucalost elementa, pa tako daje dobru procjenu čvrstoće elementa pri lomu usljed savijanja, eksperimentalno potvrđenu. Da bi koncept bio na strani sigurnosti potrebno je izvršiti proračun za svaki karakterističan slučaj, uzimajući u obzir tip sistema za ojačanje (FRP + vezivo + betonska površina), kao i najkritičniju kombinaciju opterećenja. Pri određivanju dimenzija FRP trake/lamele, potrebno je poznavati dimenzije grede koju treba ojačati, količinu zategnute i pritisnute armature, kao i kvalitet upotrijebljenog materijala. Takođe treba poznavati raspoložive dimenzije i mehaničke karakteristike trake i lijepka (epoksidna smola), kao i ostale podatke od proizvođača. Debljina sloja lijepka se u ovome dijelu proračuna zanemaruje. Proračun je sproveden za pravougoni poprečni presjek, ali se može proširiti i na grede T ili I-presjeka. Pretpostavke: - Deformacije u čeliku i betonu su direktno proporcionalne rastojanju od neutralne ose. To znači da ravni presjeci ostaju ravni i nakon opterećenja (Bernoullijeva hipoteza). - Ne postoji klizanje između FRP ojačanja i betona. - Smičuća deformacija u sloju lijepka je zanemarljiva zbog male debljine lijepka. - Maksimalna deformacija u pritisnutom betonu iznosi 3‰. - Čvrstoća betona na zatezanje je zanemarljiva. - Radni dijagram FRP materijala je linearan do loma. Važno je naglasiti da mnoge od ovih pretpostavki ne odražavaju stvarno ponašanje materijala, mada su neke usvojene zbog pojednostavljenja proračuna. Tako će se, na primjer, javiti smičuća deformacija u sloju lijepka, koja će izazvati navedeno klizanje. Međutim, pojednostavljenja kod navedenih pretpostavki u ovom slučaju neće značajno uticati na tačnost proračuna. Slika 3.8 Dijagram raspodjele deformacija i napona u pravougaonom presjeku u graničnom stanju nosivosti na savijanje [47] Postupak proračuna Proračun kojim se

dolazi do graničnog stanja nosivosti (GSN) treba da zadovolji kompatibilnost deformacija i ravnotežu sila i da se odnosi na dominantni mehanizam loma. Predstavljena je iterativna procedura poznata pod nazivom proba-greška: - Pretpostavi se rastojanje od pritisnute ivice do neutralne ose  $c$ ; - Sračuna se deformacija u svim materijalima, koristeći svojstvo kompatibilnosti; - Sračunaju se odgovarajući naponi u upotrijebljenim materijalima; - Izvrši se provjera da li je zadovoljena ravnoteža sila; - Ako rezultante unutrašnjih sila nijesu u ravnotežnom stanju, treba promijeniti položaj neutralne ose, pa postupak ponoviti. Karakteristike materijala, date od strane proizvođača, uglavnom ne uzimaju u obzir dugotrajnu izloženost uticajima spoljašnje sredine. Ti uticaji mogu znatno redukovati graničnu čvrstoću na zatezanje, pa su uvedeni u izraze kroz redukcionni faktor usljed dejstva spoljašnjih uticaja - CE (tabela 3.1). Tabela 3.1 Vrijednosti redukcionog faktora CE za različite vrste materijala [47]

Uslovi izloženosti	Tip ojačanja	Redukcionni faktor usljed dejstva spoljašnjih uticaja, CE
Unutrašnja upotreba	karbonski stakleni aramidni	0.95
	0.75	0.85
Spoljašnja upotreba (mostovi, pristaništa, otvorene garaže)	karbonski stakleni aramidni	0.85
	0.65	0.75
Agresivna sredina (hemijska postrojenja i sistemi otpadnih voda)	karbonski stakleni aramidni	0.85
	0.50	0.70

Pri proračunu ojačanog armirano-betonskog presjeka na savijanje, treba se pridržavati sljedećeg algoritma: 1. Određivanje karakteristika upotrijebljenog FRP materijala Granična čvrstoća na zatezanje dobija se iz sljedećeg izraza:  $f_i = C_i \cdot E_i \cdot \epsilon_i$  \* Analogno bi trebalo redukovati i deformaciju pri lomu: S obzirom da se FRP materijal ponaša elastično do loma, možemo odrediti iz Hukovog zakona. On ne podliježe uticaju okolne sredine, kao što se vidi iz sljedećeg izraza:  $E_i \cdot \epsilon_i = f_i / \epsilon_i$  2. Određivanje površine potrebnog FRP ojačanja Površina potrebnog FRP ojačanja izračunava se po formuli: gdje je:  $A_i = n_i \cdot t_i \cdot w_i$  - broj FRP slojeva;  $t_f$  - debljina FRP sloja;  $w_f$  - širina FRP sloja 3. Utvrđivanje stvarnog stanja deformacija Proračun se vrši uz pretpostavku da je greda napukla, i da jedino stalno opterećenje djeluje u vrijeme ojačavanja.  $M_{DL} \cdot (d_f - k \cdot d) \cdot \epsilon_{bi} = I_{cr} \cdot E_c$  gdje su:  $M_{DL}$  - moment od stalnog opterećenja;  $d_f$  - efektivno rastojanje FRP ojačanja;  $I_{cr}$  - moment inercije betonskog presjeka sa prsline;  $E_c$  - modul elastičnosti betona;  $k$  - odnos položaja neutralne ose i položaja armature, mjereno od najopterećenijeg pritisnutog vlakna;  $d$  - rastojanje od najopterećenijeg pritisnutog vlakna do težišta zategnute armature. 4. Utvrđivanje deformacije FRP sistema Pravilnik ACI 440.2R-08 je usvojio model za odvajanje FRP ojačanja, koji je sličan modelu predloženom u radu [48]. Model ograničava efektivnu deformaciju u FRP lameli, u cilju izbjegavanja prsline na mjestu veze, koje bi dovele do loma usljed odvajanja lamele. Granična vrijednost efektivne deformacije u FRP lameli data je izrazom: ' gdje je:  $\epsilon_{fe} = 0.41 \cdot \epsilon_{fu} \cdot E_i \cdot t_i \leq 0.9 \cdot \epsilon_{fd}$   $\epsilon_{fd}$  - deformacija pri odvajanju FRP ojačanja;  $\epsilon_{fu}$  - deformacija pri lomu FRP ojačanja;  $f_c$  - propisana pritisna čvrstoća betona;  $E_f$  - modul elastičnosti FRP ojačanja. 5. Procjena položaja neutralne ose  $c$  Usvaja se realna vrijednost za  $c$ :  $c = 0,2 \cdot d$  Konačna vrjednost se usvaja nakon provjere ravnoteže unutrašnjih sila. 6. Određivanje efektivnog nivoa deformacija u FRP ojačanju

$$\epsilon_{fe} = 0.003 \cdot \left( \frac{d_f - c}{d} \right) \cdot \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd}$$

92

Ukoliko je ova nejednakost zadovoljena, doći će do loma po betonu. U suprotnom bi došlo do loma po FRP traci. 7. Određivanje deformacija u čeličnoj armaturi  $\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{d_f - c}{d} \right)$  8. Određivanje nivoa napona u čeliku  $i$  u FRP ojačanju  $f_i = E_i \cdot \epsilon_i \leq f_{yi}$   $f_i = E_i \cdot \epsilon_i$  9. Određivanje rezultante unutrašnjih sila i provjera ravnoteže sila: Ravnoteža sila se potvrđuje provjerom pretpostavljene veličine  $c$ :  $A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe} = \alpha_1 \cdot f_c \cdot \beta_1 \cdot b$  Koeficijenti  $\alpha_1$  i  $\beta_1$  se računaju na osnovu paraboličnog dijela radnog dijagrama betona:  $\alpha_1 = 3 \cdot \epsilon_c / \epsilon_{cu}$ ,  $\beta_1 = 64 \cdot \epsilon_c / \epsilon_{cu} - 2 \cdot \epsilon_c / \epsilon_{cu}$  gdje je  $\epsilon_c$ , deformacija koja odgovara naponu  $f_c$ ,  $\epsilon_{cu} = 1.7 \cdot f_c / E_c$  10.



Korekcija veličine c kroz iteracije, dok ravnoteža sila ne bude zadovoljena Koraci 6-9 se ponavljaju nekoliko puta sa različitim vrijednostima c, dok ravnoteža sila ne bude zadovoljena. 11. Određivanje čvrstoće na savijanje komponenti sistema za ojačanje Doprinos čelika čvrstoći na savijanje:  $M_{nS} = A_s \cdot f_s \cdot \left( \frac{d - \beta_1 \cdot c}{2} \right)^2$  Doprinos FRP ojačanja čvrstoći na savijanje:  $M_{nf} = A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( \frac{d_f - \beta_1 \cdot c}{2} \right)^2$  12. Određivanje čvrstoće na savijanje ojačanog presjeka Projektna čvrstoća na savijanje, koja predstavlja nominalnu čvrstoću elementa pomnoženu sa koeficijentom redukcije čvrstoće, treba biti veća od potrebnog momenta, pomnoženog sa koeficijentima sigurnosti [49]: gdje je:  $\phi_i$ ?  $M_i$ ?  $n_i$ ?  $\geq M_i$ ?  $u_i$ ? |

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{za } \epsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + 0.25 \cdot (\epsilon_t - \epsilon_{sy}) & \text{za } 0.005 - \epsilon_{sy} \leq \epsilon_t < 0.005 \end{cases} \quad 56$$

0.65 za  $\epsilon_t \leq \epsilon_{sy}$  Koeficijent redukcije ima vrijednost 0.9 kod duktilnih presjeka i 0.65 kod krutih presjeka, gdje ne dolazi do tečenja čelične armature. Između ova dva ekstrema postoji linearni prelaz. Vrijednost nominalne čvrstoće na savijanje elementa sa spoljnjim FRP ojačanjem:

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left( \frac{d - \beta_1 \cdot c}{2} \right)^2 + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( \frac{h}{2} \right)^2 \quad 88$$

Imajući u vidu tačku 11, dobijamo traženu čvrstoću na savijanje ojačanog presjeka:  $\phi \cdot M_n = \phi \cdot (M_{nS} + \psi_f \cdot M_{nf})$  Preporučena vrijednost dodatnog redukcionog faktora za FRP iznosi  $\psi_f = 0.85$ . 13. Provjera nivoa napona u čeliku Sračunati napone u čeliku i provjeriti da li su u granicama dozvoljenih: |

$$M_S + \epsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left( \frac{d_f - k \cdot d}{3} \right) \quad 21$$

$$f_{s,S} = \dots$$

$$3 \cdot \left( \frac{d - k \cdot d}{3} \right) \cdot E_S \cdot A_S \cdot \left( \frac{d - k \cdot d}{3} \right) + A_f \cdot E_f \cdot \left( \frac{d_f - k \cdot d}{3} \right) \quad 21$$

$$f_{s,S} \leq 0.8 \cdot f_y \quad 14. \text{ Provjera nivoa napona u FRP ojačanju } \left( E_f \right) \left( \frac{d_f - k \cdot d}{3} \right)$$

$$f_{f,S} = f_{s,S} \cdot \left( \frac{E_S}{E_f} \right) \cdot \left( \frac{d - k \cdot d}{d_f - k \cdot d} \right) - \epsilon_{bi} \cdot E_f \quad 21$$

Na osnovu ovog izraza dobija se nivo napona u FRP ojačanju, pod određenim opterećenjem, a u okviru elastičnog ponašanja elementa. Pretpostaviti da je totalno korisno opterećenje nepromjenljivo. Zatim ovaj napon uporediti sa dopuštenim naponom usljed tečenja i cikličnog opterećenja (tabela 3.2). Tabela 3.2 Vrijednosti dopuštenih napona za

različite tipove ojačanja [47] Vrsta opterećenja GFRP Tip ojačanja AFRP CFRP Dugotrajno + ciklično 0.20 f f ,u 0.30 f f ,u 0.55 f f ,u 15. Proračun potrebnih U-profila za ojačanje podužnih lamela Ovaj proračun je dat u radu [3], a predstavlja pojednostavljenje proračuna iz aktuelnog Pravilnika [47]. Na osnovu svega do sada navedenog, jasno je da FRP trake U-profila mogu značajno redukovati potrebnu dužinu lamele na zategnutoj strani presjeka. Početna dužina podužne FRP lamele definisana je formulom:  $l_{dp} = f_{pu} \cdot t_p \cdot b_p \cdot k \cdot f_c' \cdot b_w$  gdje je:  $f_{pu}$  - čvrstoća na zatezanje lamele,  $t_p$  - debljina lamele,  $b_p$  - širina lamele,  $k$  - faktor čvrstoće veze,  $f_c'$  - pritiska čvrstoća betona i  $b_w$  - širina rebra grede. Usvaja se  $k = 0.17$ , pa veličina  $0.17 \cdot f_c'$  predstavlja prosječni napon u vezi. Pretpostavlja se da određivanje dužine lamele prati isti zakon kao i određivanje dužine čelične armature. To znači da dužina lamele treba biti  $l_{dp} + l'$  od mjesta gdje je potrebna njena puna snaga, odnosno  $l'$  od mjesta u kom nije potrebno osiguranje od savijanja.  $l' = \max \left\{ \begin{array}{l} l \\ 16 \cdot h \end{array} \right.$  gdje je:  $h$  ukupna visina grede, a  $l$  raspon grede. Ukoliko je  $l_{dp} / l_p < 1$ , poprečna ukrućenja nijesu potrebna; ukoliko je  $l_{dp} / l_p > 1$ , poprečna ukrućenja su potrebna na dužini  $l_p$ , gdje je  $l_p$  dužina lamele. 3.5.2. Dimenzionisanje prema Pravilniku CEB-FIP 2001

**Dimenzionisanje se zasniva na konceptu sigurnosti u odnosu na granična stanja. Dimenzionisanje prema graničnim stanjima**

3

(GS) podrazumijeva: - Provjeru graničnog stanja upotrebljivosti (GSU); - Provjeru graničnog stanja nosivosti (GSN); - Utvrđivanje iznenadnih (slučajnih) situacija - udar, požar, vandalizam i zemljotres. 3.5.2.1. Postupak proračuna armirano-betonskog elementa ojačanog spoljašnjim FRP ojačanjem - - Za element prije ojačanja odrediti računске momente (za GSN i GSU); Iz momenta upotrebljivosti  $M_o$  prije ojačanja odrediti početnu deformaciju  $\epsilon_o$  krajnjeg zategnutog betonskog vlakna; - Pretpostaviti da je ostvareno potpuno dejstvo ojačanja, pa iz računskog momenta nakon ojačanja sračunati traženi poprečni presjek kompozita, koji će zadovoljiti GSN. Dokazati da je postignuta potrebna duktilnost; - Sračunati ugibe u GSU. Ukoliko su maksimalni ugibi prekoračeni, odrediti odgovarajuću površinu FRP ojačanja koja će zadovoljiti propisane vrijednosti; - Sračunati napone u betonu, čeliku i FRP materijalu, za GSU. Ukoliko su dozvoljeni naponi prekoračeni, odrediti odgovarajući FRP poprečni presjek koji će zadovoljiti propisane vrijednosti; - Dokazati da je veza ostvarena ojačanjem dovoljna za kontrolu širine prslina u GSU. Ukoliko je neophodno, povećati širinu FRP ojačanja, ili, ukoliko je već usvojena maksimalna vrijednost, onda povećati debljinu FRP ojačanja; - Sračunati zaostalu smičuću silu koja izaziva smičiću pukotinu, a time i otkazivanje veze FRP-beton, prema GSN. Ukoliko je ovaj mehanizam loma dominantan, sračunati nove dimenzije FRP ojačanja; - Provjeriti da li dolazi do loma usljed odvajanja ojačanja, bilo da je u pitanju odvajanje na krajevima ili duž same trake. Ukoliko dođe do tog tipa loma, sprovesti postupak ankerovanja; - - - Provjeriti adheziju FRP ojačanja i betona na kraju ankerovanja; Utvrditi moguće iznenadne situacije; Provjeriti otpornost na smicanje ojačanog elementa. Obezbijediti ojačanje protiv smicanja, ukoliko je potrebno. 3.5.2.2. Proračun prema graničnom stanju upotrebljivosti (GSU)

**Proračun se sprovodi linearno-elastičnom analizom. Za stanje eksploatacije (nakon izvršene sanacije) zahtijeva se ograničenje napona u betonu, čeliku i karbonskim trakama:  $\sigma_c \leq 0.45 f_{ck}$  za kvazi stalno opterećenje;  $\sigma_c \leq 0.6 f_{ck}$  za rijetke kombinacije opterećenja;  $\sigma_s \leq 0.8$**

3

$f_y$ ?k za rijetke kombinacije opterećenja;  $\sigma_f \leq \eta \cdot f_{fk}$  za kvazi stalno

**opterećenje ( $\eta=0.8$  za CFRP,  $\eta=0.5$  za AFRP,  $\eta=0.3$  za GFRP). Stanje**

3

prije ojačavanja Proračun početne deformacije u presjeku neposredno prije ojačanja zasniva se na teoriji elastičnosti. Ako na kritični betonski presjek u trenutku njegovog ojačavanja djeluje korisni moment  $M_0$  bez koeficijenta sigurnosti, moguće je sračunati odgovarajuće deformacije u presjeku. Slika 3.9 Presjek prije ojačanja - raspodjela dilatacija  $S$  obzirom da je  $\sigma_c$  gdje je momentat pri pojavi prve prsline, proračun se zasniva na proračunu  $M_0 \geq M_{pr}$  eka sa prsline  $M_0 \geq M_{pr}$ . Položaj neutralne linije presjeka sa prsline ( $x_0$ ):  $1.2 \cdot b x_0^2 +$

$$(\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_0 - d)^2 = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_0)$$

18

)  $M_0 \geq M_{pr}$  gdje je  $\alpha_s = E_s / E_c$  Dilatacija pritisnute ivice betona je:  $M_0 \cdot x_0 \varepsilon_c = E_c \cdot I_c$  Za pa je momentat inercije preseka sa prsline:  $M_0 \geq M_{pr} \Rightarrow b x_0^3 (1 + \alpha_s (1 - 0.21)) \cdot$

$$A_{s2} \cdot (x_0 - d)^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_0)$$

18

) 2.3 Na osnovu principa kompatibilnosti deformacija, deformacija u najzategnutijem vlaknu u betonu jednaka je početnoj aksijalnoj deformaciji na mjestu predviđenom za ojačanje:  $\varepsilon_s = \varepsilon_c \cdot x_0$  Ukoliko je  $\varepsilon_s < \varepsilon_{c0}$ , tada njegov uticaj na proračun ojačanog elementa može biti zanemaren.  $M_0 < M_{pr}$  Stanje nakon ojačavanja Slika 3.10 Presjek sa prsline - dilatacije i unutrašnje sile Položaj neutralne linije (težišna linija aktivnog preseka):  $1 \cdot b x_e^2 +$

$$(\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d)^2 = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_e) + \alpha_f \cdot A_f \cdot h$$

87

-  $\left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right) \right) \cdot x_e$  gdje

**je:  $\alpha_f = E_c \cdot \varepsilon_c$  Napon u betonu na pritisnutoj ivici preseka:**

3

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c = M_k \cdot 1 \cdot b x_e \cdot \left( \frac{h - x_e}{I_c} \right) +$$

$$(\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d)^2 \cdot (h - d) - \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_e) \left( \frac{2}{3} \right)$$

18

3)  $\left( \frac{h - d}{1.05d - x_e} \right) \cdot x_e$  Sa uprošćenjima i, slijedi:  $\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c = M_k \cdot h / d \approx 1; 1$  odnosno:  $\varepsilon_c \approx M_0 / (E_c \cdot I_c) \cdot b \cdot x_e \cdot$   
 $\left( \frac{h - d}{1.05d - x_e} \right) \cdot \varepsilon_c \approx M_k / (E_c \cdot I_c) \cdot b \cdot x_e$

$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_c \cdot \frac{d - x}{e}$

3

$\leq 0.8 \cdot f_{yk}$ ,  $x_e$  i napon u FRP ojačanju:  $\sigma_f = E_f \cdot \left( \epsilon_c \cdot h - x_e \left( \frac{-\epsilon_0}{\eta} \leq \eta \cdot f_{fk} \right) \right)$  Proračun ugiba u GSU, korišćenjem pojednostavljene CEB bilinearne metode, daje zadovoljavajuću tačnost. Srednji ugib se računa iz izraza:  $\zeta$  gdje  $\zeta = \frac{a_i}{d}$  i  $a_i = \frac{M_i}{k_i \cdot I_i}$  bez prsline i sa prslinom, respektivno, a koeficijent  $\zeta$  preraspodi?  $d$  je  $\zeta = 0$ , za  $\zeta > 0$ , za  $\zeta < 0$ , gdje je:  $\beta_1 = 1 - \beta_2 \cdot \frac{M_i}{M_{i0}}$ ,  $\beta_2 = \frac{M_i}{M_{i0}}$  - koeficijent kojim se uzima u obzir vrsta armature,  $\beta_1$  - koeficijent kojim se uzima u obzir vrsta opterećenja.  $\beta_2$  Primjenom teorije elastičnosti, a uzevši u obzir momenat koji djeluje na presjek prije ojačavanja -  $M_0$ , dobijamo:  $a_i = \frac{M_i}{k_i \cdot I_i}$  gdje  $k_i = \frac{E_i \cdot I_i}{l_i}$  - krutost pri savijanju za presjek bez prsline,  $E_i \cdot I_i$  - krutost pri savijanju za presjek sa prslinama,  $k_i \cdot I_i$  - koeficijent koji zavisi od vrste opterećenja,  $I_i$  - moment inercije presjeka sa prslinama, prije ojačavanja. 3.5.2.3. Proračun prema graničnom stanju nosivosti (GSN) Ojačani armirano-betonski

**element mora dostići granično stanje loma na duktilan način, dakle, bez loma po betonu, loma po CFRP i bez loma na vezi.**

3

Da bi se obezbijedio takav lom, definisana su određena ograničenja: -

**ograničenje visine pritisnute zone betona  $x/d \leq 0.45$ , za beton kvaliteta C35/45 i nižeg;  $x/d \leq 0.35$ , za beton višeg kvaliteta od C35/45. - ograničenje dilatacije pri lomu vlakana FRP  $\epsilon_{fu} \geq 5\%$ , za beton kvaliteta C35/45 i nižeg;  $\epsilon_{fu} \geq 7\%$ , za beton višeg kvaliteta od C35/45.**

3

U zavisnosti od sadejstva betona i FRP ojačanja, razlikuju se dva tipa loma. 1) Lom usljed punog sadejstva između betona i FRP ojačanja

**Kada postoji puno sadejstvo betona i FRP vlakana lom nastaje kao simultani ili kao lom zatezanjem (zajedno čelik i vlakna ili pojedinačan lom) ili lom po pritisnutom betonu.**

3

Tečenje čelika, praćeno lomom betona - Kao što je ranije naglašeno, ovaj vid loma je najpoželjniji. Dolazi do simultanog loma betona i zategnute armature, bez kidanja FRP ojačanja. Elementi proračuna dati su na slici 3.11. Položaj neutralne ose  $x$  računa se na osnovu kompatibilnosti deformacija i ravnoteže unutrašnjih sila:  $0.85 \cdot \psi \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x +$

**$A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s = A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_f$  gdje je  $\psi = 0$ .**

18

8. Pri tome vrijednost  $\epsilon S 2$  ne smije prekoračiti vrijednost  $f y d$ .

$$Dilatacija u zategnutoj armaturi: \epsilon S 2 = \epsilon_{cu} \cdot x - d \quad \text{Dilatacija u FRP ojačanju: } h - x \quad \epsilon \quad 3$$

$$f = \epsilon_{cu}$$

$\cdot x - \epsilon 0$  Proračunski granični moment nosivosti ojačanog presjeka:  $M Rd = AS 1 \cdot$

$$f y d \cdot (d - \delta G x) + Af \cdot E \quad f \cdot \epsilon f \cdot (h - \delta G x) + AS 2 \cdot ES \cdot \epsilon S 2 \cdot (\delta G x - d) \quad 63$$

) gdje je  $\delta G = 0.4$ . Slika 3.11 Analiza GSN presjeka pri savijanju – dijagram dilatacija i napona Da bi gornji izrazi bili validni, potrebno je provjeriti tačnost sljedećih pretpostavki: - Došlo je do tečenja zategnute čelične armature; - Deformacije u FRP materijalu su ograničene graničnom deformacijom,  $\epsilon fud$ .  $h - x$

$$\epsilon S 1 = \epsilon_{cu} \cdot d - x \geq y d ; f \quad x \epsilon f = \epsilon_{cu} \cdot x - \epsilon 0 \leq \epsilon \quad 101$$

$fud Es$  Tečenje čelika, praćeno lomom FRP ojačanja - Ova vrsta loma je teoretski moguća, mada je veća vjerovatnoća da će prije doći do odvajanja nego do loma FRP ojačanja. Prethodni izrazi važe i u ovom slučaju, ali sa izmijenjenim oznakama. Zamijeniti  $\epsilon_{cu}$  sa  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_f$  sa  $\epsilon_{fud}$ , a za  $\psi$  i  $\delta G$  važe izrazi:  $\left[ \begin{array}{l} 1000 \cdot \epsilon_i \cdot \psi \cdot 0.5 - 1000 \cdot \epsilon_i \cdot \psi, \quad \epsilon_i \leq 0.002 \\ \psi = 12 \left[ \begin{array}{l} 1 - 2 \cdot \epsilon_i, \quad 0.002 \leq \epsilon_i \leq 0.0035 \\ 3000 \cdot \epsilon_i \left[ \begin{array}{l} 8 - 1000 \cdot \epsilon_i \cdot \delta G, \quad \epsilon_i \leq 0.002 \\ \delta G = 1000 \cdot \epsilon_i \cdot (3000 \cdot \epsilon_i - 4) + 2 \left[ \begin{array}{l} 4 \cdot (6 - 1000 \cdot \epsilon_i), \quad \left[ \begin{array}{l} 2000 \cdot \epsilon_i \cdot (3000 \cdot \epsilon_i - 2), \quad 0.002 \leq \epsilon_i \leq 0.0035 \\ 58 \end{array} \right] \end{array} \right] \end{array} \right] \end{array} \right]$  Lom usljed gubitka sadejstva između betona i FRP ojačanja Kada ne postoji sadejstvo

**betona i vlakana, lom nastaje gubitkom veze na većoj dužini elementa (peeling-off) i to: - na samoj vezi betona i FRP ojačanja (ali najčešće kroz beton); - kao posledica pojave prslina od savijanja ili od smicanja; - kao posledica neravne površine betona (valovitost površine izaziva skretne sile na vezi betona i FRP** 3

ojačanja). Odvajanje trake izazvano smičućim prslinama - Ovaj tip loma još uvijek nije u potpunosti objašnjen. Njegova tumačenja se zasnivaju na određenim eksperimentalnim istraživanjima [50], a oslanja se na Evrokod 2 [51]. Smatra se da se ovaj tip loma može izbjeći određenim modifikacijama u pogledu smičuće čvrstoće betona i odgovarajućeg koeficijenta armiranja podužnom armaturom: U slučaju pada nosivosti  $\sigma_{Ri} = \sigma_a \cdot 1.5 \cdot \psi \cdot \epsilon_{ci}$  nije ispod  $\psi \cdot \epsilon_{ci}$   $\epsilon_i = \epsilon_{ci} + \psi \cdot \epsilon_{ci}$ , potrebno je izvršiti 1 ? 3 bi?bi? ojačanje na smicanje. Odvajanje trake na krajevima ojačanja i na mjestima prslina usljed savijanja Postoji više pristupa koji se bave ovim tipom odvajanja: • Provjera krajeva ojačanja, ograničenje deformacija u FRP traci Ovaj postupak uključuje dva nezavisna koraka: Prvo se vrši provjera smičućih napona na krajevima ojačanja, a zatim je potrebno ograničiti veličinu deformacije u FRP traci,

kako bi se izazvao lom što dalje od ojačanja. Ovaj postupak je, zbog svoje jednostavnosti, često primjenjivan u nacrtima mnogih pravilnika. On, međutim, predstavlja grubo uprošćavanje stvarnog ponašanja, s obzirom da deformacija FRP trake nije konstanta, već zavisi od velikog broja parametara, kao što su odnos moment- smicanje, deformacija čelične armature, kao i propagacija prslina.

- Provjera krajeva ojačanja i prenosa sile duž kontakta FRP-beton Ovaj pristup [52], kao i prvi, predlaže dva nezavisna koraka koja treba preduzeti. Prvo se vrši provjera krajeva ojačanja na proklizavanje usljed smicanja na kontaktnoj površini FRP-beton. Zatim se provjerava da li je smičući napon duž cijele kontaktne površine manji od kritičnog (smičuće čvrstoće betona). Ovaj pristup se pokazao jednostavan i primjenljiv u praksi.
- Odvajanje krajeva trake usljed smicanja Primijenjen je koncept fiktivnog raspona smicanja [53] kako bi se sračunala otpornost na smicanje ojačanih greda. Ovaj koncept predstavlja pojednostavljen inženjerski pristup razmatranog problema.
- Odvajanje izazvano neravnomjernošću betonske podloge Ovaj problem nije ispitan u dovoljnoj mjeri. Eksperimentalni dokazi upućuju na potrebu usvajanja određenih pravila praktičnog izvođenja, kao i ograničenja hrapavosti betonske površine, čime bi se izbjegao ovaj tip odvajanja.

### 3.6. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda opterećenih na savijanje u toku vremena

#### 3.6.1. Deformacije betona u toku vremena

##### 3.6.1.1. Uvod u reologiju betona

Reologija je nauka koja se bavi ponašanjem materijala tokom vremena. Ona proučava veze između napona i deformacija materijala u funkciji od vremena.

**Višestruko korisna u praktičnoj primjeni, naročito kod izučavanja materijala složenijih** sastava i **12**  
**svojstava** i **omogućava bolje** razumijevanje interakcije **pojedinih** komponenti **materijala**

[54]. Jedan od bitnih zadataka reologije je da opiše vremenske deformacije materijala pomoću odgovarajućih matematičkih modela sa što manjim brojem promjenljivih. Najznačajniji korak u rješavanju tog zadatka predstavlja

**pronalaženje analitičkih veza između komponenata tenzora deformacija i komponenata tenzora** **17**  
 napona. **Svrha je** potpuno praktične prirode, **što znači da se** dobijene **veze koriste u**  
 donošenju zaključaka **o ponašanju materijala i konstrukcija** tokom vremena. **Reologija se u prvom redu**  
**oslanja na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava pojedinih materijala s jedne strane, a na postavke i**  
**rezultate teorijske mehanike kontinuuma s druge strane**

[55]. 3.6.1.2. Skupljanje i tečenje betona Pod deformacijama betona zavisnim od vremena podrazumijevaju se skupljanje i tečenje betona. Karakteristično za ove deformacije je to da se odigravaju veoma sporo, što znači da se radi o dugotrajnim deformacijama, pa i eksperimentalno ispitivanje traje dugo. Proračun ukupnih vremenskih deformacija opterećenog betona, primjenom postojećih metoda proračuna, zasniva se na zasebnom proračunu deformacija skupljanja i deformacija tečenja, pri čemu njihov zbir predstavlja ukupnu vremensku deformaciju. Ovaj pristup je, za praktičnu primjenu, dovoljno tačan i prihvatljiv. Međutim, treba imati u vidu činjenicu da su tečenje i skupljanje betona međusobno zavisne veličine, tj. prisustvo skupljanja utiče na promjenu deformacije tečenja. Tačna vrijednost deformacije tečenja se može odrediti oduzimanjem deformacija skupljanja neopterećenog betona od poznatih ukupnih deformacija opterećenog betona, pod istim klimatskim uslovima. Skupljanje betona je deformacija smanjenja zapremine betona u funkciji vremena, nezavisna od spoljnog opterećenja, a nastaje usljed složenog procesa hidratacije

i kristalizacije cementa. Ova deformacija se, u konstantnim uslovima okolne sredine, u toku vremena, monotono povećava i asimptotski približava konačnoj vrijednosti skupljanja. Sam proces skupljanja je u početku intenzivniji, a kasnije sve sporiji. Ukupna deformacija skupljanja sastoji se od: • skupljanja

**usljed kontrakcije produkata hidratacije (hidrataciono skupljanje);** • skupljanja **usljed isparavanja vode** u periodu **vezivanja cementa - plastično skupljanje;**

39

• skupljanja usljed isparavanja vode u periodu očvršćavanja cementne paste, odnosno nakon završetka procesa vezivanja (hidrauličko skupljanje). Plastično skupljanje je, u odnosu na ostale vrste skupljanja, najveće, ali

**se dešava u** vrijeme **kada je betonska masa još** uvijek **u određenoj** mjeri **fluidna.**

30

Ova deformacija se odvija vrlo brzo, u prvih nekoliko časova i, pošto se odigrava u okviru mase svježeg betona, nije od značaja u odnosu na naponska stanja konstrukcije.

**Hidraulično skupljanje se odvija** sve **dok se ne uspostavi ravnoteža između vlažnosti sredine i vlažnosti betona,**

39

što će se desiti tek nakon završetka procesa hidratacije. Prilikom razmatranja hidrauličkog skupljanja cementne paste, pa prema tome i betona, treba imati u vidu činjenicu da je dio ukupnog skupljanja nepovratan (ireverzibilan). To je skupljanje koje je inače najveće, a nastaje prilikom prvog sušenja. U realnim uslovima, usljed promjene vlažnosti sredine u kojoj se nalazi, beton može biti izložen naizmjeničnom sušenju i vlaženju. Tipično ponašanje betona prilikom sušenja i kvašenja prikazano je na slici 3.12. Generalno posmatrano, ukupno

**skupljanje je proces koji se u početku odvija relativno brzo da bi se kasnije, u** veoma **dugom vremenskom periodu, deformacije**

30

smanjivale i asimptotski težile nekoj konačnoj vrijednosti. Skupljanje se nikakvim mjerama ne može eliminisati, ali se može znatno ublažiti kvašenjem sve dok beton ne postigne min 70% predviđene marke betona, a najmanje u toku prvih 7 do 10 dana. Stoga se može zaključiti da je njega mladog betona veoma važna preventiva za nastanak ranog skupljanja. Slika 3.12 Tipično ponašanje betona tokom očvršćavanja Treba naglasiti da kod klasičnog armiranog betona skupljanje nema naročiti značaj, jer se armatura suprotstavlja skraćenju betona, dok daleko veći značaj ima kod prednapregnutog betona. Pod terminom tečenje betona podrazumijeva se pojava postepenog porasta elastičnih deformacija betona koje nastaju u trenutku opterećenja, pod daljim djelovanjem konstantnog dugotrajnog opterećenja u toku vremena. Razlikujemo dvije komponente tečenja opterećenog betona: • osnovno tečenje, koje se javlja bez uticaja

razmjene vlažnosti sa okolnom sredinom (uravnoteženo stanje vlažnosti); • tečenje prouzrokovano procesom sušenja betona. Konačne deformacije tečenja mogu dostići vrijednosti i nekoliko puta veće od trenutnih. I tečenje betona se, kao i skupljanje, u početku odvija brzo, a tokom vremena brzina deformacije se značajno smanjuje i na kraju asimptotski teži konačnoj vrijednosti (sl. 3.13). Slika 3.13 Tečenje betona pri konstantnom opterećenju Na slici 3.14 prikazane su vremenske deformacije betonskog elementa, koji je prvih  $t_s$  dana održavan u vlažnom stanju, a zatim je, u trenutku vremena  $t_0$ , izložen dejstvu opterećenja. Kao što je već rečeno, u tom trenutku se javlja trenutna, elastična deformacija. Ona u toku vremena opada, mada se veoma često, iz praktičnih razloga, njena promjena u toku vremena, pri dejstvu konstantnog opterećenja, zanemaruje. Samim tim bi deformaciju tečenja, koja se javlja za vrijeme dejstva tog opterećenja, trebalo sračunati kao dodatnu deformaciju na elastičnu deformaciju u posmatranom trenutku  $t$ , a ne na elastičnu deformaciju u trenutku opterećenja  $t_0$ . Isprekidana linija na slici predstavlja dalji tok dilatacija, za slučaj da nema rasterećenja, tj. da konstantan napon djeluje u beskonačno dugom vremenskom intervalu. Međutim, ukoliko se, nakon perioda djelovanja opterećenja, koji je trajao od trenutka  $t_0$  do  $t_1$ , uzorak rastereti, biće registrovana trenutna elastična povratna deformacija. Njena vrijednost je manja od trenutne elastične deformacije zbog većeg modula elastičnosti koji beton ima pri većoj starosti. Trenutna povratna deformacija je praćena i vremenski zavisnom povratnom deformacijom, koja se naziva povratna deformacija tečenja, a koja asimptotski teži nekoj konačnoj vrijednosti. Jedan dio deformacije tečenja ostaje nepovratan, i naziva se još zaostala, plastična ili ireverzibilna deformacija tečenja. Dakle, tečenje betona se sa starošću znatno smanjuje, ali i veoma stari betoni to svojstvo zadržavaju, zbog čega se beton i opisuje kao viskoelastoplastičan materijal sa izraženom osobinom starenja [56].  $\epsilon_c \rightarrow \epsilon_c$  povratna trenutna dilatacija  $\epsilon_{ci}$  dilatacija  $t_{\text{tećenja}}$  početna dilatacija  $\epsilon_{ci}$   $\epsilon_c(t)$  povratna dilatacija tečenja nepovratna dilatacija tečenja konačna dilatacija skupljanja  $0$   $t_0, s$   $t_0$   $t_1$   $t \rightarrow t$  Slika 3.14 Prikaz ukupnih deformacija pod konstantnim naponom Na slici 3.15 prikazana je vremensko-deformacijska kriva za materijal koji je izložen konstantnom dugotrajnom opterećenju. Deformacija koja se javlja u trenutku nanošenja opterećenja je primarno elastična, ali može da sadrži i neelastičnu komponentu. Nakon toga se mogu javiti tri nivoa tečenja. Slika 3.15 Kriva tečenja materijala za nivoa napona iznad eksploatacionih [51] Prvi nivo je primarno tečenje gdje materijal u toku kratkog vremenskog perioda doživljava brzi prirast deformacije. Kada taj prirast u funkciji vremena opadne na neku minimalnu vrijednost, znači da se materijal nalazi u zoni sekundarnog tečenja (tzv. stalno tečenje) i označava zonu nepromjenljivog tečenja tj. brzina deformacije postaje praktično konstantna. Obično se sekundarno tečenje aproksimira pravom linijom i predstavlja zonu kada se konstrukcija nalazi u upotrebi. Poslednji nivo, tercijarno tečenje javlja se u slučaju izloženosti izuzetno visokim nivoima napona (većim od 40- 45% čvrstoće). Tada deformacije tečenja teže beskonačno velikim vrijednostima, koje se vrlo često završavaju lomom materijala. Ovaj nivo tečenja može i ne mora da postoji, zavisno od toga da li ima ili nema prirasta napona i kojeg su nivoa ti naponi. Za radne nivoa napona (40-45% čvrstoće) može se javiti značajno sekundarno tečenje, a tercijarno tečenje gotovo da ne postoji. Vremensko-deformacijska kriva za taj slučaj definiše se kao postepeno povećanje deformacija u funkciji vremena pod stalnim naponima. Iz priloženog se zaključuje da deformacija tečenja zavisi od starosti, pa se samim tim i koeficijent tečenja mijenja slično promjeni deformacije tečenja, tj. u funkciji je od vremena i nezavistan je od nanešenog opterećenja. Poznavanje koeficijenta tečenja omogućava brzo određivanje deformacije tečenja u proizvoljnom trenutku vremena  $t$ .

### 3.6.1.3. Faktori koji utiču na deformacije betona u toku vremena

Vremenski tok i konačne vrijednosti deformacija skupljanja i tečenja zavise od niza faktora od kojih su najznačajniji nivo opterećenja i vremenski interval u kojem se ove deformacije posmatraju. Na deformacije betona u toku vremena takođe utiču i količina i vrsta cementa i vodocementni faktor, granulometrijski sastav, način ugrađivanja i dužina trajanja njegovanja betona, relativna vlažnost i temperatura okolne sredine, kao i oblik i dimenzije poprečnog presjeka betonskog



elementa. • Posebno značajan uticaj na konačne vrijednosti deformacije skupljanja i tečenja betona imaju uslovi spoljašnje sredine, a naročito relativna vlažnost i temperatura. Beton koji se u procesu starenja suši, ima veći prirast vremenskih deformacija u odnosu na beton koji je bio izložen veoma vlažnoj sredini [57]. Samim tim, deformacija tečenja može biti dva do tri puta veća u slučaju izloženosti betona relativnoj vlažnosti od 50%, nego u slučaju kada je relativna vlažnost 100%. Povećanje tečenja kod betona koji se suši koja predstavlja deformaciju tečenja tokom očvršćavanja. • Pored relativne vlažnosti bitan uticaj na deformacije skupljanja i tečenja betona ima i temperatura. Ukoliko ona varira dolazi do povećanja tečenja, bez obzira da li se radi o zagrijavanju ili hlađenju. Eksperimentalnim istraživanjima utvrđeno je da pri povećanim temperaturama deformacije tečenja dostižu veće nivoe nego pri nižim temperaturama. Ovo je, prije svega, posljedica gubitka vode iz betona pri višim temperaturama. • Oblik i dimenzije betonskog elementa imaju veliki uticaj na ukupnu deformaciju skupljanja i tečenja betona. Kod većih dimenzija elemenata, deformacije skupljanja i tečenja su manje jer se isparavanje vode iz betona odigrava sporo, i vrlo često ne u potpunosti. • Betoni koji koriste cement sa dodacima, kao i cimente sa finijim mlivom, imaju veće vrijednosti vremenskih deformacija. U slučaju korišćenja većih količina cementa, takođe se povećavaju skupljanje i tečenje betona. • Pri većim vodocementnim faktorima dobijaju se betoni manje kompaktnosti, što posebno utiče na povećanje skupljanja nakon procesa završetka vezivanja cementa. • Takođe, pravilno i efikasno ugrađivanje utiče na smanjenje brzine prirasta deformacija mladog betona, čime se obezbijuje dobra kompaktnost betona, a samim tim i smanjenje konačnih vrijednosti deformacija skupljanja i tečenja betona. • Pogodan granulometrijski sastav agregata omogućava izradu betona optimalne kompaktnosti, uz korišćenje umjerenih količina cementa. Takav beton će imati smanjene vrijednosti vremenskih deformacija. • Njegovanje betona, koje podrazumijeva vlaženje betona u prvim danima nakon ugrađivanja, ima poseban uticaj na skupljanje betona. Na ovaj način beton se u toku očvršćavanja konstantno nalazi u vlažnoj sredini, čime se odlaže pojava skupljanja za vrijeme kada će mu mehaničke karakteristike biti značajno veće. Dakle, pojava napona zatezanja usljed skupljanja odlaže se za kasniji period, kada će beton ostvariti dovoljan prirast čvrstoće na zatezanje i bez pojave prslina prihvatiti naprezanja nastala usljed procesa neravnomjernog skupljanja. • Pored gore navedenih parametara, od kojih zavise i skupljanje i tečenje betona, za krajnju vrijednost i vremenski tok deformacije tečenja naročito je bitna starost betona u vrijeme kada je prvi put opterećen, kao i trajanje i intezitet opterećenja. 3.6.1.4. Deformacije betona u toku vremena prema Pravilniku Evrokod 2 Za definisanje ponašanja betona potrebno je poznavati njegove vremenski zavisne deformacije - skupljanje i tečenje. Ove uticaje treba uzeti u

**obzir samo kada su od značaja, na primjer u proračunu** graničnih stanja ravnoteže - 6  
**stabilnosti, kada su značajni uticaji drugog reda. U ostalim slučajevima o uticajima**  
 skupljanja i tečenja u graničnom stanju **nosivosti ne mora se voditi računa, pod uslovom da su**  
**duktilnost i kapacitet rotacije elemenata dovoljni.**

Skupljanje betona Ukupna dilatacija skupljanja  $\epsilon_{cs}$  sastoji se od dvije komponente: - dilatacije skupljanja tokom očvršćavanja  $\epsilon_{cd}$  i - sopstvene dilatacije skupljanja  $\epsilon_{ca}$  tj. važi izraz: Dilatacija skupljanja  $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$

**odigrava se sporo, s obzirom da zavisi od** protoka **vode kroz očvršli beton.** 6

Njena konačna vrijednost iznosi: gdje je:  $\epsilon_{ci}(t, \infty) = k_i \cdot h \cdot \epsilon_{ci}(t, 0)$  - nespriječeno skupljanje tokom očvršćavanja;  $\epsilon_{ci}(t, 0)$  koeficijent koji zavisi od nominalne dimenzije poprečnog presjeka. Promjena koeficijenta dilatacije skupljanja u toku vremena tokom očvršćavanja data je izrazom: gdje je

$$\epsilon_{ci}(t) = \beta_i \cdot d_i(t, t_{si}) \cdot k_i \cdot h \cdot \epsilon_{ci}(t, 0) \quad \beta_i = t_i - t_{si}$$

9

gdje predstavlja s1ta-rosti?tsi?b+et0o.n0a4n?ahp0očetku skupljanja tokom očvršćavanja (u danima). 3

**Sopstvena dilatacija skupljanja** se javlja **se u toku očvršćavanja betona** i **njen najveći** dio **se** odigrava **prvih dana** nakon **betoniranja**. Ona **je linearna funkcija čvrstoće betona**

6

i od naročitog značaja je

**kada se novi beton ugrađuje na kontaktu sa očvrslim betonom.**

6

Dobija se iz izraza: gdje je

$$\epsilon_{ci}(t) = \beta_i \cdot a_i(t) \cdot \epsilon_{ci}(\infty) \quad \beta_i = 2.5 \cdot (f_{ci} - 10) \cdot 10^{-0.5} \quad \beta_i = 1 - \epsilon_{ci}$$

9

gdje je t izraženo u danima. Iz prethodnog se može zaključiti da se dio deformacije skupljanja javlja i u toku njegovanja betona i zavisi od čvrstoće betona pri pritisku. Konačne vrijednosti dilatacije skupljanja prema Pravilniku Evrokod 2 su neznatno veće od onih dobijenih prema Pravilniku BAB 87. Ukupna dilatacija, u proizvoljnom trenutku vremena t, za beton koji je izložen konstantnom dugotrajnom opterećenju  $\sigma_c$  od trenutka  $t_0$  i koji je prestao da se njeguje u trenutku  $t_s$ , može se izračunati pomoću izraza: gdje je:  $\epsilon_{ci}(t, t_0) = \epsilon_{ci}(t, t_0) +$

$$\epsilon_{ci}(t, t_0) + \epsilon_{ci}(t, t_{si}) + \epsilon_{ci}(t, t_0)$$

9

$\epsilon_{ci}(t, t_0)$  - trenutna elastična dilatacija,  $\epsilon_{ci}(t, t_0)$  - dilatacija tečenja u intervalu vremena (t-t<sub>0</sub>),  $\epsilon_{ci}(t, t_0)$  - dilatacija skupljanja tokom očvršćavanja u intervalu vremena (t-t<sub>s</sub>),  $\epsilon_{ci}(t, t_{si})$  - sopstvena dilatacija skupljanja u trenutku vremena t, ili:  $\epsilon_{ci}(t) = \epsilon_{ci}(t, t_0) +$

$$\epsilon_{CC}(t_0, t) = \epsilon_{ci}(t_0) + \epsilon_{ci}(t) - \epsilon_{ci}(t_0) \cdot \phi(t, t_0) + \epsilon_{ci}(t) \cdot \phi(t, t_0)$$

79

Tečenje betona Konačna vrijednost dilatacije tečenja betona  $\epsilon_{CC}(\infty, t_0)$  u

vremenu  $t = \infty$ , pri konstantnom naponu pritiska  $\sigma_C$ , kojem je beton izložen u starosti  $t_0$ ,  
data je izrazom:  $\epsilon_{CC}(\infty, t_0) = \phi(t, t_0) \cdot \sigma_C / E_c$

6

Mjeru tečenja predstavlja koeficijent tečenja  $\phi(t, t_0)$ , koji je funkcija tangentskog modula elastičnosti betona  $E_c$ :  
 $E_c = 1.05 \cdot E_{cm}$  gdje je  $E_{cm}$  sekantni modul elastičnosti betona starosti 28 dana i definiše se prema izrazu:  $E_{cm} = 22 \cdot f_{cm} / 100$  gdje je  $f_{cm}$  srednja vrijednost čvrstoće betona starosti 28 dana:  $f_{cm} = f_{ck} + 8$  (MPa) gdje je  $f_{ck}$  karakteristična čvrstoća betona pri pritisku betonskog cilindra dimenzija 15/30 cm pri starosti betona od 28 dana. Vrijednosti modula elastičnosti u gornjoj jednačini važe za slučaj betona sa kvarcnim agregatom.

Za agregate od krečnjaka te vrijednosti treba smanjiti za 10%, a za agregate od pješčara za 30%. Za bazaltne agregate date vrijednosti treba povećati za 20%. Vrijednost modula elastičnosti u

6

proizvoljnom trenutku vremena  $t$ , izračunava se po izrazu:  $E_{cm}(t) = f_{cm}(t) / 100$  gdje je  $f_{cm}(t)$  srednja vrijednost čvrstoće betona u proizvoljnom trenutku vremena  $t$  i

može biti određena iz srednje čvrstoće betona poslije 28 dana  $f_{cm}$ :  $f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$ , pričemuje:  $\beta_{cc}(t) = \exp\left(-s \cdot \left(\frac{t-t_0}{28}\right)^n\right)$  gdje je  $s$  u funkciji od vrste cementa: 0.2 - za klasu R, 0.25 - za klasu N, 0.38 - za klasu S

Kada se ne zahtijeva velika tačnost, može se smatrati da koeficijent tečenja odgovara

6

vrijednostima

sa slike 3. 16, pod uslovom da beton u trenutku opterećenja, u starosti  $t_0$ , nije izložen naponu pritiska većem od 0.45

6

$f_{ck}(t_0)$ , koji praktično odgovaraju najvećim naponima pri eksploatacionim opterećenjima. Konačne vrijednosti koeficijenta tečenja prema Pravilniku Evrokod 2 su manje od vrijednosti prema Pravilniku BAB 87. Vrijednosti date na ovoj slici

važe za temperature sredine između -400C i +400C i za srednju relativnu vlažnost vazduha RH = 40- 51

100%.

Slika 3. 16 Određivanje koeficijenta tečenja za beton u normalnim uslovima sredine kada U slučaju 6

se zahtijeva precizniji proračun, koeficijent tečenja se može sračunati prema izrazu: gdje je  $\phi_{RH} = \frac{1}{1 + 100 \cdot 0.13 \cdot h_0}$ ; za  $f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$   $\alpha_1 = 1$ ; za  $f_{cm} > 35 \text{ MPa}$   $\alpha_1 = \left( \frac{f_{cm}}{35} \right)^{0.7}$ ; Korišćene su sljedeće oznake: RH - relativna vlažnost sredine  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  -

u obzir uticaj relativne vlažnosti na nominalnu vrijednost koeficijenta tečenja: RH  $\phi_{RH} = 1$  90

+ 1 - 100 0.13 h0 ; za  $f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$   $\alpha_1 = 1$ ; za  $f_{cm} > 35 \text{ MPa}$   $\alpha_1 = \left( \frac{f_{cm}}{35} \right)^{0.7}$ ; Korišćene su sljedeće oznake: RH - relativna vlažnost sredine  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  -

koeficijenti kojima se uzima u obzir uticaj čvrstoće betona:  $\alpha_1 = \left( \frac{f_{cm}}{35} \right)^{0.7}$   $\alpha_2 = 1$  23

- nominalna dimenzija poprečnog presjeka (srednja debljina presjeka)  $h_0 = 2A_i$

Ac - površina poprečnog presjeka betona; u - obim dijela presjeka koji je izložen sušenju; 51

koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj relativne čvrstoće betona na 6

$\beta_i = \frac{1}{1 + 100 \cdot 0.13 \cdot h_0}$  alnu vrijednost koeficijenta tečenja: - koeficijent tečenja na nominalnu vrijednost koeficijenta tečenja:  $\beta_i(t_i) = 0.1 + t_i \cdot 0.0021$  (\*) -

**koeficijent kojim se definiše dijagram tečenja u zavisnosti od vremena**

6

nakon  $\beta_i$  općenito:  $\beta_i(t_i, t_{i0}) = \beta_i(t_i, t_{i0}) - \text{stvarno vrijeme trajanja opterećenja}$ ;  $\beta_i$  koeficijent koji zavisi od relativne vlažnosti i nominalne veličine elementa:  $\beta_i(t_i, t_{i0}) = 1.5 \cdot [1 + (0.012 \cdot R_i - 0.45)]$ ; za  $f_{cm} \leq 35$  MPa  $\beta_i(t_i, t_{i0}) = 1.5 \cdot [1 + (0.012 \cdot R_i - 0.45)]$ ; za  $f_{cm} > 35$  MPa  $\beta_i(t_i, t_{i0}) = 1.5 \cdot [1 + (0.012 \cdot R_i - 0.45)] \cdot h_0$  + 250 ·  $\alpha_3 \leq 1500$  0,5 gdje je  $\alpha_3$  koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj čvrstoće betona:  $\alpha_3 = \begin{cases} 1 & f_{cm} \leq 35 \\ 0.5 & f_{cm} > 35 \end{cases}$

**Uticaj vrste cementa na koeficijent tečenja betona može da se uzme u obzir modifikovanjem starosti**

6

**u trenutku opterećenja**  $t_0$  **u izrazu**  $(*)$ :  $t_0 = t_0 \cdot T \cdot \left( \frac{t}{t_0} + 1 \right)^{-1}$

$\alpha = \begin{cases} 1 & T \geq 0.5 \\ 0 & T < 0.5 \end{cases}$  gdje

**je  $t_0, T$  - starost betona u trenutku opterećenja, korigovana zbog uticaja temperature;**

23

$\alpha = 1$  za cement klase S

**$\alpha$  - stepen koji zavisi od vrste cementa:**  $\alpha = \begin{cases} 1 & \text{za cement klase N} \\ 0 & \text{za cement klase S} \end{cases}$

23

R Kada je napon pritiska u betonu u starosti  $t_0$ , veći od  $0.45 f_{ck}(t_0)$ , potrebno je uzeti u

**obzir nelinearnost tečenja. Tako veliki naponi mogu nastati, na primjer, pri prethodnom zatezanju u prefabrikovanim betonskim elementima, na nivou kablova za prethodno naprezanje.**

6

Tada se koeficijent zamjenjuje odgovarajućim nominalnim nelinearnim koeficijentom tečenja:  $\phi_i(t_i, t_{i0}) = \phi_i(t_i, t_{i0}) \cdot \left[ \frac{f_{ct}(t_i)}{f_{ct}(t_{i0})} \right]^{1.5} \cdot [1.5 \cdot (k_i - 0.45)]$  gdje je:  $k_i = \frac{f_{ct}(t_i)}{f_{ct}(t_{i0})}$ ;  $f_{ct}(t_0)$  - karakteristična vrijednost čvrstoće betona pri pritisku u trenutku opterećenja. 3.6.1.5. Deformacije FRP materijala u toku vremena prema Pravilniku CEB-FIP Bulletin 2007 FRP materijal se, kao kompozitni materijal, značajno razlikuje od čelika u pogledu dugotrajnih karakteristika, pa je veoma važno razumjeti to ponašanje i nova saznanja primijeniti pri projektovanju betonskih elemenata ojačanih FRP materijalom. Ovaj materijal se, kao što je poznato, sastoji od matrice (vezivne smole) i vlakana. U slučaju izloženosti dejstvu dugotrajnog opterećenja može doživjeti iznenadan lom, i to nakon dostizanja granice izdržljivosti. Ovaj fenomen, poznat kao lom usljed tečenja, odnosi se na sve strukturne materijale. On zavisi od vrste vlakana. Najmanju podložnost lomu usljed tečenja pokazuju karbonska vlakna, aramidna su umjereno osjetljiva, a staklena najosjetljivija. Stoga, orijentacija vlakana, kao i njihov zapreminski udio imaju značajan uticaj na ponašanje FRP materijala prilikom tečenja. Poznato je da većina materijala doživljava početak tečenja kada su

izloženi značajnim opterećenjima, i to pri temperaturama koje prelaze 40% njihove temperature topljenja [58]. Početna elastična deformacija kompozita dobija se pomoću izraza:  $\epsilon_0 = E_f L V_f + E_m (1 - V_f) \sigma$  gdje su:  $E_f$  i  $E_m$  - modul elastičnosti vlakana u podužnom pravcu i modul elastičnosti matrice;  $V_f$  - učešće vlakana po zapremini u kompozitnom materijalu. Pri pojavi tečenja u matrici, aplicirani napon se progresivno prenosi na vlakna, sve dok ona ne prime cjelokupan napon. U tom trenutku deformacija vlakana, a samim tim i kompozitnog materijala, može biti određena na sljedeći način:  $\epsilon_\infty = \sigma E_f L$ . Ova vrijednost dostiže se asimptotski, s obzirom da nivo tečenja u matrici opada kako se ona oslobađa napona, a ravnotežno stanje se samim tim nikad ne dostiže. Koeficijent tečenja može se odrediti linearizacijom krive tečenja usljed napona upravno na vlakna u dijagram čije su ose deformacija i logaritam vremena ( $\epsilon - \log t$ ). Prikazani na ovaj način, mnogi polimerni materijali pokazuju skoro linearnu zavisnost. Ukupna deformacija se može prikazati sljedećim izrazom: gdje je  $\beta \epsilon_i(t) = \beta \epsilon_0 + \beta \dot{\epsilon} t$  Neka eksperimentalna istraživanja ukazuju na nepostojanje loma usljed tečenja ukoliko je dugotrajno opterećenje ograničeno na 60% čvrstoće pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja [59]. Postoji značajan broj radova na ovu temu, ali se jako mali broj odnosi na ispitivanja duža od 100 časova [60]. Takođe trajnost ovih ojačanja nije do sada dovoljno ispitana,

**pa čak teži da bude i kompleksnija od korozije čelika, zato što na degradaciju materijala utiču komponente kompozitnog materijala.**

1

3.6.2. Deformacije armirano-betonskih greda ojačanih FRP materijalom u toku vremena Pravilnik ACI 318-05 prepoznaje značaj i početne i deformacije tečenja, ali ne uzima u obzir nivo dugotrajnog opterećenja, zato što smatra da će konstrukcija biti izložena samo radnom nivou napona. Međutim, samo ojačavanje konstrukcije ukazuje na mogućnost nanošenja i većeg opterećenja. Na osnovu navedenog jasno je da ovaj Pravilnik precjenjuje vrijednost dugotrajne deformacije, sračunavajući je na sljedeći način:  $\Delta t = S (1 + 50 \rho') \cdot \Delta i$  gdje je:  $\rho'$  - koeficijent armiranja pritisnutom  $\rho' = b_A \cdot s' / d$  armaturom;  $\Delta i$  - početna deformacija u trenutku nanošenja dugotrajnog opterećenja;  $\Delta t$  - vremenska deformacija usljed tečenja i skupljanja;  $S$  - vremenski zavistan koeficijent. 2.0 (5 i više godina) 1.4 (12 mjeseci)  $S_i = ?$  1.2 (6 mjeseci) Pravilnik ACI 318-05 precjenjuje vrijednosti  $S_i$  za različite periode, pa je zato u radu [4] dat predlog njegove korekcije:  $\left( \begin{array}{l} 1.3 \text{ (5 i više godina)} \\ 1.1 \text{ (18 mjeseci)} \\ 1.0 \text{ (12 mjeseci)} \\ 0.8 \text{ (6 mjeseci)} \\ 0.6 \text{ (3 mjeseca)} \\ 0.4 \text{ (1 mjesec)} \end{array} \right)$  Preporučene vrijednosti dobijene su ispitivanjem na gredama izloženim visokim nivoima konstantnog opterećenja, u trajanju od 1 godine. Vrijednosti date za period duži od godine, dobijene su ekstrapolacijom eksperimentalnih rezultata. Deformacija tečenja data je izrazom:  $\Delta \epsilon_{cr} = k_r \cdot \phi_t \cdot \Delta i$ ; gdje je  $k_r = 1 + 50 \rho' \cdot 0.85$  Usvaja se granična vrijednost koeficijenta tečenja  $\phi_t = 1.6$ , za prosječne uslove. Koeficijent tečenja će se, za period do 5 godina, računati iz izraza:  $\phi_t = 1.6 \cdot 2^{-S}$  Upoređivanjem rezultata eksperimentalnog i teorijskog ispitivanja, dolazi se do zaključka da je ACI model pogodan za procjenu dugotrajnih deformacija betonskih greda opterećenih u granicama radnih napona. Međutim, njegovim odredbama potcjenjuju se deformacije greda izloženih visokim nivoima napona, ukoliko se koristi koeficijent tečenja 1.6. Provjera nivoa napona u FRP ojačanju U Pravilniku ACI 440.2R-08 je dat izraz za dobijanje nivoa napona u FRP ojačanju, pod određenim opterećenjem, a u okviru elastičnog ponašanja elementa. Postupak provjere nivoa napona je sledeći: - Pretpostaviti da je totalno korisno opterećenje nepromjenljivo. - Ovaj napon uporediti sa dopuštenim naponima usljed dugotrajnog i cikličnog opterećenja, koji su bezbjedni za konstrukciju (tabela 3.2).

$$f_{f,S} = f_{S,S} \cdot \left( \frac{E_f}{E} \right) \cdot \left( \frac{d_f}{d} - k \cdot d \right) - \epsilon_{bi} \cdot E_f \left( \frac{E_S}{E} \right) \left( \frac{d}{d} \right)$$

3.6.3. Analiza prethodnih eksperimentalnih istraživanja lako je ponašanje ojačanih betonskih konstrukcija pod kratkotrajnim opterećenjem izazvalo značajno interesovanje u svijetu konstruktora, to nije bio slučaj kada je riječ o dugotrajnim deformacijama. Zato su podaci na tu temu prilično oskudni. Ranija istraživanja na ispitivanju reoloških svojstava betonskih uzoraka ojačanih kompozitnim materijalom, u uslovima ubrzanog starenja ne daju dobre rezultate u poređenju sa istraživanjima u prirodnim uslovima starenja, pa stoga, pri reološkom modeliranju, nije moguće preuzeti materijalne parametre, kojim se kvantifikuje njihovo naponsko-deformacijsko ponašanje. Pregledom literature je zaključeno da je tečenje usljed prirodnog starenja materijala znatno manje istraženo, vjerovatno usljed neposjedovanja odgovarajućih laboratorija za tu namjenu. U tu svrhu bi bilo neophodno intenzivirati rad na eksperimentalnoj analizi vremenskog ponašanja ovih elemenata, i to u uslovima prirodnog starenja materijala. Utvrđeno je i da se najveći broj radova na ispitivanju ponašanja ojačanih betonskih greda na dugotrajna opterećenja, odnosi na ispitivanja na modelima, tj. uzorcima umanjenih dimenzija [52], i to najčešće na gredama pravougaonog poprečnog presjeka [15]. U ovom poglavlju izvršena je analiza određenog broja rezultata dosadašnjih naučnih istraživanja iz predmetne oblasti.

- U radu [5] utvrđen je uticaj dugotrajnog opterećenja na nosivost ojačanih greda. Ono izaziva pojavu deformacija tečenja betona u pritisnutoj zoni, kao i deformaciju tečenja u CFRP lameli, i one su plastičnog karaktera nakon rasterećenja. Kada se grede ponovo kratkotrajno opterete, deformacije rastu i to počevši od zaostale deformacije od dugotrajnog opterećenja. To utiče na pad nosivosti tih uzoraka u odnosu na one koji su bili izloženi samo kratkotrajnom opterećenju.
- Eksperimentalno istraživanje sprovedeno nad ispucalim gredama ojačanim CFRP lamelama, dovelo je do saznanja da je porast nosivosti ojačanih greda u odnosu na kontrolnu manji kada se ojačavaju dok su pod dejstvom dugotrajnog ravnomjernog opterećenja nego kada su neopterećene [61].
- Tečenje ojačane betonske grede izaziva značajan porast aksijalne sile u FRP lameli, a takođe i porast smicanja i vertikalnih ivičnih normalnih napona u sloju lijepka. Ovi naponi izazivaju lom usljed odvajanja ojačanja, a njihov porast tokom vremena usljed tečenja je od izuzetnog značaja za projektovanje sistema ojačanja greda. Tečenje u sloju lijepka redukuje te ivične napone u lijepku, a u manjoj mjeri i deformacije i aksijalne sile. Stoga, u nekim slučajevima, viskoelastični lijepak može imati povoljan uticaj na ponašanje ojačanih greda [62].
- U radu [4] ispitano je 26 greda dimenzija 100x150x1800 mm sa i bez CFRP ojačanja, uz varijaciju procenta armiranja, pri čemu su glavni razmatrani parametri bili različite šema ojačanja i različiti nivoi dugotrajnog opterećenja. Nanešeno opterećenje održavano je konstantnim u periodu od 1 godine, a kretalo se u granicama od 59 do 78% graničnog opterećenja neojačane grede. Ovako visoke vrijednosti su primjenjene da bi se utvrdilo maksimalno dugotrajno opterećenje koje može biti nanijeto, a da ne dođe do loma usljed tečenja. Autori su došli do zaključka da, pri navedenom nivou opterećenja, ojačane grede doživljavaju manje dugotrajne deformacije nego neojačane. Takođe je zaključeno i da spoljašnje ojačanje povećava graničnu nosivost grede, smanjuje širinu prslina i redukuje njihovo širenje, ali da nema značajan uticaj na dugotrajne deformacije ojačanih greda.
- Ispitivan je uticaj pritisnute čelične armature i zaključeno je da je ona veoma efikasna u smanjenju dugotrajnih deformacija prostih greda. Njen uticaj je izraženiji kod betona normalne čvrstoće, nego kod betona visoke čvrstoće [63].
- Autori rada [64] razvili su teorijski model ponašanja FRP ojačanih konstrukcija na savijanje, primjenom metode konačnih elemenata. Oni su došli do zaključka, koji je kontradiktoran sa prethodnim eksperimentalnim istraživanjima, a to je da različita debljina lamele nema uticaj na vremensko ponašanje ojačanih konstrukcija.
- Proučavano je vremenski zavisno ponašanje armirano-betonskih

konstrukcija, spolja ojačanih FRP lamelama. Zaključeno je da povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tečenja [65]. 3.7. Opšti zaključak o dosadašnjim istraživanjima Na osnovu brojnih eksperimentalnih istraživanja, sprovedenih u posljednje dvije decenije, došlo se do sljedećih zaključaka: • Spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda može se uspješno sprovesti upotrebom CFRP traka i lamela. • Kod primjene lamela dokazano je da, sa povećanjem broja slojeva u lameli, raste i nosivost i krutost. • Značajna poboljšanja u pogledu nosivosti postignuta su poprečnim ojačanjem krajeva FRP trake, pa se odvajanje ojačanja događalo neposredno pred konačni lom. Utvrđeno je povećanje nosivosti u odnosu na gredu sa podužnim ojačanjem, i to 12- 35% kod ojačanja greda pravougaonog presjeka, odnosno 5-50% kod ojačanja T-greda i I-nosača. • Eksperimentalno je utvrđen pad duktilnosti u gredama ojačanim CFRP lamelama, koji je iznosio i do 70% u odnosu na kontrolnu gredu. Međutim, ovaj nedostatak je umanjen sistemom ankerovanja na krajevima lamela, pomoću traka U-profila. Na taj način se izbjegava odvajanje lamele od betonske podloge. • U pogledu šeme prslina, rasprostranjenije ali manje prsline uočene su kod ojačanih u odnosu na neojačane grede, a taj efekat je još veći kod ankerovanja sistemom U-traka. Na mehanizam loma utiču brojni parametri, pa je naročita pažnja posvećena ispitivanju njihovog uticaja. Zaključeno je sljedeće: • Povećanjem debljine FRP trake za ojačanje, kao i debljine lijepka, povećava se granična nosivost trake. • Porast granične nosivosti biće izazvan i povećanjem modula elastičnosti kako betona, tako i FRP materijala, dok zanemarljiv uticaj ima povećanje modula elastičnosti lijepka. Istražujući ponašanje ojačanih konstrukcija u toku vremena, autori su došli do sljedećih zaključaka: • Spoljašnje ojačanje povećava graničnu nosivost grede, smanjuje širinu prslina i redukuje njihovo širenje. Međutim, ono nema značajan uticaj na tečenje pritisnutog betona, odnosno na dugotrajne deformacije ojačanih greda pri radnim nivoima napona, ali ima uticaja na konačno tečenje pri višim nivoima napona. • Povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tečenja. • Trenutna deformacija je proporcionalna nivou napona, a dugotrajna je obrnuto proporcionalna čvrstoći betona na pritisak. • • Porast deformacija je intenzivniji u početku opterećivanja i vremenom se redukuje. Nivo nanešenog dugotrajnog opterećenja, kao i pritisna čvrstoća betona su glavni faktori koji utiču na nivo tečenja, a samim tim i na dugotrajne deformacije. 4. SOPSTVENO

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE 4.1. Uvod Ovaj rad nastao je kao rezultat eksperimentalnog istraživanja, sprovedenog u cilju utvrđivanja doprinosa FRP materijala povoljnijem ponašanju ojačanih konstrukcija u eksploatacionim uslovima. Pregledom literature utvrđeno je da su podaci o eksperimentalnom ispitivanju ojačanih uzoraka realnih dimenzija veoma oskudni i da se najveći broj ispitivanja vršio na umanjenim modelima, uglavnom pravougaonog poprečnog presjeka. Ove činjenice su opredijelile pravac sopstvenog istraživanja. U tu svrhu je i izvršeno ojačavanje uzoraka napravljenih prije više od 10 godina. U pitanju su armirano-betonske grede T presjeka, realnih dimenzija, ojačane karbonskim trakama na donjoj, zategnutoj ivici rebra. One su ispitivane na dejstvo koncentrisanog kratkotrajnog i ravnomjernog kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja. Utvrđen je uticaj oba tipa opterećenja kao i različitih dužina ojačanja, kako na mehanizam loma ispitivanih uzoraka, tako i na redukciju njihovih graničnih nosivosti, veličine ugiba, širine prslina i sl. Donešeni zaključci su upoređeni sa istraživanjima drugih autora. Dobijeni su korisni rezultati koji, pored ostalog, mogu dobro poslužiti u savremenoj inženjerskoj praksi. 4.2. Materijali upotrijebljeni u eksperimentu 4.2.1. Karakteristike upotrijebljene armature Za armiranje eksperimentalnih modela u podužnom pravcu korišćena je armatura B500B, a u poprečnom uzengije GA 240/360. Upotrijebljeni betonski čelik je uzet iz Željezare „Nikšić“. U tabeli 4



**.1. su prikazane osnovne** geometrijske i fizičko **-mehaničke karakteristike** upotrijebljenih **profila. Tabela 4.1 Karakteristike** upotrijebljenog **betonskog čelika**

2

B500B  $\varphi$  (mm)  $E_a$  (GPa)  $\sigma_v$  (MPa)  $\sigma_{max}$  (MPa)  $\delta_m$  (%) 22 205 515 721 17.3 GA 240/360  $\varphi$  (mm)  $E_a$  (GPa)  $\sigma_v$  (MPa)  $\sigma_{max}$  (MPa)  $\delta_m$  (%) 6 207 252 383 25.0 Karakteristični radni dijagram ( $\sigma_a - \epsilon_a$ ) upotrijebljenog betonskog čelika prikazan je na slici 4.1. Ovaj dijagram dobijen je ispitivanjem na statistički mjerodavnom uzorku, uzimajući u obzir probabilistički pristup utvrđivanja fizičko-mehaničkih karakteristika materijala. Veličina statističkog uzorka je  $n=15$ , za određenu vrstu betonskog čelika. 800 700 600 napon (MPa) 500 400 300 200 100 0  $\sigma - \epsilon$  dijagram 0 3 6 9 dilatacija (%) 12 15 18  $\sigma$  (MPa) 0 470 492 515 628 685 711 721  $\epsilon$  (%) 0 2.3 2.5 3.52 6.0 8.75 11.2 17.3 Slika 4.1 Karakteristični radni dijagram čelika B500B ( $\varphi$  22mm) 4.2.2. Karakteristike upotrijebljene karbonske trake

**Geometrijske i mehaničke karakteristike** karbonske trake date **su u tabeli 4 .2. Tabela 4**

94

**.2 Karakteristike**

upotrijebljene karbonske trake Vrsta materijala Dimenzije poprečnog presjeka (debljina / širina) (mm) Dužina trake (m) Čvrstoća na zatezanje (MPa) Modul elastičnosti (GPa) Sadržaj vlakana (%) CFRP traka 1.2 / 50 4 ili 6 3300 165 65-70 Građevinska kompanija „Sintek“ iz Skoplja, Republika Sjeverna Makedonija, izvršila je pripremu betonske površine, nabavku traka i njihovo postavljanje. Slika 4.2 Rolna CFRP trake 4.2.3. Karakteristike komponenti betonske mješavine 4.2.3.1. Agregat za spravljanje betona Za izradu betonske mješavine korišćen je agregat iz rijeke Gračanice, sa separacije „Mehanizacija i programat“, Nikšić.

**Agregat je ispiran, drobljen i separisan u** četiri **frakcije (0/4, 4/8, 8/16 i 16/32)** **u fabrici** **betona. Za svaku frakciju agregata,** prije **proizvodnje betonske** mješavine, **uzimani su** **reprezentativni uzorci i vršena su standardna ispitivanja fizičko-mehaničkih** karakteristika **agregata.**

2

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava agregata, kao i receptura za spravljanje betonske mješavine prikazani su na slici 4.3. Prolaz u (%) kroz sito u (mm) 0.125 0.25 0.5 1 2 4 8 16 31.5 63 Oznaka frakcije 0 - 4 7.15 13.26 31.15 52.15 76.5 100 100 100 100 100 4 - 8 0 0.72 15.62 96.55 100 100 100 8 - 16 0 0 0.16 8.75 100 100 100 16 - 32 0 0 2.5 8.55 100 100 Frakcije (%) 0 - 4 35 2.50 4.64 10.90 18.25 26.78 35.00 35.00 35.00 35.00 4 - 8 15 0.11 2.34 14.48 15.00 15.00 8 - 16 20 0.03 1.75 20.00 20.00 20.00 16 - 32 30 0.75 2.57 30.00 30.00 Mješavina 100 2.50 4.64 10.90 18.25 26.88 37.38 51.98 72.57 100 100 Granične krive 1 2 4 8 14 23 38 62 100 100 4 8 17 28 37 47 62 80 100 100 100 Prolaz kroz sito (%) 90 80 70 Granulometrijska kriva mješavine 60 50 40 Granične krive 30 20 10 0 0.125 0.25 0.5 1 2 Otvor sita (mm) 4 8 16 31.5 63 Slika 4.3 Granulometrijski sastav mješavine agregata

**Rezultati ostalih karakteristika upotrijebljenog agregata prikazani su u tabeli 4 .3.**

2

Tabela 4.3 Karakteristike upotrijebljenog riječnog

agregata Frakcije agregata (mm) 0-4 4-8 8-16 16-32 Specifična masa (kg/

2

m3) Zapreminska masa u rastresitom stanju (kg/m<sup>3</sup>) 2670 2685 2685 2700 Zapreminska masa u zbijenom stanju (kg/m<sup>3</sup>) 1490 1490 1380 1408 1840 1700 1670 1650 Upijanje vode (%) 0.25 0.15 0.15 0.10

Oblik zrna po Fery-u 0. 37 Sadržaj slabih zrna nema Sadržaj grudvi gline nema Sadržaj lakih čestica nema Sadržaj organskih materija nema Habanje po Los Angeles-u 22.0 Drobljivost u cilindru 24.0 Sadržaj čestica ispod 0.

2

09 mm 4.50 0.10 0.10 0.05 4.2.3.2. Cement za spravljanje betona

Cement koji je upotrijebljen za spravljanje betonske mješavine, za betoniranje eksperimentalnih modela, uzet je od proizvođača cementa „CEMEX“, Republika Hrvatska, sa oznakom

2

CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N.

Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika upotrijebljenog cementa prikazani su u tabeli

2

4.4. Za spravljanje 1 m<sup>3</sup> betona dozirana je količina cementa od 360 kg sa vodocementnim faktorom  $\omega = 0.50$ . Tabela 4.4 Karakteristike upotrijebljenog

cementa Fizičko-mehaničke karakteristike cementa Voda za standardnu konzistenciju (%) 27. 6 Početak vezivanja (minuta) 190 Kraj vezivanja (minuta) 270 Stalnost zapremine (da/ne) Finoća mliva po Blaine-u (cm<sup>2</sup> /gr) da 4000 Čvrstoća pri pritisku poslije 2 dana (MPa) 23.0 Čvrstoća pri pritisku poslije 28 dana (MPa)

2

48.0 4.2.3.3. Voda za spravljanje betona Upotrijebljena voda

za spravljanje betonske mješavine za betoniranje eksperimentalnih modela uzeta je iz gradskog vodovoda

2

Nikšić. 4.2.4. Karakteristike upotrijebljenog betona Za izradu eksperimentalnih modela korišćen je beton srednje klase čvrstoće. Karakteristični radni dijagram ( $\sigma - \epsilon_b$ ) upotrijebljenog betona prikazan je na slici 4.4. Usvojeni dijagram dobijen je obradom rezultata ispitivanja na 6 cilindričnih uzoraka serije I. Rezultati ispitivanja uzoraka obje serije, kao i radni dijagram betona za seriju II dati su u Prilogu E. 40  $\sigma$ - $\epsilon_b$  dijagram  $\sigma$  (MPa) 30 20 10 0 0 0.5 1 1.5  $\epsilon$  (%) 2 2.5 3  $\sigma$  (MPa) 0 7.14 14.29 21.43 25.00 28.57 32.14 36.02  $\epsilon$  (%) 0 0.22 0.46 0.75 1.00 1.41 1.90 2.50 Slika 4.4 Karakteristični radni dijagram betona 4.3. Eksperimentalni modeli Za ispitivanje nosivosti izrađeno je deset armirano-betonskih uzoraka sistema proste grede, raspona 7.5 m. Grede su T-presjeka, visine 43 cm, izrađene od betona klase C25/30. Slika 4.5 Poprečni presjek ispitivanih uzoraka (u cm) Za armiranje uzoraka upotrijebljena je rebrasta čelična armatura B500B, i to podužna prečnika 22 mm u zategnutoj zoni i 12 mm u pritisnutoj zoni, dok su uzengije bile prečnika 6 mm, postavljene na rastojanju od 10 cm (slika 4.5). Spravljanje betona je izvršeno u fabrici betona „Mehanizacija i programat“ - Nikšić, na čijem je platou izvršeno betoniranje greda i svih kontrolnih betonskih uzoraka. Grede su betonirane u dvije serije sa razmakom od 7 dana. Iz svake serije uzeta su po 42 kontrolna uzorka (12 kocki ivice 15 cm, 6 cilindara dim. 15/15 cm, 18 cilindara dim. 15/30 cm i 6 prizmi dim. 10/10/40 cm). Svi kontrolni uzorci betonirani su u

**standardnim čeličnim kalupima, a za ugrađivanje betona u kalupe korišćen je pervibrator sa prečnikom igle od 25 mm.**

2

Betonska mješavina

**za izradu modela i kontrolnih uzoraka projektovana je sa istim karakteristikama u pogledu granulometrijskog sastava, vrste i količine cementa, kao i vodocementnog faktora.** Konzistencija svježeg **betona kontrolisana je** za svaku mješavinu **na** mjestu ugrađivanja **i konstatovana je plastična konzistencija sa** slijeganjem **konusa**

2

od oko 12 cm. Njegovanje svih greda i kontrolnih betonskih uzoraka obavljeno je na isti način. Nakon ugrađivanja,

**beton je održavan 24 sata u uslovima visoke relativne vlažnosti i na temperaturi od oko**

2

20oC, poslije

**čega su modeli oslobađani od bočnih oplata. U narednih 5 dana nastavljeno je**

2

njegovanje, uz održavanje visoke vlažnosti, pri čemu su registrovane manje varijacije temperature spoljašnje sredine. Grede su, nakon 28 dana starosti, zajedno sa kontrolnim betonskim uzorcima, dopremljene u Laboratoriju za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Podgorici. Tamo su, opterećene sopstvenom težinom, čuvane do ispitivanja. 4.4.

Tehnologija izvođenja radova na ojačanju Proračunom je ustanovljeno da elementi ne posjeduju dovoljnu količinu armature za prihvatanje dodatnih uticaja i da ih treba ojačati. Rješenje je dato u vidu ojačanja karbonskim trakama na donjoj zategnutoj strani presjeka. Karbonske trake praktično ne povećavaju visinu presjeka, a na veoma efikasan način povećavaju njegovu nosivost. Na ovaj način se osim povećanja visine presjeka izbjegava i ugrađivanje dodatne armature koju bi nakon obijanja betona trebalo povezati sa postojećom armaturom. Procedura ojačavanja podrazumijeva: pripremu površine, lijepljenje karbonskih traka na pripremljene površine i kontrolna ispitivanja. Uslovi koje je potrebno ispuniti prije lijepljenja karbonskih traka: • Površine na koje se lijepe trake moraju biti ravne ili blago talasaste - ohrapvljene pjeskarenjem ili brušenjem, što se postiže njihovom prethodnom pripremom. • Pri primjeni

**karbonskih traka postoji i uslov da se one mogu** lijepiti **samo za betonske elemente dovoljno visokih mehaničkih karakteristika.**

3

Zato je potrebno, prije nanošenja lijepka, primijeniti tzv. „pull-off“ test na minimalno tri uzorka, kojim se utvrđuje stvarna čvrstoća betona na zatezanje kao i kvalitet pripremljene podloge. Čvrstoća dobijena na ovaj način treba da iznosi minimalno 1.5 MPa. •

**Površinska vlažnost betona pri** lijepljenju **karbonskih traka može da iznosi najviše 4%. • Radovi** na lijepljenju smiju **se izvoditi samo na temperaturama**

3

većim od 100C. • Podrazumijeva se primjena samo materijala (traka i lijepkova) koji imaju potvrdu podobnosti za datu namjenu. U obzir dolaze

**isključivo materijali koji su garantovano kompatibilni, što znači da se mogu** primjenjivati **samo** **trake i** lijepkovi **istog proizvođača.**

74

U ovom eksperimentu korišćen je materijal firme „SINTEK“ iz Skoplja, Republika Sjeverna Makedonija. Karakteristike upotrijebljenog materijala date su u njihovim atestima. Utvrđeno je da je konstrukciju potrebno prethodno izravnati, pa je na prethodno očišćenu i izglacanu površinu (slika 4.6), nanijet sloj za izravnavanje (leveling mortar S2), proizvod firme „Sintek“ iz Skoplja (slika 4.7). Riječ je o trokomponentnom epoksidnom malteru, namijenjenom za pripremu i nivelisanje betonskih i armirano- betonskih podloga, prije ojačavanja karbonskim trakama. Slika 4.6 Priprema betonske podloge (brušenje) Nakon nanošenja ove podloge izvršen je „pull-off“ test (slika 4.8). Prosječna čvrstoća betona na zatezanje dobijena na 3 uzorka iznosila je 1.71 MPa, čime je potvrđen dobar kvalitet betona i ostvaren uslov za primjenu FRP ojačanja. Slika 4.7 Nanošenje sloja maltera za nivelaciju Slika 4.8 Aparatura za izvođenje testa i izgled uzorka nakon loma Na sloj za izravnavanje nanijet je sloj lijepka (primer C), takođe proizvod firme „Sintek“ (slika 4.9). To je dvokomponentni materijal na bazi polimer cementa, koji ima ulogu da obezbijedi dobro prianjanje karbonske trake za beton. Zatim je na tako pripremljenu betonsku površinu postavljena karbonska traka, širine 50 mm i debljine 1.2 mm. Ona je zalijepljena na rebro T-presjeka, sa donje strane, i to u središnjem rasponu, na dužini od 4 m, odnosno 6 m, bez

upotrebe poprečnog ukrućenja (slika 4.10). U toj zoni gdje je koncentracija najvećih napona, uočene su najveće prsline pri ispitivanju kontrolnog, neojačanog uzorka na kratkotrajno opterećenje. Slika 4.9 Nanošenje sloja lijepka na karbonsku traku Slika 4.10 Postavljanje karbonske trake Trake su postavljane počevši sa jednog kraja ka drugom, nanošenjem dovoljnog pritiska pomoću gumenog valjka kako bi se istisnuo višak lijepka, koji je zatim uklonjen sa traka. 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 [32]. 4.5. Tok eksperimenta Geodetsko nivelisanje vršeno je dan prije ispitivanja odgovarajućeg modela. Eksperimentalni modeli su zatim postavljani na betonske oslonce (slika 4.11). Nakon toga vršeno je postavljanje mjernih instrumenata prema utvrđenoj šemi. Slika 4.11 Postavljanje na oslonce ojačanih armirano-betonskih greda za ispitivanje Za ispitivanje jednog modela bio je potreban jedan dan, pri čemu je nanošenje opterećenja do loma trajalo oko 4 sata, pa se može smatrati da je aplicirano opterećenje kratkotrajnog karaktera. Prije

**početka eksperimenta** vršeno je tzv. **nulto** očitavanje **na instrumentima pri tehničkom** 14  
**nivou opterećenja od**

5 kN. Nakon toga opterećenje je nanošeno u početku u inkrementima od 10 kN, a zatim je, u fazi prije loma, ovaj inkrement smanjen na 5 kN, čak i na 1 kN u nekim slučajevima. Na ovaj način dobija se dobar pregled stanja napona i deformacija ispitivanog modela. Brzina nanošenja opterećenja iznosila je oko 2 kN/s. Mjerenja su vršena oko 5 minuta poslije nanošenja opterećenja radi eventualnog stabilizovanja deformacija. S obzirom na dužinu trajanja opterećenja, pri kasnijim inkrementima je po potrebi vršena korekcija aplicirane sile pritiska. Registrovan je maksimalni pad sile od 0.25% u posmatranom intervalu, što se kod ovog ispitivanja može zanemariti. Svi podaci su direktno unošeni u računar u pripremljene tabele korišćenjem programskog paketa Excel. Tako je bilo omogućeno vršenje kontrole izmjerenih vrijednosti tokom eksperimenta. Svi izmjereni podaci su čuvani u štampanoj i elektronskoj formi na eksternim uređajima. Istog dana vršena je demontaža polomljenog uzorka (slika 4.12), kontrola ispravnosti uređaja i mjerne tehnike za ispitivanje, kao i sve potrebne pripreme za postavljanje sljedeće grede za ispitivanje. Na ovaj način ispitana su 2 kontrolna i 4 ojačana uzorka. Slika 4.12 Demontirani uzorak nakon loma Opterećenje na preostale četiri grede zadržano je konstantnim tokom 6 mjeseci. U ovom periodu vršena su stalna očitavanja potrebnih podataka radi proučavanja efekata tečenja betona, prema tačno utvrđenom programu za sve grede. Ova mjerenja su bila intenzivnija u prvoj nedjelji i prvom mjesecu, dok je registrovanje podataka kasnije značajno redukovano, uglavnom na 7 ili 14 dana. Nakon isteka 6 mjeseci izvršena je analiza dobijenih rezultata. Kako je utvrđeno da primjenjeni nivo opterećenja nije značajnije uticao na deformacije tečenja, samo su dvije grede ispitane do loma, dok su preostale dvije grede dodatno opterećene većim nivoom opterećenja u trajanju od 4 mjeseca. Nakon isteka tog perioda nastavljeno je opterećivanje predmetnih greda do loma, kao kod kratkotrajno ispitivanih modela, iz razloga sigurnosti opreme i osoblja. Gabariti predmetnih uzoraka i njihova težina (1.2 tone), kao i specifičan teret kojim su opterećivane prilikom ispitivanja (tegovi po 500 kg) iziskivali su dodatan oprez kod svih učesnika u eksperimentu, posebno kada se greda približavala lomu. Međutim i sam proces postavljanja uzoraka na oslonce, zatim nanošenje opterećenja, kao i demontaža uzoraka nosili su određeni stepen rizika. 4.6. Program eksperimentalnog istraživanja Eksperimentalno istraživanje sprovedeno je u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Podgorici, korišćenjem postojeće opreme. Programom je predviđeno ispitivanje nosivosti deset armirano-betonskih uzoraka sistema proste grede, raspona 7.5 m. Dvije grede nijesu ojačavane i korišćene su kao kontrolne, a preostalih osam su ojačane sa donje strane karbonskim trakama. Program

eksperimentalnih istraživanja je sadržao sljedeće aktivnosti: • Prethodna ispitivanja koja se odnose na provjeru funkcionisanja kompletne opreme, mjerne tehnike i uređaja za ispitivanje, kao i na provjeru mogućnosti realizacije ovakvog eksperimenta uključujući i ispitivanje vremenskih deformacija. •

**Ispitivanje serije standardnih kontrolnih betonskih** uzoraka **(kocke, cilindri i prizme)** **pod** uticajem **kratkotrajnog opterećenja za** određivanje **naponsko-deformacijskih karakteristika betona.** • **Ispitivanje serije standardnih kontrolnih** uzoraka **armature koja** je korišćena **u eksperimentu za** određivanje **naponsko-deformacijskih karakteristika.**

2

• Ispitivanje serije standardnih kontrolnih cilindara pod uticajem dugotrajnog opterećenja za određivanje naponsko-deformacijskih karakteristika betona u toku vremena. • Ojačavanje karbonskim FRP trakama 8 armirano-betonskih greda realnih dimenzija. • Ispitivanje 6 uzoraka pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja do loma (2 kontrolne i 4 ojačane grede). • Ispitivanje 4 uzorka na uticaj dugotrajnog opterećenja u trajanju od 6 mjeseci za sve grede i dodatna 4 mjeseca za dvije grede koje su naknadno opterećene većim nivoom opterećenja. Za svaku armirano-betonsku gredu utvrđen je zaseban program eksperimentalnog ispitivanja, koji je sadržao

**dispoziciju modela,** mjernih **mjesta i opterećenja, kao i način registrovanja podataka.**

2

Svi modeli pod dejstvom kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja ispitani su u Laboratoriji

**za materijale i konstrukcije** Građevinskog **fakulteta u Podgorici.** **Sva kontrolna** mjerenja **na** uzorcima **od betona i armature obavljena su u istoj laboratoriji.** 4.6 .1.

2

Aparatura za ispitivanje 4.6.1.1. Aparatura za ispitivanje kontrolnih uzoraka Sva ispitivanja kontrolnih betonskih uzoraka i uzoraka armature sprovedena su prema procedurama koje su utvrđene u naučno-istraživačkom programu. Za utvrđivanje

**mehaničkih karakteristika na kontrolnim betonskim** uzorcima **(čvrstoća pri pritisku, čvrstoća na** **zatezanje pri** cijepanju, **radni dijagram, modul elastičnosti) korišćena je hidraulična presa nosivosti 250 tona (slika**

2

4.13a). Slika 4.13 Laboratorijska oprema: a) hidraulična presa; b) kidalica Za utvrđivanje

**mehaničkih karakteristika na kontrolnim uzorcima armature (granica velikih izduženja, granica kidanja,** ukupno relativno izduženje, **radni dijagram čelika, modul elastičnosti) korišćena je**

2

### laboratorijska kidalica kapaciteta 100 tona (slika

4.13b). Ispitivanje reoloških karakteristika očvrstlog betona sprovedeno je nestandardnim postupkom u realnim termo-higrometrijskim uslovima koji su vladali tokom ispitivanja u laboratoriji Građevinskog fakulteta. Pri ispitivanju tečenja korišćeni su posebni uređaji kojima se održava konstantna sila pritiska tokom vremena (slika 4.14). Slika 4.14 Uređaj za ispitivanje tečenja betona Uređaji su konstruisani na principu dvostruke poluge, tako da se dejstvo mrtvog tereta multiplicira do projektovane vrijednosti sile pritiska pri kojoj se prati deformacijsko stanje ispitivanog uzorka. Uređaj je univerzalan i korekcijama oslonačkih zona mogu se ispitivati i različiti konstrukcijski elementi. Laboratorija raspolaže sa 12 ovakvih uređaja kod kojih se masom do 1000 kg može aplicirati sila pritiska do 1500 kN. Ispitivanje koeficijenta tečenja betona izvršeno je na po 6 uzoraka oblika cilindra iz obje serije. Mjerenje dilatacija obavljeno je mehaničkim dilatometerima osjetljivosti 1/1000 mm, na tri pozicije cilindra na mjernoj bazi od 150 mm. Istovremeno, preko mehaničkog mjerača sile sa komparaterima, koji je prethodno baždaren u hidrauličnoj presi, kontrolisana je veličina spoljašnjeg opterećenja. Ispitivanje tečenja betona obavljeno je pod opterećenjem od 55-85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, što predstavlja relativno veliko eksploataciono opterećenje. Ono je na sve ispitivane cilindre nanijeto pri velikoj starosti i održavano je konstantnim tokom narednih 10 mjeseci.

4.6.1.2. Aparatura za nanošenje kratkotrajnog opterećenja Uzorci su postavljeni na betonske oslonce, na rasponu od 7.5 metara. Opterećenje je nanošeno na dva načina: kao koncentrisano, preko hidraulične prese (slika 4.15) i kao ravnomjerno, preko čeličnih tegova težine 5 kN (slika 4.16). Koncentrisano opterećenje nanošeno je na grede kao statičko, monotono rastuće od nule do loma, u inkrementima. Brzina nanošenja svakog inkrementa bila je 5 kN/min. Slika 4.15 Ispitivanje greda opterećenih koncentrisanom silom Nanošenje drugog tipa opterećenja sprovedeno je u koracima od po 10 kN, postavljanjem tegova od po 5 kN simetrično, počevši od sredine grede ka njenim krajevima. Ovo opterećenje bilo je uglavnom ravnomjerno podijeljeno, jer je neposredno prije loma na sredinu raspona grede nanošena dodatna koncentrisana sila, u inkrementima, do loma. Ispitivanje je izvršeno na ovaj način zbog bezbjednosti i ograničenja opreme i sistema za ispitivanje ovih greda. Slika 4.16 Ispitivanje greda pod dejstvom ravnomjernog opterećenja

4.6.1.3. Aparatura za nanošenje dugotrajnog opterećenja Isti princip opterećivanja sproveden je kao i u slučaju ispitivanja pod dejstvom kratkotrajnog ravnomjernog opterećenja.

4.6.2. Mjerna tehnika

4.6.2.1. Mjerenja na kontrolnim uzorcima Eksperimentalna istraživanja praćena su ispitivanjem serije standardnih kontrolnih uzoraka za utvrđivanje mehaničkih karakteristika ugrađenog betona i armature za svaku seriju greda, i to: za

**beton: – čvrstoća betona pri pritisku, – čvrstoća betona na zatezanje pri** cijepanju, – **modul**  
**elastičnosti betona, – radni dijagram betona,**

2

– koeficijent tečenja betona; za armaturu: – granica razvlačenja, – čvrstoća pri zatezanju, – modul elastičnosti – standardno izduženje  $\delta$  (%) na mjernoj bazi od  $10\phi$ , –

**radni dijagram čelika.** Naznačena **ispitivanja** vršena **su** prema **posebnom programu, koji**  
**je** utvrđen prije **početka**

2

ispitivanja armirano-betonskih greda i kontrolnih betonskih uzoraka. Ovaj program istraživanja je realizovan u cjelini. Najvažnije karakteristike betona, dobijene ispitivanjem kontrolnih betonskih uzoraka, prikazane su u tabeli 4.5. Tabela 4.5 Fizičko-mehaničke karakteristike betona Karakteristična vrijednost ispitivanog svojstva betona Oblik / broj uzoraka I Serija II čvrstoća betona pri pritisku  $f_p$  (MPa) kocka /  $n=12$  36.02 41.27 čvrstoća betona na čisto zatezanje  $f_z$  (MPa) prizma /  $n=6$  3.71 4.04 čvrstoća betona na zatezanje pri savijanju  $f_{zs}$  (MPa) prizma /  $n=6$  3.66 3.97 čvrstoća betona na zatezanje pri cijepanju  $f_{zc}$  (MPa) cilindar /  $n=6$  4.14 4.43 modul elastičnosti betona  $E_b$  (GPa) cilindar /  $n=6$  32.45 36.05 Najvažnije karakteristike upotrijebljenog betonskog čelika i njegov radni dijagram, dobijeni ispitivanjem kontrolnih uzoraka, prikazani su na slici 4.1 i u tabeli 4.1 (poglavlje 4.2.1). Tečenje betona ispitivano je prema šemi na standardnim uzorcima, u istim laboratorijskim uslovima u kojima su bile ispitne grede (slika 4.17). Rezultati mjerenja koeficijenta tečenja prikazani su u tabeli 6.2. i u Prilozima B3 i B4. Slika 4.17 Mjerenja koeficijenta tečenja na kontrolnim cilindrima 4.6.2.2. Mjerenja na gredama Za svaku gredu su vršena sljedeća mjerenja: • Dilatacije u betonu, deformetrom „Pfender“ prema utvrđenoj šemi i pomoću mjernih traka. • Dilatacije u karbonskoj traci po njenoj cijeloj dužini pomoću mjernih traka. • Deformacije grede (ugibi) komparaterima prema utvrđenoj šemi. • Ugao rotacije na krajevima grede pomoću klinomjera prema utvrđenoj šemi. • Mjerenje širine prslina za svaki inkrement sile. Mjerenja su vršena nakon nanošenja opterećenja u inkrementima, sve do loma. Tri ugibomjera, osjetljivosti 1/1000 mm, korišćena su za mjerenje ugiba, od kojih jedan postavljen u sredinu raspona, a ostali na  $\approx 250$  cm od oslonaca (slika 4.18). Za mjerenje dilatacija u betonu korišćen je mehanički deformetar tipa „Pfender“, preciznosti 1/1000 mm. Napravljena je šema mjernih mjesta, na međusobnom rastojanju od 100 mm (slika 4.18). Za fiksiranje mjernih mjesta na površini betona korišćen je specijalni dvokomponentni lijepak proizvođača „Hotinger“ iz Njemačke. Na pritisnutom betonu, na bočnim stranama flanše postavljena su po 4 mjerna mjesta, a na zategnutoj strani, uz donju ivicu rebra po 10 mjernih mjesta, tako da je ukupan broj mjernih mjesta iznosio 28. Na taj način postignuto je tzv. „opasivanje presjeka“, pri čemu

**jedan od dobijenih podataka** uvijek **predstavlja kontrolni na osnovu kojeg se može ustanoviti**  
**greška** izmjerenih **veličina.**

14

Prosječni rezultati mjerenja sa obje strane grede usvojeni su kao mjerodavni. Slika 4.18 Šematski prikaz ispitivane grede i mjerne aparature Za mjerenje dilatacija u betonu, u pogledu mjerne tehnike, korišćene su i mjerne trake tipa PL-120-11-3LT, proizvođača TML iz Japana. One su postavljene u obje zone betona - na pritisnuti dio ploče, kao i uz donju ivicu zategnute strane rebra. Tokom ovog ispitivanja mjerene su i dilatacije u karbonskoj traci, pa su za tu svrhu upotrijebljene mjerne trake tipa BFLA-5-8, istog proizvođača TML iz Japana (slika 4.19). Za očitavanje rezultata ispitivanja korišćen je TML uređaj – mjerni most TDS 303. Registrovan je prirast opterećenja, zajedno sa odgovarajućim deformacijama, kako bi se utvrdilo naponsko-deformacijsko ponašanje greda. Slika 4.19 Položaj mjernih traka na betonu i na karbonskim trakama Mjerenja rotacije oslonaca vršeno je klinomjerom postavljenim na jednom osloncu grede. Praćenje pojave i razvoja prslina vršeno je vizuelnim putem, dok je za njihovo mjerenje u kritičnim presjecima korišćena lupa tipa Zeiss, sa tačnošću od 0.025 mm (slika 4.20). Mapa prslina je propisno izvedena, za svaki inkrement, počevši od trenutka nastanka prve prslina pa sve do loma, dok je odgovarajuće opterećenje zapisivano na površini grede. Slika 4.20 Mjerenje širine prslina 4.6.2.3. Ostala mjerenja Vršeno je mjerenje početnih ugiba ispitivanih uzoraka u sredini raspona, nastalih usljed dejstva sopstvene težine. Mjerenja su izvršena neposredno prije nanošenja opterećenja. Rezultati mjerenja prikazani su u tabeli 4.6. Tabela 4.6 Početni ugibi greda Greda



Ugib (cm) 1.20 1.05 1.10 1.10 1.35 1.25 1.15 1.20 1.30 1.05 Vršeno je redovno mjerenje temperature i vlažnosti sredine u laboratoriji u kojoj su smješteni uređaji za ispitivanje i ispitni modeli, odnosno gdje je u cjelini obavljen eksperiment. Podaci o ovim parametrima dobijeni su instrumentima koji su bili u laboratorijskom neosunčanom dijelu na visini 1.20 m od kote poda. Podaci dobijeni u Hidrometeorološkom zavodu u Podgorici neznatno se razlikuju zbog odgovarajućih standardnih uslova mjerenja. Izmjereni direktni rezultati dilatacija tokom vremena na gredama, ukazuju na vrlo mala kolebanja dilatacija usljed promjena vlažnosti i temperature sredine, koja su očekivana s obzirom da se radi o starim modelima.

4.7. Rezultati ispitivanja 4.7.1. Rezultati ispitivanja greda opterećenih kratkotrajnim opterećenjem U tabeli 4.7 date su karakteristike predmetnih greda i rezultati dobijeni njihovim ispitivanjem. Tabela 4.7 Karakteristike greda ispitivanih na kratkotrajno opterećenje

Oznaka grede	Tip ojačanja	Vrsta opterećenja	Granična nosivost P (kN) / q (kN/m')	Granični momenat savijanja Mu (kNm)	c Porast graničnog momenta savijanja (%)	Ugib u (cm)	a Dilatacija u zategnutom betonu $\epsilon_{max}$ (‰)	Dilatacija u pritisnutom betonu $\epsilon_{max}$ (‰)	Dilatacija karbonske trake $\epsilon_{max}$ (‰)	Širina prslina $a_{max}$ (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 bravnomjerno	9.2 76.9 / 9.40 11.88 5.11 / 2.50	lom po betonu na savijanje
G4	CFRP (l=4m) bravnomjerno	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) bravnomjerno	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	U tabeli su prikazane maksimalne vrijednosti karakterističnih veličina za šest ispitivanih greda, a pojedinačni rezultati dati su u tabelama u Prilogu A. Dimenzije svih greda su bile iste, a osim dužine ojačanja variran je i način opterećivanja. Usljed toga javile su se značajne razlike u graničnim nosivostima, deformacijama ugibima, kao i tipu loma. Te razlike su naročito izražene u odnosu na kontrolne, neojačane grede, a takođe i između samih greda. U Prilogu A1 prikazani su rezultati mjerenja za sve ispitivane grede, dok su u Prilogu A2 dati samo obrađeni podaci za crtanje dijagrama. Svaka tabela Priloga A1 ima u zaglavlju oznaku modela sa datumom ispitivanja i izmjerenim termo-higrometrijskim parametrima. Zatim je prikazan raspon grede, dužina ojačanja i veličina nanijetog opterećenja. Pored podataka dobijenih mjerenjem i njihovom obradom, prikazana je i starost modela pri dugotrajnom ispitivanju. Iako se ovi podaci mogu prikazati u odgovarajućim grupnim tabelama, ovakva prezentacija je neophodna radi lakšeg sagledavanja pojedinih uticajnih parametara, karakteristika ispitivanih modela i podataka koji su dobijeni mjerenjem. Treba napomenuti da, zbog velikog obima podataka, nijesu obuhvaćeni svi inkrementi kako bi se na prikladan način prikazao dijagram sa odgovarajućim izmjerenim podacima. Ovi podaci se čuvaju u laboratoriji Građevinskog fakulteta u Podgorici i mogu biti uvijek na raspolaganju zainteresovanim istraživačima.				

4.7.2. Rezultati ispitivanja greda opterećenih dugotrajnim opterećenjem U tabeli 4.8 date su karakteristike predmetnih greda i rezultati dobijeni njihovim ispitivanjem. Prikazane su maksimalne vrijednosti karakterističnih veličina za četiri ispitivane grede, a pojedinačni rezultati dati su u tabelama u Prilozima B1 i B2. Dimenzije svih greda su bile iste, a osim dužine ojačanja variran je i nivo dugotrajnog opterećenja. Tabela 4.8 Karakteristike greda ispitivanih na dugotrajno opterećenje

Oznaka grede	Tip ojačanja	Vrsta opterećenja (nivo opterećenja)	Granična nosivost q (kN/m' + P (kN)	Granični momenat
--------------	--------------	--------------------------------------	-------------------------------------	------------------

savijanja  $M_u$  (kNm) c Porast graničnog momenta savijanja (%) Ugib  $u$  (cm) a Dilatacija u zategnutom betonu  $\epsilon_{max}$  (‰) Dilatacija u pritisnutom betonu  $\epsilon_{max}$  (‰) Dilatacija karbonske trake  $\epsilon_{max}$  (‰) Širina prslina  $a_{max}$  (mm) Tip loma G1b neojačana bravnomjerno 8+4 76.9 / 9.40 11.88 5.11 / 2.50 lom po betonu na savijanje G6 CFRP ( $l=6m$ ) bravnomjerno (55%) 10+34 134.0 74.30 9.1 8.34 1.72 7.12 1.20 lom po betonu na savijanje G7 CFRP ( $l=4m$ ) bravnomjerno (60%) 10+29 125.0 62.50 7.90 8.41 1.26 7.65 1.35 lom po zaštitnom sloju betona, a djelimično duž trake G8 CFRP ( $l=6m$ ) bravnomjerno (55%→75%) 10+28.5 121.0 60.99 11.60 10.18 1.64 8.04 1.55 lom po betonu na savijanje G9 CFRP ( $l=4m$ ) bravnomjerno (60%→85%) 10+26 117.0 54.70 9.80 9.43 1.23 7.45 1.75 lom po zaštitnom sloju betona, a djelimično duž trake a izmjerene vrijednosti date su za presjek sa prslinom b pretežno ravnomjerno opterećenje; nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost greda ojačanih trakom iste dužine ispitanih pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja c porast je dat u odnosu na kontrolnu gredu G1b

**5. ANALIZA REZULTATA DOBIJENIH DEJSTVOM KRATKOTRAJNOG OPTEREĆENJA**

**5.1. Granična nosivost greda** Granične nosivosti svih ispitanih greda, kao i njima odgovarajući momenti savijanja dati su u tabeli 4.7. Evidentan je porast graničnih momenata za sve grede u odnosu na kontrolne: 91-111% za dejstvo koncentrisanog i 55-68% za dejstvo ravnomjernog opterećenja (slika 5.1). Slika 5.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda Dakle, tip opterećenja ima očekivan uticaj na veličinu prirasta graničnih momenata u odnosu na kontrolne grede. Međutim, razlika u prirastu između ojačanih greda je veoma mala. Za dužinu trake 4 m prirast iznosi 5% u korist koncentrisanog opterećenja, odnosno 8% za dužinu trake 6 m. Za ravnomjerno opterećenje dobija se prirast 8% u korist duže trake, a za koncentrisano 11%. Ovim se potvrđuje zaključak rada [66] da dužina ojačanja nema značajnijeg uticaja na graničnu nosivost grede. U Prilogu F je prikazan postupak dimenzionisanja poprečnog presjeka armirano- betonske grede ojačane CFRP trakom, prema Pravilniku ACI 440.2R-08.

**5.2. Ugibi u sredini grede** Kontrolna greda G1a, ispitivana koncentrisanom silom, doživjela je značajan središnji ugib od približno 8 cm, pri relativno malom graničnom momentu. Pri tom istom momentu, ojačane grede G2 i G3 doživjele su ugibe od 2.1 i 1.1 cm, respektivno. Ove grede su imale malo smanjenje konačnih ugiba u poređenju sa kontrolnom gredom G1a ali usljed dejstva skoro dvostruko većeg graničnog momenta. Greda G4 je doživjela skoro isti ugib kao kontrolna greda G1b, dok je kod grede G5 prisutno povećanje ugiba od 18%, mada u oba slučaja pod uticajem značajno većeg graničnog momenta. Sa dijagrama 5.2. vidi se da su krive porasta ugiba za grede G2 i G4 skoro paralelne, kao i one za grede G3 i G5. Konačne vrijednosti ugiba imale su porast od 32% ( $l=4m$ ), odnosno 42% ( $l=6m$ ), za grede izložene ravnomjernom opterećenju. Veći ugibi (15-23%) registrovani su kod greda ojačanih dužim trakama. Slika 5.2 Veličine ugiba ispitanih greda

**5.3. Deformacije u betonu**

**5.3.1. Deformacije u zategnutom betonu** Dijagram dilatacija 5.3. formiran je na osnovu mjerenja na mjestima na kojima mjernom dužinom nije obuhvaćena vidljiva prslina, osim eventualnih mikroprslina koje nijesu uočene. Na dijagramu je evidentan uticaj spoljašnjeg ojačanja na smanjenje deformacija, naročito kod greda G2 i G3, opterećenih koncentrisanim opterećenjem. Slika 5.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona One se do nekog momenta od oko 50 kNm ponašaju skoro identično sa kontrolnom gredom G1a, nakon čega u toj gredi dolazi do velikog porasta dilatacija, pri neznatnom povećanju opterećenja. Nasuprot tome, u gredama G2 i G3 sa povećanjem opterećenja i pojavom prvih prslina dolazi do smanjenja prirasta dilatacija u zategnutoj zoni, iznad karbonske trake. Njihove konačne dilatacije razlikuju se za 25% u korist grede ojačane dužom trakom (G3), uz neznatnu razliku u njihovim graničnim momentima. Grede G4 i G5, opterećene ravnomjernim opterećenjem, ponašaju se takođe veoma slično, gotovo elastično do određene granice. Nakon toga, deformacije rastu mnogo brže u odnosu na opterećenje. Konačne deformacije greda G4 i G5 se takođe razlikuju za 25% u korist grede ojačane dužom trakom (G5). Kod greda G2 i G4, ojačanih trakama od 4m, konačne deformacije greda su skoro identične. Ovo važi i za grede G3 i G5, ojačane trakama dužine 6m. Smanjenje deformacija u odnosu na kontrolne grede je značajno, naročito pri upotrebi kraćih traka. Ono je

skoro nezavisno od tipa opterećenja i iznosi 1.6-2 puta kod greda opterećenih na dejstvo koncentrisanog opterećenja i 1.5-1.9 puta za dejstvo ravnomjernog opterećenja. Redukcija deformacija praćena je velikim porastom graničnih momenata u oba slučaja. 5.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu Iz dijagrama 5.4. je lako uočljivo da su dilatacije u pritisnutoj zoni zavisne od vrste opterećenja. Naime, sve tri grede koje su ispitane koncentrisanim opterećenjem (G1a, G2 i G3) ponašaju se slično: veliki prirast deformacija za mali prirast graničnog momenta. Slika 5.4 Dilatacije u pritisnutoj zoni betona Kod ojačanih greda, nakon dostizanja vrijednosti maksimalne dilatacije kontrolne grede G1a, tj. oko 7%, očigledan je porast smičućih napona u betonu, kada se skoro zaustavlja dalji prirast deformacija u pritisnutom betonu. Veza između sile i dilatacije je skoro linearna, a porast krajnje dilatacije iznosi samo 12%, odnosno 17%, za grede G2 i G3, opterećene koncentrisanim opterećenjem, u odnosu na krajnju dilataciju kontrolne grede G1a. Veličine dilatacija greda G2 i G3 su nekoliko puta veće nego dilatacije greda G4 i G5. Ove grede, opterećene ravnomjernim opterećenjem, doživljavaju izuzetno mali prirast dilatacija pri velikom prirastu graničnog momenta. Njihovo ponašanje je skoro identično, a krajnje dilatacije im se razlikuju za 20%. 5.3.3. Deformacije karbonske trake Slika 5.5. prikazuje deformacije u karbonskim trakama različitih dužina, koje nastaju za vrijeme opterećivanja ojačanih greda sa dva tipa opterećenja, kao i nakon rasterećenja. Može se zaključiti da su ove deformacije nezavisne od oba parametara - i od dužine trake i od tipa opterećenja. Najveće deformacije javile su se u sredini trake svih ispitivanih greda. Na krajevima traka deformacije su zanemarljive. Registrovane su značajne zaostale deformacije nakon rasterećenja, koje iznose 51-66% od veličine konačnih deformacija. Slika 5.5 Dilatacije u karbonskim trakama 5.4. Prslina u betonu Pojava i razvoj prslina su praćeni detaljno, a njihova mapa je propisno izvedena, za svaki inkrement, počevši od trenutka nastanka prve prslina pa sve do loma. Kod neojačane grede ispitane pod dejstvom koncentrisanog opterećenja prve prslina su se javile pri sili od 25 kN (kontrolna greda G1a), dok su se kod ojačanih greda one pojavile pri sili od 30 kN odnosno 40 kN (grede G3 i G2, respektivno). Prve prslina kod neojačane grede opterećene ravnomjernim opterećenjem javile su se pri sili od oko 20 kN (kontrolna greda G1b), dok su se kod ojačanih greda one pojavile pri sili od oko 40 kN (grede G4 i G5). Širina graničnih prslina se neznatno razlikuje kod svih ojačanih greda, dok je, u poređenju sa kontrolnom gredom G1a, značajno redukovana i to do 5.5 puta (greda G3). Širina prslina kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem bila je 20 - 45% veća nego kod greda pod uticajem koncentrisanog opterećenja. Šema prslina data je u Prilogu C1. Broj prslina kod ojačanih greda bio je očekivano veći. Razmak između prslina bio je 20 - 23 cm kod kontrolnih greda, 17 - 20 cm kod greda opterećenih koncentrisanim opterećenjem i 16 - 18 cm kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem. U graničnom stanju loma pod dejstvom koncentrisanog opterećenja evidentirane su kose prslina koje su očigledno posljedica prirasta smičućih napona. Naime, zbog značajne vrijednosti zatežuće sile u CFRP traci, došlo je do promjene naponsko-deformacijskog stanja u uskoj oblasti oko sredine grede, na dužini od oko 0.11 ≈ 75cm. 5.5. Mehanizam loma grede Analizom tipova loma u gredama G1a - G5 (tabela 4.7), jasno je da spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda mijenja njihov mehanizam loma. Izabrani geometrijski parametri, kao i njihovi relativni odnosi, imaju značajan uticaj na formiranje mehanizma loma. Spoljašnje ojačanje CFRP trakama dovodi do značajnog povećanja granične nosivosti na savijanje. To utiče na porast smičućih napona, koji se odražava na sliku mehanizma loma, koja se razlikuje od uobičajenih koje se javljaju kod ispitivanja na umanjenim uzorcima. Ispitivanje grede G4 je samo djelimično potvrdilo ranije zaključke iz radova [11], [33], [43], a koji se odnose na uticaj dužine ojačanja na tip loma. Autori ovih radova tvrdili su da će uzorci ojačani kraćom trakom prije doživjeti lom usljed njenog odvajanja u odnosu na uzorke ojačane dužom trakom. Prema njihovim istraživanjima, u slučaju kada se za ojačanja armirano-betonskih greda koriste duže trake, lom se dešava zbog iskorišćenja nosivosti trake i njenog pucanja. Slična situacija desila se i kod predmetnog ispitivanja, prilikom loma grede G4. Njega je izazvala kritična dijagonalna prslina (KDP) koja

se pojavila na kraju trake i koja je sa porastom opterećenja rasla i širila se ka sredini grede. Na taj način izazvala je djelimično odvajanje trake, i to uglavnom zajedno sa zaštitnim slojem betona (slika 5.6). Takođe je došlo do značajnog mrvljenja betona u pritisnutoj zoni, kao posljedica naglog loma. Slika 5.6 KDP kao uzročnik loma i izgled grede nakon loma U slučaju greda G3 i G5, ojačanih dužim trakama, došlo je do loma po betonu, pa nije u potpunosti iskorišćen kapacitet trake. Kada je u pitanju uticaj vrste opterećenja na tip loma, zaključci ovog istraživanja odstupaju od zaključaka prethodnih istraživanja. Naime, smatralo se da je u slučaju kraćih traka za ojačanje mehanizam loma greda sličan u oba slučaja opterećenja – odvajanje trake na krajevima. Armirano-betonske grede ojačane dužim trakama su se uglavnom bolje ponašale pod ravnomjernim opterećenjem nego pod koncentrisanim jer ono ne izaziva diskontinuitet u sili ploče duž raspona. Taj diskontinuitet je odgovoran za odvajanje ili pucanje FRP trake u središnjem rasponu pri koncentrisanom opterećenju, dok su uzorci opterećeni ravnomjernim opterećenjem doživljavali lom uglavnom usljed iskorišćenja nosivosti betona [40]. Kod predmetnog ispitivanja desila se obrnuta situacija, uzevši u obzir da je greda G2 ispitana na dejstvo koncentrisanog, a greda G4 na dejstvo ravnomjernog opterećenja.

### 5.6. Zaključna razmatranja

Nakon sprovedenog sopstvenog ispitivanja uzoraka izloženih dejstvu kratkotrajnog opterećenja, moguće je donijeti određene zaključke u vezi uticaja ispitivanih parametara.

#### 5.6.1. Granični momenat savijanja

Spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda dovelo je do značajnog povećanja graničnih momenata savijanja u odnosu na momente kontrolnih, neojačanih greda. Ovaj zaključak se posebno odnosi na grede izložene uticaju koncentrisanog opterećenja. Međutim, nijedan od dva razmatrana parametra (tip opterećenja i dužina ojačanja) nije imao značajniji uticaj na granične momente savijanja ojačanih greda. Proračun kapaciteta nosivosti poprečnog presjeka prema Pravilniku ACI 440.2R-08, ne daje zadovoljavajuće poklapanje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. Prosječni moment nosivosti dobijen eksperimentom je za 20% veći od računskog. Proračunom se pokazuje da je presjek predimenzionisan CFRP trakom, kod koje su naponi iskorišćeni svega oko 25%. Imajući u vidu da se u praktičnim rješenjima najčešće usvaja nešto veće ojačanje od sračunatog/potrebno, može se zaključiti da se korišćenjem ovog proračuna dobijaju zadovoljavajući rezultati koji su na strani sigurnosti.

#### 5.6.2. Ugibi

Ojačavanje greda CFRP trakama doprinosi redukciji veličine ugiba u poređenju sa kontrolnom gredom. Kod nekih greda konačni ugibi su dostigli ugibe kontrolnih greda, dok su kod drugih postojale varijacije u redukciji, ali koje su uvijek bile praćene značajnim porastom nosivosti kritičnog poprečnog presjeka. Veće vrijednosti konačnih ugiba zabilježene su kod greda ojačanih dužim trakama, kao i kod greda izloženih ravnomjernom opterećenju. Time je dokazana tvrdnja prethodnih istraživača da kraće ojačanje dopušta manje ugibe od dužih ojačanja [33].

#### 5.6.3. Deformacije

Ovim ispitivanjem dokazano je da spoljašnje CFRP ojačanje redukuje veličinu deformacija u zategnutom betonu u poređenju sa kontrolnom gredom, nezavisno od načina opterećivanja. Takođe je dokazano da duže ojačanje dopušta veće deformacije u zategnutom betonu, i to u istom iznosu (25%) za dejstvo oba tipa opterećenja. Stoga se može zaključiti da uticaj tipa opterećenja nije od većeg značaja kada je riječ o deformacijama u zategnutom betonu. Uticaj tipa opterećenja je očigledan u pritisnutom betonu, uzevši u obzir da su deformacije u gredama opterećenim koncentrisanim opterećenjem nekoliko puta veće od onih koje se javljaju u gredama opterećenim ravnomjernim opterećenjem. Razmatran je i uticaj dužine ojačanja na veličinu deformacija u pritisnutom betonu. Sa porastom dužine trake javlja se neznatna razlika u konačnim deformacijama, bez obzira na tip opterećenja. Deformacije u karbonskim trakama su veoma slične za sve grede, skoro nezavisne od uticaja razmatranih parametara.

#### 5.6.4. Prsline

Praćenjem razvoja prslina, potvrđen je zaključak prethodnih ispitivanja da spoljašnje ojačanje vrši značajnu redukciju širine prslina. Kao što se i očekivalo, broj prslina kod ojačanih greda bio je veći ali je njihova širina bila znatno manja. Kod neojačanih - kontrolnih greda širina i međusobni razmak prslina su u očekivanim granicama, dok su kod ojačanih greda one nešto niže od tih vrijednosti. Spoljašnje CFRP ojačanje takođe redukuje negativne efekte koje imaju

armaturne šipke velikih prečnika na propagaciju prslina. 5.6.5. Mehanizam loma Nakon završenog sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja na modelima u prirodnoj veličini i sprovedene analize rezultata, a naročito uticaja dužine ojačanja na tip loma, došlo se do zaključka da nije potrebno koristiti poprečna ukrućenja, kao ni povećavati dužinu trake jer nema naznaka da će doći do njenog potpunog odvajanja, kao što se dešavalo u ranijim eksperimentalnim istraživanjima [10], [31]. Takođe je zaključeno da je, u slučaju spoljašnjeg ojačavanja greda, dovoljno koristiti CFRP trake čija je dužina jednaka polovini grede, jer nema značajnih povećanja nosivosti pri ojačavanju dužim trakama. Ovo se odnosi na slučaj ispitivanja na savijanje prostih greda, kada se ne očekuje porast opterećenja koje bi povećalo granični momenat savijanja za više od 60%. Na osnovu svega navedenog, treba naglasiti da se ojačavanje armirano-betonskih greda određene starosti može izvršiti uspješno, brzo i jednostavno CFRP trakama, zahvaljujući njihovim dobrim karakteristikama i brojnim prednostima. Pri tome se održava zahtijevani nivo nosivosti i upotrebljivosti elementa koji se ojačava.

## 6. ANALIZA REZULTATA DOBIJENIH DEJSTVOM DUGOTRAJNOG OPTEREĆENJA

Problem granične nosivosti armirano-betonskih greda, pri dejstvu dugotrajnog konstantnog opterećenja, u uslovima nivoa napona od 55% do 85% čvrstoće na kratkotrajno opterećenje, bio je predmet proučavanja u ovom radu. Sve četiri grede su opterećene ravnomjernim opterećenjem po cijeloj dužini, u trajanju od 6 mjeseci. Ovo opterećenje iznosilo je 55%, odnosno 60% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, za grede ojačane dužom, odnosno kraćom trakom. Nakon analize rezultata na kraju tog perioda, bilo je evidentno da predmetni uzorci ne reaguju značajno na taj nivo opterećenja, što je bilo očekivano, s obzirom da su grede bile stare 10 godina u trenutku ojačavanja i proces tečenja betona se u najvećoj mjeri završio. Što se tiče vremenskih deformacija karbonskih traka, poznato je da su one, u poređenju sa staklenim ili aramidnim, najmanje podložne tečenju. Kako je poznato da efikasnost spoljašnjeg ojačanja slabi sa porastom nivoa opterećenja [67], ono je u sljedećoj fazi povećano na 75-85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, u zavisnosti od dužine trake. Ovo opterećenje održavano je konstantnim u trajanju od 4 mjeseca, sve do stabilizacije procesa. Na osnovu rezultata ispitivanja sprovedenog na 4 uzorka mogu se sa dovoljnom pouzdanošću donijeti određeni zaključci u pogledu razmatranih veličina. U nastavku ovog poglavlja prikazana je analiza rezultata ispitivanja, sa posebnim osvrtom na uticaj dva parametra - dužine ojačanja i nivoa opterećenja.

### 6.1. Ponašanje ojačanih AB greda u funkciji graničnog momenta

#### 6.1.1. Granična nosivost greda

Granične nosivosti svih ispitivanih greda, kao i njima odgovarajući momenti savijanja dati su u tabeli 4.8. Evidentan je porast graničnih momenata za sve ispitane grede koje su bile izložene dugotrajnom ravnomjernom opterećenju, u odnosu na kontrolnu gredu G1b: 52-63% kod greda ojačanih na dužini od 4m i 57-74% kod greda ojačanih na dužini od 6m (slika 6.1). Slika 6.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda Međutim, relativna razlika u porastu je veoma mala između ojačanih greda i iznosi 3.4- 7% u korist greda ojačanih dužim trakama. Manji pad nosivosti (2-6%) je zabilježen kod greda opterećenih većim nivoom dugotrajnog opterećenja (G8 i G9). Do sličnog zaključka došli su i autori rada [68].

#### 6.1.2. Ugibi u sredini grede

Veća razlika u veličini krajnjih ugiba greda G6 i G7 i greda G8 i G9 je posljedica specifičnosti u opterećivanju greda G8 i G9. One su, naime, bile dugotrajno opterećene većim teretom, što je rezultiralo i većim konačnim ugibima, i to 27% i 24%, respektivno. Kao i kod ispitivanja usljed dejstva kratkotrajnog opterećenja, i u ovom slučaju su veći ugibi registrovani kod greda ojačanih dužim trakama (G6 i G8). Ta razlika iznosi 15% i 18%, u zavisnosti od nivoa opterećenja. Zaostale, plastične deformacije su velike kod svih greda, naročito kod onih ojačanih dužim trakama. One iznose 52% i 74% od konačne vrijednosti ugiba za grede G6 i G8. Sa dijagrama 6.2 jasno se uočava uticaj nivoa opterećenja na veličinu zaostalih deformacija (greda G8), kao i efekti usljed otkidanja karbonske trake (greda G9). Slika 6.2 Veličine ugiba ispitivanih greda U Prilogu G prikazan je proračun ugiba grede pri dejstvu dugotrajnog opterećenja. Postupak je sproveden za neojačanu gredu (Prilog G1) i za gredu ojačanu CFRP trakom (Prilog G2).

#### 6.1.3. Deformacije u betonu

6.1.3.1. Deformacije u zategnutom betonu Sve ispitivane grede ponašaju se skoro identično. Nakon dostizanja graničnog momenta od oko 90 kNm, evidentan veliki porast deformacija pri neznatnom povećanju opterećenja. Konačne deformacije greda G6 i G7 opterećenih manjim nivoom opterećenja neznatno se razlikuju. Kod greda G8 i G9 koje su izložene većem dugotrajnom opterećenju, javlja se razlika od 8% u veličini krajnjih deformacija, a u korist grede ojačane dužom trakom (G8). Usljed porasta nivoa opterećenja, ove grede doživljavaju 22% odnosno 12% veće deformacije, respektivno, u odnosu na grede ojačane CFRP trakama iste dužine. Zaostale deformacije su velike kod svih greda, naročito kod onih opterećenih većim nivoom opterećenja (slika 6.3), što se može konstatovati kao stabilizacija naponsko- deformacijskog stanja tokom vremena. Slika 6.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona

6.1.3.2. Deformacije u pritisnutom betonu Iz dijagrama 6.4 vidi se da se sve grede ponašaju slično, pri čemu se uočava značajan uticaj dužine ojačanja na krajnje deformacije u pritisnutoj zoni betona. Slika 6.4 Dilatacije u pritisnutoj zoni betona One su kod greda ojačanih dužim trakama (G6 i G8) veće za 32-37%. Uticaj povećanja nivoa dugotrajnog opterećenja odražava se na porast ovih deformacije za 10-14%.

6.1.3.3. Deformacije karbonske trake Najveće deformacije, kao što je očekivano, javile su se u sredini trake svih greda. Na krajevima traka deformacije su zanemarljive. Kraće trake su podložnije uticaju dugotrajnog opterećenja. Veći nivo opterećenja utiče na povećanje deformacija i kraćih i dužih karbonskih traka (slika 6.5). Kod svih greda registrovane su značajne zaostale deformacije nakon rasterećenja. Ovo se može tumačiti simultanim efektima zaostalog naponsko-deformacijskog stanja od sopstvene težine i tečenja u karbonskoj traci. Slika 6.5 Dilatacije u karbonskim trakama

6.1.4. Prsline u betonu Pojava i razvoj prsline praćeni su detaljno, a njihova mapa je propisno izvedena za svaki inkrement, počevši od trenutka nastanka prve prsline pa sve do loma. Kod greda ispitanih na dugotrajno opterećenje prve prsline pojavile su se pri sili od 45 kN kod greda ojačanih kraćim trakama, odnosno 50-55 kN kod greda ojačanih dužim trakama. Tokom vremena nije došlo do značajnog formiranja novih većih prsline, već samo do širenja starih i to uglavnom pri većim nivoima opterećenja. Srednji razmak između prsline bio je u rasponu od 16 do 18 cm. Uticaj dugotrajnog opterećenja ogleda se u povećanju kritičnih dijagonalnih prsline koje su bile uzročnici loma kod greda ojačanih kraćim trakama. Šema prsline data je u Prilogu C2.

6.1.5. Mehanizam loma grede Dužina ojačanja je parametar koji igra značajnu ulogu u jačini veze traka-beton, a samim tim i kod mehanizma loma ojačanih greda [21], [40]. Rezultati nekih istraživanja ukazali su na to da povećanje dužine CFRP ojačanja, bilo da se radi o ojačanju na smicanje ili savijanje, povećava kapacitet nosivosti grede [34], [43]. Takođe je utvrđeno da efikasnost same tehnike ojačavanja greda opterećenih na savijanje zavisi od ovog parametra, imajući u vidu da je najčešći tip loma u ovim gredama bio usljed odvajanja trake [10]. Ispitivanje greda G7 i G9 potvrdilo je zaključke iz radova [11], [33], [43], a koji se odnose na uticaj dužine ojačanja na tip loma. Autori ovih radova tvrdili su da će uzorci ojačani kraćom trakom prije doživjeti lom usljed njenog odvajanja u odnosu na uzorke ojačane dužom trakom. Prema njihovim istraživanjima, u slučaju kada se za ojačanja armirano-betonskih greda koriste duže trake, njihov lom se dešavao zbog iskorišćenja nosivosti trake i njenog pucanja. Slična situacija desila se i u predmetnom ispitivanju (sl. 6.6 i 6.7). Slika 6.6 Lom grede G7 Slika 6.7 KDP kao uzročnik loma i odvajanje CFRP trake grede G9 Usljed loma greda ojačanih kraćim trakama došlo je do njihovog djelimičnog odvajanja, i to uglavnom zajedno sa zaštitnim slojem betona. U slučaju greda G6 i G8, ojačanih dužim trakama, došlo je do loma po betonu, pa nije u potpunosti iskorišćen kapacitet primijenjenog ojačanja (slika 6.8). Slika 6.8 Lom grede G6

6.1.6. Zaključna razmatranja Nakon sprovedenog sopstvenog ispitivanja uzoraka u prirodnoj veličini, izloženih dejstvu ravnomjernog dugotrajnog opterećenja, moguće je donijeti zaključke u vezi uticaja ispitivanih parametara.

6.1.6.1. Granični momenat savijanja Kod greda ojačanih dužim trakama uočava se relativno mali porast kapaciteta nosivosti, u odnosu na grede ojačane kraćim trakama. Granična nosivost ojačanih greda je niža pri većem nivou dugotrajnog opterećenja.

6.1.6.2. Ugibi Na veličinu krajnjih ugiba značajan uticaj imaju oba razmatrana

parametra – dužina ojačanja i nivo dugotrajnog ravnomjernog opterećenja. Najveći ugib doživjela je greda ojačana dužom trakom, opterećena većim nivoom opterećenja. Na osnovu proračuna ugiba prikazanog u Prilogu G, dat je predlog za ograničavanje ugiba na veličinu  $l/150$  umjesto  $l/300$ .

6.1.6.3. Deformacije Dužina trake ima značajan uticaj kod veličine deformacija u pritisnutom betonu, ali zanemarljiv kod deformacija u zategnutom betonu. Međutim, evidentan je porast ovih deformacija usljed porasta nivoa dugotrajnog opterećenja, dok na deformacije u pritisnutoj zoni betona ovaj parametar nema značajan uticaj. Deformacije u karbonskim trakama su veoma slične za sve grede, skoro nezavisne od uticaja razmatranih parametara.

6.1.6.4. Prsline Na momenat pojave prve prsline utiče dužina CFRP trake. Kod greda ojačanih kraćom trakom prsline su se pojavile ranije nego kod greda ojačanih dužom trakom. Dužina ojačanja, međutim, nema značajan uticaj na širinu graničnih prslina, kao ni na sliku prslina. Povećanje nivoa dugotrajnog opterećenja izaziva povećanje širine graničnih prslina.

6.1.6.5. Mehanizam loma Nakon završenog eksperimentalnog ispitivanja ojačanih armirano-betonskih greda na dejstvo dugotrajnog opterećenja, sprovedena je analiza rezultata gdje je, između ostalog, razmatran uticaj dužine ojačanja na tip loma. Zaključeno je da je potrebno koristiti CFRP trake dužine veće od polovine grede kako bi izbjegli lom usljed odvajanja trake, koji je nepoželjan. Efekat prijanjanja nije razmatran, ali u ovom slučaju ne bi bio od značaja, s obzirom da se prilikom odvajanja lom desio djelimično i po zaštitnom sloju. CFRP trake dužine 6 metara, što čini 80% raspona grede, pokazale su se kao dobar izbor pri formiranju povoljnog mehanizma loma. One su doživjele veće ugibe od greda ojačanih kraćim trakama, ali nije došlo do odvajanja trake već se desio lom po pritisnutom betonu.

6.2. Uporedna analiza rezultata dobijenih dejstvom kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja

Vršeno je poređenje rezultata dobijenih ispitivanjem greda G4 i G5, opterećenih kratkotrajnim ravnomjernim opterećenjem i greda G6 - G9, opterećenih dugotrajnim ravnomjernim opterećenjem.

6.2.1. Granična nosivost greda Usljed dejstva oba razmatrana tipa opterećenja, dolazi do povećanja granične nosivosti ojačanih greda u odnosu na kontrolne. Razlika u prirastu nosivosti je veoma mala između ojačanih greda ali je ipak izraženija kod greda ojačanih dužim trakama. Porast nosivosti je skoro nezavistan od dužine trajanja opterećenja, s obzirom da iznosi 5-8% pri dejstvu kratkotrajnog, odnosno 4-7% pri dejstvu dugotrajnog opterećenja, u korist greda ojačanih dužim trakama.

6.2.2. Ugibi Slika 6.9 Uporedna analiza veličine ugiba ispitivanih greda Dužina trajanja opterećenja nema značajan uticaj na ponašanje greda ojačanih kraćom trakom, ali intenzitet tog opterećenja ima. Povećanje nivoa napona izaziva i povećanje prirasta ugiba tokom vremena. Ovo povećanje nije od naročitog značaja kod ojačanja dužom trakom (slika 6.9). Veći ugibi registrovani su kod greda ojačanih dužim trakama i u slučaju dejstva kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja, uz odgovarajući prirast nosivosti. Izrazito veliki zaostali ugibi kod kratkotrajno opterećene grede G4 posljedica su „brzine loma“. Naime, nagli lom koji je nastao odvajanjem trake istovremeno je uzrokovao i lom pritisnutog betona, što se odrazilo na veličinu plastičnih deformacija.

6.2.3. Deformacije u zategnutom betonu Slika 6.10 Uporedna analiza veličine dilatacija u zategnutom betonu Sve grede se ponašaju slično, skoro pravolinijski, do postizanja dilatacije od oko 2‰ pri graničnom momentu od oko 90 kNm. Grede ojačane dužom trakom se do tog nivoa opterećenja ponašaju skoro identično, nakon čega dolazi do naglog porasta dilatacija. Sa dijagrama 6.10 može se zaključiti da je uticaj nižeg nivoa dugotrajnog opterećenja na dilatacije u zategnutom betonu ojačanih greda zanemarljiv. Uticaj dužine ojačanja je od značaja kod određivanja konačne vrijednosti dilatacije u zategnutom betonskom presjeku pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja i uzrokovao je razliku od oko 25% u korist duže trake. Kod dilatacija pod dejstvom dugotrajnog opterećenja ova razlika je mala i iznosi svega 8%, takođe u korist grede ojačane dužom trakom. Dužina ojačanja nije značajan parametar kod određivanja dilatacija u zategnutom betonu, kao što je to slučaj kod ispitivanja na kratkotrajno opterećenje. Sa porastom dužine ojačanja rastu i dilatacije u zategnutom betonu. Konačne vrijednosti dilatacije su veće kod ispitivanja na dejstvo dugotrajnog opterećenja i to čak 50% kod greda ojačanih dužom trakom i opterećenim većim

nivoom opterećenja (slika 6.10). 6.2.4. Deformacije u pritisnutom betonu Slika 6.11 Uporedna analiza veličine dilatacija u pritisnutom betonu Dužina trake ima značajan uticaj kod veličine deformacija u pritisnutom betonu. Sa porastom dužine ojačanja rastu i dilatacije u pritisnutom betonu. Konačne dilatacije su veće kod ispitivanja na dejstvo dugotrajnog opterećenja i to značajno kod greda ojačanih dužom trakom. One rastu sa porastom nivoa opterećenja (slika 6.11).

6.2.5. Deformacije karbonske trake Dugotrajno opterećenje ima značajniji uticaj na veličinu dilatacija kraćih karbonskih traka, dok se kod dužih traka odražava uglavnom na veličinu zaostalih (trajnih) dilatacija. Kod nanošenja većih nivoa opterećenja dolazi do porasta dilatacija kod svih ispitivanih CFRP traka (slika 6.12). Slika 6.12 Uporedna analiza veličine dilatacija karbonskih traka

6.2.6. Prslina u betonu Slika prslina je ostala stabilna u oba slučaja tj. usljed dejstva kratkotrajnog i dugotrajnog ravnomjernog opterećenja. Nije došlo do značajnog formiranja novih većih prslina tokom vremena, već samo do širenja starih i to uglavnom pri većim nivoima opterećenja.

6.3. Ponašanje ojačanih armirano-betonskih greda usljed vremenskih deformacija

6.3.1. Uvod U ovom poglavlju prezentirani su eksperimentalni rezultati nekih značajnijih ispitivanja na dugotrajno opterećenje. Posebna pažnja se poklanja analizi rezultata ispitivanja armirano-betonskih elemenata usljed dugotrajnog dejstva konstantnog, ravnomjernog opterećenja. Zaključeno je da deformacije nastale usljed dugotrajnog opterećenja mogu uticati na pojavu tzv. „odloženog loma“, tj. pojavu deformacija tečenja u pritisnutoj zoni betona i u kompozitnom materijalu. Ove deformacije su plastičnog karaktera nakon rasterećenja. Kada se grede ponovo kratkotrajno opterete, deformacije rastu i to počevši od zaostale deformacije od dugotrajnog opterećenja. To utiče na pad nosivosti tih uzoraka u odnosu na one koji su opterećivani samo kratkotrajno [5]. U radu [4] različiti nivoi dugotrajnog opterećenja kretali su se u granicama od 59% do 78% nosivosti neojačane grede. Autori su došli do zaključka da, pri navedenom nivou opterećenja, ojačane grede doživljavaju manje dugotrajne deformacije nego neojačane. Takođe je zaključeno i da spoljašnje ojačanje nema značajan uticaj na dugotrajne deformacije ojačanih greda, što je potvrđeno i drugim istraživanjima [69]. Međutim, ovaj zaključak važi, uglavnom, za tečenje pritisnutog betona pri radnim nivoima napona. Male vrijednosti dugotrajnih deformacija kod ojačanih elemenata su posljedica uticaja pritisnute čelične armature. Naime, raniji istraživači su zaključili da je ona veoma efikasna u smanjenju dugotrajnih deformacija prostih armirano-betonskih greda [63], [70]. Povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tečenja [65]. Autori rada [71] potvrdili su taj zaključak, mada samo u pogledu deformacija tečenja. Ponašanje usljed tečenja ojačanih betonskih elemenata ispitivano je i u radovima [72] i [73]. Autori su zaključili da FRP ojačanje povoljno utiče na ponašanje uzoraka izloženih tečenju. Takođe ističu da se upotrebom različitih lijepkova može postići željeno ponašanje ispitivanih uzoraka. Nažalost, na našem tržištu još uvijek nije prisutan dobar izbor lijepkova, jer je i sama tehnika ojačavanja konstrukcija kod nas u početnoj fazi, mada je u svijetu aktuelna već više decenija. Međutim, u radu [52] došlo se do suprotnog zaključka. Naime, autor tvrdi da je ponašanje ojačanih greda pod konstantnim opterećenjem uglavnom praćeno tečenjem pritisnutog betona, a da ne zavisi od vremenskih karakteristika upotrijebljenog lijepka, kako se smatralo. Taj zaključak je izveden ispitivanjem na dugotrajno konstantno dejstvo neojačane i CFRP ojačana grede, pri čemu su one doživjele slično i proporcionalno tečenje. Autor takođe tvrdi da je kod ovih ispitivanja, pored deformacija tečenja, značajan i nivo opterećenja, jer može izazvati lom usljed tečenja CFRP materijala, čak i pri vrijednostima koje su niže od njegove nosivosti na kratkotrajno opterećenje. Ovaj kompozitni materijal uglavnom izdržava dugotrajno opterećenje do 80% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, dok su za ostale FRP materijale ovi nivoi opterećenja znatno niži [74], [75]. Nivo dopuštenog napona zavisi od izabranog sistema ojačanja, orijentacije vlakana, kao i zapreminskog učešća vlakana u kompozitnom materijalu.

6.3.2. Rezultati ponašanja ojačanih uzoraka usljed vremenskih deformacija U ovom radu izvršeno je ispitivanje ponašanja armirano-betonskih greda ojačanih karbonskim trakama, u toku vremena. Cilj je bio utvrditi uticaj spoljašnjeg



ojačanja starijih modela na konačno tečenje pri većim nivoima napona. Poznato je da se tečenje betona sa starošću znatno smanjuje, ali i veoma stari betoni to svojstvo zadržavaju. S obzirom da se u ovom radu vrši ojačavanje starih konstruktivnih elemenata, a imajući u vidu da su vremenske deformacije same trake veoma male, tečenje se uglavnom ne uzima u obzir kod dimenzionisanja CFRP spoljašnje ojačanih betonskih elemenata [52]. Rezultati navedenog ispitivanja predstavljeni su dijagramima 6.13 – 6.16, dok su odgovarajuće tabele date u Prilogu B2. Slika 6.13 Dijagram ugiba u toku vremena Slika 6.14 Dijagram dilatacija u zategnutom betonu u toku vremena Slika 6.15 Dijagram dilatacija u pritisnutom betonu u toku vremena Slika 6.16 Dijagram dilatacija u karbonskoj traci u toku vremena 6.3.3. Analiza rezultata sopstvenog eksperimentalnog istraživanja Analizom zaključaka prethodnih istraživanja odlučeno je da će se predmetno ispitivanje vršiti opterećivanjem sa 55%, odnosno 60% nosivosti na kratkotrajno opterećenje ojačanih greda, za grede ojačane dužom, odnosno kraćom trakom. Sve četiri grede (G6-G9) opterećene su ravnomjerno podijeljenim teretom po cijeloj dužini, u trajanju od 6 mjeseci. U ovom periodu vršena su stalna očitavanja potrebnih podataka radi proučavanja efekata tečenja betona, prema tačno utvrđenom programu za sve grede. Nakon analize rezultata na kraju tog perioda, bilo je evidentno da uzorci ne reaguju značajno na ovaj nivo opterećenja. Porast ugiba iznosio je svega 9-12%, porast deformacija u zategnutom betonu 9-13%, porast deformacija u pritisnutom betonu svega 7-11%, dok su vremenske deformacije karbonskih traka za 6 mjeseci porasle 6-8% (tabela 6.1). Stoga su samo dvije grede ispitane do loma, dok su preostale dvije grede u sljedećoj fazi dodatno opterećene većim nivoom opterećenja. To opterećenje iznosilo je 75% i 85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje, što je blizu gornje granice dozvoljenih napona kod ojačanja karbonskim trakama. U trenutku nanošenja dodatnog opterećenja javila se i dodatna trenutna elastična deformacija. Nakon toga se u praksi mogu javiti tri karakteristična slučaja tečenja, kao što je opisano u tački 3.6.1.2. Međutim, u predmetnom eksperimentu ne postoji prvi slučaj, tj. primarno tečenje. Naime, kako se radi o uzorcima starim više od 10 godina, beton je taj brzi prirast deformacije, tzv. tečenje tokom očvršćavanja i trajanja dejstva od sopstvene težine, doživio za taj period. Sa dijagrama se jasno uočava zona nepromjenljivog tečenja kada je brzina deformacije postala praktično konstantna, ali veoma mala. Prirast svih razmatranih veličina u funkciji vremena ima minimalnu vrijednost. To ukazuje na činjenicu da se materijal nalazi u zoni sekundarnog - stalnog tečenja, ali ipak ne dolazi do loma. U ovom slučaju deformacije tečenja su imale postepeni, blagi porast i težile su ka konačnim vrijednostima. Iako su predmetni uzorci bili izloženi izuzetno visokim naponima, kojim se smatraju oni iznad 40-45% čvrstoće, nije se javilo tercijarno tečenje. Grede su na taj način bile opterećene 4 mjeseca, sve do stabilizacije procesa. Analizom ponašanja modela u toku vremena zaključeno je da nema indikacija da daljim zadržavanjem opterećenja može doći do porasta deformacija, koji bi eventualno izazvao lom materijala. Nakon isteka predviđenog perioda nastavljeno je opterećivanje modela do loma na isti način kao kod ispitivanja na dejstvo kratkotrajnog opterećenja. Iz dijagrama 6.13 - 6.16 vidi se da konstantno dugotrajno opterećenje izaziva pojavu deformacije tečenja betona, kao i deformaciju tečenja u CFRP trakama. Prirast ovih deformacija je vrlo mali kada se radi o nižim nivoima napona. Tek se kod dvije grede naknadno opterećene većim nivoima opterećenja (G8 i G9) registruje nešto veći porast deformacija, koji takođe nije značajan u tolikoj mjeri da bi negativno uticao na ponašanje predmetnih modela. Ovakav rezultat je i očekivan, uzevši u obzir starost uzoraka koji se ojačavaju, kao i činjenicu da CFRP doživljava zanemarljivo tečenje u odnosu na ostale FRP materijale. Tabela 6.1 Maksimalne dilatacije greda u toku vremena Ugibi  $\epsilon_{el,1}$  (‰)  $\epsilon_{teč,1}$  (‰)  $\epsilon_{el,2}$  (‰)  $\epsilon_{teč,2}$  (‰)  $\epsilon_{el,pov}$  (‰)  $\phi_{teč,1}$   $\phi_{teč,2}$  G6 4.40 0.40 / / 4.40 0.09 / G7 3.20 0.40 / / 4.20 0.12 / G8 3.90 0.40 1.00 0.80 3.00 0.10 0.24 G9 3.40 0.40 1.10 0.80 3.60 0.12 0.27 Dilatacije u zategnutom betonu  $\epsilon_{el,1}$  (‰)  $\epsilon_{teč,1}$  (‰)  $\epsilon_{el,2}$  (‰)  $\epsilon_{teč,2}$  (‰)  $\epsilon_{el,pov}$  (‰)  $\epsilon_{teč,pov}$  (‰)  $\epsilon_{teč,nep}$  (‰)  $\phi_{teč,1}$   $\phi_{teč,2}$  G6 1.81 0.18 / / 1.37 0.30 6.66 0.10 / G7 1.54 0.20 / / 1.40 0.79 6.22 0.13 / G8 1.89 0.18 1.54 0.51 2.87 0.55 6.77 0.09 0.20 G9 1.84 0.20 1.29 0.52 1.77 0.80 6.86 0.11 0.33 Dilatacije u pritisnutom

betonu  $\epsilon_{el,1}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,1}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{el,2}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,2}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{el,pov}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,pov}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,nep}$  ( $\%$ )  $\varphi_{teč,1}$   $\varphi_{teč,2}$  G6 0.84 0.06 / / 0.35 0.09 1.27 0.08 / G7 0.54 0.05 / / 0.45 0.08 0.72 0.09 / G8 0.59 0.05 0.30 0.11 0.48 0.24 6.77 0.08 0.17 G9 0.74 0.08 0.13 0.18 0.50 0.09 0.85 0.11 0.30 Dilatacije u karbonskoj traci  $\epsilon_{el,1}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,1}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{el,2}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,2}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{el,pov}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,pov}$  ( $\%$ )  $\epsilon_{teč,nep}$  ( $\%$ )  $\varphi_{teč,1}$   $\varphi_{teč,2}$  G6 1.50 0.09 / / 1.18 0.10 5.85 0.06 / G7 1.74 0.15 / / 1.37 0.22 6.06 0.08 / G8 1.58 0.09 1.23 0.61 1.87 1.02 6.77 0.06 0.25 G9 1.80 0.15 0.92 0.69 1.97 1.37 5.11 0.08 0.31 Parametri od kojih zavisi tečenje betona, razmatrani u tački 3.6.1.3, uglavnom se odnose na mlad beton. Zaključeno je da je za krajnju vrijednost i vremenski tok deformacije tečenja bitna starost betona u vrijeme kada je prvi put opterećen, kao i trajanje i intenzitet opterećenja. Samim tim, i koeficijent tečenja se mijenja slično promjeni deformacije tečenja, tj. u funkciji je od vremena i nezavistan je od nanešenog opterećenja.

6.3.4. Ispitivanje tečenja starih betonskih uzoraka Ispitivanje vremenskih deformacija starog betona je za obje serije praćeno na po 6 kontrolnih betonskih cilindara dimenzija 15/30 cm, u istim termohigrometrijskim uslovima u laboratoriji gdje su ispitivane grede – modeli. Za prvu seriju usvojena je vrijednost konstantnog napona pritiska od 0.55 fb, kako bi se simuliralo slično naponsko stanje u maksimalno pritisnutom presjeku ispitivanih greda. Može se smatrati da je ovo naponsko stanje još uvijek u linearnom dijelu radnog dijagrama betona. Uzorci su opterećeni u parovima u uređajima za dugotrajno opterećenje (slika 4.13), pri čemu je održavana konstantna sila pritiska, koja se mogla kontrolisati preko mehaničkih mjerača sile. Elastične deformacije i deformacije tečenja mjerene su pomoću mjernih traka, koje su postavljane duž tri izvodnice, tako da su, gledano u osnovi, raspoređene pod uglom od 120°. Dodatno je, radi kontrole, vršeno mjerenje mehaničkim deformetrom „Montetoyo“, osjetljivosti 1/1000mm, sa digitalnim očitavanjem. Očitavanje deformacija vršeno je prilikom nanošenja opterećenja, zatim narednog dana, a nakon toga na svakih sedam dana u prvom mjesecu. Kasnije je očitavanje vršeno jednom mjesečno, a nakon 6 mjeseci uzorci su opterećivani do loma u hidrauličnoj presi. Pretpostavlja se da je skupljanje starih betonskih uzoraka u cjelini okončano. Obradom rezultata ispitivanja dobijene su srednje vrijednosti dilatacija i prosječna vrijednost koeficijenta tečenja starog betona (tabela 6.2). Potpuno ista procedura sprovedena je na drugoj seriji, s tim što je nakon šest mjeseci povećano opterećenje do nivoa od oko 0.85 fb, a mjerenje deformacija nastavljeno još četiri mjeseca, kada su uzorci ispitivani do loma u hidrauličnoj presi. Ovaj nivo naprezanja svakako pripada nelinearnom dijelu radnog dijagrama betona. Tabela 6.2 Rezultati ispitivanja tečenja na kontrolnim betonskim cilindrima P0 Pe  $\sigma = \text{const}$  Eb (t0)  $\epsilon_{el}$   $\epsilon_{t,max}$   $\varphi_t$   $\varphi_t$  (kN) (kN) (MPa) (GPa) ( $\%$ ) ( $\%$ ) (t=6mj.) (t=10mj.) Serija I 10 350 19.8 32.45 0.61 0.15 0.24 / Serija II 10 400+210 22.6+12.0 36.05 0.66+0.44 0.15/0.33 0.25 0.27 Upoređujući rezultate prirasta vremenskih deformacija na gredama i na kontrolnim uzorcima, mogu se konstatovati skoro dva puta veće vrijednosti kod kontrolnih betonskih uzoraka u odnosu na deformacije dobijene na gredama. Treba imati na umu da su stare grede već u toku „eksploatacije“ (dejstvo sopstvene težine) bile izložene uticajima vremenskih deformacija, a kontrolni betonski uzorci samo deformacijama skupljanja betona. Može se dakle zaključiti da su deformacije tečenja kod greda djelimično obavljene, čime se mogu objasniti veće deformacije tečenja kontrolnih betonskih uzoraka. U oba slučaja su, međutim, ove deformacije male, tako da se grubo može računati povećanje usljed deformacija tečenja starih uzoraka za svega 10% u odnosu na elastične deformacije. Izmjerene dilatacije na gredama tokom vremena, vrlo malo se mijenjaju usljed svakodnevnih ambijentalnih promjena temperature i vlažnosti,

što je i očekivano budući da se radi o starim modelima. Na

102

osnovu naučnih istraživanja i ispitivanja autora [76], [77] na realnim armirano- betonskim elementima u istoj laboratoriji i sličnim uslovima, permanentna promjena termo-higrometrijskih uslova se pokazala kao parametar sa zanemarljivim uticajem na konačne vrijednosti vremenskih deformacija. Pri tome se u oba slučaja, jasno uočava trend prirasta vremenskih deformacija, koji je razumljivo izraženiji kod mlađih uzoraka. 6.3.5. Zaključna razmatranja Ovim eksperimentom potvrđeni su zaključci ranijih istraživanja koji su ukazivali na nepostojanje loma usljed vremenskih deformacija greda ojačanih CFRP materijalom ukoliko je dugotrajno opterećenje ograničeno na 60% graničnog dejstva kratkotrajnog opterećenja [59]. Ovo istraživanje pomjera tu granicu na 75-85%, u zavisnosti od dužine ojačanja. Takođe, tvrdnja da povećanje procenta armiranja FRP materijalom smanjuje kako trenutnu tako i deformaciju tečenja [65], u predmetnom slučaju bi značila da su navedene deformacije manje kod greda ojačanih dužim trakama. Ti zaključci su djelimično potvrđeni, jer su grede ojačane dužim trakama doživjele manje deformacije tečenja ali ne i trenutne (elastične) deformacije. Samo su u slučaju mjerenja dilatacija u karbonskim trakama oba zaključka potvrđena. Opsežnim ispitivanjem na dugotrajna dejstva dokazano je da za armirano-betonske grede određene starosti, ojačane karbonskim trakama minimalne dužine 0.8 l , ne postoji opasnost da u toku vremena, u eksploatacionim uslovima, mogu biti dovedene u granično stanje loma. Ukoliko se još uzme u obzir inertnost CFRP materijala na kombinovani uticaj sredine i mehaničkog dejstva, preporučuje se njegova upotreba naročito u slučajevima kada konstrukcija, u oštrim uslovima sredine, treba da ponese značajan teret [52]. Ovi zaključci važe samo u slučaju ravnomjernog opterećenja, dok bi u slučaju koncentrisanog tereta bilo poželjno koristiti dodatna poprečna ojačanja. 7. NUMERIČKA ANALIZA

OJAČANIH GREDA 7.1. Uvod u numeričku analizu primjenom programskog paketa ANSYS Programski paket ANSYS koristili su mnogi istraživači za modelovanje armirano- betonskih konstrukcija primjenom metode konačnih elemenata (MKE). ANSYS predstavlja najrasprostranjenije softversko rješenje u raznim industrijskim oblastima, a broj modula za rješavanje različitih inženjerskih problema putem numeričkih simulacija daje mogućnost za najobimniju analizu, kako mehanike deformabilnih tijela (solida), tako i mehanike fluida i elektromagnetne analize. ANSYS je korišćen kod ispitivanja armirano-betonskih konstrukcija ojačanih FRP lamelama, uglavnom za analizu strukturnog ponašanja greda i mostova [78]. Metodologija zastupljena u ovom radu je ujedno i najčešće primjenjivana, i u njoj se za modelovanje betona, armature i FRP lamele koriste elementi SOLID65, LINK8 i SOLID46, respektivno. Slični primjeri se mogu naći i u radovima [79], [80] i [81]. Dodatna vrijednost dosadašnjih istraživanja ogleda se u komparativnoj analizi rezultata numeričke simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Uočava se da se najčešće upoređuju nosivost, odnos ponašanja sila-ugib, kao i raspored prslina u graničnom stanju loma. Generalni zaključak je da numerički model sa nelinearnim ponašanjem na nivou materijalnih karakteristika relativno tačno predviđa ponašanje i odgovor ispitivanih armirano-betonskih greda i spojeva greda sa stubom. Vezano za pristup modelovanja FRP trake, uočava se i alternativna metodologija koja podrazumijeva primjenu konačnih elemenata tipa ljuske [82], [83]. Ovaj pristup donekle pojednostavljuje numeričku formulaciju, dok sa druge strane realistično predviđa koncentraciju napona u betonu na krajevima FRP traka, što je potvrđeno eksperimentom. 7.1.1. Beton U razmatranoj verziji programskog paketa ANSYS [84] postoje dva načina za modelovanje betonskog elementa. Novi proračunski kapaciteti odnose se na primjenu Microplane modela koji se zasniva na konceptu energije loma. Međutim, zbog nedovoljno dostupnih literaturnih izvora i naučnih radova koji primjenjuju ovu metodologiju, u okviru disertacije korišćen je klasični pristup, koji postoji u programu više decenija u modifikovanom obliku. SOLID65 je element koji se koristi za 3D modelovanje krutih tijela sa ili bez armature. Ovaj element se kida pri zatezanju i lomi pri pritisku. Element je definisan pomoću 8 čvorova

sa po tri stepena slobode u svakom: translatorno u x, y i z pravcu. Na slici 7.1 prikazana je geometrija elementa

14

SOLID65. Najviše tri različite vrste armature se mogu definisati kao ekvivalentna razmazana armatura (smeared reinforcement), tj. ravnomjerno raspoređena armatura u svakom pravcu, određena procentualno u odnosu na površinu poprečnog presjeka šipki i njihov razmak. SOLID65 je u stanju da se plastično deformiše i da teče. Slika 7.1 Konačni element SOLID65 [84] ANSYS koristi William-Warnke kriterijum loma. Funkcija loma ima pet parametara, koji se koriste kod određivanja putanje napona zatezanja i pritiska, a samim tim i pojave prslina i loma, u skladu sa definisanim radnim dijagramom materijala. Ovi parametri, neophodni za definisanje William-Warnke površine loma su: -  $f_t$  - jednoaksijalna granična čvrstoća na zatezanje, -  $f_c$  - jednoaksijalna granična čvrstoća na pritisak, -  $f_{cb}$  - biaksijalna granična čvrstoća na pritisak, -  $f_1$  - triaksijalna čvrstoća na pritisak utegnutog elementa (compressive meridian) i -  $f_2$  - triaksijalna čvrstoća na pritisak utegnutog elementa (tensile meridian). Svih pet ulaznih parametara su neophodni za definisanje površine loma (kao i okolno hidrostatičko naponsko stanje na kojima su bazirani parametri  $f_1$  i  $f_2$ ), dok ANSYS može stvoriti površinu loma sa minimum dvije konstante - jednoaksijalnom čvrstoćom na zatezanje i na pritisak. Za ostale parametre, ANSYS koristi zadate vrijednosti iz istraživanja [85]. Matrica krutosti betona je u linearnom stanju definisana na sljedeći način: gdje su:  $E$  i  $\nu$  - Young-ov modul elastičnosti betona i Poisson-ov koeficijent, respektivno. Ova relacija predstavlja generalizaciju ortotropne zavisnosti napona i dilatacija na nivo izotropnog materijala. Sa druge strane, matrica krutosti u slučaju nelinearne zavisnosti elementa koji gubi nosivost u jednom pravcu, definisana je sa: gdje su nagib, tj. sekantni modul definisan na slici 7.2, a predstavlja koeficijent transfera napona (konstanta  $C_1$  u opciji TBDATA elementa SOLID65). Slika 7.2 Ponašanje betona u ispućalom stanju [86] Na slici 7.2,  $T_c$  predstavlja multiplikator koji služi za kontrolu modela krutosti, i isti djeluje kao multiplikator relaksacije napona. U slučaju zatvaranja prslina, naponi pritiska upravni na ravan prslina prenose se u pravcu pružanja prslina, i tada je zavisnost definisana primjenom koeficijenta (konstanta  $C_2$  u opciji TBDATA). U tom slučaju matrica krutosti postaje: Za lom koji nastaje u dva pravca matrica krutosti se transformiše: dok za zatvaranje u oba pravca ova matrica postaje: Uočava se da gornja matrica sadrži sve dijagonalne elemente pa je, u slučaju kada se dešava prostorno zatvaranje prslina (u sva tri pravca), ponašanje potpuno identično površinskoj formulaciji. Sa druge strane, krutost elementa ispućalog u tri pravca definiše se matricom: Status pukotine/prslina definisan je dilatacijama integracionih tačaka, pri čemu važi: - ukoliko nema pojave prslina; - ukoliko se prslina pojavi u y pravcu; - ukoliko se prslina pojavi u y i z pravcu. gdje su: - komponente dilatacija u pravcu pružanja prslina. Procedura je iterativna i kada se pojavi pukotina u integracionoj tački, status se tretira kao otvoren u sledećoj iteraciji. Iz svega navedenog, zaključuje se da ANSYS tretira William-Warnke funkciju kao površinski, a ne prostorni lom. Prije loma ponašanje je elastično, a nakon loma pri zatezanju ili drobljenja pri pritisku materijal potpuno propada i gubi kompletnu krutost. Za pravac prostiranja prslina nosivost na zatezanje se isključuje, a kada se prslina zatvori pritisak upravno na prslinu prenosi se sa jednog na drugi element u pravcu pružanja prslina. Kao što se vidi iz prikazanih relacija, pojava prslina definisana je jedinstvenim svojstvom materijala a to je zatezna čvrstoća betona. Ovo naime predstavlja i najveći nedostatak ove metodologije, jer je jasno da dostizanjem granične čvrstoće na zatezanje element gubi nosivost, što u slučaju prebrzog ili presporog nanošenja opterećenja dovodi do divergencije numeričkog postupka. Osim toga, i veličina elementa igra izuzetno važnu ulogu u postizanju veće tačnosti. Opšte priznato pravilo u metodi konačnih elemenata da, za granične uslove definisane geometrijom koja ne vodi ka

singularnim rješenjima, povećanje broja konačnih elemenata vodi ka tačnijem rješenju, ovdje nije validno. Tako se u praktičnim problemima javlja potreba za uvođenjem fiktivnih krutosti ispucalih elemenata, čime se omogućava konvergencija nelinearnog rješenja (već navedena opcija KEYOPT(7)=1 kojom se uvodi multiplikator modela krutosti Tc). Dakle, da bi se razmotrila krutost usljed zatezanja, treba uzeti u obzir i relaksaciju napona nakon pojave prsline, kao što je prikazano na slici 7.2, a vrijednost koeficijenta Tc usvaja se na osnovu inženjerske procjene, bez jasno definisanih pravila o vrijednosti ovog parametra. U disertaciji je ovaj koeficijent variran u iznosu od 0.1 do 0.3. Kako ovaj parametar utiče na vrijednost granične nosivosti, njegovom varijacijom moguće je izvesti dodatne zaključke vezane za kalibraciju numeričkih modela. Koeficijenti transfera smicanja za otvorene i zatvorene prsline ( imaju vrijednost između nula i jedan, gdje nula definiše glatku pukotinu sa potpunim ubitkom prenosa smicanja, a vrijednost jedan pretpostavlja da gubici u prenosu smicanja ne postoje (aggregate effect)). Iako navedene relacije navode na to da ovi parametri igraju izuzetno važnu ulogu u samom ponašanju materijala, ne postoji univerzalno pravilo kako bi se isti mogli usvojiti, već samo preporuka [87]. Ova preporuka je usvojena u disertaciji, 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. Pretpostavlja se da je ponašanje betona prije loma, usljed zatezanja odnosno drobljenja pri pritisku, linearno elastično. I pored toga, plastično ponašanje i/ili tečenje moguće je kombinovati sa osnovnim svojstvima betona, kako bi se obezbijedilo nelinearno ponašanje do loma. U tom slučaju se uglavnom za plastično ponašanje betona koristi model Von-Mises ili Drucker-Prager [88]. Ovakav pristup nije primijenjen o ovom radu. Treba napomenuti i da je ponašanje betona nakon loma praćeno fenomenom razmekšavanja materijala. Za beton je dostupno nekoliko modela razmekšavanja, međutim isti su implementirani samo u verziji sa eksplicitnim numeričkim postupkom. U implicitnoj verziji ANSYS-a nije moguće razmatrati ovaj fenomen.

### 7.1.2. Čelična armatura

Postoje dvije varijante za modelovanje armaturnih šipki u ANSYS-u: razmazana i diskretna. Kad se koristi razmazana opcija, armatura se definiše kao dio betonskog elementa SOLID65, kako je to prikazano na slici 7.1. Razmazane šipke se u svakom pravcu ponašaju slično kao jednoosni materijal. Druga opcija je da se armaturne šipke modeluju kao zasebni element, pričvršćen na betonski element. Ako treba modelovati zasebne armaturne šipke u ANSYS-u, predlažu se LINK, BEAM i COMBIN elementi. Među njima su najviše korišćeni jednoaksijalni zatezno-pritisni 2-čvorni elementi LINK8 i LINK180. Von-Mises kriterijum plastičnosti se uglavnom koristi za metale poput čelika. U cilju omogućavanja numeričke konvergencije, materijalne karakteristike čelika se uglavnom modeluju u vidu bilinearne zavisnosti napona i dilatacija. U predmetnom radu, podužne šipke grede modelovane su korišćenjem diskretnog LINK180 elementa, a uzengije su modelovane pomoću razmazane armature. S obzirom na pretpostavku da ne postoji proklizavanje čelika unutar betonskog presjeka, primijenjena je permanentna veza čelika sa betonom.

### 7.1.3. FRP kompoziti

FRP kompoziti su anizotropni materijali. Šema FRP kompozita prikazana je na slici 7.3. Kao što se vidi, jednosmjerna lamela ima tri ortogonalne ravni svojstava materijala (tj. ravni  $x - y$ ,  $x - z$  i  $y - z$ ). Koordinatne ose  $xyz$  nazivaju se glavnim koordinatama materijala, pri čemu su vlakna paralelna osi  $x$ , a upravna na  $y$  i  $z$  ose. Slika 7.3 Šema jednosmjernog FRP kompozita

Kao što je ranije u tekstu objašnjeno, SOLID46, SHELL41 i SHELL99 se najčešće koriste za modelovanje FRP kompozita. Iako takav pristup nije uobičajen, elementi za ojačavanje se unutar matrice mogu definisati kao diskretni SOLID elementi. Formulacija čitavog presjeka primjenom elemenata SHELL181 i SHELL281 predstavlja takođe numeričku formulaciju koja je veoma bliska pretpostavkama analitičkog modela klasične teorije slojevitih kompozita (CLPT). U slučaju nosača sa većom debljinom, mogu biti primijenjeni elementi SOLID185, SOLID186 kao i SOLSH190. Ne treba zaboraviti da se ovi elementi u numeričkom smislu približavaju teorijskim pretpostavkama Teorije smicanja I i II reda slojevitih kompozita. Uz odgovarajuću formulaciju u skladu sa Opštom teorijom slojeva (Generalized Layerwise

Theory), isti su podložni „shear-locking“ efektu. Međutim, uvođenje velikog broja dodatnih stepeni slobode (do 13 po elementu) u velikoj mjeri utiče na performanse proračunskog modela. Kako su za materijal koji je primijenjen u eksperimentu poznate materijalne karakteristike ekvivalentnog sloja, to je suvišna primjena slojevitih shell ili solid elemenata sa kontaktnim spojem. Stoga je u ovom radu primijenjena diskretizacija putem elementa SOLID46 uz definisanje slijepljenog spoja sa betonskim presjekom primjenom MPC (Multi-Point Constraint) formulacije. 7.2. Geometrija i definisanje mreže konačnih elemenata Za definisanje geometrije korišćen je program Design Modeler u sklopu ANSYS programskog paketa (slika 7.4). 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 7.4 Geometrija nosača Diskretizacija armature sprovedena je u pojednostavljenom obliku, koncentrisanjem armature ekvivalentne površine u osovinu 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 se vidi na slici 7.5 element SOLID46 ne pojeduje unutrašnje čvorove, 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 modelovao 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. Slika 7.5 Izgled poprečnog presjeka nosača 7.3. Analiza rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS 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. 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. 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. 7.3.1. Analiza slike prslina Na slikama 7.6 i 7.7 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. Slika 7.6 Šema prslina za gredu G1a Slika 7.7 Šema prslina za gredu G2 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. U Prilogu C3 date su slike sa prikazom rasporeda prslina i pukotina u stanju loma za sve grede u punoj dužini. 7.3.2. Analiza dijagrama ugiba Modeliranje je izvršeno korišćenjem linearne i nelinearne analize. Na osnovu dobijenih rezultata (Prilog D1) analizirani su ugibi iz ova dva modela. Na dijagramu 7.8 prikazani su rezultati linearne analize, a na dijagramu 7.9 rezultati dobijeni na modelu sa nelinearnim materijalnim karakteristikama. 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, L – za rezultate dobijene linearnom analizom i N – za rezultate dobijene nelinearnom analizom. Linearni model uključuje linearnu zavisnost napona i deformacija, tj. konstantnu vrijednost modula elastičnosti. Kod ovog modela se pri maksimalnom ugibu iz eksperimenta, dešavao progresivni gubitak nosivosti u većoj zoni, usljed čega je u cilju stabilizacije numeričkog postupka za veći broj elemenata definisana fiktivna krutost opcijom KEYOPT(7)=1. Slika 7.8 Dijagrami ugiba za linearni model Kod pojedinih linearnih modela nije došlo do potpunog loma što se vidi i sa grafika toka ugiba, a i sa prikazanih slika. Može se konstatovati da kod pojedinih greda ne postoji jasan prelaz u tečenje, tj. krive su zaobljene na prelazu ka graničnom stanju loma, dok se ostale ponašaju krto do loma. Bolje poklapanje rezultata uočava se kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem (G4 i G5). Nelinearni model uključuje znatno veći broj elemenata. Nelinearne deformacije određene su na osnovu  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrama dobijenog na kontrolnim tijelima materijala korišćenih u eksperimentu. U svakom narednom koraku se karakteristike mijenjaju, tako da u iterativnom postupku kod određenih elemenata dolazi do prekoračenja graničnog stanja napona. Takav element dobija fiktivnu krutost i ponaša se kao da je izgubio nosivost, tj. teče. Sa prikazanih dijagrama se može uočiti da je, kao i kod linearnog modela, poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata u prihvatljivim granicama, naročito kod greda opterećenih ravnomjernim opterećenjem. Slika 7.9 Dijagrami ugiba za nelinearni model

### 7.3.3. Analiza dilatacija u karbonskoj traci

Uniformni rezultati dobijeni ispitivanjem dilatacija u karbonskim trakama ukazuju na njihov elasto-plastični karakter (Prilog D2). 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. Slika 7.10 Dijagrami dilatacija karbonskih traka

### 7.4. Kritička analiza razmatranih parametara

Prilikom planiranja i izvođenja bilo kog eksperimenta logično je izvršiti odgovarajuće modeliranje, kako bi se definisali glavni uticajni parametri i izvršila verifikacija dobijenih rezultata. Budući da je u računarskom modeliranju neophodno uvoditi određena pojednostavljenja, očekivane su razlike u vrijednostima karakteristika kojima se opisuje naponsko-deformacijsko stanje posmatranog elementa. Glavni razlozi zbog kojih se javljaju određena odstupanja u rezultatima: - 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 neminovne kod modela realnih dimenzija. Naznačeni razlozi, koji mogu imati i aditivni karakter, neminovno će dovesti do pomenutih odstupanja. Ovo je posebno izraženo ako se imaju na umu brojni uticajni parametri ovakvog jednog multikompozitnog sistema.

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 [89]. Numeričke metode su veoma zahtjevne i dugotrajne kada se vrši simulacija vremenski zavisnog ponašanja konstrukcija, jer je potrebno koristiti najmanji mogući korak kako bi se dobilo odgovarajuće rješenje. Analitička rješenja su se pokazala kao mnogo efikasnija [24]. Tečenje betona i FRP ojačanja odvija se u mnogo dužem vremenskom periodu u poređenju sa tečenjem lijepka [90], tako da se najčešće samo lijepak modelira kao viskoelastični materijal. Vremenske karakteristike FRP materijala i ojačane grede se zanemaruju u cilju pojednostavljenja postupka. Stoga su ovakva viskoelastična rješenja validna samo u slučaju procjene napona i deformacija u ograničenom vremenskom periodu.

## 8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Potreba za ojačavanjem armirano-betonskih konstrukcija je veoma aktuelna ne samo u svijetu već i kod nas. Naime, posljednjih par decenija

do pada nosivosti armirano- betonskih i prednapregnutih konstrukcija, a time i do potrebe za ojačanjem, dolazi zbog korozije betona i ugrađenog čelika, naročito u agresivnoj sredini kao što je blizina mora, te zbog različitih mehaničkih, hemijskih i fizičkih dejstava na

8

konstrukciju. Korozija predstavlja neizbježnu pojavu u ljudskom okruženju, s obzirom da trenutno skoro polovina svjetske populacije živi na bliskoj udaljenosti od obale, prosječno oko 150 kilometara. Korozija u određenim uslovima sredine može dovesti do uništenja konstruktivnog elementa, vodeći ka velikim popravkama i troškovima rekonstrukcija. 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 CFRP kompozitnog materijala kao spoljašnjeg ojačanja dala je više nego zadovoljavajuće rezultate i dobra rješenja za navedene probleme. U ovoj disertaciji istraživana je i eksperimentalno analiziran rijedak slučaj ojačanja armirano-betonskih elemenata. Naime, iako su CFRP trake za spoljašnje ojačanje u svijetu u upotrebi već decenijama, detaljnim pregledom literature uočen je mali broj eksperimenata sprovedenih na uzorcima stvarnih dimenzija i značajne starosti. Činjenica da se ojačanje u eksploataciji uglavnom primjenjuje na baš takvom tipu uzoraka, poslužila je kao osnovna ideja za ovo istraživanje. Budući da se u većini istraživanja ojačavaju grede jednostavnog pravougaonog presjeka, primjena CFRP traka kao spoljašnjeg ojačanja greda T-presjeka pokazala se kao logičan izbor. Ispitivanje sprovedeno na dejstvo dugotrajnog opterećenja u stvarnim vremenskim okvirima dalo je dodatni značaj ovoj disertaciji. Nakon sprovedenog sopstvenog ispitivanja uzoraka izloženih dejstvu dva tipa kratkotrajnog opterećenja i dva nivoa dugotrajnog opterećenja, moguće je donijeti određene zaključke koji se odnose na ponašanje ovih sistema i ispitivane uticajne parametre. Pri tome su varirane dvije različite šeme ojačanja, kako bi se došlo do optimalnih rješenja. Odgovor ovako definisanih sistema analiziran je preko osnovnih naponsko- deformacijskih efekata i njihove komparacije sa neojačanim kontrolnim uzorcima. S obzirom na dugogodišnji eksploatacioni period, stanje napona i deformacija do momenta ojačanja nije bilo predmet ove analize. Granični momenat savijanja – Spoljašnje ojačanje armirano-betonskih greda dovodi do značajnog povećanja kapaciteta nosivosti. Vrijednosti graničnih momenata savijanja u kritičnom presjeku se skoro dupliraju u odnosu na momente kontrolnih, neojačanih greda. Ovaj porast je značajniji kod greda izloženih uticaju koncentrisanog opterećenja, u odnosu na grede pod dejstvom ravnomjernog opterećenja. – Efikasnost primijenjenog sistema ojačanja zavisi od dužine CFRP trake. Korišćenjem duže trake porast nosivosti u odnosu na kontrolnu gredu veći je nego kod upotrebe kraćih traka. Taj porast je veći i pri dejstvu kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja, mada nije značajan. – Granična nosivost ojačanih greda niža je pri većem nivou dugotrajnog opterećenja. – Proračun prema Pravilniku ACI 440.2R-08 za određivanje kapaciteta nosivosti analiziranog poprečnog presjeka, ne daje zadovoljavajuće poklapanje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima, ali daje rezultate koji su na strani sigurnosti. Ugibi – Ojačavanje greda CFRP trakama doprinosi redukciji veličine ugiba u poređenju sa kontrolnom gredom. – Veće vrijednosti konačnih ugiba zabilježene su kod greda ojačanih dužim trakama. – Grede izložene dejstvu ravnomjernog opterećenja doživljavaju veće konačne ugibe od onih pod dejstvom koncentrisanog opterećenja. – Ugibi rastu sa porastom nivoa dugotrajnog opterećenja. Deformacije – Spoljašnje CFRP ojačanje redukuje veličinu dilatacija u zategnutom betonu u poređenju sa kontrolnom gredom. – Duže ojačanje dopušta veće dilatacije u zategnutom betonu, i to za dejstvo oba tipa opterećenja



– kratkotrajnog i dugotrajnog. – Dužina trake za ojačanje ima veći uticaj kod dilatacija u pritisnutom betonu, nego u zategnutom betonu. – Dilatacije u pritisnutom betonu značajno su veće u gredama opterećenim koncentrisanim opterećenjem u odnosu na one opterećene ravnomjernim opterećenjem. – Veći nivo dugotrajnog opterećenja uzrokuje veće vrijednosti dilatacija u zategnutom betonu, dok na dilatacije u pritisnutoj zoni betona ovaj parametar nema značajniji uticaj. – Dilatacije u karbonskim trakama greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja skoro su nezavisne od dužine trake i od tipa opterećenja. – Dugotrajno opterećenje ima značajniji uticaj na veličinu dilatacija kraćih karbonskih traka, a sa povećanjem nivoa opterećenja dolazi do porasta dilatacija u karbonskim trakama svih ispitivanih greda. Prsline – Rasprostranjenije prsline, ali manjih širina uočene su kod ojačanih greda u odnosu na neojačane – kontrolne grede. – Dužina ojačanja nema značajan uticaj na širinu graničnih prsline, kao ni na sliku prsline, ali je njihova dubina nešto manja. Evidentna je pojava dijagonalnih prsline na krajevima kraćih traka, koje sa porastom opterećenja postaju glavni uzročnici loma ojačanih greda. Karakteristično je da se, u ovom slučaju, lom manifestuje odlamanjem trake sa dijelom zaštitnog sloja betona. – Povećanje nivoa dugotrajnog opterećenja izaziva povećanje širine graničnih prsline. Mehanizam loma – Na osnovu naponsko–deformacijskog odgovora za slučaj dejstva kratkotrajnog opterećenja, kada se ne očekuje porast graničnog momenta savijanja za više od 60%, moglo bi se zaključiti da je dovoljno koristiti CFRP traku čija je dužina jednaka polovini grede i da nije potrebno koristiti poprečna ukrućenja. – Rezultati eksperimentalnog ispitivanja na dejstvo dugotrajnog opterećenja, ukazuju na potrebu primjene karbonske trake dužine najmanje 0,8l. Kako bi izbjegli lom usljed odvajanja kraćih traka, poželjna bi bila upotreba poprečnih ukrućenja.

Deformacije u toku vremena – Spoljašnje ojačanje nema značajan uticaj na tečenje pritisnutog starog betona, odnosno na dugotrajne deformacije ojačanih greda pri radnim nivoima napona, ali ima uticaja na konačno tečenje pri većim nivoima napona. – Porast deformacija nakon opterećivanja intenzivniji je u početku, a vremenom dolazi do stabilizacije procesa. – Primjena dužih traka kod ojačavanja greda smanjuje kako trenutnu, tako i deformaciju tokom vremena u karbonskim trakama, dok u betonu dolazi do smanjenja samo deformacije tečenja. – Nivo nanešenog dugotrajnog opterećenja je glavni faktor koji utiče na nivo tečenja, a samim tim i na dugotrajne deformacije. Grede ojačane dužim trakama podložnije su uticaju većih nivoa dugotrajnog opterećenja sa stanovišta porasta ugiba i deformacija u pritisnutom betonu. – Usljed dejstva dugotrajnog opterećenja nivoa 55–60% od nosivosti na kratkotrajno opterećenje, evidentirano je povećanje deformacija tokom vremena za oko 10%. Usljed dejstva dugotrajnog opterećenja većeg nivoa (75–85% od nosivosti na kratkotrajno opterećenje) evidentirano je povećanje deformacija tokom vremena u intervalu od 17–33%. Dobijeni eksperimentalni rezultati su djelimično u saglasnosti sa rezultatima i zaključcima drugih autora.

Razlike postoje, uglavnom zbog toga što su ispitivanja sprovedena na modelima realnih dimenzija. Takođe, nije moguće upoređivati uticaj tečenja na ponašanje starih i novih greda, tako da su odstupanja u očekivanim granicama. Generalno se može zaključiti da se ojačanjem armirano-betonskih greda karbonskim trakama značajno povećavaju elastična svojstva ovog sistema, tako da bi se veće vrijednosti dobijenih deformacija u graničnom stanju loma trebale analizirati sa ovog aspekta. Kriterijum loma bi mogao biti definisan preko dopuštenog ugiba, a koji bi bio veći u odnosu na vrijednosti date u propisima za armirano-betonske konstrukcije. Analizom graničnih ugiba, dobijenih u ovom eksperimentu, može se za kriterijum loma umjesto veličine  $l/300$  predložiti veća veličina (do  $l/150$ ). Ovaj prijedlog je proizašao iz proračuna ugiba, a koji predstavlja autorovu modifikaciju izraza iz Pravilnika BAB'87 i daje zadovoljavajuće rezultate za konkretan problem. Rezultati numeričke analize primjenom programskog paketa Ansys, pokazuju zadovoljavajuću saglasnost sa sopstvenim eksperimentalnim podacima. Nešto slabije poklapanje plastičnih dilatacija u karbonskim trakama, može biti rezultat analize date u zaključnim razmatranjima iz prethodnog poglavlja. Ovim istraživanjem dokazano je da neće doći do loma usljed vremenskih deformacija ojačanih prostih armirano-betonskih

gređa T-presjeka značajne starosti i nakon dugogodišnje eksploatacije. Ovaj zaključak važi ukoliko se za ojačanje koriste CFRP trake minimalne dužine 0.8 l, a pri tom je dugotrajno ravnomjerno opterećenje ograničeno na 85% nosivosti na kratkotrajno opterećenje. To znači da ove gređe mogu biti izložene navedenom nivou dugotrajnog ravnomjernog opterećenja, bez opasnosti da u eksploatacionim uslovima mogu biti dovedene u granično stanje loma. Ojačanje armirano-betonskih elemenata karbonskim materijalima ima brojne prednosti u odnosu na tradicionalne sisteme sanacije konstrukcija, bez obzira na primijenjeni sistem i ekonomski aspekt. Specifičan slučaj istraživani u ovoj disertaciji predstavlja doprinos ovoj tezi. LITERATURA [1]

**Folić, R. and Malešev, M. (2005) Održavanje i sanacija konstrukcija, Materijali i konstrukcije, 48 (4) pp. 62-80.**

1

[2]

**Hag-Elsafi, O., Alampalli, A. and Kunin, J. (2001) Applications of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structures, Journal of Composite Structures, 52 (3-4) pp. 453-466.**

11

**[3] Smith, S.T. and Teng, J.G. (2002) FRP strengthened RC beams I,**

85

Engineering Structures, 24 (4) pp. 385-395. [4] Chami, Al

**.G., Theriault, M. and Neale, K.W. (2009) Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams, Construction and Building Materials, 23 (4)**

61

pp. 1640–1652. [5]

**Valivonis, J., Skuturna, T. and Daugevičius, M. (2010) The load-carrying capacity**

96

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. [6]

**Gao, B., Leung, C.K. Y. and Kim, J.K. (2007) Failure diagrams of FRP strengthened RC beams, Composite Structures, 77 (4) pp. 493–508.**

13

[7] Casas, R.J. and

**Pascual, J. (2007) Debonding of FRP in bending: Simplified model and experimental validation, Construction and Building Materials, 21 (10) pp. 1940–1949.**

16

[8]

**Yao, J. and Teng, J.G. (2007) Plate end debonding in FRP-plated RC beams - I: Experiments, Engineering Structures, 29 (10) pp. 2457–2471.**

57

[9] Da Silva Duarte, P.C.F. (2011)

**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.**

4

[10] Obaidat, **Y.T.,** Heyden, S., Dahlblom, **O.,** Abu-Farsakh, **G. and Abdel-Jawad, Y.** (2011) **Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates, Construction and Building Materials, 25**

(2) pp. 591-597. [11]

**Kotynia, R. (2009) Bond between composite materials and concrete in reinforced concrete members strengthened with CFRP composites,** Report **No 16,** Department of

22

concrete structures, Technical University of Lodz, Poland. [12] Lee, S.

**and Moy, S. (2007) Prediction of flexural strength of RC beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer, Science and Engineering of Composite Materials, 14 (3)**

55

pp. 169-180. [13] Sim, J. (2006)

**Structural performance of concrete T-beam bridge strengthened with fiber reinforced plastics, CFS, GFRP and AFS, Science and Engineering of Composite Materials, 13 (1) pp. 1-**

4

11. [14]

**Ramos, G., Casas, J.R. and Alarcón, A. (2015) Normalized Test for Prediction of Debonding Failure in Concrete Elements Strengthened with CFRP, Journal of Composites for Construction, 10 (6) pp. 509-519.**

16

[15] Mukhlesur, R.M. and Zamin, J.M. (2013) The

**Effect of CFRP Laminate Length for Strengthening the Tension Zone of the Reinforced Concrete T-Beam, International Journal of Scientific Research and Reviews IJSRR,**

25

2 (3) pp. 1-16. [16]

**Hollaway, L.C. (2010) A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, Construction and Building Materials, 24 (12) pp. 2419-2445.**

24

[17] CEB-FIP

**BULLETIN 40 (2007) FRP reinforcement in RC structures, Technical report, Switzerland: fib – International federation for structural concrete.**

80

[18]

**Malek, A.M. and Saadatmanesh, H. (1996) Physical and mechanical properties of typical fibers and resins, Proceedings 1st Conference on Composites In Infrastructure, Tucson, Arizona, pp. 68-79.**

58

[19] CEB-FIP

**BULLETIN 14** (2001) **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures**, Technical report, Switzerland: **fib – International federation for structural concrete.**

82

[20]

**Ibell, T., Darby, A. and Denton, S. (2009) Research issues related to the appropriate use of FRP in concrete structures, Construction and Building Materials, 23 (4) pp. 1521-1528.**

37

[21] Karbhari, VM. (2003)

**Durability of FRP composites for civil infrastructure myth, mystery or reality, Advances in Structural Engineering, 6 (3) pp. 243-255.**

67

[22]

**Grace, N.F., Sayed, G.A., Soliman, A.K. and Saleh K.R. (1999) Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates, ACI Structural Journal, 96 (5) pp. 865-**

13

875. [23]

**Sobuz, H.R., Ahmed, E., Hasan, S. and Uddin, A. (2011) Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending, International Journal of Civil & Structural Engineering, 2 (1)**

28

pp. 67-84. [24] Zhang, C. (2011) Mechanics and subcritical cracking of FRP-concrete interface, A Dissertation,

**Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa,**

105

Alabama. [25]

**Bank, L.C. (2006) Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials,** New Jersey: **Wiley.** [26] Khaloo, **A.R. and**

76

Gharachorlou, A. (2005)

**Numerical analysis of RC beams flexurally strengthened by CFRP laminates, Iranian Journal of Civil Engineering, 3 (1) pp. 1-**

4

9. [27] Karusena,

**W., Hardeo, P. and Bosnich, G. (2002) Rehabilitation of concrete beams by externally bonding fiber composite reinforcement, Proceedings of the ACUN-4 International Composites Conference,** Sydney, Australia, **pp. 222-226.**

47

[28]

**Kachlakev, D. and Mc Curry, D. (2000) Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, Composites Part B: Engineering, 31 (6) pp. 445-452.**

41

[29]

**Toutanji, H., Zhao, L. and Zhang, Y. (2006) Flexural behaviour of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix, Engineering Structures, 28 (4) pp. 557-566.**

27

[30] Tomičić, I. (2001) Ojačavanje armirano-betonskih greda nemetalnim lamelama, Građevinar, 53 (10) pp. 641-649. [31] Holmer, N.P.(2010) Parametric

**Study of the Bond Between Fiber Reinforced Polymers and Concrete using Finite Element Analysis, Master's thesis, Marquette University,**

4

Wisconsin, USA. [32]

**Sen, R., Shahawy, M., Mullins, G. and Spain, J. (1999) Durability of carbon fiber-reinforced polymer/epoxy/concrete bond in marine environment, ACI Structural Journal, 96 (6) pp. 906-914.**

35

[33]

**Shit, T. (2011) Experimental and numerical study on behavior of externally bonded RC T-beams using GFRP composites, Master's Thesis, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Rourkela.**

31

[34]

**Malek, A.M., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R (1998) Prediction of failure load of RC beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end, ACI Structural Journal, 95 (2) pp. 142-152.**

10

[35]

**Wang, Y-C. and Hsu, K. (2009) Design recommendations for the strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite plates, Composite structures, 88 (2) pp. 323-332.**

10

[36] Corrales, J.J.P. (1997)

**Finite element evaluation of the effects of lateral anchorage strips on the behavior of CFRP-strengthened RC beams, Master thesis, University of**

68

Central Florida Orlando, Florida. [37]

**Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. and Ghaleb, B.N. (1994) Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates, ACI Structural Journal, 91 (2) pp. 160-**

11

166. [38]

**Kim, Y., Quinn, K., Satrom, N., Garcia, J., Sun, W., Ghannoum, M .W. and Jirsa,**

83

O.J. (2011) Shear Strengthening of Reinforced and Prestressed Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets and Anchors, Technical report, Center for transportation research, The University of Texas at Austin. [39]

**Eshwar, N., Ibell, T. and Nanni, A. (2003) CFRP strengthening of concrete bridges with curved soffits, Proceedings of the 10th International conference and exhibition – Structural faults and repair conference, London. [40] Thomsen, H.,**

52

**Spacone, E., Limkatanyu, S. and Camata, G. (2004) Failure Mode**

100

Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers, Journal of Composites for Construction, 8 (2) pp. 123-131. [41]

**Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R. (1991) RC beams strengthened with GFRP plates, Journal of Structural engineering, 117 (11) pp. 3417-3433.**

64

[42]

**Rahimi, H. and Hutchinson, A. (2001) Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates, Journal of Composites for Construction, 5 (1)**

15

pp. 44-56. [43]

**Obaidat, Y.T. (2010) Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer, Licentiate Dissertation, Lund University,**

69

Sweden. [44]

**Chen, F. and Qiao, P. (2009) Debonding analysis of FRP-concrete interface between two balanced adjacent flexural cracks in plated beams, International Journal of Solids and Structures, 46**

38



(13) pp. 2618-2628. [45]

**Dai, J.G., Ueda, T., Sato, Y. and Ito, T. (2005) Flexural strengthening of RC**

78

beams using externally bonded FRP sheets through flexible adhesive bonding, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, pp. 205-213. [46]

**Ceroni, F. (2010) Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials, Construction and Building Materials, 24 (9) pp. 1547-1559.**

65

[47]

**ACI 440.2R-08 (2008) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.**

46

[48]

**Chen, J. F. and Teng, J. G. (2001) Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, Journal of Structural Engineering, 127 (7) pp. 784- 791.**

43

[49]

**ACI 318-05 (2005) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.**

71

[50]

**Blaschko, M. (1997) Strengthening with CFRP, Münchner Massivbau Seminar, TU München (in German).**

20

[51]

**Eurocode 2 (2004) Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, CEN, EN 1992-1-1.**

62

[52]

**Matthys, S. (2000) Structural behaviour and design of concrete members**

98

strengthened with externally bonded FRP reinforcement, PhD thesis, Department of Structural Engineering, Faculty of Applied Sciences, Ghent University, Belgium. [53]

**Jansze, W. (1997) Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates, PhD dissertation, TU Delft, The Netherlands.**

20

[54]

**Neville A.M., Dilger W.H., Brooks J.J. (1983) Creep of plain and structural concrete, New York: Construction Press.**

66

[55] Rzanicin, A. (1974) Teorija puženja materijala, Beograd: Građevinska knjiga. [56]

**PBAB '87 (1995) Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton,**

95

Beograd: Građevinska knjiga. [57] Muravljev, M. (2015) Tehnologija betona, Beograd: Građevinska knjiga. [58]

**Hull, D. and Clyne, T.W. (1996) An Introduction to Composite Materials, 2nd edition, Cambridge: Cambridge University Press.**

32

[59]

**Budelman, H. and Rostasy, F.S. (1993) Creep Rupture Behaviour of FRP**

32

Elements for Prestressed Concrete-Phenomenon, Results and Forecast Models, Proceedings of ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete structures, Vancouver, pp. 87-100. [60]

**ACI 440.1R-06 (2006) Guide for the Design and Construction of concrete reinforced with FRP bars, Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.**

22

[61]

**Arduini, M. and Nanni, A. (1997) Behavior of Precracked RC beams strengthened with carbon FRP Sheets, ASCE Journal of Composites for Construction, 1 (2) pp. 63- 70.**

40

[62] Hamed, E. and

**Bradford, M.A. (2010) Creep in concrete beams strengthened with composite materials, European Journal of Mechanics - A/Solids, 29 (6) pp. 951- 965.**

60

[63]

**Washa, G.W. and Fluck, P.G. (1952) Effect of Compressive Reinforcement on the Plastic Flow of Reinforced Concrete Beams, Journal of the American Concrete Institute,**

45

49 (10) pp. 89-108. [64]

**Shin, Y.S. and Lee, C. (2003) Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load, ACI Structural Journal, 100 (2)**

15

pp. 231-239. [65] Pelvis,

**N. and Triantafillou, T.C. (1994) Time-Dependent Behavior of RC Members Strengthened with FRP Laminates, Journal of Structural Engineering, ASCE, 120 (3) pp. 1016-1042.**

48

[66] Jaiswal,

M. and

Ramtekkar, G. (2017) Experimental Study of Reinforced (RC) beams Strengthened by Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP): Effect of Beam Size and Length of CFRP, International Journal of Applied Engineering Research, 12 (24) pp.

14075-14081. [67]

**Daugevičius, M., Valivonis, J. and Marčiukaitis, G. (2012) Deflection analysis of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer under long-term load action, Journal of Zhejiang University-Science A,**

29

13 (8) pp. 571-583. [68] Wang,

**W. and Guo, L. (2006) Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load, International Journal of Solids and Structures, 43 (6)**

44

pp. 1372-1387. [69] Cho, D., Jeong, H. and Han, K. (2018)

**Residual Strength and Deformation Recovery of RC Beams strengthened with FRPs Plates under the Sustained Load,**

75

Polymers & Polymer Composites, 26 (1) pp. 119-126. [70]

**Paulson, K.A., Nilson, A.H. and Hover, K.C. (1991) Long-term deflection of high-strength concrete beams, Materials Journal, American Concrete Institute, 88 (2) pp. 197–206.**

49

[71]

**Jung, S-Y., Kim, N.- Il and Shin, D.K. (2007) Viscoelastic behavior on composite beam using nonlinear creep model, Steel and Composite Structures, 7 (5)**

54

pp. 355- 376. [72] Stierwalt, D.D. and Hamilton,

**H.R.III (2005) Creep of concrete masonry walls strengthened with FRP composites, Construction and building materials, 19**

70

(3) pp. 181-187. [73]

**Savoia, M., Ferracuti, B. and Mazzotti, C. (2005) Creep deformation of fiber reinforced plastics - plated reinforced concrete tensile members, Journal of composites for construction,**

53

9 (1) pp. 63-72. [74] Rostasy, F. (1992) Fiber

**Composite Elements and Techniques as Non-Metallic Reinforcement of Concrete, Technical Report - Evaluation of potentials and production techniques of FRP, BRITE Project 4142/BREU-CT 91 0515.**

42

[75]

**Yamaguchi, T., Nishimura, T. and Uomoto, T. (1998) Creep Model of FRP Rods**

20

Based on Fibre Damaging Rate, Proceedings 1st International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, Sherbrooke, Canada. [76] Vujović, P. (

**1999) Uticaj vremenskih deformacija na granična stanja AB ploča napregnutih u svojoj ravni, Doktorska disertacija,**

81

Beograd. [77]

**Zejak, R. ( 2002) Prilog analizi vitkih armirano-betonskih elemenata sa kosim savijanjem, Doktorska disertacija, Beograd.**

89

[78]

**Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S., Chansawat, K. and Potisuk, T. (2001) Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates, Final Report SPR 316, Oregon department of transportation, USA.**

26

[79]

**Alhaddad, M.S., Siddiqui, N.A., Abadel, A.A., Alsayed, S.H. and Al-Salloum,**

77

Y.A. (2012) Numerical investigations on the seismic behavior of FRP and TRM Upgraded RC exterior beam-column joints, *Journal of Composites for Construction*, 16 (3) pp. 308-321. [80]

**Parvin, A. and Granata, P. (2000) Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints, *Composites Part B Engineering*, 31 (6) pp. 499- 509.**

59

[81]

**Mahini, S.S. and Ronagh, H.R. (2011) Web-bonded FRPs for relocation of plastic hinges away from the column face in exterior RC joints, *Composite Structures*, 93 (10)**

33

pp. 2460-2472. [82]

**Hawileh, R.A., Naser, M.Z. and Abdalia, J.A. (2009) Finite element simulation of reinforced concrete beams externally strengthened with short-length CFRP plates, *Composites Part B Engineering*, 45 (1)**

34

pp. 1722-1730. [83]

**Mirmiran, A., Zagers, K. and Yuan, W. (2000) Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites, *Finite Elements in Analysis and Design*, 35 (1) pp. 79-96.**

36

[84] ANSYS (2012) Workbench User's Guide, Release 14.5, ANSYS, Inc. [85]

**William, K.J. and Warnke, E.P. (1974) Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete, In proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering, Bergamo, Italy: ISMES Press.**

19

[86] ANSYS (1999) Theory Reference, Release 5.6, ANSYS, Inc. [87] Luo, R-d. (2008) Values of shear transfer coefficients of concrete element Solid 65 in Ansys, *Journal of Jiangsu University*, 29 (2) pp. 169-172. [88]

**Drucker, D., Prager, W. and Greenberg, H. (1952) Extended limit design theorems for continuous media, *Quarterly of Applied Mathematics*, 9 (4)**

19

pp. 381- 389. [89] Džolev, I., Rašeta, A., Lađinović, Đ., Radujković, A. and Starčev-Ćurčin, A. (2019) Influence of tensile stress softening in nonlinear concrete modelling, 18th International Symposium of MASE at Ohrid, North Macedonia, pp. 1234-1242. [90] Choi, K., Meshgin, P. and Reda Taha, M.M. (2007) Shear creep of epoxy at the concrete-FRP interfaces, Composites Part : Engineering, 38 (5) pp. 772-780. Prilozi PRILOG A Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja PRILOG A1 Podaci očitani na instrumentima za mjerenje deformacijskog stanja greda pri kratkotrajnom opterećenju PRILOG A2 Rezultati mjerenja deformacijskog stanja greda pri kratkotrajnom opterećenju u karakterističnom presjeku u sredini Prilog A1: GREDA G1a Oznaka grede Datum ispitivanja l ( m ) l CFRP ( m ) Vrsta opterećenja Mu (kNm ) Tip lom a T ( o C ) W ( % ) G1a 10.10.2014. 7.5 / koncentrisana sila 65.6 na savijanje 21 93 UGIBI Mu (kNm) Č ΔČ u (cm) 0 -143 0 0.00 PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 0 (kritični presjek) a (mm) / 19 28 37 292 180 435 0.18 0.44 19 28 // 38 47 1176 1857 1319 2000 1.32 2.00 38 47 // 56 3002 3145 3.15 56 0.3 60 65 3720 7817 3863 7960 3.86 7.96 60 65 0.6 3.0 DILATACIJE U Z A T EGNUT OM BET ONU Mu (kNm) 1 2 3 4 5 6 0 19 28 38 47 56 60 0 1.01 1.87 3.94 4.55 8.96 11.12 0 0.85 1.48 3.25 5.17 9.61 10.83 0 1.44 2.18 4.41 5.02 12.19 13.46 0 1.26 2.36 4.48 6.21 9.23 12.66 0 0.91 1.75 4.04 5.99 8.81 11.09 0 1.30 2.88 4.15 6.47 10.05 12.22 Mu (kNm) 1 DILATACIJE U 2 PRITISNUTOM 3 BETONU 4 5 6 0 19 0 0.96 0 0.66 0 0.45 0 0.61 0 0.39 0 0.52 28 38 2.38 3.44 1.83 3.02 1.55 2.69 1.63 2.92 1.34 2.55 1.70 3.18 47 56 4.15 5.31 3.75 5.40 3.23 4.66 4.05 5.21 3.48 4.87 3.82 5.48 60 6.18 6.79 5.75 6.01 5.62 6.29 Prilog A1: GREDA G2 Oznaka grede Datum ispitivanja l l CFRP Vrsta Mu T W ( m ) ( m ) opterećenja (kNm) Tip loma ( o C ) ( % ) G2 28.10.2014. 7.5 4.0 koncentrisana sila 125.5 KDP+lom na savijanje 19 60 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 75 94 103 113 122 0 UGIBI Č 11704 11699 11693 11686 11683 11679 11671 11665 11650 11636 11668 ΔČ 0 5 11 18 21 25 33 39 54 68 36 u (cm) 0.0 0.5 1.1 1.8 2.1 2.5 3.3 3.9 5.4 6.8 3.6 PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 19 28 38 47 56 66 75 84 94 103 113 (kritični presjek) a (mm) / / / / / / / 0.45 0.50 0.60 0.65 0.75 Mu (kNm) 0 19 56 66 75 84 94 103 113 122 0 1 0 0.05 0.20 0.20 0.23 0.25 0.26 0.26 0.26 0.24 0.02 DILATACIJA U 2 0 0.17 0.87 1.05 1.25 1.44 1.63 1.82 2.06 2.68 1.15 KARBONSKOJ TRACI 3 0 0.31 1.21 1.43 1.67 1.90 2.19 3.01 5.42 6.59 4.34 4 0 0.15 0.80 1.02 1.22 1.41 1.60 1.77 2.00 2.34 0.74 5 0 0.05 0.15 0.15 0.16 0.15 0.15 0.14 0.16 0.17 0.05 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 75 84 94 103 113 122 1 0 0.44 1.74 2.45 3.60 4.05 4.43 4.66 4.79 4.91 5.17 ZATEGNUTOM BETONU 3 0 0.51 4.37 4.77 5.09 5.40 5.62 5.87 5.99 6.13 6.53 DILATACIJA U 2 0 0.49 1.91 3.02 4.36 4.85 5.29 5.48 5.61 5.84 6.11 4 0 0.43 1.22 2.80 4.15 4.37 4.98 5.14 5.30 5.77 6.07 5 0 0.59 1.83 2.64 3.58 4.46 4.99 5.27 5.46 5.68 6.34 6 0 0.52 1.66 2.35 3.74 4.24 4.60 4.96 5.25 5.61 5.88 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 75 84 94 103 113 122 PRITISNUTOM BETONU 2 0 1.31 2.26 2.89 3.47 3.85 4.11 5.60 7.19 7.37 7.49 DILATACIJA U 1 0 1.33 5.61 7.16 7.29 7.33 7.39 7.46 7.51 7.56 7.59 3 0 0.48 1.23 2.56 3.02 4.44 5.08 6.95 7.03 7.19 7.34 4 0 0.64 1.55 2.69 3.56 4.17 5.52 6.89 7.03 7.17 7.41 Prilog A1: GREDA G3 Oznaka grede Datum l ispitivanja ( m ) l CFRP Vrsta ( m ) opterećenja Mu (kNm ) Tip loma T ( o C ) W ( % ) G3 15.11.2014. 7.5 6.0 koncentrisana sila 138.7 KDP+lom na savijanje 14 73 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 84 94 103 122 137 UGIBI Č 220 228 241 302 330 367 382 406 445 990 ΔČ 0 8 21 82 110 147 162 186 225 770 u (cm) 0.00 0.08 0.21 0.82 1.10 1.47 1.62 1.86 2.25 7.70 PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 0 19 38 56 66 75 84 94 103 122 (kritični presjek) a (mm) / / / / / / / 0.35 0.40 0.50 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 84 94 103 113 122 1 0 0.11 0.23 0.26 0.27 0.27 0.29 0.32 0.35 0.36 DILATACIJA U 2 0 0.19 0.33 0.68 1.39 1.65 1.72 1.85 2.01 3.12 KARBONSKOJ TRACI 3 0 0.45 0.79 1.19 1.44 1.89 2.36 3.01 4.63 7.45 4 0 0.09 0.26 0.70 0.98 1.22 1.75 1.91 2.18 2.55 5 0 0.12 0.36 0.82 1.29 1.48 2.31 2.85 3.16 3.64 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 84 94 103 122 1 0 0.51 1.68 2.84 3.68 4.11 4.29 4.70 5.01 DILATACIJA U 2 0 0.62 2.11 2.95 3.36 4.48 5.02 5.33 6.18 ZATEGNUTOM BETONU 3 0 1.32 4.54 4.98 5.23 6.56 7.07 7.88 8.17 4 0 0.58 1.65 2.19 2.96 3.87 4.65 6.21 6.95 5 0 0.42 1.56 2.81 3.62 4.15 4.76 6.06 7.22 6 0 0.81 1.93 3.05 3.71 4.60 5.51 6.47 7.14 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 84 94 103 122 DILATACIJA U 1 0 2.52

6.22 7.45 7.52 7.59 7.65 7.77 7.81 PRITISNUTOM BETONU 2 0 1.11 1.86 2.55 3.13 3.68 4.25 5.89 6.55 3 0 0.89 1.45  
2.84 4.01 4.95 5.62 6.33 7.23 4 0 0.58 1.21 2.03 2.76 3.41 4.67 6.12 6.88 0 630 410 4.10 137 0.55 0 0.13 1.25 3.56 1.05  
1.57 Prilog A1: GREDA G1b Oznaka grede Datum ispitivanja l (m) l CFRP (m) Vrsta opterećenja Mu (kNm) Tip loma T ( oC) W (%) G1b 17.01.2016. 7.5 / ravnomjerno podijeljeno 76.9 na savijanje 6 14 Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 69 UGIBI Č  
110 1090 3350 5990 7750 9230 9510 ΔČ 0 980 3240 5880 7640 9120 9400 u (cm) 0.00 0.98 3.24 5.88 7.64 9.12 9.40  
PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 69 (kritični presjek) a (mm) / / / 0.40 0.55 0.80 2.50 Mu (kNm) 0 9 26  
39 51 65 69 1 0 0.38 0.95 3.66 6.16 8.45 9.96 ZATEGNUTOM BETONU 3 0 0.29 0.82 4.23 7.41 10.02 10.76 DILATACIJA  
U 2 0 0.54 1.13 5.80 8.80 11.30 11.88 4 0 0.65 1.09 5.54 8.20 10.68 11.53 5 0 0.44 0.87 4.05 7.38 9.55 11.16 6 0 0.71  
1.24 4.93 7.87 9.91 11.35 Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 69 1 0 0.37 1.43 2.56 3.77 4.62 5.04 PRITISNUTOM BETONU 3 0  
0.41 1.51 2.45 3.62 4.89 5.11 DILATACIJA U 2 0 0.25 1.12 1.94 3.03 4.57 4.90 4 0 0.60 1.85 2.33 3.84 4.32 4.79 5 0 0.28  
0.95 1.84 2.93 3.77 4.63 6 0 0.45 1.23 1.75 2.88 3.81 4.55 Prilog A1: GREDA G4 Oznaka grede Datum ispitivanja l (m) l  
CFRP (m) Vrsta opterećenja Mu (kNm) Tip loma T ( oC) W (%) G4 16.06.2016. 7.5 4.0 rapvondoijmeljeernnoo 119.4  
bloemtonpaoizdaušzt.strloajkue 28 70 Mu (kNm) 0 39 59 69 70 108 117 119 0 UGIBI Č 285 435 525 555 565 805 1065  
1185 1000 ΔČ 0 150 240 270 280 520 780 900 715 u (cm) 0.00 1.50 2.40 2.70 2.80 5.20 7.80 9.00 7.15 PRSLINE U  
BETONU Mu (kNm) 39 59 65 69 70 98 108 117 (kritični presjek) a (mm) oslonac / / / / / 0.3 0.8 2.0 polje / / / / / 0.5 0.9 /  
Mu (kNm) 0 39 59 69 70 98 108 117 0 1 1 279 495 88 72 35 20 307 37 2 4 631 1130 1428 1491 2031 2264 3006 154  
DILATACIJA U 3 5 718 1243 1549 1614 2454 4071 5519 256 KARBONSKOJ TRACI 4 3 749 1258 1563 1634 2643 4761  
6150 2247 5 0 688 1209 1502 1566 2200 2577 4531 4040 6 0 527 1040 1330 1392 1882 2090 2367 3970 7 2 262 482  
56 44 154 187 36 1263 Mu (kNm) 0 39 59 69 70 98 108 117 0 1 3 708 1210 1494 1533 2231 4264 5589 - ZATEGNUTOM  
BETONU 3 0 655 1080 1335 1385 2039 2401 2580 - DILATACIJA U 2 0 641 1090 1365 1437 - - - - 4 5 464 887 1130 1174  
1853 3764 6290 3747 5 2 661 1114 1352 1398 2154 3486 3952 1484 6 1 701 1122 1332 1377 1826 2221 2640 - Mu  
(kNm) 0 39 59 69 70 98 108 117 0 1 4 185 333 419 446 673 884 1047 900 PRITISNUTOM BETONU 3 17 311 459 542  
575 760 855 947 829 DILATACIJA U 2 - - - - - - - - - 4 13 332 459 534 551 707 861 977 - 5 14 425 571 656 674 850 1038  
1170 985 6 7 322 447 525 540 680 770 876 - Prilog A1: GREDA G5 Oznaka grede Datum ispitivanja l (m) l CFRP (m)  
Vrsta opterećenja Mu (kNm) Tip loma T ( oC) W (%) G5 02.09.2016. 7.5 4.0 ra pv on di o je m lj je er n n o o 128.8 na  
savijanje 31 55 Mu (kNm) 0 39 59 69 70 89 108 117 127 0 UGIBI Č 250 363 415 465 484 610 900 1100 1350 870 ΔČ 0  
113 165 215 234 360 650 850 1100 620 u(cm) 0.00 1.13 1.65 2.15 2.34 3.60 6.50 8.50 11.00 6.20 PRSLINE U BETONU  
Mu (kNm) 0 39 59 66 69 70 89 108 117 127 (krit.presj.) a (mm) / / 0.45 0.50 0.55 0.55 0.60 0.70 0.75 0.80 U AJI CATALI  
D 2 108 188 247 400 569 803 950 1099 1232 1293 1384 1405 154 1 18 29 38 62 105 181 255 83 46 36 26 23 37 I  
CARTJ OKS NOBRAK Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 70 89 108 117 127 128 0 3 147 267 355 610 862 1147 1305 1585  
1818 1916 2090 2137 256 4 225 385 504 781 1034 1295 1447 1793 2158 2734 4346 4633 2247 5 365 549 726 1036  
1308 1643 1826 2319 3668 4815 6890 7199 4040 6 285 428 627 924 1181 1545 1718 2134 3308 4443 6628 6990  
3970 7 155 240 389 677 954 1267 1440 1806 2161 2424 3319 3664 1263 8 88 125 191 332 525 782 924 1116 1296  
1394 1527 1551 222 9 16 22 34 57 110 91 88 88 81 75 65 62 8 Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 70 89 108 117 127 128 0 U  
AJI CATALI D MOTUNGETAZ 1 248 398 505 778 1015 1257 1416 1786 2117 2709 2870 3052 1306 UNOTEB 2 251 390  
539 803 1034 1298 1443 1852 2755 3164 5732 6107 3346 3 204 324 498 726 951 1202 1347 1695 3105 3920 4751  
4891 2712 4 124 212 285 458 633 773 862 1089 1350 1651 4716 5126 2654 5 397 635 229 1130 1408 1707 1894 2376  
3823 4527 6326 6608 3784 6 305 456 671 1020 1288 1593 1776 2144 3196 4643 7401 7876 4429 U AJI CATALI D  
MOTUNSI TI RP 1 227 331 408 528 617 688 729 818 911 984 1082 1098 392 Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 70 89 108 117  
127 128 0 UNOTEB 2 286 420 528 669 771 871 914 1022 1154 1243 1361 1384 498 3 234 330 414 525 610 736 777



893 1095 1206 1375 1411 468 4 85 125 159 227 288 389 432 523 626 712 856 881 207 5 100 139 178 244 304 401  
442 534 664 772 900 919 231 6 95 136 183 253 315 427 468 565 758 854 1008 1039 284 Prilog A2: UGIBI P (kN) 0 10  
15 20 25 30 32 35 G 1a Mu (kNm) 0 19 28 38 47 56 60 66 U1a (cm) 0.00 0.18 0.44 1.32 2.00 3.15 3.86 7.96 P (kN) 0 10  
20 30 35 40 50 55 60 65 G 2 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 75 94 103 113 122 U2 (cm) 0.0 0.5 1.1 1.8 2.1 2.5 3.3 3.9 5.4 6.8 P  
(kN) 0 20 30 35 45 55 65 70 G 3 Mu (kNm) 0 38 56 66 84 103 122 131 U3 (cm) 0.00 0.21 0.82 1.10 1.47 1.86 2.25 7.70 P  
(kN) 0 15 25 35 45 55 65 G 1b Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 69 U1b (cm) 0.00 0.98 3.24 5.88 7.64 9.12 9.40 P (kN) 0 25  
45 65 75 90 95 100 G 4 Mu (kNm) 0 39 59 69 70 98 108 117 U4 (cm) 0.00 1.50 2.40 2.70 2.80 5.20 7.80 9.00 P (kN) 0 25  
45 65 75 85 95 100 105 G 5 Mu (kNm) 0 39 59 69 70 89 108 117 127 U5 (cm) 0.00 1.13 1.65 2.15 2.34 3.60 6.50 8.50  
11.10 Prilog A2: DILATACIJE U ZATEGNUTOM PRESJEKU BETONA P (kN) 0 10 15 20 25 30 32 35 G 1a Mu (kNm) 0 19  
28 38 47 56 60 66  $\epsilon$ 1a (%) 0 1.44 2.18 4.41 5.02 12.19 13.46 / P (kN) 0 10 20 30 35 40 50 65 67 G 2 Mu (kNm) 0 19 38  
56 66 75 94 122 126  $\epsilon$ 2 (%) 0.00 0.51 4.37 4.77 5.09 5.40 5.87 6.53 / P (kN) 0 10 20 30 45 55 65 74 G 3 Mu (kNm) 0 19  
38 56 84 103 122 139  $\epsilon$ 3 (%) 0.00 1.32 4.54 4.98 6.56 7.88 8.17 / P (kN) 0 5 15 25 35 55 65 71 G 1b Mu (kNm) 0 9 26  
39 51 65 69 69  $\epsilon$ 1b (%) 0.00 0.54 1.13 5.80 8.80 11.30 11.88 / P (kN) 0 25 45 65 75 90 95 100 G 4 Mu (kNm) 0 39 59 69  
70 98 108 117  $\epsilon$ 4 (%) 0.01 0.46 0.89 1.13 1.17 1.85 3.76 6.29 P (kN) 0 15 25 35 45 55 75 85 95 100 105 106 G 5 Mu  
(kNm) 0 26 39 51 59 66 70 89 108 117 127 128  $\epsilon$ 5 (%) 0.31 0.46 0.67 1.02 1.29 1.59 1.78 2.14 3.20 4.64 7.40 7.88  
Prilog A2: DILATACIJE U PRITISNUTOM PRESJEKU BETONA P (kN) 0 10 15 20 25 30 32 35 G 1a Mu (kNm) 0 19 28 38  
47 56 60 66  $\epsilon$ 1a (%) 0 0.66 1.83 3.02 3.75 5.40 5.94 6.79 P (kN) 0 10 20 30 35 40 50 65 G 2 Mu (kNm) 0 19 38 56 66 75  
94 122  $\epsilon$ 2 (%) 0.00 1.33 5.61 7.16 7.29 7.33 7.46 7.59 P (kN) 0 10 20 30 40 50 60 65 G 3 Mu (kNm) 0 19 38 56 75 94  
113 122  $\epsilon$ 3 (%) 0.00 2.52 6.22 7.45 7.59 7.77 7.89 7.96 P (kN) 0 5 15 25 35 45 55 65 71 G 1b Mu (kNm) 0 9 26 39 51 59  
66 69 69  $\epsilon$ 1b (%) 0 0.21 0.41 1.51 2.45 3.62 4.89 5.11 / P (kN) 0 25 45 65 75 90 95 100 G 4 Mu (kNm) 0 39 59 69 70 98  
108 117  $\epsilon$ 4 (%) 0.00 0.43 0.57 0.66 0.67 0.85 1.04 1.17 P (kN) 0 15 25 35 45 55 75 85 95 105 106 G 5 Mu (kNm) 0 26 39  
51 59 66 70 89 108 127 128  $\epsilon$ 5 (%) 0.00 0.41 0.53 0.61 0.74 0.78 0.81 0.89 1.10 1.38 1.41 Prilog A2: DILATACIJE U  
KARBONSKIM TRAKAMA P (kN) 0 10 30 35 40 45 50 55 60 65 0 G 2 Mu (kNm) 0 19 56 66 75 84 94 103 113 122 0  $\epsilon$ 2  
(%) 0.00 0.31 1.21 1.43 1.67 1.90 2.19 3.01 5.42 6.59 4.34 P (kN) 0 10 20 30 40 50 60 65 0 G 3 Mu (kNm) 0 19 38 56 75  
94 113 122 0  $\epsilon$ 3 (%) 0.00 0.45 0.79 1.19 1.89 2.36 4.63 7.45 3.56 P (kN) 0 25 45 65 75 90 95 100 0 G 4 Mu (kNm) 0 39  
59 69 70 98 108 117 0  $\epsilon$ 4 (%) 0.00 0.46 0.89 1.13 1.17 1.85 3.76 6.29 3.75 P (kN) 0 15 25 35 45 55 75 85 95 100 105  
106 0 G 5 Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 70 89 108 117 127 128 0  $\epsilon$ 5 (%) 0.00 0.55 0.73 1.04 1.31 1.64 1.83 2.32 3.67 4.82  
6.89 7.20 4.04 PRILOG B Rezultati ispitivanja greda pod dejstvom dugotrajnog opterećenja PRILOG B1 Podaci očitani na  
instrumentima za mjerenje deformacijskog stanja greda pri dugotrajnom opterećenju PRILOG B2 Rezultati mjerenja  
deformacijskog stanja greda pri dugotrajnom opterećenju u karakterističnom presjeku PRILOG B3 Podaci očitani na  
instrumentima za mjerenje tečenja na kontrolnim cilindrima PRILOG B4 Rezultati ispitivanja tečenja na kontrolnim  
cilindrima Prilog B1: GREDA G6 Oznaka I grede (m) ICFRP (m) Vrsta opterećenja Mu opterećenja (kNm) \* Nivo Tip loma  
W lom (dani) (oC) (%) Starost pri T G6 7.5 6.0 dugotra pjo nd oijr e a l j v e n n o o mjerno 55% 134.0 lon m a s pa ovi b je  
at n o j n e u 177 12 68 PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 0 59 66 69 70 89 108 117 127 132 (kritični presjek) a (m m) / / /  
0.30 0.45 0.55 0.75 0.80 0.90 1.20 Datum \*\* t Mu DILATACIJA U KARBONSKOJ DILATACIJA U ZATEGNUTOM  
DILATACIJA U PRITISNUTOM ispitiv. (dani) (kNm) TRACI BETONU BETONU 22.09.16 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 22.09.16 0 39 22 394 572 792 763 870 600 317 19 729 753 740 755 678 873 536 267 488 191 249 417 22.09.16  
0 59 27 781 1136 1315 1284 1466 1121 706 20 1253 1234 1206 1320 1132 1518 754 422 692 296 362 437 22.09.16 0  
66 28 810 1193 1385 1359 1574 1231 834 25 1327 1298 1290 1390 1179 1632 784 446 725 312 379 448 22.09.16 0 70  
29 930 1341 1543 1501 1765 1385 987 29 1490 1420 1477 1505 1226 1809 842 495 786 346 414 447 25.09.16 3 70 29

942 1357 1564 1522 1781 1402 1010 29 1499 1441 1481 1519 1233 1826 846 497 797 348 416 4 45 02.10.16 10 70 29  
 943 1359 1569 1525 1792 1405 1012 29 1505 1458 1483 1522 1245 1839 850 499 802 351 417 452 09.10.16 17 70 29  
 946 1360 1577 1531 1802 1406 1016 31 1514 1462 1483 1523 1251 1846 861 500 807 352 419 458 23.10.16 34 70 29  
 946 1360 1581 1534 1815 1410 1017 32 1518 1467 1490 1527 1256 1860 867 507 817 355 422 461 06.11.16 48 70 29  
 948 1363 1584 1541 1822 1416 1021 32 1521 1471 1492 1528 1261 1872 867 511 820 359 425 461 20.11.16 62 70 30  
 949 1366 1589 1545 1828 1418 1023 32 1527 1475 1494 1528 1263 1880 869 513 828 362 426 462 04.12.16 76 70 30  
 949 1367 1595 1547 1831 1424 1023 34 1532 1479 1497 1530 1269 1882 870 514 829 363 426 467 18.12.16 90 70 32  
 949 1382 1603 1562 1840 1424 1028 36 1532 1490 1499 1536 1274 1893 874 517 833 380 429 472 01.01.17 104 70  
 34 950 1389 1613 1578 1855 1427 1034 37 1540 1512 1517 1559 1276 1916 888 538 837 384 431 480 15.01.17 118  
 70 50 951 1392 1632 1611 1858 1427 1034 41 1558 1544 1538 1577 1291 1940 890 540 839 385 436 495 29.01.17  
 132 70 51 951 1395 1636 1620 1871 1429 1036 43 1587 1553 1552 1590 1305 1961 892 541 839 388 437 499  
 12.02.17 146 70 51 953 1395 1639 1648 1874 1433 1037 43 1591 1562 1564 1603 1318 1969 895 546 844 391 440  
 507 26.02.17 160 70 53 955 1396 1640 1666 1882 1433 1037 47 1602 1567 1567 1605 1327 1978 900 547 848 395  
 442 509 12.03.17 174 70 50 955 1398 1644 1694 1886 1435 1038 48 1604 1570 1567 1611 1330 1985 906 551 853  
 399 443 509 15.03.17 177 80 52 968 1439 1714 1716 1929 1473 1044 50 1717 1690 1678 1707 1420 2119 945 574  
 729 421 464 523 15.03.17 177 89 52 1018 1557 1876 1898 2120 1588 1116 54 1894 1872 1838 1853 1562 2325 1001  
 627 786 477 507 564 15.03.17 177 108 51 1165 1803 2363 3451 3471 1855 1313 57 2348 3552 3018 2408 3229 4376  
 1236 863 1087 626 665 721 15.03.17 177 117 53 1236 1944 3522 4743 4463 2050 1399 61 3561 4557 4328 4331 4774  
 5676 1432 1044 1292 730 764 804 15.03.17 177 127 51 1312 2187 4599 6183 5744 2514 1472 65 4722 4977 5816  
 5432 6692 7618 1613 1197 1448 818 847 882 15.03.17 177 132 49 1369 2983 5372 7121 6455 2878 1499 77 5566  
 5321 6614 5982 7323 8340 1718 1282 1558 884 914 932 18.03.17 177 0 43 952 2177 4428 5942 5363 2175 1110 53  
 4692 4389 5699 4931 6141 6966 1365 954 1177 549 679 705 01.04.17 191 0 33 912 2102 4392 5867 5312 2105 1086  
 41 4606 4268 5618 4859 6101 6785 1308 911 1112 522 619 680 15.04.17 205 0 31 899 2085 4377 5845 5292 2090  
 1069 30 4538 4215 5555 4800 5889 6662 1274 878 1096 501 576 671 \* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na  
 nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja \*\* vrijeme prošlo od početka ispitivanja Prilog B1: GREDA G7  
 Oznaka I grede (m) I CFRP (m) Vrsta opterećenja \* Nivo opterećenja Mu (kNm) Tip loma W lomu (dani) (oC) (%) Starost  
 pri T G 7 7.5 4.0 dugotrajno ravnomjerno lom po zaštitnom sloju podijeljeno 60% 125.0 betona i duž trake 181 29 75  
 PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 0 26 39 59 69 70 89 108 117 123 (kritični presjek) a (m m) / / / 0.30 0.55 0.70 0.85 1.10  
 1.20 1.35 Mu ispitivanja (dani) (kNm) Datum \*\*t DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI DILATACIJA U ZATEGNUTOM  
 BETONU DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU 30.12.16. 0 30.12.16. 0 26 128 398  
 457 493 439 356 158 415 529 366 355 463 611 211 191 117 203 237 201 30.12.16. 0 39 228 715 772 849 763 645 227  
 729 806 579 729 771 1038 322 284 182 304 334 292 30.12.16. 0 59 254 1393 1392 1561 1455 1295 241 1365 1411  
 1186 1372 1469 1912 547 470 336 474 495 446 30.12.16. 0 0 279 1573 1547 1741 1625 1430 260 1539 1560 1334  
 1539 1638 2113 590 503 369 526 542 492 02.01.17. 3 3 284 1596 1557 1755 1646 1434 263 1566 1561 1345 1561  
 1651 2131 593 505 372 530 546 498 09.01.17. 10 9 284 1599 1565 1758 1650 1437 265 1593 1563 1348 1573 1655  
 2133 595 507 372 533 547 499 16.01.17. 17 16 284 1601 1571 1759 1651 1440 269 1663 1567 1349 1587 1657 2135  
 597 507 372 534 549 499 23.01.17. 24 23 287 1600 1573 1767 1654 1444 269 1720 1569 1362 1642 1667 2150 598  
 508 384 537 551 504 06.02.17. 38 36 288 1604 1579 1773 1659 1452 278 1726 1571 1367 1646 1669 2151 602 517  
 389 544 554 506 20.02.17. 52 49 301 1604 1579 1774 1661 1455 279 1731 1578 1370 1650 1672 2151 607 520 391  
 545 562 511 06.03.17. 66 62 305 1605 1581 1777 1663 1459 280 1734 1580 1376 1656 1679 2154 613 528 393 550

564 515 20.03.17. 80 75 305 1611 1582 1778 1664 1460 280 1738 1582 1379 1659 1680 2158 614 533 399 552 567  
517 03.04.17. 94 88 305 1613 1587 1789 1670 1463 286 1764 1583 1383 1663 1685 2160 619 536 401 554 568 517  
17.04.17. 108 101 308 1616 1593 1793 1675 1464 287 1767 1588 1392 1666 1687 2160 628 537 401 555 571 520  
01.05.17. 122 114 311 1616 1593 1794 1675 1470 287 1773 1590 1396 1680 1695 2182 632 542 409 560 572 520  
15.05.17. 136 128 312 1628 1607 1807 1688 1476 290 1780 1591 1406 1697 1711 2198 634 545 415 561 574 522  
29.05.17. 150 141 312 1655 1639 1839 1716 1505 297 1798 1594 1415 1707 1728 2211 639 549 417 561 574 523  
12.06.17. 164 154 314 1670 1666 1859 1768 1521 297 1812 1624 1433 1721 1739 2219 640 552 422 563 575 525  
26.06.17. 178 263 315 1689 1682 1888 1763 1536 298 1839 1637 1452 1737 1750 2230 642 553 430 563 576 526  
29.06.17. 181 269 338 1936 1987 2287 2067 1775 322 2195 1980 1711 2074 2107 2573 725 627 491 639 649 588  
29.06.17. 181 269 355 2088 2335 3684 2348 1923 360 2552 2698 1995 2599 3484 2806 813 740 565 731 783 673  
29.06.17. 181 269 370 2268 4194 5544 3626 2070 384 3847 3719 3419 5359 5447 3443 982 1047 642 924 955 775  
29.06.17. 181 269 389 2778 5777 7117 5163 2252 417 5990 4636 4730 7831 7063 5067 1119 1202 725 1070 1071  
870 29.06.17. 181 181 29.06.17. 269 0 155 405 3312 6188 7647 5848 2406 461 6502 4997 5588 8414 7577 5762 1162  
1258 777 1118 1108 914 631 1336 4594 6280 2428 441 223 5268 4012 4526 6681 6127 4691 848 804 522 762 819  
13.07.17. 195 0 131 1288 4266 6172 2107 437 174 4955 3820 4288 6224 5847 4445 814 760 497 705 783 605  
27.07.17. 209 0 120 1044 4013 6061 2065 422 151 4732 3666 4104 6010 5772 4381 765 721 459 679 760 584 \* nivo  
opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja \*\* vrijeme prošlo od početka  
ispitivanja Prilog B1: GREDA G8 Oznaka l grede (m) l CFRP (m) Vrsta opterećenja Mu opterećenja (kNm) \* Nivo Tip loma  
W lomu (dani) ( o C) (%) Starost pri T G 8 7.5 6.0 dugotrajno ravnomjerno podijeljeno 55%→75% 121.0 lom po betonu na  
savijanje 278 27 61 PRSLINE U BETONU Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 70 96 106 115 121 (kritični presjek) a (mm) / / / /  
0.30 0.40 0.70 1.10 1.25 1.35 1.55 Datum \*\* t Mu DILATACIJA U KARBONSKOJ DILATACIJA U ZATEGNUTOM  
DILATACIJA U PRITISNUTOM (dani) (kNm) ispitiv. TRACI BETONU BETONU 07.12.16. 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 07.12.16. 0 26 25 196 222 398 525 368 285 149 66 254 406 232 484 554 463 192 251 241 242 312 100  
07.12.16. 0 51 32 549 833 1035 1087 1065 838 489 229 666 909 605 1300 1202 1265 365 438 445 442 520 213  
07.12.16. 0 70 26 984 1366 1583 1597 1557 1363 910 254 1013 1385 932 2076 1887 1742 509 595 572 553 629 269  
10.12.16. 3 70 29 990 1371 1587 1588 1559 1374 914 251 1014 1389 946 2092 1893 1748 510 600 572 554 627 269  
13.12.16. 6 70 31 1000 1381 1588 1574 1551 1407 915 251 1016 1402 980 2096 1902 1751 526 616 577 564 634 270  
20.12.16. 13 70 31 1002 1392 1588 1575 1561 1423 917 251 1019 1422 997 2096 1905 1756 527 624 581 564 634 274  
27.12.16. 20 70 31 1006 1396 1590 1579 1563 1428 918 251 1019 1434 1002 2099 1905 1766 529 625 584 565 635  
280 03.01.17. 27 70 32 1024 1401 1597 1582 1570 1438 926 251 1020 1443 1011 2102 1910 1768 535 631 590 568  
638 284 10.01.17. 34 70 28 1049 1416 1610 1594 1581 1451 935 252 1024 1479 1023 2104 1913 1772 534 632 592  
575 640 287 17.01.17. 41 70 29 1053 1444 1636 1622 1608 1478 957 252 1034 1499 1043 2107 1930 1780 522 636  
593 577 646 287 24.01.17. 48 70 29 1056 1447 1641 1625 1611 1481 962 252 1034 1499 1046 2115 1936 1784 528  
642 598 581 648 290 31.01.17. 55 70 29 1066 1450 1645 1628 1616 1485 967 252 1036 1504 1049 2115 1939 1784  
528 648 600 589 654 292 07.02.17. 62 70 28 1075 1465 1656 1640 1627 1497 974 254 1042 1528 1063 2119 1945  
1793 520 655 603 602 656 292 14.02.17. 69 70 27 1083 1472 1667 1649 1635 1504 982 254 1045 1531 1064 2121  
1949 1793 520 657 603 609 657 296 21.02.17. 76 70 27 1088 1479 1675 1659 1647 1513 994 258 1048 1536 1065  
2128 1958 1795 529 664 608 611 659 301 28.02.17. 83 70 27 1089 1480 1679 1666 1650 1518 999 259 1058 1542  
1070 2133 1966 1795 530 669 608 614 660 309 14.03.17. 97 70 29 1096 1484 1681 1670 1655 1518 1001 260 1071  
1548 1074 2136 1978 1797 533 670 611 615 660 311 21.03.17. 104 70 28 1101 1492 1685 1677 1659 1521 1005 262

1085 1551 1078 2147 1992 1798 535 672 613 621 663 311 28.03.17. 111 70 28 1112 1496 1688 1683 1662 1528 1007  
262 1094 1555 1078 2149 1999 1802 536 677 614 622 666 314 11.04.17. 125 70 30 1114 1505 1689 1690 1667 1529  
1011 265 1102 1557 1091 2150 2014 1804 548 680 616 626 667 315 18.04.17. 132 70 28 1115 1508 1695 1699 1672  
1533 1017 266 1119 1560 1093 2155 2029 1804 550 684 619 628 667 317 25.04.17. 139 70 27 1118 1512 1698 1704  
1675 1536 1019 268 1121 1563 1095 2157 2034 1807 555 685 627 630 673 320 \* nivo opterećenja je prikazan u  
odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja \*\* vrijeme prošlo od početka ispitivanja Oznaka I CFRP  
grede (m) (m) I Vrsta opterećenja Mu opterećenja (kNm) \* Nivo Tip loma W lom (dani) ( o C) (%) Starost pri T G 8 7.5  
6.0 dugotrajno ravnomjerno lom po betonu na podijeljeno 55%→75% 121.0 savijanje 278 27.6 61 Datum \*\* t ispitiv. Mu  
(dani) (kNm) DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU DILATACIJA U PRITISNUTOM  
BETONU 02.05.17. 146 70 29 1122 1520 1699 1710 1677 1538 1022 268 1122 1565 1098 2157 2038 1808 557 691 629  
632 678 321 09.05.17. 153 70 27 1126 1526 1707 1716 1686 1544 1028 270 1128 1566 2005 2160 2054 1809 562 699  
632 639 679 322 23.05.17. 167 70 28 1129 1531 1725 1734 1690 1553 1033 274 1135 1586 2014 2169 2065 1815 571  
711 642 648 687 345 26.05.17. 170 80 30 1138 1577 1816 1759 1736 1601 1051 277 1251 1694 2130 2280 2120 1932  
633 755 707 674 715 377 26.05.17. 170 89 32 1206 1690 2041 1951 1825 1730 1132 277 1436 1881 2328 2428 2284  
2111 681 814 760 722 769 421 26.05.17. 170 96 31 1277 1802 2888 2670 1955 1843 1194 280 1682 2234 2891 2758  
3384 3088 766 948 891 801 844 496 02.06.17. 177 96 32 1282 1845 3014 2805 2358 1895 1213 282 1730 2599 3033  
2861 3523 3229 804 965 930 835 862 537 09.06.17. 184 96 33 1288 1868 3259 3057 2622 1928 1228 280 1827 2884  
3195 2914 3705 3455 841 981 948 849 873 544 16.06.17. 191 96 31 1295 1886 3469 3295 2814 1955 1235 282 1895  
3258 3317 2955 3839 3703 862 994 966 857 886 551 23.06.17. 198 96 35 1301 1913 3592 3451 2955 1963 1239 281  
1915 3440 3455 2976 3893 3892 877 1015 978 864 890 557 30.06.17. 205 96 35 1318 1918 3604 3580 3130 1977  
1242 282 1922 3481 3488 2983 3947 4101 885 1018 990 869 898 560 07.07.17. 212 96 33 1329 1921 3617 3588 3141  
1984 1244 282 1926 3485 3505 2988 3958 4162 889 1021 994 872 906 563 14.07.17. 219 96 32 1333 1926 3621 3594  
3156 1988 1247 279 1934 3490 3516 2990 3973 4188 892 1026 998 875 909 565 21.07.17. 226 96 31 1338 1928 3627  
3601 3163 1989 1247 284 1938 3495 3524 2993 3985 4205 896 1029 999 877 911 566 28.07.17. 233 96 34 1341 1929  
3630 3604 3175 1991 1248 284 1941 3502 3531 2995 3991 4218 899 1033 1002 878 915 570 11.08.17. 247 96 32  
1344 1931 3632 3605 3180 1992 1250 280 1944 3510 3538 2998 4002 4227 901 1035 1005 880 916 572 25.08.17.  
261 96 33 1350 1931 3635 3609 3184 1994 1250 277 1945 3514 3540 2999 4006 4231 903 1035 1008 880 918 574  
08.09.17. 275 96 30 1352 1933 3636 3611 3188 1996 1252 284 1947 3516 3544 3002 4111 4234 905 1036 1009 881  
919 577 11.09.17. 278 106 27 1428 2021 4955 4991 4208 2216 1336 280 3185 4602 4785 4968 5584 5476 ### 1230  
1197 975 1006 640 11.09.17. 278 115 36 1508 2255 6385 6433 5559 2776 1424 282 4351 5103 6192 6148 7428 7604  
### 1635 1366 1068 1091 724 11.09.17. 278 121 29 1615 3612 7924 8038 6925 3456 1494 281 5879 6077 7653 7581  
8658 8893 ### 1892 1592 1225 1221 844 11.09.17. 278 22 1118 2191 6039 6017 5078 2083 1022 274 4005 4408  
5863 5453 6830 6844 897 1133 945 803 836 586 0 25.09.17. 292 0 20 1095 2145 5996 4733 4922 1931 1014 268 3866  
4388 5849 5430 6794 6831 863 1098 929 794 808 579 09.10.17. 306 0 18 1077 2110 5957 4571 4884 1918 989 269  
3825 4350 5825 5406 6765 6809 835 1074 914 775 769 562 \* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede  
pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja \*\* vrijeme prošlo od početka ispitivanja Prilog B1: GREDA G9 Oznaka grede I (m) I  
CFRP (m) Vrsta opterećenja \* Nivo opterećenja Mu (kNm) Tip loma Starost pri lom (dani) W ( o C) (%) T G 9 7.5 4.0  
dugotrajno ravnomjerno lom po zaštitnom sloju podijeljeno 60%→82% 115.0 betona i duž trake 290 10 49 PRSLINE U  
BETONU Mu (kNm) 0 26 39 51 59 66 70 96 106 (kritični presjek) a (mm) / / / 0.25 0.50 0.85 1.05 1.50 1.75 Datum \*\* t  
Mu ispitiv. (dani) (kNm) DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI DILATACIJA U ZATEGNUTOM BETONU DILATACIJA U

PRITISNUTOM BETONU 16.03.17. 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 16.03.17. 0 39 237 523 769 852 779 576 245 663  
 854 861 864 788 840 418 291 383 322 16.03.17. 0 59 267 1030 1336 1390 1287 1125 469 1193 1409 1510 1507 1243  
 1349 604 422 528 426 16.03.17. 0 66 279 1208 1516 1583 1465 1312 531 1355 1598 1728 1708 1394 1522 660 465  
 574 462 16.03.17. 0 70 283 1394 1707 1802 1657 1503 579 1506 1871 1954 1880 1539 1731 721 512 619 499  
 17.03.17. 1 70 283 1408 1727 1812 1664 1510 581 1510 1898 1967 1894 1541 1746 729 514 628 501 20.03.17. 4 70  
 285 1409 1731 1818 1672 1523 583 1513 1905 1969 1899 1544 1751 731 519 633 503 27.03.17. 11 70 285 1409 1735  
 1826 1680 1538 583 1515 1912 1970 1902 1545 1768 732 519 634 509 03.04.17. 18 70 285 1412 1738 1837 1683  
 1543 586 1520 1919 1973 1905 1547 1763 734 521 639 510 10.04.17. 25 70 284 1415 1744 1844 1695 1551 588 1525  
 1928 1974 1906 1547 1770 736 523 640 516 24.04.17. 39 70 287 1419 1749 1845 1701 1555 591 1527 1939 1978  
 1915 1550 1774 740 523 642 520 01.05.17. 46 70 289 1420 1755 1847 1707 1567 592 1530 1945 1979 1917 1555  
 1782 743 524 645 522 15.05.17. 60 70 289 1422 1762 1850 1713 1568 592 1531 1946 1985 1926 1557 1788 744 525  
 645 526 22.05.17. 67 70 289 1426 1762 1851 1716 1570 594 1536 1959 1987 1933 1561 1790 749 525 647 528  
 05.06.17. 81 70 289 1428 1764 1856 1717 1574 595 1540 1978 1990 1938 1562 1793 751 527 648 532 12.06.17. 88 70  
 282 1442 1795 1870 1734 1592 595 1544 1993 2002 1992 1569 1805 762 534 650 532 19.06.17. 95 70 294 1447 1803  
 1877 1742 1599 600 1546 1997 2005 2007 1573 1809 765 537 652 535 26.06.17. 102 70 295 1456 1812 1886 1751  
 1608 601 1546 1999 2006 2022 1581 1812 768 537 656 537 03.07.17. 109 70 295 1475 1835 1903 1772 1629 602  
 1549 2007 2013 2039 1586 1823 773 542 662 537 10.07.17. 116 70 295 1480 1845 1909 1778 1638 602 1550 2023  
 2026 2049 1586 1832 792 553 669 538 17.07.17. 123 70 295 1490 1857 1921 1791 1651 602 1552 2028 2032 2065  
 1589 1840 802 561 678 540 24.07.17. 130 70 296 1495 1863 1929 1799 1658 601 1558 2036 2041 2072 1596 1848  
 814 570 690 541 07.08.17. 144 70 296 1503 1871 1937 1808 1667 603 1563 2036 2042 2080 1599 1852 817 574 696  
 542 \* nivo opterećenja je prikazan u odnosu na nosivost grede pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja \*\* vrijeme prošlo od  
 početka ispitivanja Oznaka I grede (m) I CFRP (m) Vrsta opterećenja \* Nivo opterećenja Mu (kNm) Tip lom a T lom u  
 (dani) (o C) Starost pri W (%) G 9 7.5 4.0 dug otrajno ravnomjerno I om po zaštiti tnom sl oju podi jel jeno 60%→82%  
 115.0 betona i duž trake 290 10 49 Datum \*\* t Mu ispitiv. (dani) (kNm) DILATACIJA U KARBONSKOJ TRACI DILATACIJA  
 U ZATEGNUTOM BETONU DILATACIJA U PRITISNUTOM BETONU 21.08.17. 158 70 299 1511 1888 1940 1814 1681 603  
 1568 2038 2043 2084 1602 1857 820 577 703 542 04.09.17. 172 70 299 1521 1892 1954 1824 1686 604 1575 2041  
 2047 2095 1607 1859 825 582 709 544 07.09.17. 175 80 312 1555 2008 2245 1996 1741 622 1707 2278 2192 2235  
 1811 2005 841 623 751 576 07.09.17. 175 89 325 1712 2120 2486 2105 1932 638 1855 2460 2381 2489 1939 2278  
 883 655 777 601 07.09.17. 175 96 344 1930 2461 2717 2398 2067 666 2070 2998 2694 2745 2215 2465 950 687 800  
 641 14.09.17. 182 96 346 1935 2488 2749 2401 2071 681 2109 3144 2721 2759 2154 2467 966 695 808 651 21.09.17.  
 189 96 346 1944 2540 2874 2488 2086 689 2177 3175 2741 2765 2308 2472 981 709 811 656 28.09.17. 196 96 347  
 1998 2787 2899 2603 2117 695 2431 3868 2757 2772 2838 2479 1004 725 847 695 05.10.17. 203 96 351 2043 2842  
 3509 2664 2153 705 2469 3896 2760 2775 2859 2481 1011 732 869 702 12.10.17. 210 96 351 2063 2866 3511 2692  
 2176 711 2477 3908 2775 2776 2863 2487 1029 750 876 710 19.10.17. 217 96 352 2065 2871 3513 2703 2182 714  
 2478 3912 2782 2781 2863 2495 1038 758 883 716 25.10.17. 224 96 352 2079 2890 3526 2726 2204 719 2480 3914  
 2789 2784 2865 2499 1055 778 903 726 01.11.17. 231 96 352 2082 2901 3534 2742 2220 721 2484 3928 2805 2786  
 2867 2504 1073 792 917 737 08.11.17. 238 96 355 2089 2909 3540 2749 2229 722 2487 3929 2807 2788 2873 2513  
 1084 804 929 743 15.11.17. 245 96 357 2097 2915 3548 2759 2238 724 2490 3933 2815 2788 2874 2523 1100 818  
 944 752 29.11.17. 259 96 357 2112 2930 3555 2769 2248 727 2492 3935 2818 2789 2877 2534 1112 834 956 761  
 13.12.17. 273 96 358 2118 2937 3560 2776 2256 729 2496 3940 2829 2795 2881 2545 1115 835 959 763 27.12.17.

287 96 357 2129 2939 3568 2782 2259 733 2497 3950 2836 2798 2883 2548 1130 837 963 770 30.12.17. 290 106 381  
2286 4428 5888 4008 2415 770 3863 5677 3650 5432 5653 3267 1198 906 1096 948 30.12.17. 290 115 404 2805  
5912 8446 5326 2633 795 4124 8013 5057 7956 7208 4933 1431 1089 1213 1166 30.12.17. 290 0 784 163 1021 2380  
6477 1925 689 304 2166 6320 4105 6301 5697 3745 933 755 814 13.01.18. 304 0 140 914 1986 5563 1859 645 266  
1884 6005 3854 6110 5444 3427 882 678 766 680 27.01.18. 318 0 129 888 1744 5111 1775 631 248 1767 5863 3709  
6008 5399 3291 847 652 731 666 \* niv o opterećenja je prikazan u odnosu na nosiv ost grede pri dejstv u kratkotrajnog  
opterećenja \*\* v vrijeme prošlo od početka ispitivanja Prilog B2: UGIBI t (dani) 0 0 0 0 0 3 10 24 38 52 66 80 94 108 122  
136 150 164 178 181 181 181 P(kN) 0.0 15.0 25.0 45.0 65.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0  
75.0 75.0 75.0 85.0 95.0 100.0 Mu (kNm) 0.0 25.6 39.4 59.4 69.4 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3  
70.3 70.3 70.3 70.3 89.1 107.8 117.2 6 G ADERG č6 73.0 71.5 70.5 69.4 69.2 68.6 68.5 68.5 68.4 68.4 68.4 68.4  
68.4 68.3 68.3 68.2 68.2 68.2 67.9 67.2 66.5 U6 (cm) 0.0 1.5 2.5 3.6 3.8 4.4 4.5 4.5 4.6 4.6 4.6 4.6 4.6 4.7 4.7  
4.8 4.8 4.8 4.8 5.1 5.8 6.5 Mu (kNm) 126.6 132.2 0.0 č6 65.2 63.9 68.3 U6 (cm) 7.8 9.1 4.7 t (dani) 181 181 184 P(kN)  
105.0 108.0 0.0 t (dani) 0 0 0 0 3 10 17 24 38 52 66 80 94 108 122 136 150 164 178 181 181 181 184 7 G ADE P(kN) 0.0  
25.0 45.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0  
0.0 39.4 59.4 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3 70.3  
73.0 71.6 70.6 69.8 69.8 69.7 69.6 69.6 69.6 69.6 69.5 69.5 69.5 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 68.4 66.8 65.1 67.9 U7  
(cm) 0.0 1.4 2.4 3.2 3.2 3.3 3.4 3.4 3.4 3.4 3.5 3.5 3.5 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 4.6 6.2 7.9 3.7 t (dani) 0 0 0 0 3 6 13 20 27  
34 41 48 55 62 69 76 83 97 104 111 125 132 139 P (kN) 0.0 35.0 55.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0 75.0  
75.0  
70.3  
70.3  
69.4 69.4 69.4 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3  
69.4 69.4 69.4 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3 69.3  
4.1 4.2 4.1 4.1  
4.1 4.2 4.1 4.1  
292 292 292 292 292 295 P (kN) 75.0 75.0 75.0 80.0 85.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0 90.0  
100.0 102.0 103.0 75.0 0.0 Mu (kNm) 70.3 70.3 70.3 79.7 89.1 96.3 96.3 96.3 96.3 96.3 96.3 96.3 96.3 96.3 96.3  
105.6 115.0 118.8 120.6 70.3 0.0 č8 69.2 69.2 69.2 69.0 68.7 68.2 68.0 67.8 67.7 67.7 67.6 67.5 67.5 67.5 67.4 67.4  
67.0 65.2 63.0 61.9 64.0 64.9 U8 (cm) 4.3 4.3 4.3 4.5 4.8 5.3 5.5 5.7 5.8 5.8 5.9 6.0 6.0 6.0 6.1 6.1 6.5 8.3 10.5 11.6 9.5  
8.6 t (dani) 0 0 0 0 1 4 11 18 25 39 46 60 67 81 88 95 102 109 116 123 130 137 P (kN) 0.0 25.0 45.0 55.0 75.0 75.0  
75.0  
70.3  
71.0 70.6 70.4  
3.0 3.4 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.6 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.7 3.8 t (dani) 151 165 179 182 182 182 189 196  
203 210 217 224 231 238 245 259 273 287 290 290 290 290 293 P (kN) 75.0 75.0 75.0 80.0 85.0 90.0 90.0 90.0 90.0  
90.0  
96.3  
96.3  
68.6 68.5 68.4 68.4 68.4 68.4 68.3 68.3 68.3 68.3 68.3 68.3 67.2 65.9 64.2 66.7 67.8 U9 (%) 3.8 3.8 3.8 4.3 4.6 4.9 5.2 5.4 5.4 5.5  
5.6 5.6 5.6 5.6 5.7 5.7 5.7 5.7 6.8 8.1 9.8 7.3 6.2 Prilog B2: DILATACIJE U ZATEGNUTOM PRESJEKU BETONA t (dani) 0 0  
0 0 0 3 10 17 34 48 62 76 90 104 118 132 146 160 174 P (kN) 0 25 45 55 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75 75  
Mu (kNm) 0 39 59 66 70  
1846 1860 1872 1880 1882 1893 1916 1940 1961 1969 1971 1985 ε6 (%) 0.00 0.87 1.52 1.63 1.81 1.83 1.84 1.85 1.86  
1.87 1.88 1.88 1.89 1.92 1.94 1.96 1.97 1.97 1.99 Mu (kNm) 80 89 108 117 127 132 0 0 0 č6 2119 2325 4376 5676 7618







(dani) P (kN) Mu (kNm) č9 ε9 (%) Prilog B3.1 - SERIJA I VREMENSKE DEFORMACIJE BETONA datum 01.03.18.

01.03.18. 02.03.18. 08.03.18. 15.03.18. 22.03.18. 01.04.18. 02.05.18. 01.06.18. 01.07.18. 01.08.18. 01.09.18. T (oC) 1 1  
6 11 11 5 13 22 25 27 31 28 W (%) 86 86 82 78 66 81 68 65 54 51 49 36 aji res P (kN) P dani mjeseci 0 P e 1 7 14 21 1 2  
3 4 5 6 mj.mjesto TEČENJE BETONA 1-1 954 890 881 880 879 879 878 874 873 870 870 1-1 aji reS 2-2 870 808 800  
801 798 797 795 795 792 791 792 792 3-3 965 915 908 907 908 907 906 905 904 904 903 904 4-4 580 524 520 521  
519 518 517 515 515 516 515 515 5-5 620 565 560 559 558 557 555 556 554 553 552 552 6-6 675 608 605 603 600  
601 597 597 595 594 594 595 1-1 848 786 785 781 782 780 779 776 775 775 776 775 2-1 aji reS 2-2 879 815 809 810  
808 806 802 801 800 797 801 800 3-3 918 856 850 849 848 849 846 844 842 843 843 843 4-4 757 689 682 682 683  
680 679 675 674 673 673 674 5-5 815 758 751 750 749 748 748 746 746 747 745 745 6-6 655 590 582 580 579 582  
580 578 578 577 578 578 1-1 715 650 644 643 644 642 642 640 641 639 638 638 3- 2-2 667 605 598 598 595 593 591  
591 590 588 589 588 II aji reS 3-3 720 660 650 651 650 648 645 642 642 643 642 643 4-4 485 420 408 409 407 408  
405 405 406 402 402 402 5-5 680 623 613 611 610 610 609 607 608 608 609 608 6-6 516 450 441 442 440 438 438  
438 437 436 436 435 σ (MPa) s 0 s e dani mjeseci 1 7 14 21 1 2 3 4 5 6 ani mj.mjesto TEČENJE BETONA ders (1-1; 4-  
4)sr 723 660 653 653 652 651 650 648 647 646 646 646 (2-2; 5-5)sr 755 696 689 688 686 685 683 683 682 681 681  
681 (3-3; 6-6)sr 742 680 673 672 671 671 669 667 666 666 666 666 P0 = 10 kN max Pe = 350 kN Δσ = 19,23 MPa εel =  
0,61 ‰ σ0 = 0,57 MPa max σe = 19,8 MPa E = 32,45 GPa φsr, 6mj. = 0,24 1 1 P 2 2 4 5 4 5 P A = 176,71 cm2 Prilog B3.2 -  
SERIJA II VREMENSKE DEFORMACIJE BETONA datum

01.03.18.01.03.18.02.03.18.08.03.18.15.03.18.22.03.18.01.04.18.02.05.18.01.06.18. 01.07.18.

01.08.18.01.09.18.01.09.18.01.10.18.01.11.18.01.12.18.02.01.19. T(oC) 1 1 6 11 11 5 13 22 25 27 31 28 28 20 17 7 2 W  
(%) 86 86 82 78 66 81 68 65 54 51 49 36 36 59 70 76 69 aji res P (kN) P0 Pe dani mjeseci 1 7 14 21 1 2 3 4 5 6 6 7 8 9  
10 mj.mjesto TEČENJE BETONA 1-1 957 892 885 883 882 882 881 879 878 876 875 875 834 830 828 825 823 1- 2-2  
880 811 806 804 803 803 800 798 796 794 793 792 751 748 747 745 744 II aji reS 3-3 988 922 916 915 913 912 912  
910 910 908 907 907 868 866 865 864 864 4-4 601 533 529 527 525 523 522 521 521 520 518 517 489 487 486 486  
485 5-5 647 584 581 580 577 575 574 574 573 571 570 570 521 518 516 515 514 6-6 666 598 592 589 586 585 585  
583 583 582 581 581 548 546 545 544 544 1-1 827 755 747 745 744 742 741 741 739 738 738 737 700 695 693 690  
688 II 2- 2-2 852 788 785 783 782 780 779 777 776 776 774 773 737 731 727 724 723 aji reS 3-3 909 848 844 841 840  
838 837 835 834 834 833 833 796 792 787 784 782 4-4 770 708 706 705 703 702 701 698 696 695 695 694 642 639  
635 628 625 5-5 844 774 768 766 764 763 761 760 759 757 757 756 724 718 714 711 707 6-6 639 573 566 563 562  
559 558 556 555 554 554 552 511 507 505 501 498 1-1 701 632 625 624 623 621 621 620 619 618 617 617 583 578  
575 572 570 II 3- 2-2 694 625 618 616 615 613 612 610 609 609 608 607 559 554 551 547 544 aji reS 3-3 741 678 670  
667 665 664 662 660 659 657 656 656 613 607 603 598 597 4-4 503 442 436 433 432 429 427 426 423 422 421 421  
372 370 366 363 361 5-5 671 610 602 598 596 595 593 591 588 587 587 586 548 541 537 534 533 6-6 549 484 475  
471 469 468 466 465 465 464 464 463 428 424 421 417 414 σ (MPa) s 0 s e 1 dani 7 14 21 1 2 3 4 5 mjeseci 6 6 7 8 9  
10 A = 176,71 cm2 ani mj.mjesto TEČENJE BETONA ders (1-1;4-4)sr 727 660 655 653 652 650 649 648 646 645 644  
644 603 600 597 594 592 (2-2;5-5)sr 765 699 693 691 690 688 687 685 684 682 682 681 640 635 632 629 628 (3-3;6-  
6)sr 749 684 677 674 673 671 670 668 668 667 666 665 627 624 621 618 617 P0 = 10 kN max Pe = 390 kN max P =  
610 kN Δσ = 22,07 MPa εel = 0,66 ‰ φsr,fikt. = 0,27 σ0 = 0,57 MPa max σe = 22,6 MPa max σ = 34,6 MPa E = 36,05 GPa  
φsr = 0,25 (t=6 mj.) (t=10 mj.) Prilog B4.1 - SERIJA I 01.03.18. 01.03.18. 02.03.18. 08.03.18. 15.03.18. 22.03.18.

01.04.18. 02.05.18. 01.06.18. 01.07.18. 01.08.18. 01.09.18. 0 0.60 0.69 0.70 0.71 0.71 0.72 0.76 0.77 0.77 0.80 0.80 0  
0.62 0.70 0.69 0.72 0.73 0.75 0.75 0.78 0.79 0.78 0.78 0 0.53 0.60 0.61 0.60 0.61 0.62 0.63 0.64 0.64 0.65 0.64 0 0.56

0.60 0.59 0.61 0.62 0.63 0.65 0.65 0.64 0.65 0.65 0 0.55 0.60 0.61 0.62 0.63 0.65 0.64 0.66 0.67 0.68 0.68 0 0.67 0.70  
0.72 0.75 0.74 0.78 0.78 0.80 0.81 0.81 0.80 0 0.59 0.65 0.65 0.67 0.67 0.69 0.70 0.72 0.72 0.73 0.73 0 0.62 0.63 0.67  
0.66 0.68 0.69 0.72 0.73 0.73 0.72 0.73 0 0.64 0.70 0.69 0.71 0.73 0.77 0.78 0.79 0.82 0.78 0.79 0 0.62 0.68 0.69 0.70  
0.69 0.72 0.74 0.76 0.75 0.75 0.75 0 0.68 0.75 0.75 0.74 0.77 0.78 0.82 0.83 0.84 0.84 0.83 0 0.57 0.64 0.65 0.66 0.67  
0.67 0.69 0.69 0.68 0.70 0.70 0 0.65 0.73 0.75 0.76 0.73 0.75 0.77 0.77 0.78 0.77 0.77 0 0.63 0.69 0.70 0.71 0.71 0.73  
0.75 0.76 0.77 0.76 0.76 0 0.65 0.71 0.72 0.71 0.73 0.73 0.75 0.74 0.76 0.77 0.77 0 0.62 0.69 0.69 0.72 0.74 0.76 0.76  
0.77 0.79 0.78 0.79 0 0.60 0.70 0.69 0.70 0.72 0.75 0.78 0.78 0.77 0.78 0.77 0 0.65 0.77 0.76 0.78 0.77 0.80 0.80 0.79  
0.83 0.83 0.83 0 0.57 0.67 0.69 0.70 0.70 0.71 0.73 0.72 0.72 0.71 0.72 0 0.66 0.75 0.74 0.76 0.78 0.78 0.78 0.79 0.80  
0.80 0.81 0 0.63 0.72 0.72 0.73 0.74 0.76 0.77 0.77 0.78 0.78 0.78 0 0.63 0.69 0.70 0.70 0.71 0.73 0.75 0.75 0.76 0.77  
0.77 0 0.60 0.67 0.67 0.69 0.70 0.72 0.73 0.74 0.75 0.74 0.74 0 0.62 0.69 0.70 0.71 0.71 0.73 0.75 0.76 0.76 0.76 0.76 0  
0.61 0.68 0.69 0.70 0.71 0.73 0.74 0.75 0.76 0.76 0.76 0.85 Serija I-1 0.8 0.75 0.7 0.65 0.6 0.55 0.5 1-1 2-2 3-3 4-4 5-5 6-  
6 srednja 0.9 Serija I-2 0.85 0.8 1-1 0.75 2-2 0.7 3-3 0.65 4-4 5-5 0.6 6-6 0.55 srednja 0.5 0.85 0.8 0.75 0.7 0.65 0.6 0.55  
0.5 Serija I-3 0.8 0.75 1-1 0.7 2-2 3-3 0.65 4-4 0.6 5-5 6-6 0.55 srednja 0.5 Serija I 1-1 2-2 3-3 srednja Prilog B4.2 - SERIJA  
II 01.03.18. 01.03.18. 02.03.18. 08.03.18. 15.03.18. 22.03.18. 01.04.18. 02.05.18. 01.06.18. 01.07.18. 01.08.18.  
01.09.18. 01.09.18. 01.10.18. 01.11.18. 01.12.18. 30.12.18. 0 0.65 0.72 0.74 0.75 0.75 0.76 0.78 0.79 0.81 0.82 0.82  
1.23 1.27 1.29 1.32 1.34 0 0.69 0.74 0.76 0.77 0.77 0.80 0.82 0.84 0.86 0.87 0.88 1.29 1.32 1.33 1.35 1.36 0 0.66 0.72  
0.73 0.75 0.76 0.76 0.78 0.78 0.80 0.81 0.81 1.20 1.22 1.23 1.24 1.24 0 0.68 0.72 0.74 0.76 0.78 0.79 0.80 0.80 0.81  
0.83 0.84 1.12 1.14 1.15 1.15 1.16 0 0.63 0.66 0.67 0.70 0.72 0.73 0.73 0.74 0.76 0.77 0.77 1.26 1.29 1.31 1.32 1.33 0  
0.68 0.74 0.77 0.80 0.81 0.81 0.83 0.83 0.84 0.85 0.85 1.18 1.20 1.21 1.22 1.22 0 0.67 0.72 0.74 0.76 0.77 0.78 0.79  
0.80 0.81 0.83 0.83 1.21 1.24 1.25 1.27 1.28 0 0.72 0.80 0.82 0.83 0.85 0.86 0.86 0.88 0.89 0.89 0.90 1.27 1.32 1.34  
1.37 1.39 0 0.64 0.67 0.69 0.70 0.72 0.73 0.75 0.76 0.76 0.78 0.79 1.15 1.21 1.25 1.28 1.29 0 0.61 0.65 0.68 0.69 0.71  
0.72 0.74 0.75 0.75 0.76 0.76 1.13 1.17 1.22 1.25 1.27 0 0.62 0.64 0.65 0.67 0.68 0.69 0.72 0.74 0.75 0.75 0.76 1.28  
1.31 1.35 1.42 1.45 0 0.70 0.76 0.78 0.80 0.81 0.83 0.84 0.85 0.87 0.87 0.88 1.20 1.26 1.30 1.33 1.37 0 0.66 0.73 0.76  
0.77 0.80 0.81 0.83 0.84 0.85 0.85 0.87 1.28 1.32 1.34 1.38 1.41 0 0.66 0.71 0.73 0.74 0.76 0.77 0.79 0.80 0.81 0.82  
0.83 1.22 1.27 1.30 1.34 1.36 0 0.69 0.76 0.77 0.78 0.80 0.80 0.81 0.82 0.83 0.84 0.84 1.18 1.23 1.26 1.29 1.31 0 0.69  
0.76 0.78 0.79 0.81 0.82 0.84 0.85 0.85 0.86 0.87 1.35 1.40 1.43 1.47 1.50 0 0.63 0.71 0.74 0.76 0.77 0.79 0.81 0.82  
0.84 0.85 0.85 1.28 1.34 1.38 1.43 1.44 0 0.61 0.67 0.70 0.71 0.74 0.76 0.77 0.80 0.81 0.82 0.82 1.31 1.33 1.37 1.40  
1.42 0 0.61 0.69 0.73 0.75 0.76 0.78 0.80 0.83 0.84 0.84 0.85 1.23 1.30 1.34 1.37 1.38 0 0.65 0.74 0.78 0.80 0.81 0.83  
0.84 0.84 0.85 0.85 0.86 1.21 1.25 1.28 1.32 1.35 0 0.65 0.72 0.75 0.77 0.78 0.80 0.81 0.83 0.84 0.84 0.85 1.26 1.31  
1.34 1.38 1.40 0 0.66 0.72 0.74 0.75 0.77 0.78 0.79 0.81 0.82 0.83 0.83 1.23 1.27 1.29 1.33 1.35 0 0.66 0.71 0.74 0.75  
0.77 0.78 0.80 0.81 0.82 0.83 0.84 1.25 1.30 1.33 1.35 1.37 0 0.65 0.72 0.74 0.76 0.78 0.79 0.81 0.81 0.82 0.83 0.83  
1.21 1.25 1.28 1.31 1.32 0 0.66 0.72 0.74 0.75 0.77 0.78 0.80 0.81 0.82 0.83 0.83 1.23 1.27 1.30 1.33 1.35 1.5 Serija II-1  
1.4 1.3 1.2 1.1 1 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 1-1 2-2 3-3 4-4 5-5 6-6 srednja 1.5 Serija II-2 1.4 1.3 1.2 1.1 1 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 1-1 2-  
2 3-3 4-4 5-5 6-6 srednja 1.7 Serija II-3 1.5 1.3 1.1 0.9 0.7 0.5 1-1 2-2 3-3 4-4 5-5 6-6 srednja 1.5 Serija II 1.4 1.3 1.2 1.1 1  
0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 1-1 2-2 3-3 srednja PRILOG C Slika prslina PRILOG C1 Slika prslina u gredama ispitanim pod dejstvom  
kratkotrajnog opterećenja PRILOG C2 Slika prslina u gredama ispitanim pod dejstvom dugotrajnog opterećenja PRILOG  
C3 Komparativna analiza slike prslina sa rezultatima dobijenim pomoću programskog paketa ANSYS PRILOG D  
Komparativna analiza eksperimentalnih i rezultata dobijenih primjenom programskog paketa ANSYS PRILOG D1  
Komparativna analiza ugiba PRILOG D2 Komparativna analiza dilatacija u karbonskoj traci Prilog D1: UGIBI GREDA  
OPTEREĆENIH KONCENTRISANIM OPTEREĆENJEM P (kN) 0 10 15 20 25 30 30 35 Eksperiment Mu (kNm) 0.00 18.75

28.13 37.50 46.88 56.25 56.25 65.63 U1a (mm) 0.00 1.80 4.40 13.20 20.00 31.50 38.60 79.60 Ansys nelinearne Mu (kNm) 0.00 4.33 9.76 22.67 61.98 65.63 materijalne karakteristike 1.82 U1a (mm) 2.48 5.64 29.47 175.39 3.16 Ansys linearne materijalne Mu (kNm) 0.00 1.82 karakteristike U1a (mm) 8.38 16.75 41.88 65.63 4.57 15.74 121.50 3.07 204 Eksperiment 50 55 60 65 Mu (kNm) 0.00 18.75 37.50 56.25 65.63 75.00 93.75 103.13 112.50 121.88 5.00 11.00 18.00 21.00 25.00 33.00 39.00 54.00 68.00 P (kN) U2 (mm) 0 0.00 10 20 30 35 40 Mu (kNm) 0.00 Ansys nelinearne 8.64 17.29 43.21 121.00 121.88 1.79 materijalne karakteristike U2 (mm) 3.09 4.61 14.94 117.66 232.52 Ansys linearne materijalne Mu (kNm) 0.00 8.64 17.29 43.21 64.99 1.79 karakteristike U2 (mm) 3.09 4.64 15.28 121.39 P (kN) 0 20 30 35 45 55 65 74 Eksperiment Mu (kNm) 0.00 37.50 56.25 65.63 84.38 103.13 121.88 138.75 U3 (mm) 0.00 2.10 8.20 11.00 14.70 18.60 22.50 77.00 Ansys nelinearne Mu (kNm) 0.00 9.92 10.57 46.43 138.00 138.75 materijalne karakteristike U3 (mm) 1.82 2.63 3.44 6.77 40.96 241.75 Ansys linearne materijalne Mu (kNm) 0.00 9.92 10.57 46.43 138.00 karakteristike U3 (mm) 1.82 2.79 3.82 9.94 97.41 Prilozi Prilog D1: UGIBI GREDA OPTEREĆENIH RAVNOMJERNIM OPTEREĆENJEM P (kN) 0 15 25 35 45 55 65 Eksperiment Mu (kNm) 0.00 25.63 39.38 50.63 59.38 65.63 69.38 U1b (mm) 0.00 9.80 32.40 58.80 76.40 91.20 94.00 Ansys nelinearne Mu (kNm) 0.00 8.54 17.07 35.69 68.54 69.37 materijalne karakteristike 1.78 U1b (mm) 5.27 20.06 151.16 235.09 3.26 Ansys linearne materijalne Mu (kNm) 0.00 1.78 karakteristike U1b (mm) 9.86 10.72 40.79 70.00 5.33 21.13 156.97 3.26 205 Eksperiment 100 101 Mu (kNm) 0.00 39.38 59.38 69.38 70.00 107.81 117.19 119.06 0.00 15.00 24.00 27.00 28.00 52.00 78.00 90.00 P (kN) U4 (mm) 0 25 45 65 75 95 Ansys nelinearne materijalne karakteristike Mu (kNm) 0.00 13.73 23.47 49.67 105.89 118.12 4.17 10.93 82.40 222.52 U4 (mm) 1.79 2.98 Ansys linearne materijalne karakteristike Mu (kNm) 0.00 13.73 23.47 49.67 106.00 118.00 4.17 11.08 86.71 160.10 U4 (mm) 1.79 2.98 P (kN) 0 25 45 65 75 85 95 100 106 Eksperiment Mu (kNm) 0.00 39.00 59.38 69.38 70.31 89.06 107.81 117.19 128.44 U5 (mm) 0.00 11.30 16.50 21.50 23.40 36.00 65.00 85.00 111.00 Ansys nelinearne Mu (kNm) 0.00 14.07 24.13 51.33 116.93 128.1 materijalne karakteristike U5 (mm) 1.78 3.02 4.27 11.6 91.42 206.1 Ansys linearne materijalne Mu (kNm) 0.00 14.07 24.13 51.33 116.9 128.1 karakteristike U5 (mm) 1.78 3.02 4.32 12.19 96.68 194.80 Prilozi Prilog D2: DILATACIJE U KARBONSKOJ TRACI Mu (kNm) 0.0 18.8 56.3 65.6 75.0 84.4 93.8 103.1 112.5 121.9 0  $\epsilon_2$  (%) 0.00 0.31 1.21 1.43 1.67 1.90 2.19 3.01 5.42 6.59 4.34 Mu (kNm) 0.00 9.90 19.80 49.60 128.80 0.00  $\epsilon_2,A$  (%) 0.03 0.06 0.17 0.82 6.07 5.66 Mu (kNm) 0.0 18.8 37.5 56.3 75.0 93.8 112.5 121.9 0  $\epsilon_3$  (%) 0.00 0.45 0.79 1.19 1.89 2.36 4.63 7.45 3.56 206 Mu (kNm)  $\epsilon_3,A$  (%) 0.00 0.03 8.70 0.05 17.41 0.14 43.52 0.52 121.86 4.80 0.00 3.84 Mu (kNm) 0.0 39.4 59.4 69.4 70.3 98.4 107.8 117.2 0  $\epsilon_4$  (%) 0.00 0.46 0.89 1.13 1.17 1.85 3.76 6.29 3.75 Mu (kNm) 0.00 10.20 24.70 31.30 69.30 118.50 0  $\epsilon_4,A$  (%) 0.03 0.05 0.13 0.41 2.58 6.24 6.035 Prilozi Mu (kNm) 0.0 25.6 39.4 50.6 59.4 65.6 70.0 89.1 107.8 117.2 126.6 128.4 0  $\epsilon_5$  (%) 0.00 0.55 0.73 1.04 1.31 1.64 1.826 2.32 3.67 4.82 6.89 7.20 4.04 Mu (kNm) 0.00 0.03  $\epsilon_5,A$  (%) 0 0.05 0.16 0.35 2.40 6.84 5.560 9.80 25.10 30.90 69.60 128.40 PRILOG E Radni dijagram betona PRILOG E1 Radni dijagram betona dobijen na kontrolnim tijelima serije I PRILOG E2 Radni dijagram betona dobijen na kontrolnim tijelima serije II Prilog E1: RDB serije I P (kN) 0 161 322 482 562 643 723 810  $\sigma$  (MPa) 0.00 7.14 14.29 21.43 25.00 28.57 32.14 36.02  $\epsilon_1$  335 365 401 450 484 522 616 /  $\epsilon_2$  472 504 547 591 638 651 706 /  $\epsilon_3$  456 493 524 559 589 724 795 /  $\Delta\epsilon_1$  0 30 66 115 149 187 281 /  $\Delta\epsilon_2$  0 32 75 119 166 179 234 /  $\Delta\epsilon_3$  0 37 68 103 133 268 339 /  $\Delta\epsilon_{sr}$  0 33 70 112 149 211 285 /  $\epsilon$  (%) 0 0.22 0.46 0.75 1.00 1.41 1.90 2.5 40 ob-ob dijagram  $\sigma$  (MPa) 30 20 10 0 0 0.5 1 1.5  $\epsilon$  (%) 2 2.5 3  $\sigma$  (MPa) 0 7.14 14.29 21.43 25.00 28.57 32.14 36.02  $\epsilon$  (%) 0 0.22 0.46 0.75 1.00 1.41 1.90 2.50 Prilog E2: RDB serije II P (kN) 0 211 422 634 741 833 884 929  $\sigma$  (MPa) 0.00 9.37 18.76 28.18 32.93 37.02 39.29 41.27  $\epsilon_1$  281 315 358 447 451 502 586 /  $\epsilon_2$  364 404 449 461 532 616 679 /  $\epsilon_3$  408 453 478 499 589 647 722 /  $\Delta\epsilon_1$  0 34 77 166 170 221 305 /  $\Delta\epsilon_2$  0 40 85 97 168 252 315 /  $\Delta\epsilon_3$  0 45 70 91 181 239 314 /  $\Delta\epsilon_{sr}$  0 40 77 118 173 237 311 /  $\epsilon$  (%) 0 0.26 0.52 0.79 1.15 1.58 2.08 2.86 45 ob-ob dijagram 40 35 30  $\sigma$  (MPa) 25 20 15 10 5 0 0 0.5 1 1.5  $\epsilon$  (%) 2 2.5 3  $\sigma$  (MPa) 0 9.37 18.76 28.18





$\sigma_{i?i?} / I_i?I_i? = k_i?ai?3ai?1,84 \text{ cm G4 - G9} = 1 \text{ Mi?ri?ri? vi?Mi?Mi?(ti?00),854 \text{ Grede vi?Mi?I_i?I_i?Mi?(ti?0)} = k_i?;ai?I_i?I_i?ai? \cdot vi?$   
 $= bi?1; = 39,23 \text{ cm } \zeta_i?bi? = 1 - \beta_i?1\beta_i?2 \cdot Mi? \beta_i? 1 \beta_i? 2 \zeta_i?bi? = 28,50 \text{ vi?Mi?Mi?(ti?0)} = (1 - \zeta_i?bi?) \cdot vi?Mi?Mi? (ti?0) + \zeta_i?$   
 $bi? \cdot vi?Mi?Mi?(ti?0) \text{ I_i? I_i?I_i? mvi?Mi?mMi?(ti?0)} = vi?Mi?Mi?(ti?0) = (1 - \zeta_i?bi?) \cdot vi?Mi?Mi? (ti?0) + \zeta_i?bi? \cdot vi?Mi?Mi?(ti?$   
 $0) = \zeta_i?bi? = 1 - \beta_i?1\beta_i?2 \cdot Mi? \beta_i?1 \beta_i?2 \zeta_i?bi? = 35,06 \text{ I_i? mvi?Mi?mMi?(ti?0) Ugib u toku vremena za stanje I I_i? vi?Mi?}$   
 $\text{MI?(ti?}\infty\text{)} 18,95; * * * * * 15,25 \text{ ni?} = E_i?ai?/E_i?bi?(ti?\infty) \text{ ni?fi?} = E_i?fi?/E_i?bi?(ti?\infty) \text{ ni?*} = \chi_i?(ti?\infty, ti?0) = 0,8 \text{ } \varphi_i?(ti?\infty, ti?$   
 $0) = 2,5 \text{ 10,82 GPa } E_i?bi?(ti?\infty) = 1 + \chi_i?;(ti?\infty, ti?E_i?0bi?) \cdot \varphi_i?(ti?\infty, ti?0) * E_i?bi?(ti?\infty) = * Ai?ii?fi? = Ai?bi? + ni? \cdot Ai?ai? +$   
 $ni?fi? \cdot Ai?fi? Ai?ii?fi? = 18,05 \text{ cm } y_i?ii?2fi? = y_i?bi?2 + ?y_i?ai?2 - y_i?bi?2? \cdot ni? \cdot I_i?Ai?*ai? + ?y_i?ai?2fi? - y_i?bi?2? \cdot ni?fi?$   
 $\cdot I_i?*Ai?fi? * * * I_i? y_i?ii? 2fi? = I_i? * * ni?fi? = 594,9 \text{ cm2 I_i? * * I_i? * Ai?ii? Ai?ii?fi? I_i? * * * I_i?ii?ii? = I_i?bi? + Ai?bi? \cdot ?y_i?$   
 $ai?2 - y_i?bi?2? \cdot ?y_i?ii?2 - y_i?bi?2? + Ai?bi? \cdot ?y_i?ai?2fi? - y_i?bi?2? \cdot ?y_i?ii? 2fi? - y_i?bi?2? I_i? I_i? I_i? 1I_i?ii?5ii?24=79,5\text{cm}$   
 $4 * * ki?\varphi_i?\varphi_i? = 1 - I_i?* \cdot ?Ai?ai? \cdot ?y_i?ai?2 - y_i?ii?2??y_i?ai?2 - y_i?ii?2 ?? - I_i? * \cdot ?Ai?fi? \cdot ?y_i?ai?2fi? - y_i?ii?2fi?? ?y_i?ai?$   
 $2fi? - y_i?ii?2fi? ?? I_i? ni? I_i? I_i? * ni? fi? I_i? I_i? * 0ki?,\varphi_i?7\varphi_i?35=6 \text{ I_i? Grede GI_i?2ii? i G3 I_i?ii?ii? 24,35 Grede G4 - G9 vi?}$   
 $\text{Mi?Mi?(ti?}\infty\text{)} = I_i? \text{ vi?Mi?Mi?(ti?}\infty\text{)} = vi?Mi?Mi?(ti?0) \cdot ?1 + ki?\varphi_i?\varphi_i? \cdot \varphi_i?(ti?\infty, ti?0)? I_i? I_i? I_i? 30,01 \text{ I_i? vi?Mi?Mi?(ti?}\infty\text{)} =$   
 $\text{Ugib u toku vremena za stanje II I_i?I_i? 327,4 cm2 * vi?Mi?MI?(ti?}\infty\text{)} I_i?ii?ii? = * I_i?bi?bi? + Ai?bi?bi? \cdot ?y_i?ai?2fi? - y_i?bi?$   
 $2fi? ? \cdot ?y_i?*ii?2fi? - y_i?bi?2fi? ? I_i?ii?ii? = I_i?I_i? ni? I_i?I_i?* \cdot ?Ai?ai? \cdot ?y_i?ai?2 - y_i?ii?2??y_i?ai?2 - y_i?ii?2 ?? - I_i?I_i?* \cdot ?Ai?$   
 $fi? \cdot ?y_i?ai?2fi? - y_i?ii?2fi?? ?y_i?ai?2fi? - y_i?ii?2fi? ?? I_i?I_i? I_i?I_i?* ni?fi? I_i?I_i? I_i?I_i? * ki?\varphi_i?\varphi_i? = 1 - 0,I_i?0I_i?007 ki?\varphi_i?$   
 $\varphi_i?3=1,90 \text{ y_i?ii?2fi?} = y_i?bi?2 + ?y_i?ai?2 - y_i?bi?2 ? \cdot I_i?I_i?* + ?y_i?ai?2fi? - y_i?bi?2fi? ? \cdot I_i?I_i? * I_i?I_i? * Ai?ii? * Ai?ii?ii? I_i?$   
 $I_i? I_i?I_i? I_i?I_i? I_i?I_i? I_i?I_i? I_i?I_i? * I_i?I_i? I_i?I_i? * * Ai?ii?ii? 12,40 \text{ cm I_i?I_i? I_i?I_i? * Ai?ii?ii?} = Ai?bi?bi? + ni?* \cdot Ai?ai? + ni?fi? \cdot$   
 $Ai?fi? I_i?I_i? I_i?I_i? ni? \cdot Ai?ai? I_i?I_i? ni?fi? \cdot Ai?fi? I_i?I_i? * = y_i?ii?2fi? = 74540,6 \text{ cm4 I_i?ii? I_i?ii?ii? Grede I_i?I_i? vi?Mi?Mi?(ti?}$   
 $\infty) = vi?Mi?Mi?(ti?0) = ?11; + ki?=\varphi_i?\varphi_i?0,5\varphi_i?(ti?\infty, ti?0)? G2 i G3 \text{ Mi?ri?ri? vi?Mi?Mi?(ti?0}\infty,9)2=8 \text{ vi?Mi?Mi?(ti?}\infty) = (1 -$   
 $\zeta_i?bi?) \cdot vi?Mi?Mi?(ti?\infty) + \zeta_i?bi? \cdot vi?Mi?Mi?(ti?\infty) \text{ Grede vi?Mi?Mi?(ti?}\infty) = 39,31 \text{ I_i?I_i? I_i?I_i? I_i?I_i? vi?Mi?I_i?I_i?Mi?(ti?$   
 $0\infty,9)2=7 \zeta_i?bi? = 1 - \beta_i?1\beta_i?2 \cdot Mi? 1 \text{ I_i? } \beta_i?2 \zeta_i?bi? = 31,35 \text{ vi?Mi?Mi?(ti?}\infty) = vi?Mi?Mi?(ti?0) = ?11; + ki?=\varphi_i?\varphi_i?0,5\varphi_i?$   
 $(ti?\infty, ti?0)? G4 - G9 \text{ Mi?ri?ri? } \zeta_i?bi? = 1 - \beta_i?1\beta_i?2 \cdot Mi? 1 \zeta_i?bi? = 38,64 \text{ I_i? } \beta_i?2 \text{ vi?Mi?Mi?(ti?}\infty) = (1 - \zeta_i?bi?) \cdot vi?Mi?Mi?$   
 $(ti?\infty) + \zeta_i?bi? \cdot vi?Mi?Mi?(ti?\infty) \text{ vi?Mi?Mi?(ti?}\infty) = \text{Granični ugib je} = l / 300 = vi?7Mi?50/(ti?3\infty0)0 = vi?2ui?,5 \text{ cm} = 25\text{mm}$   
 prekoračen. vi?ui? PRILOG H Spisak slika Slika 2.1 Radni dijagrami FRP materijala za spoljašnje ojačanje

..... 11	Slika 2.2 Uzorak trake-lamele prije i nakon ispitivanja na zatezanje.....	20	Slika 2.3
Ojačanje greda i ploča na savijanje i smicanje .....	22	Slika 3.1 Načini ojačavanja	
konstrukcijskih elemenata .....	27	Slika 3.2 Zavisnost veličine ugiba od opterećenja	
..... 30	Slika 3.3 Mehanizam loma grede bez gubitka veze betona i FRP ojačanja		
..... 33	Slika 3.4 Mehanizam loma grede usljed odvajanja FRP ojačanja.....	34	Slika 3.5
Mehanizam loma u zoni interakcije betona i FRP ojačanja .....	35	Slika 3.6 Zavisnost graničnog opterećenja	
i ugiba od debljine ojačanja po Holmeru....	37	Slika 3.7 Zavisnost graničnog opterećenja i ugiba od debljine ojačanja po	
Sobuzu .....	38	Slika 3.8 Dijagram raspodjele deformacija i napona u GSN pri savijanju .....	45
Slika 3.9 Presjek		prije ojačanja - raspodjela dilatacija .....	54
Slika 3.10 Presjek sa prslinom - dilatacije i		unutrašnje sile .....	55
Slika 3.11 Analiza GSN presjeka pri savijanju – dijagram dilatacija i napona		.....	58
Slika 3.12 Tipično ponašanje betona tokom očvršćavanja .....	62	Slika 3.13 Tečenje	
betona pri konstantnom opterećenju .....	63	Slika 3.14 Prikaz ukupnih deformacija pod	
konstantnim naponom .....	64	Slika 3.15 Kriva tečenja materijala za nivoe napona iznad eksploatacionih	
..... 65	Slika 3.16 Određivanje koeficijenta tečenja za beton u normalnim uslovima sredine ...	72	Slika 4.1
Karakteristični radni dijagram čelika B500B (φ 22mm) .....	83	Slika 4.2 Rolna CFRP	
trake.....	84	Slika 4.3 Granulometrijski sastav mješavine agregata	

.....	85	Slika 4.4 Karakteristični radni dijagram betona .....	87
Slika 4.5 Poprečni presjek ispitivanih uzoraka.....	88	Slika 4.6 Priprema betonske podloge (brušenje).....	90
Slika 4.7 Nanošenje sloja maltera za nivelaciju.....	91	Slika 4.8 Aparatura za izvođenje testa i izgled uzorka nakon loma.....	91
Slika 4.9 Nanošenje sloja lijepka na karbonsku traku.....	92	Slika 4.10 Postavljanje karbonske trake.....	92
Slika 4.11 Postavljanje na oslonce ojačanih armirano-betonskih greda za ispitivanje ..	93	Slika 4.12 Demontirani uzorak nakon loma.....	94
Slika 4.13 Laboratorijska oprema: a) hidraulična presa; b) kicalica.....	96	Slika 4.14 Uređaj za ispitivanje tečenja betona.....	97
Slika 4.15 Ispitivanje greda opterećenih koncentrisanom silom.....	98	Slika 4.16 Ispitivanje greda pod dejstvom ravnomjernog opterećenja.....	99
Slika 4.17 Mjerenja koeficijenta tečenja na kontrolnim cilindrima.....	101	Slika 4.18 Šematski prikaz ispitivane grede i mjerne aparature.....	102
Slika 4.19 Položaj mjernih traka na betonu i na karbonskim trakama.....	103	Slika 4.20 Mjerenje širine prslina.....	104
Slika 5.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda .....	108	Slika 5.2 Veličine ugiba ispitivanih greda.....	109
Slika 5.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona.....	110	Slika 5.4 Dilatacije u pritisnutoj zoni betona .....	112
Slika 5.5 Dilatacije u karbonskim trakama.....	113	Slika 5.6 KDP kao uzročnik loma i izgled grede nakon loma.....	115
Slika 6.1 Odnos graničnih momenata savijanja ojačanih i kontrolnih greda .....	120	Slika 6.2 Veličine ugiba ispitivanih greda.....	121
Slika 6.3 Dilatacije u zategnutoj zoni betona.....	122	Slika 6.4 Dilatacije u pritisnutoj zoni betona .....	123
Slika 6.5 Dilatacije u karbonskim trakama.....	124	Slika 6.6 Lom grede G7.....	125
Slika 6.7 KDP kao uzročnik loma i odvajanje CFRP trake grede G9.....	126	Slika 6.8 Lom grede G6.....	126
Slika 6.9 Uporedna analiza veličine ugiba ispitivanih greda.....	129	Slika 6.10 Uporedna analiza veličine dilatacija u zategnutom betonu.....	129
Slika 6.11 Uporedna analiza veličine dilatacija u pritisnutom betonu .....	130	Slika 6.12 Uporedna analiza veličine dilatacija karbonskih traka .....	131
Slika 6.13 Dijagram ugiba u toku vremena .....	134	Slika 6.14 Dijagram dilatacija u zategnutom betonu u toku vremena .....	134
Slika 6.15 Dijagram dilatacija u pritisnutom betonu u toku vremena .....	135	Slika 6.16 Dijagram dilatacija u karbonskoj traci u toku vremena .....	135
Slika 7.1 Konačni element SOLID65 .....	142	Slika 7.2 Ponašanje betona u ispucalom stanju .....	144
Slika 7.3 Šema jednosmjernog FRP kompozita .....	149	Slika 7.4 Geometrija nosača .....	150
Slika 7.5 Izgled poprečnog presjeka nosača .....	151	Slika 7.6 Šema prslina za gredu G1a .....	152
Slika 7.7 Šema prslina za gredu G2.....	152	Slika 7.8 Dijagrami ugiba za linearni model .....	153
Slika 7.9 Dijagrami ugiba za nelinearni model .....	154	Slika 7.10 Dijagrami dilatacija karbonskih traka .....	

.....	155	PRILOG I Spisak tabela	Tabela 2.1	Karakteristike vlakana
.....	8	Tabela 2.2	Karakteristike	polimerne matrice
.....	9	Tabela 2.3	Karakteristike	FRP materijala
.....	10	Tabela 2.4	Karakteristike	CFRP traka za ojačanje i poređenje sa čelikom
.....	10	Tabela 3.1	Vrijednosti	redukcionog faktora CE za različite vrste materijala
.....	46	Tabela 3.2	Vrijednosti	dopuštenih napona za različite tipove ojačanja
.....	51	Tabela 4.1	Karakteristike	upotrijebljenog betonskog čelika
.....	83	Tabela 4.2	Karakteristike	upotrijebljene karbonske trake
.....	84	Tabela 4.3	Karakteristike	upotrijebljenog riječnog agregata
.....	86	Tabela 4.4	Karakteristike	upotrijebljenog cementa
.....	86	Tabela 4.5	Fizičko-mehaničke	karakteristike betona
.....	100	Tabela 4.6	Početni	ugibi greda
.....	104	Tabela 4.7	Karakteristike	greda ispitivanih na kratkotrajno opterećenje
.....	105	Tabela 4.8	Karakteristike	greda ispitivanih na dugotrajno opterećenje
.....	137	Tabela 6.1	Maksimalne	dilatacije greda u toku vremena
.....	139	Tabela 6.2	Rezultati	ispitivanja tečenja na kontrolnim betonskim cilindrima

139 Biografija BIOGRAFIJA AUTORA Mr Nataša Kopitović Vuković, rođena je 17. jula 1975. godine u Podgorici, gdje je završila osnovnu školu i gimnaziju. Dobitnik je diplome Luča za osnovnu i srednju školu. Diplomirala je na konstruktivnom smjeru Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore u julu 2001. godine. Magistarski rad pod nazivom „Uporedna analiza granične nosivosti elemenata od prethodno napregnutog betona, prema našim propisima i prema Evrokodu 2” odbranila je 2008. godine, na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore, pod mentorstvom prof. dr Radenka Pejovića. Doktorske studije upisala je na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore i položila sve predviđene ispite sa prosječnom ocenom A. Njeno doktorsko istraživanje je usmjereno ka primjeni novih materijala i tehnologija u građevinarstvu. Od 01.04.2003. godine radi na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore, gdje je, u zvanju saradnika, samostalno održavala vježbanja na brojnim predmetima na Katedri za materijale i konstrukcije. Angažovana je na osnovnim i specijalističkim studijama konstruktivnog smjera, kao i studijskog programa Menadžment u građevinarstvu. Takođe je dugi niz godina bila angažovana i kao saradnik na Arhitektonskom fakultetu. Od početka angažovanja, Nataša Kopitović Vuković je radila i kao saradnik u Laboratoriji za ispitivanje materijala i konstrukcija. Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu. U okviru CEEPUS razmjene nastavnog kadra, boravila je na Tehničkom Univerzitetu u Beču, kao istraživač na projektu. Obavljala je funkciju koordinatora za međunarodnu saradnju Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore (2 studijske godine). Bila je član komisija za odbranu velikog broja diplomskih radova. Objavila je veći broj radova, izlaganih na naučnim i stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Član je Inženjerske komore Crne Gore . Član je tima za izradu Evrokodova. Član je Tehničkog komiteta Instituta za standardizaciju. Član je Grupe za ocjenu i nadzor (GON) Tijela za sertifikaciju građevinskih proizvoda (IG CERT). Aktivno se koristi engleskim jezikom. Udata je i ima dva sina. Izjava o autorstvu Izjava o autorstvu Potpisana Broj indeksa/upisa Nataša Kopitović Vuković 103/08 Izjavljujem da je doktorska disertacija pod naslovom Ponašanje AB konstrukcija ojačanih kompozitnim materijalima pod dugotrajnim opterećenjem • • rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja, • • da su rezultati korektno navedeni, i da nijesam povrijedila autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima. U Podgorici, 14. 05. 2020. godine Potpis doktoranda \_\_\_\_\_ Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada Ime i prezime autora Nataša Kopitović Vuković Broj indeksa/upisa 103/08 Studijski program Građevinarstvo Naslov rada Ponašanje









[konstrukcija.me](#)

---

6 219 words / 1% - Internet from 03-Jun-2020 12:00AM  
[docplayer.net](#)

---

7 149 words / < 1% match - Internet from 07-Jun-2008 12:00AM  
[www.casopis-gradjevinar.hr](#)

---

8 144 words / < 1% match - Internet from 31-Jan-2020 12:00AM  
[hrcak.srce.hr](#)

---

9 65 words / < 1% match - Internet from 25-May-2016 12:00AM  
[diva-portal.org](#)

---

10 64 words / < 1% match - Internet from 28-Mar-2015 12:00AM  
[pure.ltu.se](#)

---

11 62 words / < 1% match - Internet from 25-Apr-2019 12:00AM  
[kohankarazma.com](#)

---

12 58 words / < 1% match - Internet from 25-May-2015 12:00AM  
[www.unizg.hr](#)

---

13 55 words / < 1% match - Internet  
[orca.cf.ac.uk](#)

---

14 54 words / < 1% match - Internet from 17-Dec-2018 12:00AM  
[www.cris.uns.ac.rs](#)

---

15 52 words / < 1% match - Internet from 03-Mar-2019 12:00AM  
[www.aciitaly.com](#)

---

16 52 words / < 1% match - Internet  
[journals.rtu.lv](#)

---

17 51 words / < 1% match - Internet from 15-Jun-2015 12:00AM  
[rgn.hr](#)

---

18 50 words / < 1% match - Internet from 26-Sep-2018 12:00AM  
[issuu.com](#)

---

19 49 words / < 1% match - Internet from 24-Jul-2019 12:00AM  
[ijcsm.springeropen.com](#)

---

20

47 words / < 1% match - Internet from 05-Jun-2020 12:00AM  
[mafiadoc.com](http://mafiadoc.com)

---

21

45 words / < 1% match - Crossref Posted Content  
[Igor Del Gaudio Orlando. "Projeto de estruturas de concreto armado reforçadas com compósitos FRP: dimensionamento à flexão e à força cortante.", Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP, 2019](#)

---

22

42 words / < 1% match - Crossref  
["Advances in FRP Composites in Civil Engineering", Springer Science and Business Media LLC, 2011](#)

---

23

38 words / < 1% match - Internet from 29-May-2020 12:00AM  
[www.scribd.com](http://www.scribd.com)

---

24

36 words / < 1% match - Internet from 04-Jul-2018 12:00AM  
[eprints.nottingham.ac.uk](http://eprints.nottingham.ac.uk)

---

25

34 words / < 1% match - Internet from 21-Mar-2018 12:00AM  
[www.iaeme.com](http://www.iaeme.com)

---

26

32 words / < 1% match - Internet from 27-May-2020 12:00AM  
[www.scribd.com](http://www.scribd.com)

---

27

31 words / < 1% match - Internet from 30-Aug-2017 12:00AM  
[open.uct.ac.za](http://open.uct.ac.za)

---

28

30 words / < 1% match - Internet  
[studentsrepo.um.edu.my](http://studentsrepo.um.edu.my)

---

29

30 words / < 1% match - Internet from 15-Mar-2019 12:00AM  
[ijsr.in](http://ijsr.in)

---

30

30 words / < 1% match - Internet from 25-Sep-2018 12:00AM  
[es.scribd.com](http://es.scribd.com)

---

31

30 words / < 1% match - Internet from 25-Sep-2019 12:00AM  
[m.scirp.org](http://m.scirp.org)

---

32

29 words / < 1% match - Internet from 14-Mar-2019 12:00AM  
[edoc.site](http://edoc.site)

---

33

29 words / < 1% match - Internet from 28-Nov-2019 12:00AM  
[espace.library.uq.edu.au](http://espace.library.uq.edu.au)

---

34

29 words / < 1% match - Internet from 06-Jul-2016 12:00AM

[open.library.ubc.ca](https://open.library.ubc.ca)

---

35 29 words / < 1% match - Internet  
[orca.cf.ac.uk](https://orca.cf.ac.uk)

---

36 29 words / < 1% match - Internet  
[livrepository.liverpool.ac.uk](https://livrepository.liverpool.ac.uk)

---

37 29 words / < 1% match - Internet from 01-Jun-2018 12:00AM  
[opus.bath.ac.uk](https://opus.bath.ac.uk)

---

38 28 words / < 1% match - Internet from 24-May-2016 12:00AM  
[www.ros.hw.ac.uk](https://www.ros.hw.ac.uk)

---

39 28 words / < 1% match - Internet from 24-May-2014 12:00AM  
[gf.unmo.ba](https://gf.unmo.ba)

---

40 27 words / < 1% match - Internet from 17-Dec-2018 12:00AM  
[nardus.mpn.gov.rs](https://nardus.mpn.gov.rs)

---

41 27 words / < 1% match - Internet  
[hal.archives-ouvertes.fr](https://hal.archives-ouvertes.fr)

---

42 27 words / < 1% match - Crossref  
[Luke A Bisby. "Response to fire of concrete structures that incorporate FRP", Progress in Structural Engineering and Materials, 07/2005](#)

---

43 26 words / < 1% match - Internet from 10-Mar-2020 12:00AM  
[publicationslist.org](https://publicationslist.org)

---

44 26 words / < 1% match - Internet from 06-Jul-2014 12:00AM  
[www.iifc-hq.org](https://www.iifc-hq.org)

---

45 26 words / < 1% match - Internet from 26-Dec-2016 12:00AM  
[fedorabg.bg.ac.rs](https://fedorabg.bg.ac.rs)

---

46 26 words / < 1% match - Internet from 02-Mar-2020 12:00AM  
[polymer-science.imedpub.com](https://polymer-science.imedpub.com)

---

47 26 words / < 1% match - Internet from 06-May-2020 12:00AM  
[researchonline.jcu.edu.au](https://researchonline.jcu.edu.au)

---

48 25 words / < 1% match - Internet from 18-Feb-2019 12:00AM  
[citeseerx.ist.psu.edu](https://citeseerx.ist.psu.edu)

---

- 
- 49 25 words / < 1% match - Internet  
[scholarbank.nus.edu.sg](http://scholarbank.nus.edu.sg)
- 
- 50 25 words / < 1% match - Internet from 06-Jun-2020 12:00AM  
[scindeks.ceon.rs](http://scindeks.ceon.rs)
- 
- 51 24 words / < 1% match - Internet from 12-Jul-2016 12:00AM  
[fr.scribd.com](http://fr.scribd.com)
- 
- 52 24 words / < 1% match - Internet from 29-Dec-2012 12:00AM  
[www.ipublishing.co.in](http://www.ipublishing.co.in)
- 
- 53 24 words / < 1% match - Internet from 03-Nov-2011 12:00AM  
[library.modot.mo.gov](http://library.modot.mo.gov)
- 
- 54 24 words / < 1% match - Internet from 31-Oct-2016 12:00AM  
[www.readbag.com](http://www.readbag.com)
- 
- 55 24 words / < 1% match - Internet from 06-Jul-2016 12:00AM  
[eprints.soton.ac.uk](http://eprints.soton.ac.uk)
- 
- 56 24 words / < 1% match - Crossref  
[Abdulla Jabr, Amr El-Ragaby, Faouzi Ghrib. "Effect of the Fiber Type and Axial Stiffness of FRCM on the Flexural Strengthening of RC Beams", \*Fibers\*, 2017](#)
- 
- 57 23 words / < 1% match - Internet from 12-May-2019 12:00AM  
[www.issres.net](http://www.issres.net)
- 
- 58 23 words / < 1% match - Internet from 14-Jan-2018 12:00AM  
[iasir.net](http://iasir.net)
- 
- 59 23 words / < 1% match - Internet from 20-Jan-2011 12:00AM  
[library.tee.gr](http://library.tee.gr)
- 
- 60 23 words / < 1% match - Internet from 19-Jan-2018 12:00AM  
[wlv.openrepository.com](http://wlv.openrepository.com)
- 
- 61 21 words / < 1% match - Internet from 14-Apr-2019 12:00AM  
[link.springer.com](http://link.springer.com)
- 
- 62 21 words / < 1% match - Internet from 13-Mar-2020 12:00AM  
[www.scielo.br](http://www.scielo.br)
- 
- 63 20 words / < 1% match - Internet from 18-Nov-2018 12:00AM  
[www.omniascience.com](http://www.omniascience.com)

64

20 words / < 1% match - Internet from 28-May-2010 12:00AM  
[onlinepubs.trb.org](http://onlinepubs.trb.org)

65

20 words / < 1% match - Internet from 26-Aug-2018 12:00AM  
[www.jsce.ir](http://www.jsce.ir)

66

20 words / < 1% match - Internet from 08-Jun-2016 12:00AM  
[followscience.com](http://followscience.com)

67

20 words / < 1% match - Internet from 24-Jun-2017 12:00AM  
[www.uta.edu](http://www.uta.edu)

68

19 words / < 1% match - Internet from 27-Jun-2017 12:00AM  
[onlinepubs.trb.org](http://onlinepubs.trb.org)

69

18 words / < 1% match - Internet from 15-Apr-2019 12:00AM  
[repository.unika.ac.id](http://repository.unika.ac.id)

70

18 words / < 1% match - Internet from 14-May-2019 12:00AM  
[www.scribd.com](http://www.scribd.com)

71

17 words / < 1% match - Internet from 29-Mar-2016 12:00AM  
[www.irbnet.de](http://www.irbnet.de)

72

17 words / < 1% match - Internet from 07-Nov-2017 12:00AM  
[epublications.marquette.edu](http://epublications.marquette.edu)

73

17 words / < 1% match - Internet from 20-Jun-2019 12:00AM  
[dimk.rs](http://dimk.rs)

74

16 words / < 1% match - Internet from 07-Sep-2016 12:00AM  
[www.scribd.com](http://www.scribd.com)

75

16 words / < 1% match - Internet from 01-Dec-2019 12:00AM  
[journals.sagepub.com](http://journals.sagepub.com)

76

16 words / < 1% match - Crossref  
[M. MOTAVALLI. "Fibre reinforced polymer composite materials for building and construction",  
Textiles polymers and composites for buildings, 2010](#)

77

15 words / < 1% match - Internet from 14-May-2020 12:00AM  
[ascelibrary.org](http://ascelibrary.org)

78

15 words / < 1% match - Internet from 24-May-2020 12:00AM



[spotidoc.com](http://spotidoc.com)

---

79

15 words / < 1% match - Internet from 04-Dec-2015 12:00AM  
[etd.fcla.edu](http://etd.fcla.edu)

---

80

15 words / < 1% match - Internet from 18-Jan-2020 12:00AM  
[www.ejournals.eu](http://www.ejournals.eu)

---

81

15 words / < 1% match - Internet from 24-Aug-2018 12:00AM  
[scindeks.ceon.rs](http://scindeks.ceon.rs)

---

82

15 words / < 1% match - Crossref  
[Constantin E. Chalioris. "Analytical model for the torsional behaviour of reinforced concrete beams retrofitted with FRP materials", Engineering Structures, 2007](#)

---

83

14 words / < 1% match - Internet from 26-Oct-2019 12:00AM  
[edoc.pub](http://edoc.pub)

---

84

14 words / < 1% match - Internet from 03-Jun-2020 12:00AM  
[www.ucg.ac.me](http://www.ucg.ac.me)

---

85

14 words / < 1% match - Internet  
[eprints.um.edu.my](http://eprints.um.edu.my)

---

86

13 words / < 1% match - Internet from 12-Oct-2019 12:00AM  
[repositorio.ucv.edu.pe](http://repositorio.ucv.edu.pe)

---

87

13 words / < 1% match - Internet from 17-Mar-2016 12:00AM  
[bibliotecadigital.ipb.pt](http://bibliotecadigital.ipb.pt)

---

88

13 words / < 1% match - Internet from 12-Jun-2009 12:00AM  
[www.ding.unisannio.it](http://www.ding.unisannio.it)

---

89

13 words / < 1% match - Internet from 24-Aug-2018 12:00AM  
[scindeks.ceon.rs](http://scindeks.ceon.rs)

---

90

12 words / < 1% match - Internet from 06-Mar-2020 12:00AM  
[www.cris.uns.ac.rs](http://www.cris.uns.ac.rs)

---

91

12 words / < 1% match - Internet from 27-Feb-2020 12:00AM  
[nardus.mpn.gov.rs](http://nardus.mpn.gov.rs)

---

92

11 words / < 1% match - Internet from 02-Feb-2019 12:00AM  
[www.radyab.co](http://www.radyab.co)

---

- 
- 93 11 words / < 1% match - Internet from 26-May-2019 12:00AM  
[fmeri.gov.ba](http://fmeri.gov.ba)
- 
- 94 11 words / < 1% match - Internet from 31-Dec-2018 12:00AM  
[fedorabg.bg.ac.rs](http://fedorabg.bg.ac.rs)
- 
- 95 11 words / < 1% match - Internet from 09-Nov-2018 12:00AM  
[www.mtf.unze.ba](http://www.mtf.unze.ba)
- 
- 96 11 words / < 1% match - Crossref  
[Gediminas Marčiukaitis, Mykolas Daugevičius, Juozas Valivonis. "THE FRAGMENTATION OF THE TENSIONED ZONE OF THE STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE BEAM WITH CARBON FIBER COMPOSITE", Engineering Structures and Technologies, 2010](#)
- 
- 97 11 words / < 1% match - Crossref  
[Hollaway, L.C.. "A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties", Construction and Building Materials, 201012](#)
- 
- 98 10 words / < 1% match - Internet from 14-Nov-2017 12:00AM  
[link.springer.com](http://link.springer.com)
- 
- 99 10 words / < 1% match - Internet from 18-Jan-2013 12:00AM  
[konstrukcija.me](http://konstrukcija.me)
- 
- 100 10 words / < 1% match - Internet from 09-Jul-2018 12:00AM  
[shellbuckling.com](http://shellbuckling.com)
- 
- 101 10 words / < 1% match - Internet from 27-Jul-2018 12:00AM  
[pastel.archives-ouvertes.fr](http://pastel.archives-ouvertes.fr)
- 
- 102 10 words / < 1% match - Internet from 18-Apr-2020 12:00AM  
[repositorij.unizg.hr](http://repositorij.unizg.hr)
- 
- 103 10 words / < 1% match - Internet from 26-Nov-2018 12:00AM  
[studionatia.pl](http://studionatia.pl)
- 
- 104 10 words / < 1% match - Internet from 28-Aug-2008 12:00AM  
[www.ee.buffalo.edu](http://www.ee.buffalo.edu)
- 
- 105 10 words / < 1% match - Crossref  
[Jialai Wang. "Debonding of FRP-plated reinforced concrete beam, a bond-slip analysis. I. Theoretical formulation", International Journal of Solids and Structures, 2006](#)
-