

Dr Nebojša Đuranović

FRP REINFORCEMENT FOR RC BEAMS

Summary

This paper studies feasibility and possible employability of Fiber Reinforced Plastics (FRP) when used in lieu of ordinary steel reinforcements. The reinforcement production, main types, positive and negative features of the material from a designer point of view, possible areas of application and the directions of necessary further investigation have all been indicated. The paper presents basic principles that can be used to transform an steel reinforced section to one reinforced with FRP, all in circumstances of non-existence of applicable codes and standards .

Key words: FRP, reinforced concrete, plastics, fibers, design

ARMIRANJE AB GREDA PLASTIČNOM (FRP) ARMATUROM

Dr Nebojša Đuranović

Ovaj članak se bavi proučavanjem mogućnosti upotrebe plastičnih vlaknastih armatura (FRP) kao, u određenim situacijama, pogodne zamjene za uobičajene čelične armature. Objasnjeni su načini proizvodnje, osnovne vrste, pozitivna i negativna svojstva, moguća polja primjene kao i pravci daljnjih istraživanja. U nedostatku standarda za dimenzionisanje ovim materijalima, dati su osnovni načini prevođenja presjeka armiranih čelikom na presjeke armirane FRP armaturama i upoređenja među njima.

Ključne riječi: FRP, armirani beton, plastika, vlakna, dimenzionisanje

1. UVOD

Upotreba čelika za armiranje betonskih konstrukcija dugo vremena predstavljala je jedinu mogućnost dostupnu projektantu određenog građevinskog objekta. U novije vrijeme dolazi do ubrzanog istraživanja u oblasti primjene alternativnih materijala kao glavne armature betonskih presjeka. Tu se prvenstveno radi o tzv. kompozitnim materijalima koji se sastoje od osnove, koju čini plastično-smolasti materijal, na koju se, ili kroz koju se, provlače vlakna drugog materijala, dajući mu tako karakteristike koje čine kombinaciju karakteristika osnovnih materijala.

Termin FRP (na engleskom **Fibre Reinforced Plastics** to jest plastike ojačane vlaknima) koji će ovdje biti upotrebljavan, pokriva ogroman broj različitih materijala čije osobine ne zavise samo od sastojaka već veoma često i u veoma velikoj mjeri i od načina to jest postupka proizvodnje. Na samom početku treba reći da se ovdje pod vlaknima ne podrazumijevaju kratka vlakna koja se obično koriste kao aditiv za poboljšavanje određenih karakteristika samog betona već kontinuirana vlakna čiji se prečnici, kao i kod predhodno pomenutih, mjere mikronima.

FRP materijali su svoju najveću primjenu našli u avionskoj i elektro industriji. Najpoznatiji primjer toga je Američki "nevidljivi" vojni avion - Stealth, koji je u potpunosti izgrađen od ovog materijala. Primjena ovih materijala u području građevinarstva zadnjih godina je u značajnom usponu.

2. PODRUČJE PRIMJENE I PROIZVODNJA FRP ARMATURA

Pravilo je da se materijal, u ovom slučaju čelik, koji se u mnogobrojnim primjenama pokazao kao uspješan i ekonomičan ne mijenja bez valjanih razloga koji opravdavaju tu promjenu. Međutim, istraživanja sa FRP armaturama upućuju na zaključak da će one, u skoroj budućnosti, preuzeti dio zadataka dosada povjeravanih čeličnim armaturama i čeličnim kablovima za prednaprezanje. To se prvenstveno odnosi na situacije u kojima se armature pravljenе od čelika pokazuju kao neadekvatno ili

nedovoljno pouzdano sredstvo armiranja. Ta neadekvatnost čelika u pojedinim situacijama direktna je posljedica njegovih fizičkih, mehaničkih i hemiskih osobina.

Posmatrajmo, na primjer, situaciju koja nastaje kao posljedica korozije čelične armature. Rđanje kao hemiski proces dovodi do povećavanja poprečnog presjeka šipki armature uz istovremeno slabljenje nosivosti. Povećavanje poprečnog presjeka glavne armature, zauzvrat, dovodi do povećavanja napona u okolnom betonu. Nakon određenog vremena nosivost okolnog betona može biti prevaziđena što će dovesti do pojave pukotina, kao dodatak onima koje su već dopuštene po propisima, kao i njihovom sve većem otvaranju. Ovo zatim dovodi, kod presjeka izloženih atmosferskim uticajima, do povećanog pristupa vode a samim tim i povećane korozije. Kao što se vidi proces korozije, sam po sebi, nije uticao na ponašanje i trajnost betona, ali posledična veza između rđanja armature i ukupnog stanja konstrukcije može biti dramatična. Posebno je zabrinjavajuće to što se ova brzina oštećenja odvija geometriskom progresijom i što u određenim situacijama ne može biti jednostavno ustanovljena. Za razliku od čeličnih, kompozitne armature nisu podložne klasičnoj koroziji. Objekti u kojima problemi korozije mogu biti adekvatno riješeni primjenom FRP armatura su: mostovi, podporni zidovi, temelji, objekti izloženi vandalizmu itd.

FRP materijali imaju čvrstoću na zatezanje znatno veću nego čelici koji se uobičajeno upotrebljavaju.

Plastični materijali pokazuju potpunu magnetnu i električnu neutralnost. Električna "transparentnost" FRP armatura predstavlja karakteristiku koja je od suštinskog značaja za sve objekte u kojima su smješteni osetljivi elektronski uređaji i u kojima prisustvo većih količina čelične armature može nepovoljno uticati na upotrebljivost tih instrumenata. Tipični primjer bi bili telekomunikacioni centri, bolnički prostori sa sofisticiranom tehnikom, radarski centri, aerodromski tornjevi, određene vojne instalacije a poznati su i slučajevi znatnih problema u prijemu televizijskih i radio signala u prostorijama većih objekata u kojima nisu postavljene veze sa centralnom, tzv. zajedničkom antenom. Magnetna "providnost" pruža prednosti slične onima pomenutim kod električne. Na primjer, istraživački centri koji traže potpunu ili djelimičnu magnetnu izolovanost ne mogu biti građeni sa čeličnim armaturama jer u suprotnom će svi izmjereni rezultati morati da budu razmatrani i sa stanovišta uticaja okolne armature¹.

Mala specifična težina ovih armatura, iako ne predstavlja njihovu najveću prednost sa stanovišta građevinarstva, može u određenim situacijama da znatno smanji težinu samog objekta pa tako i smanji statičke i dinamičke uticaje koji negativno djeluju na njegove niže nivoe. Ovo se posebno odnosi na objekte kod kojih su prisutni jako armirani presjeci.

Velika otpornost na zamor (za aramidne i karbonatne FRP armature čak do 3 puta veća nego kod čelika ali kod staklenih FRP armatura može biti manja nego kod čelika²) i otpornost na hamiske uticaje takođe mogu u određenim situacijama olakšati posao projektanta.

I na kraju proces proizvodnje koji se odvija pod ne tako visokim temperaturama i vlaknasta priroda završnog proizvoda ostavljaju dosta prostora za ugrađivanje raznih vrsta mjerača i senzora u samu armaturu, koji mogu u budućnosti predstavljati značajan korak ka tzv. "inteligentnim" konstrukcijama koje bi praktično same izvještavale o svom trenutnom upotrebnom stanju.

U dosadašnjim primjenama FRP materijali su svoje mjesto našli ponajviše u području prednapregnutih konstrukcija, traka za naknadno, spoljnje ojačavanje presjeka kao i u području proizvodnje gotovih presjeka. U zadnje vrijeme naglasak se stavlja na pokušaj njihove primjene kao glavne armature betonskih presjeka

Upotreba različitih dodataka u obliku vlakana a u cilju poboljšavanja osobina betona datira još iz tridesetih godina ovog vijeka³ ali prva istraživanja na upotrebi FRP armatura u građevinarstvu su započeta 1978 godine kada su testirani FRP kablovi za prednaprezanje. FRP materijal sa staklenim vlaknima je prvi put upotrebljen za jedan mali betonski most 1980 dok je 1986 jedan kompletan most u Diseldorfu (Njemačka) projektovan sa kablovima za prednaprezanje od ovog materijala⁴.

Karbonatni FRP kablovi za prednaprezanje su prvi put korišćeni 1991 za most u Ludvigshafen-u (Njemačka).

Kao što je predhodno rečeno suštinu FRP materijala čini kombinacija vlakana i veziva. Mehaničke i fizičke osobine vlakana u ogromnoj mjeri određuju karakteristike završnog proizvoda. Vezivni materijali ne poboljšavaju nosivost završnog proizvoda ali utiču na njegov modul elastičnosti.

Oni se po pravilu doziraju u najmanjim mogućim količinama koje pružaju dobru zaštitu od spoljnih uticaja i doprinose ukupnoj čvrstoći na smicanje, koja je kod vlakana inače veoma niska. Najčešće upotrebljavana veziva su epoksidna i poliesterska ljepila - plastike. Ona se najčešće oblikuju temperaturom pri čemu neka od njih mogu biti čak i pretapana i njihov oblik naknadno mijenjan.

Dosta precizne procjene modula elastičnosti kompozitne armature, E_{frp} , se mogu vršiti ako su poznati modul elastičnosti E_{vl} , procenat vlakana u ukupnoj zapremini V_{vl} i modul elastičnosti veziva E_{ve} . Tada:

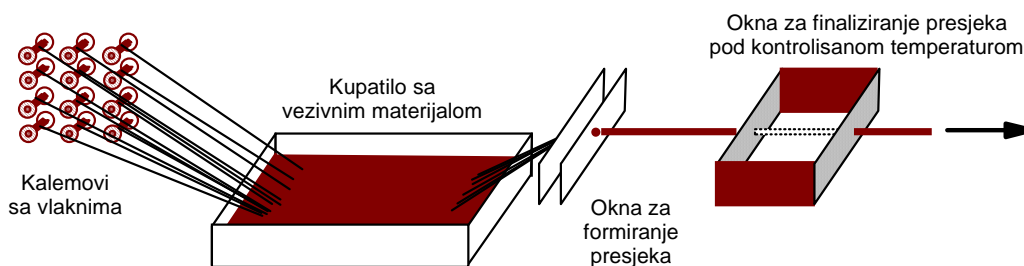
$$E_{frp} = E_{vl} \cdot V_{vl} + E_{ve} \cdot (1 - V_{ve})$$

Po istom principu se može procijeniti i čvrstoća na zatezanje f_{frp} plastične armature a na osnovu poznate čvrstoća na zatezanje f_{vl} vlakana koji je čine. Tada:

$$f_{frp} = f_{vl} \cdot V_{vl}$$

Proces spajanja veziva i vlakana je od suštinske važnosti i on može biti izveden na mnogo načina pri čemu su sledeća tri za nas najinteresantnija:

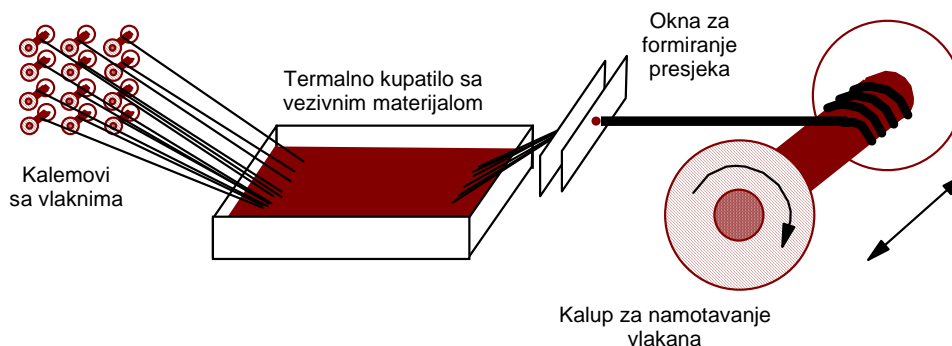
a) proces provlačenja vlakana kroz "termalno kupatilo" napunjeno tečnim vezivom - najčešće se koristi pri dobijanju armaturnih šipki, slika 1,



Slika 1 - Proces dobijanja armaturnih šipki

b) proces mašinskog ili ručnog polaganja vlakana zajedno sa vezivom u slojeve različitih debljina koji se mogu naknadno kidati u željene oblike, i

c) proces namotavanja vlakana predhodno natopljenih vezivom na kalupe željenih dimenzija - najčešće se koristi pri dobijanju uzengija armature pri čemu dobijene uzengije imaju presjek zavisno od oblika kalema na koji se namotavaju i mogu se kidati u proizvoljnim širinama, slika 2.



Slika 2 - Proces proizvodnje uzengija i spiralne armature namotavanjem vlakana

Ova tri procesa proizvodnje omogućavaju proizvodnju armatura u obliku armaturnih šipki, kablova za prednaprezanje, armaturnih mreža, uzengija, trake za ojačavanje postojećih AB greda, pa čak i gotovih nosećih elemenata kao što su grede, stubovi ili ploče. Završni proizvod, u našem slučaju armatura, je,

kako se može i pretpostaviti, heterogene prirode (zbog prisustva konstitutivnih materijala sa različitim osobinama) i anizotropan to jest posjeduje različite karakteristike u različitim pravcima.

Pomenutim procesima proizvodnje po pravilu se dobijaju glatke armature na koje se zatim mogu, ako je potrebno, nanijeti slojevi spoljnog rebrastog omotača, a u cilju poboljšanja prijanjanja betona uz armaturu. Te "izboranosti" mogu biti u različitim formama kao što su nalijepljena zrnca pijeska, nalijepljene navlake sa različitim dubinama i oblicima šara itd. Značajno je napomenuti da, za sada, ove "izboranosti" ni u kom slučaju ne mogu biti na nivou i kvalitetu rebara koje ima obična rebrasta armatura.

Trenutno se u svijetu proizvodi nekoliko vrsta FRP armatura. One imena obično dobijaju prema vrsti vlakana od kojih su napravljena. Sama vlakna mogu biti proizvedena od različitih materijala ali sa stanovišta građevinarstva najznačajnija su:

a) Staklene FRP armature - (engleski: *Glass FRP*) - Modul elastičnosti im se kreće u rasponu 31 do 63 GPa, čvrstoća na zatezanje između 600 do 2100 MPa dok im je deformacija na granici kidanja između 1,8 i 4,0%. Koeficijent podužnog termalnog izduženja im je negativan i iznosi $-15 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$. Staklene armature su i najjeftinije od svih ovdje pomenutih FRP armatura.

b) Karbonatne FRP armature - (*Carbon FRP*) - to su FRP armature za koje se koriste karbonatna vlakna. One imaju najveći modul elastičnosti od svih plastičnih armatura i on može da ide do 230 GPa. Deformacija na granici kidanja im je između 1,2 i 2,0%, dok im je čvrstoća na granici kidanja ide do 3000 MPa. Koeficijent podužnog termalnog izduženja im iznosi $0,2 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$. Ove armature su lako obradljive ali i skuplje od staklenih i aramidskih.

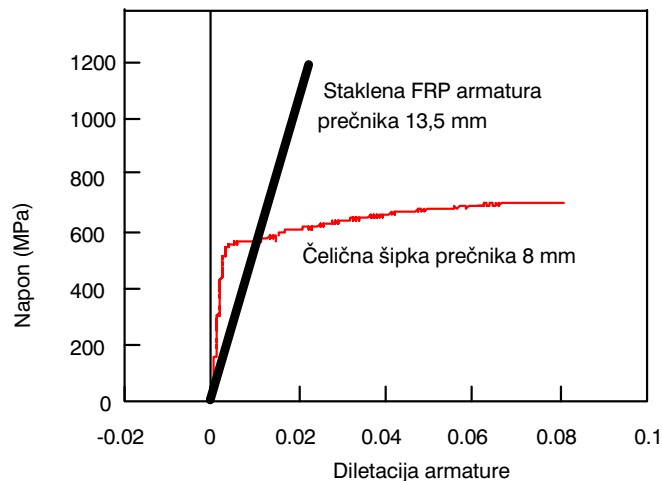
c) Aramidске FRP armature - (*AramidFRP*) - imaju vlakna napravljena od aramida a osnovna prednost u odnosu na karbonatne armature im je veća deformacija na granici kidanja kao i određena nelinearnost između diletacija i napona u neposrednoj blizini granice kidanja, što bi moglo biti značajno sa stanovišta duktilnosti. Modul elastičnosti im se kreće u rasponu 73 do 165 GPa, čvrstoća na zatezanje između 2600 i 3400 MPa dok je deformacija na granici kidanja između 1,5 i 5,3%. Koeficijent podužnog termalnog izduženja im je negativan i iznosi $-15 \times 10^{-6} \text{ m/m}^{\circ}\text{C}$.



Slika 3. FRP Armature: (odozgo) aramidска, karbonatna i staklena šipka i staklena FRP uzengija

3. NEDOSTACI FRP ARMATURA

Pored svih svojih dobrih karakteristika postoje razlozi zbog kojih kompozitni materijali mogu biti upotrebljavani samo uz značajnu dozu opreza. Najznačajniji od njih, sa stanovišta projektovanja, su potpuna linearnost dijagrama napon-deformacija, i problemi povezani sa prijanjanjem FRP armature i betona.



Slika 4. Dijagrami napon-dilatacija za tipičnu čeličnu i FRP armaturu

Sa slike 4. je evidentno da FRP materijali ne posjeduju tačku tečenja kao čelične armature već se do tačke kidanja ponašaju potpuno linearno. To potpuno odsustvo duktiliteta to jest nepostojanje zone plastičnosti je veoma značajna osobina FRP armature i ona ima najveće posledice po njihovu upotrebu za armiranje AB konstrukcija. Dalje, FRP materijali imaju po pravilu veoma nizak modul elastičnosti, ali se mora naglasiti da se već sada proizvode karbonatne FRP armature koje imaju modul čak i veći od 200 GPa. Sledeća bitna karakteristika vidljiva sa slike 4. je po pravilu niska dilatacija na granici kidanja. Jedina, sa gornje slike vidljiva karakteristika, a zbog koje su ovi materijali itekako dobrodošli za mnoštvo primjena u građevinarstvu je njihova izuzatno visoka čvrstoća na zatezanje. Gore pobrojane karakteristike će kasnije imati presudni uticaj na promjenu modaliteta loma između presjeka armiranih čeličnim i uporednog presjeka armiranog FRP armaturama (vidi poglavlje 4.).

Znatno viša čvrstoća FRP šipki na zatezanje kao posledicu ima potrebu za većim dužinama sidrenja ove nego obične čelične armature. Kada se vrši direktno upoređivanje rezultata testova na čeličnim i FRP armaturama autor još nije naišao na slučaj da je neko izvijestio da nije bilo smanjenja napona prijanjanja za FRP armaturu u odnosu na čelične armature istih presjeka. Isto se odnosi i na minimalne dužine sidrenja. Ovo ima značajne konsekvence i može direktno voditi do loma u presjeku kao što se vidi na nekim od testova izvedenim na Univerzitetu u Šefildu⁵. U suštini, problemi prijanjanja betona za FRP armaturu su povezani sa visokim Poisonov-im koeficijentom FRP materijala i mehaničkim karakteristikama rebara same armature. Prihvatanje napona zatezanja u armaturi je dalje komplikovano zbog nemogućnosti sidrenja ovih armatura na način uobičajen za čelične armature. Sidrenje je praktično nemoguće zbog nepostojanja duktilnosti u FRP materijalu što sprečava pravljenje kuka i krivina na krajevima armaturnih šipki, tako da se one ostavljaju prave. Ovaj problem se trenutno razmatra na više mjesta u svijetu a predložena rešenja se kreću u pravcu proizvodnje specijalnih završetaka za šipke koji bi se postavljali neposredno prije izlivanja betona, istraživanja uticaja različitih poprečnih presjeka šipke na napone prijanjanja, uticaj različitih vrsta rebara i tekstura šipke⁶ itd. Ima takođe pokušaja da se problem izbjegne kontrolisanjem najvećih napona u šipci armature tako što bi bili znatno niži od maksimalnih koji se mogu postići. Značajno je napomenuti da je eksperimentima utvrđeno da se postizanjem prostornog stanja napona u betonu putem sprežavanja, naponi prijanjanja znatno povećavaju⁷ što je posebno interesantno jer je povezano i sa onako dobrodošlim povećanjem u iskorišćenosti betona u presjeku, to jest pomjeranja neutralne ose naniže. Testovi izvedeni u Šefildu pokazuju da se za slučaj FRP armatura od staklenih ili karbonatnih vlakana problemi prijanjanja nisu pojavili u nijednom slučaju kada su naponi u armaturi do 30 % od onih na granici kidanja.

Posledica dva gore navedena problema je potpuno nov pristup pri projektovanju AB presjeka sa ovim materijalima, a značaj predhodno rečenog na cijeli niz drugih pitanja npr. u zemljotresnom inženjerstvu sa stanovišta potpunog odsustva duktiliteta u presjeku, je takođe evidentan. Nepostojanje duktilnosti znači da kod računanja sila za presjeke, a za potrebe računanja maksimalnih nosivosti presjeka armiranog sa FRP armaturama, ne treba uzimati u obzir preraspodjelu momenata zbog plastične deformacije - zato što nje praktično nema⁸.

Pored ovih ovi materijali posjeduju još niz drugih problema a neki od njih su:

- a) Relativno visoka cijena - u ovom trenutku cijena im je od 3 do 5 puta veća nego obične čelične armature ali se smatra da će povećanom potražnjom cijena biti snižena. Ta visoka cijena je dobrim dijelom i posljedica još uvijek potpuno neusavršenog sistema proizvodnje i djelimične neizvjesnosti u pogledu karakteristika završnog proizvoda. Receptura za proizvodnju je u većini firmi koje je proizvode strogo čuvana komercijalna tajna pa i pored toga svaki ciklus nove proizvodnje obično zahtijeva period uhodavanja prije nego se proizvede armatura željenih osobina.
- b) Granična čvrstoća pri dugotrajnim opterećenjima im je nedovoljno ispitana,
- c) Postoje izvještaji koji nagoveštavaju da ultra-violentna zračenja mogu prouzrokovati oštećenja na materijalu,
- d) Problemi obradljivosti npr. kod staklenih armatura zbog opasnosti od povreda stalnim vlaknima,
- e) Znatno niža čvrstoća na smicanje nego kod čelika,
- f) Nepostojanje standarda za projektovanje kao u slučaju čeličnih armatura.

Pored navedenih postoji još dosta drugih nepoznanica koje zahtijevaju oprez kao što su na primjer nedovoljna ispitanoost postojanosti staklenih FRP armatura u betonu, slabljenje aramidnih FRP armatura pri absorpciji vode, veoma slab nivo ispitanoosti ponašanja u uslovima vatre i dinamičkih opterećenja, nedovoljna ekološka ispitanoost itd. Istraživanja koja se trenutno vrše na više mjesta u svijetu pokušavaju da osvijetle neke od ovih nepoznanica pa se sa prilično sigurnosti mogu očekivati i dalja poboljšanja samog materijala.

4. POREĐENJE PRESJEKA ARMIRANIH ČELIČNIM I ODGOVARAJUĆIM FRP ARMATURAMA

Za razliku od projektovanja čeličnim armaturama trenutno nigde u svijetu ne postoje standardi za projektovanje objekata FRP armaturama. Nekoliko različitih istraživanja je usmjereno u tom pravcu (Kanada⁹, Sheffield¹⁰, Japan¹¹) pa se sa sigurnošću može reći da će veoma brzo i projektovanje FRP armaturama biti pokriveno obavezujućim standardima.

U međuvremenu dimenzionisanja presjeka armiranih sa FRP armaturama se vrše uz pažljivo razmatranje nekoliko kritičnih, predhodno pomenutih osobina ovog materijala. Pri tome kod dimenzionisanja po teoriji loma koeficijent sigurnosti materijala može se uzeti kao $\gamma_m = 1,3$ ¹².

U nedostatku propisa za upotrebu kompozitnih armatura postojeći propisi za metalne armature se obično pokušavaju interpretirati za slučaj armiranja sa FRP materijalima. Pri tome postoji nekoliko osnovnih pristupa dimenzionisanju i svi se svode na upoređivanje presjeka armiranih uobičajenim čeličnim armaturama, a prema važećim standardima, i presjeka armiranih sa plastičnim FRP šipkama. Nekoliko najčešće upotrebljivanih načina će ovdje biti i navedeno.

U svim posmatranim slučajevima računanja su vršena za pravougaoni presjek dimenzija 25 x 15 cm i raspon grede od 2,3 m. Opterećenje je bilo zadato po sistemu proste grede opterećene sa dvije identične sile u trećinama raspona. Čvrstoća betonske kocke na pritisak je zadata kao 40 MPa dok mu je diletacija na granici tečenja uzeta kao 0.0035. U svim slučajevima čvrstoća betona na zatezanje je bila zanemarena. Čelična armatura je imala granicu tečenja od 460 MPa i modul elastičnosti od 200 GPa. FRP armatura je imala modul elastičnosti od 45 GPa i čvrstoću na zatezanje od 1000 MPa. Vrijednosti u tabelama su sračunate koristeći dijagram napona u betonu parabola/prava, a koji je dat Britanskim propisima BS 8110¹³, i linearnu vezu diletacija u betonu i armaturi, pri tome ne unoseći u račun faktore sigurnosti. U cilu upoređenja rezultata, vrijednosti sila loma su za sve slučajeve sračunate samo od momenata savijanja, bez obzira što će u nekim od posmatranih situacija do stvarnog loma doći zbog prekoračenja napona prijanjanja betona uz armaturu ili eventualno zbog sila smicanja kod oslonaca.

Jasno je iz navedenog na predhodnim stranicama da će uslovi graničnog stanja upotrebljivosti u velikoj mjeri biti rukovođeni mnogo manjim modulom elastičnosti ovih armatura u odnosu na čelične tako da se za iste sile mogu očekivati znatno veće deformacije, a prema tome i ispucalost. Ovo znači

da se može očekivati da, na primjer, uslov maksimalnih dozvoljenih ugiba bude faktor koji će odrediti karakteristike poprečnog presjeka računatog po teoriji loma.

Da bi se to izbjeglo presjek armiran sa FRP armaturom se može upoređivati sa presjekom identičnog gabarita a kome je količina armature određena preko takozvane *metode istih krutosti*. Ovom metodom se, kako joj i ime kaže, teži izjednačavanju krutosti čelične i FRP armature. Ovaj pristup vodi gotovo uvijek u presjeke koji su prearmirani a samim tim rezultiraju u krutom lomu po betonu. Pri tome će uslovi graničnog stanja upotrebljivosti biti skoro u svim slučajevima automatski zadovoljeni. Nekoliko tipičnih slučajeva upoređenja čeličnih i FRP armatura je prezentirano u Tabeli 1.

Tabela 1 - Metoda istih krutosti

	Vrsta armature	Armatura	Površina armature	Ukupna krutost armature	Procenat armiranja	Armiranost presjeka	Položaj neutralne linije	Nosivost grede na savijanje	Modalitet loma
			(mm ²)	(KN)	(%)		(mm)	(KN)	
1	Čelik	2 φ 8	100,5	20.100	0.3	Lako armiran	57,4	26,1	Armatura
	FRP	2 φ 17	454	20.430	1.4	Prearmiran	57,1	101,0	Beton
2	Čelik	2 φ 12	226,2	45.240	0.7	Lako armiran	79,5	56,2	Armatura
	FRP	4 φ 18	1018	45.800	3.1	Prearmiran	79,2	132,9	Beton
3	Čelik	2 φ 16	402,1	80.420	1.2	Lako armiran	98,0	94,2	Armatura
	FRP	8 φ 17	1816	81.710	5.6	Prearmiran	98,4	157,9	Beton
4	Čelik	6 φ 16	1206	241.300	3.7	Prearmiran	138,3	200,7	Beton
	FRP	10 φ 26	5309	238.900	16.6	Prearmiran	135,6	192,1	Beton

Iz tabele se vidi da pri ovoj metodi ne dolazi do značajnije promjene položaja neutralne ose presjeka a da se povećanje nosivosti na savijanje postiže uz promjenu modaliteta loma.

Drugi uobičajeni pristup pri upoređivanju presjeka armiranih čelikom i FRP materijalom se bazira na određivanju količine FRP armature koja ima istu graničnu nosivost na zatezanje kao čelična armatura u presjeku koji se posmatra¹⁴ - *metoda istih nosivosti*. Značajno je napomenuti da će pri ovom prilazu u većini slučajeva doći do prekoračenja graničnih uslova upotrebljivosti zadatih za presjeke armirane čeličnom armaturom, jer je krutost smanjena primjenom armature sa smanjenom krutošću a i zbog manje količine armature kao posledice veće čvrstoće na zatezanje FRP šipki. Ovdje je potrebno podsjetiti da pri dimenzionisanju presjeka uz korišćenje FRP armatura izvesno je da nema potrebe razmatrati širinu pukotina sa stanovišta zaštite armature od korozije već samo sa pozicije estetskog izgleda. Pri tome treba znati da vidljive pukotine na objektu, ma koliko one mogle biti nebitne sa stanovišta sigurnosti konstrukcije, mogu izazvati osjećaj nesigurnosti kod osoba koje taj objekat koriste. Zbog toga¹⁵ daje njihovu maksimalnu vrijednost 0,3 - 0,5 mm za objekte opšte namjene. Pri provjeri graničnih uslova upotrebljivosti - uslov ugiba, moguće je u principu koristiti iste one vrijednosti koje su date propisima za armarinje čeličnim šipkama ili mrežnom armaturom¹⁶. Nekoliko tipičnih slučajeva dobijenih metodom istih nosivosti između čeličnih i FRP armatura je prezentirano u Tabeli 2.

Tabela 2 - Metoda istih nosivosti

	Vrsta armature	Armatura	Površina armature	Ukupna nosivost armature	Procenat armiranja	Armiranost presjeka	Položaj neutralne linije	Nosivost grede na savijanje	Modalitet loma
			(mm ²)	(KN)	(%)		(mm)	(KN)	
1	Čelik	2 φ 12	226,2	104,1	0,7	Lako armiran	79,5	56,2	Armatura
	FRP	2 φ 8	100,5	100,5	0,3	Lako armiran	29,4	55,0	Armatura
2	Čelik	2 φ 14	307,9	141,6	0,9	Lako armiran	89,2	74,4	Armatura
	FRP	2 φ 9.5	141,8	141,8	0,4	Prearmiran	34,4	65,2	Beton
3	Čelik	2 φ 16	402,1	185,0	1,2	Lako armiran	98,0	94,18	Armatura
	FRP	3 φ 9	190,8	190,8	0,6	Prearmiran	39,4	74,0	Beton
4	Čelik	4 φ 20	1257	578,1	3,9	Prearmiran	138,9	198,7	Beton
	FRP	4 φ 13.5	572,6	572,6	1,7	Prearmiran	63,22	111,4	Beton

Iz tabele se može vidjeti da uprkos znatnom smanjenju procenta armiranja skoro svi presjeci ipak postaju prearmirani. Ovo je direktna posledica značajne razlike u čvrstoćama na zatezanje i odgovarajućim diletacijama kod čeličnih i FRP armatura što dovodi do neminovne promjene u nivou armiranosti pri kome je presjek uravnotežen. U svim slučajevima kada je došlo do promjene modaliteta loma imaćemo i znatnu redukciju u nosivosti na savijanje za zadati sistem opterećenja. Značajno je konstatovati da u svim slučajevima dolazi do znatnog pomjeranja neutralne ose naviše prema ivici presjeka, to jest do slabije iskorišćenosti betona.

Treći princip se sastoji u direktnom izjednačavanju količine FRP armature sa količinom čelične armature u poprečnom presjeku - *metoda istog procenta armiranja*. Ovaj princip vodi ka značajnom pomjeranju položaja neutralne ose ka gornjoj ivici presjeka, to jest smanjenju površine pritisnutog betona. Značajno je zapaziti da iako po ovom metodu ne dolazi do promjene procenta armiranja posmatranog presjeka, u velikoj većini slučajeva presjeci koji su bili lako armirani čeličnim armaturama postaću prearmirani sa FRP šipkama i tako ponovo promijeniti način loma presjeka, iz istih razloga koji su navedeni u predhodnom slučaju. Nekoliko tipičnih slučajeva dobijenih metodom istih procenata armiranja između čeličnih i FRP armatura je prezentirano u Tabeli 3.

Tabela 3 - Metoda istih procenata armiranja

	Vrsta armature	Armatura	Površina armature	Procenat armiranja	Armiranost presjeka	Položaj neutralne linije	Nosivost grede na savijanje	Modalitet loma
			(mm ²)	(%)		(mm)	(KN)	
1	Čelik	2 φ 8	100,5	0,3	Lako armiran	57,4	26,1	Armatura
	FRP	2 φ 8	100,5	0,3	Lako armiran	29,4	55,0	Armatura
2	Čelik	2 φ 12	226,2	0,7	Lako armiran	79,5	56,2	Armatura
	FRP	2 φ 12	226,2	0,7	Prearmiran	42,5	84,2	Beton
3	Čelik	2 φ 14	307,9	0,9	Lako armiran	89,2	74,4	Armatura
	FRP	2 φ 14	307,9	0,9	Prearmiran	48,6	94,5	Beton
4	Čelik	4 φ 20	1257	3,9	Prearmiran	138,9	198,7	Beton
	FRP	4 φ 20	1257	3,9	Prearmiran	85,8	150,8	Beton

Iz predhodne tabele se može zaključiti da u svim slučajevima ponovo imamo izraženu neiskorišćenost betona ispoljenu kroz pomjeranje neutralne ose naviše. Kod veoma lako armiranih presjeka dolazi do povećanja nosivosti dok se kod jače armiranih i prearmiranih presjeka nosivost smanjuje

Iz gore rečenog se lako može zaključiti da će svi navedeni metodi u gotovo svim situacijama proizvesti **lom po betonu**.

Ako se želi postići lom po armaturi a pri tome ne prekoračiti granice date uslovima upotrebljivosti mora se razmišljati o promjenama dimenzija presjeka u odnosu na one koje su dobijene za presjek armiran čelikom. Ovo je opet posledica različitog odnosa dilatacija na granici tečenja i modula elastičnosti čelika i FRP - koji prouzrokuje potpuno drugačiji položaj neutralne ose u AB presjeku. Takođe može se ići na poboljšanje čvrstoće betona (na primjer spoljnim sprežanjem u cilju postizanje triaksialnog stanja napona koje je takođe dobrodošlo zbog povećanja duktilnosti betona). Najefikasnija iskorišćenost betona, a samim tim i FRP armature, će se, kao i kod čeličnih armatura, postići upotrebom "T" presjeka to jest maksimalnim udaljavanjem FRP armature od gornje ivice presjeka. Jedina razlika je, da sada, ako se želi izbeći lom po betonu, ove udaljenosti moraju biti znatno veće nego u slučaju odgovarajućih čeličnih armatura.

Međutim, čak iako se izbjegne lom po betonu, zbog nepostojanja duktilnosti u samoj armaturi opet ćemo imati **krti lom**. U principu, duktilitet presjeka armiranih čelikom sam po sebi predstavlja dodatnu dozu sigurnosti i omogućava, u ekstremnim slučajevima, lako opažanje mogućih problema, a na račun stanja ugiba znatno većih od onih koje odgovaraju nivou tečenja armature. Samo u rijetkim slučajevima kada nema razlike između nosivosti armature na granici tečenja i granici kidanja, neće postojati određeno vrijeme za evakuaciju objekta. Takođe, pri pojavi tečenja armature na određenom mjestu u konstrukciju obično će doći do preraspodjele momenata savijanja, to jest do smanjenja momenta koji je doveo do tečenja. Toga svega u slučaju FRP plastičnih armatura neće biti. Kako je, sa stanovišta projektanta, prisustvo duktiliteta i ovog stepena dodatne sigurnosti u presjeku veoma važno i gotovo neophodno, trenutno se vrše mnoga istraživanja kojima se pokušava proizvesti "vještačka duktilnost" u presjeku armiranom FRP armaturama. Tri pristupa problemu će biti pomenuta i ovdje.

Prvi pristup se oslanja na upotrebu kombinacije FRP armatura koje imaju različite module elastičnosti čime bi se moglo doći do situacije "progresivnog loma" što bi predstavljalo jednu vrstu duktiliteta. Ovo se postiže na dva načina i to upotrebom dvije ili više vrsti FRP armaturnih šipki ili, što su veoma nedavni pokušaji, kombinacijom dva ili više FRP materijala u samoj šipki. Iz načina proizvodnje armature (slika 1) očito je da sa stanovišta proizvodnje ovo ne predstavlja veliki problem ali postoje određeni dodatni problemi u smislu odnosa između prijanjanja betona i slabljenja određenog dijela presjeka šipke.

Drugi pristup razmatra mogućnost upotrebe progresivnog slabljenja veze prijanjanja betona i armature i njenog korišćenja u svrhu "progresivnog loma".

Treći princip polazi od činjenice o povećanju duktilnosti samog betona uvođenjem trodimenzionalnog stanja napona. Ovo se obično postiže postavljanjem dodatnih spoljnjih uzengija - takozvanim sprežanjem presjeka. Značajno je napomenuti da se ovo sprežanje betona može postići i FRP armaturama.

Može se reći da u razmatranju problema duktiliteta postoji i jedan čisto pragmatičan pristup kojim se dogovorno utvrđuje nivo dilatacije u FRP šipkama koji će se smatrati početkom duktilnog odgovora konstrukcije¹⁷. Taj nivo bi u praksi odgovarao tački tečenja čelične armature. Ovim principom duktilitet bi se mogao sračunati kao odnos površina ispod dijagrama momenta i krivine prije i posle "tačke duktiliteta".

Pri računanju nosivosti presjeka na smicanje pristup određivanju potrebne količine poprečne armature je isti kao i kod armiranja čeličnim armaturama. Za razliku od dijela smičuće nosivosti presjeka koji je posledica čvrstoće na istezanje armature i kao takav nezavisan od vrste materijala, udio od smičuće nosivosti samog betona je najbolje korigovati za odnos modula elastičnosti čelika i podužne FRP armature¹⁸.

ZAKLJUČAK

U radu su iznijeta osnovna zajednička svojstva i karakteristike FRP plastičnih materijala, dat je prikaz načina proizvodnje armatura i preko osnovnih mehaničkih karakteristika kvantifikovane su tri glavne vrste: karbonatne, staklene i aramidne FRP armature. Dat je način procjene modula elastičnosti i čvrstoće na zatezanje armaturnih šipki ako su date količine i karakteristike sastavnih komponenti. Glavne pozitivne karakteristike plastičnih FRP materijala kao što su visoka čvrstoća na zatezanje, otpornost na koroziju i elektromagnetna neutralnost upućuju na zaključak da ovi materijali mogu naći široku primjenu u građevinarstvu. Sa druge strane nizak moduo elastičnosti, neposjedovanje duktiliteta i nedovoljna ispitnost cijelog niza drugih parametara upućuju na oprez pri njihovoj primjeni.

U situaciji nepostojanja propisa koji bi regulisali njihovu upotrebu prikazana su tri postupka kojima se vrši prevođenje presjeka armiranih čeličnim na presjeke armirane plastičnim FRP armaturama a u cilju njihovog upoređenja. Na primjerima grede pravougaonog presjeka je prikazano kako prelaskom sa jedne na drugu vrstu armature dolazi do promjene u modalitetima loma, položaju neutralne linije presjeka i sila loma za sva tri slučaja.

Metoda istih krutosti vodi povećanju količine armature kod presjeka armiranih FRP armaturama pri čemu će lako armirane grede znatno povećati nosivost uz promjenu modaliteta loma. Pri upotrebi metode istih površina armature gotovo uvijek do prelaska presjeka na lom po betonu. Ta promjena modaliteta loma u većini slučajeva vodi do znatnog smanjenja nosivosti presjeka i pomjeranja neutralne ose naviše. Metoda istih nosivosti armature dovodi do znatnog smanjenja u količini armature za presjek armiran sa FRP materijalom ali i pored toga ti presjeci postaju prearmirani zbog osobina samog materijala. I pri ovoj metodi imamo znatno smanjenje nosivosti na savijanje prouzrokovano promjenom načina loma. Može se reći da je ta promjena modaliteta loma glavna karakteristika sve tri metode i da se ona u principu može izbjeći samo promjenom gabarita presjeka.

LITERATURA:

- ¹ Kikizawa, T. itd.: "Magnetic Characteristics of the 3-D FRP Reinforcement used for Non-Magnetic Chambers" iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 124 - 131.
- ² Erki, M.A. i Rizkalla, S.H.: "FRP Reinforcement for Concrete Structures", Concrete International; Design and Construction, tom 15, dio 6 strana 48 - 53.
- ³ Dolan, C.: "FRP Development in the United States", članak u "FRP Reinforcement for Concrete Structures", editor A.Nanni, Elsevier, Amsterdam, 1993. strana 129 - 164
- ⁴ Taerwe, L.R.: "FRP Developments and Applications in Europe", ", članak u "FRP Reinforcement for Concrete Structures", editor A.Nanni, Elsevier, Amsterdam, 1993. strana 99 - 115.
- ⁵ N. Duranović itd.: "Experimental Program - Structural Testing on RC - Beams, Tests for beams 17 to 20 - Phase II", Univerzitet u Šefildu, CCC, Interni Izvještaj, oktobar 1995.
- ⁶ Malvar, L.J.: "Tensile and bond properties of GFRP Reinforcing Bars", ACI Materials Journal, Maj-Jun 1995, strana 276 - 285.
- ⁷ Malvar, L.J.: "Bond Stress-Slip Characteristics of FRP Rebars", ACI Convention, San Francisko, 1994, strana 17 - 20.
- ⁸ Machida, A. itd.: "Initiatives in Developing the specifications for Design and Construction of Concrete Structures using FRP in Japan", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 627 - 634.
- ⁹ Erki, M.A. i Rizkalla, S.H.: "A Canadian Perspective on R&D, Design/Codes and Technical Committees", članak u "FRP Reinforcement for Concrete Structures", editor A.Nanni, Elsevier, Amsterdam, 1993. strana 89 - 97

¹⁰ Centre for Cement and Concrete: "Project Eurocrete", Građevinski Fakultet, Univerzitet u Šefieldu, 1994.

¹¹ Machida, A. itd.: "Initiatives in Developing the specifications for Design and Construction of Concrete Structures using FRP in Japan", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 627 - 634.

¹² Machida, A. itd.: "Initiatives in Developing the specifications for Design and Construction of Concrete Structures using FRP in Japan", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 627 - 634.

¹³ Britanski propisi za beton "Structural Use of Concrete - BS8110", 1985.

¹⁴ Heffernan, P.J. i Erki, P.J.: "Equivalent Capacity - A Design Concept for FRP Strengthened RC Beams", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 517 - 524.

¹⁵ Machida, A. itd.: "Initiatives in Developing the specifications for Design and Construction of Concrete Structures using FRP in Japan", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 627 - 634.

¹⁶ Sonobe, Y. itd.: "Guideline for Structural Design of FRP Concrete Building Structures in Japan", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 636 - 645.

¹⁷ Mast, R.F.: "Unified Design Provisions for Reinforced and Prestressed Flexural Members", ACI Structural Journal, American Concrete Institute, Vol. 89, broj 2 Mart/April 1992, strana 185.

¹⁸ Clarke J.L. i Regan D.P.: "Design of Concrete Structures Reinforced with Fibre Composite Rods", iz "Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", L. Taerwe, E & FN Spon, 1995, strana 646 - 654.