

primljen: 09.03.2024.
korigovan: 03.04.2024.
prihvaćen: 08.04.2024.

Izvorni naučni rad

UDK : 691.32
<https://doi.org/10.62683/NiP27.27-34>

UTICAJ ČELIČNIH VLAKANA NA MEHANIČKA SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

Aleksandar Šutanovac¹, Denis Milenović², Predrag Blagojević³, Darko Živković⁴

Rezime: U radu su prikazani rezultati sopstvenih laboratorijskih ispitivanja na samozbijajućem betonu (SCC – self-compacting concrete) i mikroarmiranom samozbijajućem betonu (SFR-SCC – steel fiber reinforced self-compacting concrete) u očvrslom stanju. Upotrebljena su čelična vlakna sa kukicama na krajevima. Ispitan je doprinos zapreminskog sadržaja vlakana V_f i faktora oblika vlakana l/d na određena mehanička svojstva samozbijajućeg betona. Zapreminski sadržaj vlakana V_f u uzorcima je variran u sledećim vrednostima: 0,5%, 1,0%, 1,5% i 2,0%. Korišćena su čelična vlakna dužine 35 i 60mm pri čemu je faktor oblika vlakana iznosio 47 i 80. Ispitana su sledeća svojstva na očvrslom betonu: čvrstoća betona pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem i čvrstoća pri savijanju. Rezultati pokazuju da se sa povećanjem zapreminskog sadržaja vlakana V_f od 0,5% do 2,0% čvrstoća betona na zatezanje pri cepanju kao i čvrstoća pri savijanju takođe povećale u odnosu na kontrolne uzorke bez vlakana. Rezultati pokazuju da sa povećanjem faktor oblika vlakana l/d i za vrednosti V_f iznad 1,0% dolazi do pada čvrstoće betona pri pritisku.

Ključne reči: samozbijajući beton, čelična vlakna sa kukicama, mehanička svojstva, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, čvrstoća pri savijanju

THE INFLUENCE OF STEEL FIBERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Abstract: The paper presents the results of own laboratory tests on self-compacting concrete (SCC) and steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC) in the hardened state. Hooked end steel fibers were used. This study investigates contribution of fiber volume fraction V_f and fiber aspect ratio l/d on certain mechanical properties of self-compacting concrete. The fiber volume fraction V_f in specimens was varied in the following values: 0,5%, 1,0% 1,5% and 2,0%. Steel fibers with a length of 35 and 60mm were used, with the aspect ratios of fibers being 47 and 80. The following properties were tested on the hardened concrete: compressive strength of concrete, splitting tensile strength and flexural strength. The results show that with an increase in fiber volume fraction V_f from 0,5% to 2,0%, the splitting tensile strength of concrete as well as the flexural strength also increased to control specimens without fibers. The results show that with an increase in aspect ratio of fibers l/d and for values of V_f above 1,0% there is decrease in the compressive strength of concrete.

Key words: Self-compacting concrete, Hooked steel fibers, Mechanical properties, Compressive strength, Split tensile strength, Flexural strength

¹ dipl. inž. građ., doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, aleksandar.sutanovac@gaf.ni.ac.rs
ORCID 0009-0001-7435-5838

² master inž. građ., branch menadžer, Put inženjering doo Nova Pazova, milenovicd@putinzenjering.com
ORCID N/A

³ dr docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, predrag.blagojevic@gaf.ni.ac.rs
ORCID 0000-0001-7802-1758

⁴ dr, asistent sa doktoratom, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, darko.zivkovic@gaf.ni.ac.rs
ORCID 0009-0002-0780-0783

1 UVOD

Samozbijajući (samougrađujući) beton (eng. Self-Compacting Concrete - SCC) je specijalna vrsta betona koji se ugrađuje sam u oplatu i ne zahteva vibriranje da bi postigao punu zbijenost. Beton u potpunosti ispunjava sve delove oplata pod dejstvom sopstvene težine, kao i prostor između svih šipki armature i oplata. Betonska mešavina ima visok stepen fluidnosti i otpornost prema segregaciji. Okamura [1] je 1986. godine predstavio koncept samozbijajućeg betona i ukazao na neophodnost primene ovog betona kao rešenje za problem zbijanja betona prilikom ugradnje i trajnosti betonskih konstrukcija u Japanu. Istraživači sa Univerziteta u Tokiju (Ozawa, Maekawa, Okamura) sproveli su studije u cilju razvoja ove vrste betona [2] i 1988. godine je predstavljen prototip samozbijajućeg betona koji je nazvan beton visokih performansi (High Performance Concrete - HPC). Profesori Gagne i Aitcin [3] su skoro u isto vreme 1989. godine definisali „beton visokih performansi (High Performance Concrete)“ kao beton visoke trajnosti usled niskog vodocementnog faktora. Okamura je nakon toga promenio naziv za predstavljeni beton u „samozbijajući beton visokih prerformansi (Self-Compacting High Performance Concrete)“.

Glavni nedostaci SCC u čvrstom stanju kao i konvencionalnog betona su mala čvrstoća pri zatezanju i krti način loma. Dodavanjem vlakana moguće je izbeći krti način loma i unaprediti mehaničke karakteristike betona u postpukotinskom stanju. Vlakna mehanizmom premoščavanja ivica prslina (Bridging Effect) povećavaju čvrstoću betona pri zatezanju i smicanju [4,5]. U samozbijajućem betonu ojačanom čeličnim vlaknima (SFR-SCC – Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete) dolazi do sinergijskog efekta između čeličnih vlakana i SCC betona što dovodi do poboljšanja duktilnosti pri savijanju, veće zamorne čvrstoće i otpornosti na udarno opterećenje [6,7]. Uticaj čeličnih vlakana na svojstva SCC zavisi od: oblika vlakna, dimenzija vlakana, zapremiskog sadržaja vlakana V_f i rasporeda vlakana u betonu [8]. Čelična vlakna koja se najčešće upotrebljavaju su: ravna vlakna, vlakna sa kukicama na krajevima, valovita vlakna, vlakna sa zadebljalim krajevima i vlakna promenljivog poprečnog preseka. Na osnovu analize najvećih proizvođača, vlakna sa kukicama na krajevima čine skoro 67% od svih prodatih vlakana [9]. Vlakna sa kukicama na krajevima ili vlakna nepravilnog oblika u odnosu na

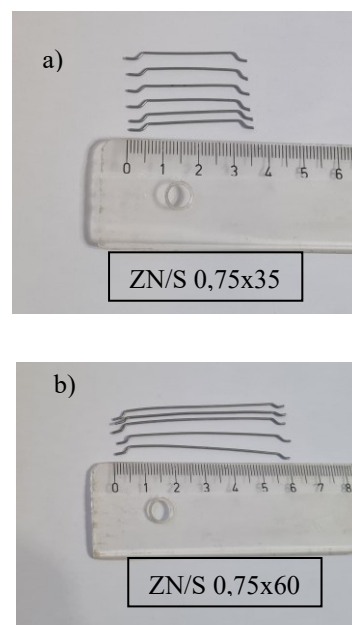
prava vlakna povoljnije utiču na čvrstoću betona pri zatezanju zbog boljeg ankerovanja tih vlakana u beton [10,11].

Obrađivost SCC u svežem stanju se smanjuje kada zapreminski sadržaj vlakana bude veći od 0,5% [12]. Ding je ispitivao uticaj četiri tipa vlakna, različite dužine vlakana l_f (32,3, 38,8, 50,7 i 52,2mm) i zapreminskog sadržaja vlakana V_f (0,5, 1,0 i 1,5%) na svojstva SCC i došao do rezultata da dužina vlakna ima veći uticaj na obrađivost betona od zapreminskog sadržaja vlakna [13].

Rezultati eksperimentalnih istraživanja o uticaju čeličnih vlakana na čvrstoću betona pri pritisku su kontradiktorni. Pojedina istraživanja [14,15,16,17] su pokazala da je došlo do smanjenja čvrstoće pri pritisku, dok je kod drugih došlo do povećanja [18,19]. Khaloo [14] je istraživao uticaj čeličnih vlakana sa kukicama na krajevima na mehanička svojstva SCC za projektovane klase čvrstoće betona od 40 MPa i 60 MPa pri čemu je varirao V_f u sledećim granicama od 0,5% do 2,0%. Rezultati pokazuju da je sa povećanjem V_f došlo do pada čvrstoće pri pritisku u odnosu na kontrolne uzorke. Povećanje V_f dovodi do smanjenja obrađivosti betona što utiče na smanjenje čvrstoće pri pritisku. Zeyad [20] je nagovestio da dužina i oblik vlakana sa kukicama na krajevima negativno utiče na čvrstoću betona pri pritisku jer oblik vlakana smanjuje obrađivost SCC prilikom ugradnje. Zeyad je u svojim istraživanjima utvrdio da su vlakna sa kukicama na krajevima povećala čvrstoću betona pri zatezanju cepanjem i čvrstoću pri savijanju za 140% i 130% u odnosu na kontrolne uzorke bez vlakana. Gencil [15] je ispitivao uticaj čeličnih vlakana sa kukicama na krajevima dužine 30mm na mehanička svojstva SCC. Napravio je kontrolnu mešavinu sa oznakom 1 bez vlakna i četiri mešavine sa vlaknima koje su nosile oznake 2, 3, 4 i 5 i sadržale 15, 30, 45 i 60 kg/m³. Čvrstoća pri zatezanju se povećala za 18,6%, 23,3%, 14% i 21% u odnosu na uzorak bez vlakana. Čvrstoća pri savijanju se povećala za 13,1%, 24,2%, 40,6% i 51,7% u odnosu na kontrolni uzorak. Aslani [18] je takođe utvrdio da su čelična vlakna sa kukicama na krajevima dovela do povećanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem u odnosu na SCC uzorak bez vlakna.

Glavni cilj ovog istraživanja je da ispita uticaj čeličnih vlakana sa kukicama na krajevima na pojedina mehanička svojstva očvrstlog SFR-SCC u odnosu na SCC. Parametri koji su varirani u betonskim mešavinama su: zapreminski sadržaj vlakana V_f (0,5%, 1,0%, 1,5% i 2,0%) i faktor oblika vlakana l/d (47 i 80). U prethodno razmatranim istraživanjima autori su najčešće koristili čelična

vlakna proizvođača „Bekaert“ pod nazivom „Dramix“, dužine 30mm i faktora oblika l/d koji se kretao u granicama od 40 do 60. U ovom istraživanju izabrana su čelična vlakna sa kukicama na krajevima dužine 35mm ($l/d=47$) i 60mm ($l/d=80$), domaćeg proizvođača „Spajić“ iz Negotina, jer ova vrsta vlakana nije dovoljno istražena. Zapreminski sadržaj vlakana V_f u uzorcima je variran do 2,0%, dok je u većini ranije navedenih istraživanja V_f variran u granicama do 1,0%. Doprinos ovog istraživanja je i u rasvetljavanju uticaja čeličnih vlakana sa kukicama na krajevima na čvrstoću betona pri pritisku pri različitim starostima uzoraka jer su rezultati dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja kontradiktorni. U odnosu na prethodno komentarisana istraživanja date su linearne jednačine za predviđanje čvrstoće SFR-SCC pri zatezanju cepanjem i čvrstoće pri savijanju u zavisnosti od zapreminskog sadržaja vlakana V_f .



Slika 1 – Čelična vlakna sa kukicama na krajevima ZN/S 0,75x35 (a) i ZN/S 0,75x60 (b)

2 EKSPERIMENTALNI PROGRAM

2.1 MATERIJALI KORIŠĆENI U EKSPERIMENTU

Za spravljenje betonske mešavine korišćen je cement CEM II/A-M(S-L) 42,5R „Lafarge“ Beočin. Prema preporukama za spravljenje mikroarmiranog betona korišćeno je zrno agregata maksimalne veličine 16 mm [21,22,23]. Usvojen je trofrakcijski agregat sa maksimalnom veličinom zrna od 16 mm. Upotrebljen je pesak 0/4 mm i dve frakcije agregata 4/8 mm i 8/16 mm. Upotrebljen je superplastifikator Cementol Hiperplast 481. Za spravljenje mikroamiranih betonskih mešavina korišćena su čelična vlakna sa kukicama na krajevima dužine 35 mm i 60 mm. Proizvođač čeličnih vlakana je firma „Spajić“ iz Negotina. Prvi tip vlakana ZS/N 0,75x60 ima dužinu l_f od 60 mm, kružni poprečni presek, prečnika 0,75 mm i faktor oblika (l/d) 80. Drugi tip vlakana ZS/N 0,75x35 ima dužinu 35 mm, prečnik kružnog poprečnog preseka takođe 0,75 mm i faktor oblika (l/d) 47. Na slici 1(a) su prikazana čelična vlakna dužine 35mm a na slici 1(b) čelična vlakna dužine 60mm. Svojstva čeličnih vlakana su data u tabeli 1.

Tabela 1- Svojstva čeličnih vlakana

Karakteristike	Tip I ZS/N 0,75x60	Tip II ZS/N 0,75x35
Dužina l_f (mm)	60	35
Prečnik d_f (mm)	0,75	0,75
Faktor oblika (l_f/d_f)	80	47
Površina poprečnog preseka A_f (mm ²)	0,44	0,44
Čvrstoća pri zatezanju (MPa)	1100-1400	1100-1400
Oblik poprečnog preseka	Kružni	Kružni

2.2 BETONSKE MEŠAVINE

Napravljena je jedna (etalon) mešavina samozbijajućeg betona bez vlakna označena sa SCC i osam betonskih mešavina sa dodatkom vlakana koje su označene sa SFR-SCC. Sve mešavine imaju istu proporciju cementa, agregata, filera, vode i superplastifikatora. Vodocementni faktor za sve mešavine iznosi 0,45. Variran je zapreminski sadržaj vlakana V_f u iznosima od 0,5%, 1,0%, 1,5% i 2,0% i faktor oblika vlakana l/d u iznosima 47 i 80 (odnosno dužina vlakana 35mm i 60mm). Četri mešavine su napravljene sa vlaknima dužine 35mm, oznaka SFR-SCC35, pri čemu je variran V_f od 0,5% do 2,0%. Mešavina SFR-SCC35-0,5 ima udeo vlakana u zapremini od 0,5%, SFR-SCC35-1,0 ima $V_f=1,0%$,

SFR-SCC35-1,5 ima $V_f=1,5\%$ i SFR-SCC35-2,0 ima $V_f=2,0\%$. Preostale četiri mešavine su napravljene sa vlaknima dužine 60mm i imaju oznaku SFR-SCC60. Po istom principu V_f je variran i u ovim mešavinama u iznosima od 0,5% do 2,0%. U tabeli 2 su dati sastavi betonskih mešavina bez i sa čeličnim vlaknima sa kukicama na krajevima.

Spravljanje betonskih mešavina sa vlaknima je odrađeno u tri koraka kako bi se sprečilo stvaranje efekta grudvanja vlakana. U prvom koraku polovina

od ukupne količine vlakana je pomešana zajedno sa cementom, peskom, filerom i agregatom u mešalici u trajanju od 2 minuta. U drugom koraku je dodata voda zajedno sa superplastifikatorom i mešanje je nastavljeno još jedan minut. U trećem koraku je dodata preostala količina vlakana i mešanje je nastavljeno još 2 minuta. Za svaku betonsku mešavinu uzorci su čuvani 24h u kalupima, da bi potom bili izvađeni iz kalupa i negovani u vodi do dana ispitivanja.

Tabela 2- Sastav betonskih mešavina bez i sa čeličnim vlaknima sa kukicama za 1m³

Oznaka betona	Cement kg/m ³	Pesak 0/4mm kg/m ³	Agregat 4/8mm kg/m ³	Agregat 8/16mm kg/m ³	Filer kg/m ³	Voda kg/m ³	Superplastifikator kg/m ³	Vlakna ZS/N 0,75x35 kg/m ³	Vlakna ZS/N 0,75x60 kg/m ³
SCC	420	820	326	493	100	189	2,2	0	0
SFR-SCC35-0,5	420	820	326	493	100	189	2,2	40	0
SFR-SCC35-1,0	420	820	326	493	100	189	2,2	80	0
SFR-SCC35-1,5	420	820	326	493	100	189	2,2	120	0
SFR-SCC35-2,0	420	820	326	493	100	189	2,2	160	0
SFR-SCC60-0,5	420	820	326	493	100	189	2,2	0	40
SFR-SCC60-1,0	420	820	326	493	100	189	2,2	0	80
SFR-SCC60-1,5	420	820	326	493	100	189	2,2	0	120
SFR-SCC60-2,0	420	820	326	493	100	189	2,2	0	160

2.3 MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

2.3.1 Čvrstoća pri pritisku

Za svaku mešavinu napravljeno je po 9 kocki dimenzija 150 x 150 x 150 mm kako bi se ispitala čvrstoća pri pritisku posle 7, 28 i 90 dana u svemu prema odredbama standarda SRPS EN 12390-3 [24]. Sračunate su srednje vrednosti čvrstoća za po tri uzorka pri različitim starostima betona i predstavljene kao čvrstoća pri pritisku. Ispitivanje je vršeno na hidrauličkoj presi Controls Automax5, slika 2.



Slika 2 – Ispitivanje čvrstoće pri pritisku

2.3.2 Čvrstoća pri zatezanju cepanjem

Za svaku mešavinu napravljeno je po 3 cilindra prečnika 150 mm i visine 300 mm kako bi se ispitala čvrstoća pri zatezanju cepanjem posle 28 dana (u literaturi poznata i kao „Brazilski opit“) u svemu prema odredbama standarda SRPS EN 12390-6 [25]. Sračunate su srednje vrednosti čvrstoća za po tri uzorka i predstavljene kao čvrstoća pri zatezanju cepanjem. Ispitivanje je vršeno na hidrauličkoj presi HPM-3000, Ljubljana (opseg merenja 3000kN, tačnost 2,5kN). Na slici 3 je prilazan cilindrični uzorak prilikom ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Na mestima kontakta čeličnih ploča prese i betonskog cilindra, postavljeni su odgovarajući podmetači od drveta, koji obezbeđuju ravnomerno prenošenje sile pritiska na izvodnice cilindra.



Slika 3 – Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem

2.3.3 Čvrstoća pri savijanju

Za svaku mešavinu napravljeno je po 3 prizme dimenzija 100 x 100 x 400 mm kako bi se ispitala čvrstoća pri savijanju u četiri tačke posle 28 dana u svemu prema odredbama standarda SRPS EN 12390-5 [26]. Sračunate su srednje vrednosti čvrstoća za po tri uzorka i predstavljene kao čvrstoća pri savijanju. Ispitivanje je vršeno na hidrauličkoj presi WPM VEB Thüringer Industrierwerk Rauenstein (opseg merenja 0-20000N, tačnost 25N). Na slici 4 je prilazan uzorak prilikom ispitivanja čvrstoće pri savijanju.

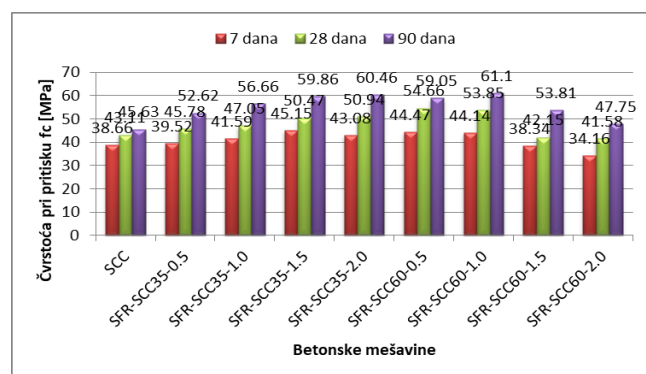


Slika 4 – Ispitivanje čvrstoće pri savijanju

3 REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 ČVRSTOĆA PRI PRITISKU

Uticao dužine vlakana, odnosno faktor oblika vlakna l/d i V_f na promenu čvrstoće pri pritisku pri starosti uzoraka od 7, 28 i 90 dana predstavljen je na slici 5.



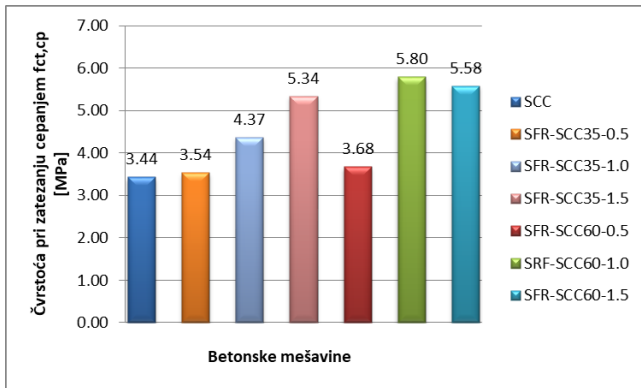
Slika 5 – Uticaj faktora oblika vlakna l/d i V_f na čvrstoću pri pritisku pri starosti betona od 7, 28 i 90 dana

Može se primetiti da za kraća vlakna, dužine 35mm i $l/d=47$ čvrstoća betona pri pritisku raste sa porastom zapremenskog sadržaja vlakana V_f u odnosu na kontrolne uzorke bez vlakana. Tako na primer, pri ispitivanju posle 28 dana, uzorci sa sadržajem vlakana

V_f od 0,5%, 1% , 1,5% i 2% imaju veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na kontrolni uzorak bez vlakana za 6,19%, 9,14% 17,07% i 18,16%, respektivno. Može se primetiti i da što su uzorci bili stariji pri ispitivanju da su čvrstoće bile procentualno veće u odnosu na uzorak bez vlakana. Na primer, pri ispitivanju posle 90 dana, uzorci sa sadržajem vlakana V_f od 0,5% do 2% imali su veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na etalon za 15,32% do 32,5%, respektivno. Betonske mešavine koje su sadržale čelična vlakna dužine 60mm i imale faktor oblika $l/d=80$ ponašale su se drugačije. Primećen je najveći porast čvrstoće pri pritisku na uzorcima kod kojih je sadržaj vlakana V_f iznosio 0,5% i 1% u odnosu na etalon, dok je sa povećanjem sadržaja vlakana V_f na 1,5% i 2% došlo do pada čvrstoće betona. Ova pojava se može objasniti narušavanjem strukture matrice usled pojave grudvanja vlakana. Može se izvesti zaključak da je $V_f=0,5-1,0\%$ optimalan sadržaj vlakana za faktor oblika vlakna $l/d=80$.

3.2 ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU CEPANJEM

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem u zavisnosti od faktora oblika vlakana l/d i zapremenskog sadržaja vlakana V_f pri starosti uzoraka od 28 dana predstavljeni su na slici 6. Kod uzoraka koji su imali zapreminski sadržaj vlakana $V_f=2,0\%$ došlo je do grudvanja vlakana. Cilindri nisu bili pravlinog oblika tako da uzorci sa sadržajem vlakana $V_f=2,0\%$ nisu razmatrani. Može se primetiti da se sa povećanjem sadržaja vlakana V_f u betonu povećava i čvrstoća betona pri zatezanju cepanjem kod uzoraka sa obe vrste vlakana u odnosu na beton bez vlakana. Kod uzoraka koji sadrže kraća vlakna, 35mm dužine i faktor oblika $l/d=47$ primećen je porast čvrstoće pri zatezanju cepanjem od 2,91%, 27,03% i 55,2% pri sadržaju vlakna V_f od 0,5%, 1,0% i 1,5%, respektivno. Kod uzoraka koji sadrže duža vlakna od 60mm i $l/d=80$, porast čvrstoće pri zatezanju je iznosio 6,98%, 68,60% i 62,21% za sadržaj vlakana V_f od 0,5%, 1,0% i 1,5%, respektivno. Primećen je nešto veći porast čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod dužih vlakana, što znači da faktor oblika l/d ima uticaj na čvrstoću betona pri zatezanju cepanjem.



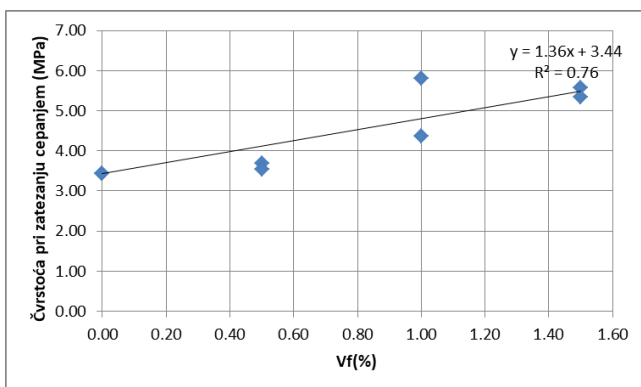
Slika 6 – Uticaj faktora oblika vlakana i Vf na čvrstoću pri zatezanju cepanjem pri starosti betona od 28 dana

Koristeći regresionu analizu čvrstoća pri zatezanju cepanjem je $f_{ct,cp}$ je izražena u funkciji zapreminskog sadržaja vlakana V_f i čvrstoće pri zatezanju cepanjem betona bez vlakana $f_{ct,cp,0}$:

$$f_{ct,cp} = 1,36 \cdot V_f + f_{ct,cp,0} \quad (1)$$

Na slici 7, prikazana je linearna veza između zapreminskog sadržaja vlakana V_f i čvrstoće betona pri zatezanju cepanjem. Koeficijent determinacije (R^2) iznosi 0,76 i pokazuje da postoji snažna korelacija između V_f i čvrstoće pri zatezanju cepanjem.

Dodavanje čeličnih vlakna betonskim mešavinama dovelo je do očuvanja celovitosti uzoraka nakon loma u odnosu na kontrolne uzorke bez vlakana gde je dolazilo do krtoг loma. Čelična vlakna su ostala ankerisana u matricu i posle loma, premošćavajući prslinu duž celog preseka, slika 8.



Slika 7 – Veza između zapreminskog sadržaja vlakana V_f i čvrstoće pri zatezanju cepanjem pri starosti betona od 28 dana



Slika 8 – Uzorak SFR-SCC60-1,5 nakon ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem

3.3 ČVRSTOĆA PRI SAVIJANJU

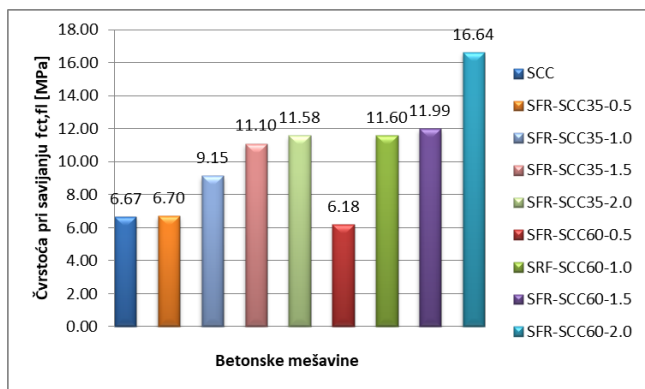
Uticaj dužine vlakna, odnosno faktora oblika vlakana l/d i zapreminskog sadržaja vlakana V_f na promenu čvrstoće pri savijanju pri starosti uzoraka od 28 dana prikazan je na slici 9. Kod uzoraka koji sadrže vlakna 35mm dužine ($l/d=47$) u odnosu na referentni uzorak zabeležen je porast čvrstoće pri savijanju od 0,45%, 37,18%, 66,42% i 73,61% pri sadržaju vlakna V_f 0,5%, 1,0%, 1,5% i 2,0%, respektivno. Kod uzoraka koji sadrže duža vlakna od 60mm ($l/d=80$) za $V_f=0,5\%$ zabeležen je pad čvrstoće pri savijanju od 7,35% u odnosu na uzorak bez vlakana, dok je za sadržaj vlakna V_f 1,0%, 1,5% i 2,0% primećen porast čvrstoće pri savijanju od 73,91%, 79,76% i 149,48%, respektivno. Uzorci sa faktorom oblika 80 imali su nešto veći porast čvrstoće betona pri savijanju u odnosu na uzorke sa faktorom oblika 47.

Primenom regresione analize čvrstoća pri savijanju $f_{ct,fl}$ je data u zavisnosti od zapreminskog sadržaja vlakana V_f i čvrstoće pri savijanju betona bez vlakana $f_{ct,fl,0}$:

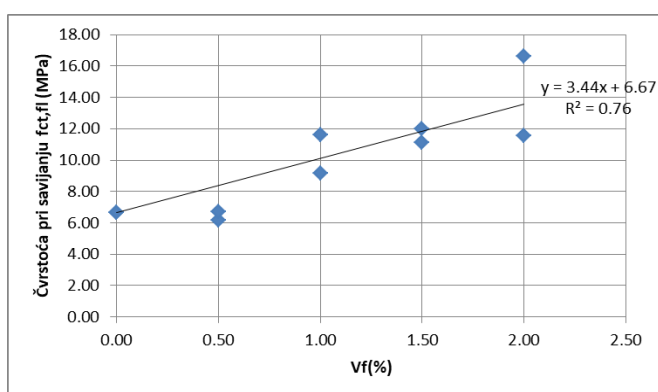
$$f_{ct,fl} = 3,44 \cdot V_f + f_{ct,fl,0} \quad (2)$$

Rezultati regresione analize su prikazani na slici 10. Koeficijent determinacije (R^2) iznosi 0,76 i pokazuje da postoji snažna korelacija između V_f i čvrstoće pri savijanju.

Kod uzoraka sa čeličnim vlaknima nakon dostizanja granične sile loma nije dolazilo do trenutnog loma prizme kao što je to bio slučaj kod uzoraka koji su bili bez čeličnih vlakana, slika 11.



Slika 9 – Uticaj dužine vlakana i Vf na čvrstoću pri savijanju pri starosti betona od 28 dana



Slika 10 – Veza između zapreminskog sadržaja vlakana Vf i čvrstoće pri savijanju pri starosti betona od 28 dana



Slika 11 – Uzorak SFR-SCC35-1,0 nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju

4 ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog istraživanja je da se ispita uticaj čeličnih vlakana sa kukicama na krajevima na čvrstoću betona pri pritisku, čvrstoću pri zatezanju cepanjem i čvrstoću pri savijanju. Napravljena je jedna kontrolna mešavina SCC betona bez vlakana i 8 mešavina ojačanih čeličnim vlaknima pri čemu su

varirani zapreminski sadržaj vlakana i faktor oblika vlakana. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Faktor oblika vlakana l/d utiče na čvrstoću betona pri pritisku. Kod mešavina sa faktorom oblika vlakana $l/d=47$ zabeležen je porast čvrstoće betona pri pritisku sa porastom zapreminskog sadržaja vlakana V_f u odnosu na kontrolni uzorak. Kod mešavina sa faktorom oblika 80 zabeležen je najveći porast čvrstoće betona pri pritisku za zapreminski sadržaj vlakana 0,5% i 1,0% u odnosu na kontrolni uzorak bez vlakana, dok sa porastom V_f dolazi do pada čvrstoće zbog narušavanja strukture matrice usled grudvanja vlakana. Što su stariji uzorci bili pri ispitivanju, čvrstoća pri pritisku je procentualno bila veća u odnosu na uzorke bez vlakana.
- Čvrstoća betona pri zatezanju cepanjem se povećala sa porastom zapreminskog sadržaja vlakana V_f . Najveći porast čvrstoće od 68,6% za SFR-SCC je zabeležen za $V_f=1,0\%$ i $l/d=80$. Betonske mešavine sa faktorom oblika $l/d=80$ imale su nešto veću čvrstoću u odnosu na betonske mešavine sa faktorom oblika $l/d=47$.
- Čvrstoća betona pri savijanju se povećala za sve uzorke kod kojih je zapreminski sadržaj vlakana $V_f \geq 1,0\%$. Najveći porast čvrstoće pri savijanju kod SFR-SCC iznosi 76,6% za $V_f=2\%$ i vlakna dužine 35mm, dok za vlakna 60mm dužine i $V_f=2\%$ porast čvrstoće na savijanje iznosi 149,5%.
- Na osnovu regresione analize date su linearne jednačine (1) i (2) za predviđanje čvrstoće pri cepanju zatezanjem SFR-SCC i čvrstoće pri savijanju SFR-SCC u zavisnosti od zapreminskog sadržaja vlakana V_f .

ZAHVALNOST

Autori se posebno zahvaljuju firmi “Put Inženjering” na spozorstvu i jer su omogućili izvođenje eksperimentalnog programa kao i laboratoriji za građevinske materijale na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu u Nišu. Autori se zahvaljuju i firmi “Spajić” iz Negotina na doniranim vlaknima.

LITERATURA

- [1] Okamura H., Ouchi M.: **Self-Compacting Concrete**. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [2] Ozawa Kazumasa, Maekawa Koichi, Okamura Hajime: **Development of High Performance Concrete**. *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokio*, Vol. XLI, No. 3, 391-439, 1992.
- [3] Gagne R., Pigeon M, Aitcin P.C.: **Deicer salt scaling resistance of high performance concrete**. *Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete*, SP-122, ACI, 1989.
- [4] Singh Harvinder: **Steel Fiber Reinforced Concrete**. *Springer Berlin Heidelberg*, New York, NY, 2016.
- [5] Daniel James I., Gopalaratnam Vellore S., Galinat Melvyn A.: **Report on Fiber Reinforced Concrete**, *ACI Committee 544*, 2002.
- [6] Khayat Kamal H., Schutter Geert De (Eds.): **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. *State-of-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*, vol.14, Springer, 2014.
- [7] Madandoust R., Ranjbar M. M., Ghavidel R., Shahabi S. F.: **Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete**. *Materials & Design*, Vol.83, 284-294, October 2015.
- [8] Katzer Jacek, Domski Jacek: **Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete**. *Construction and Building Materials*, Vol.34, 243-248, 2012.
- [9] Katzer Jacek: **Steel fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering**. *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol.7, No.1, 53-58, 2006.
- [10] Pajak M., Ponikiewski T.: **Flexural behaviour of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers**. *Construction and Building Material*, Vol.47, 397-408, 2013.
- [11] Wu Zemei, Shi Caijun, He Wen, Wu Linmei. **Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete**. *Construction and Building Materials*, Vol.103, 8-14, 2016.
- [12] Khayat K. H., Roussel Y.: **Testing and performance of fiber-reinforced, self-consolidating concrete**. *Materials and Structures*, Vol.33, 391-397, 2000.
- [13] Ding X., Li Ch., Han B., Lu Y., Zhao S.: **Effects of different deformed steel-fibers on preparation and fundamental properties of self-compacting SFRC**. *Construction and Building Material*, Vol.168, 471-481, 2018.
- [14] Khaloo Alireza, Raisi Elias Molaei, Hosseini Payam, Tahsiri Hamidreza: **Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers**. *Construction and Building Materials*, Vol.51, 179-186, 2014.
- [15] Gencil Osman, Brostow Witold, Datashvili Tea, Thedford Michael: **Workability and Mechanical Performance of SteelFiber-Reinforced Self-Compacting Concrete with Fly Ash**. *Composite Interfaces* 18, 169-184, 2011.
- [16] Haddadou Naima, Chaid Rabah, Ghernouti Youcef, Adjou Naima: **The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete**. *Journal of Building Materials and Structures*, Vol.1, No.2, 65-76, 2014.
- [17] Sahmaran Mustafa, Yurtseven Alperen, Yaman I. Ozgur: **Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete**. *Building and Environment*, Vol.40, No.12, 1672-1677, 2005.
- [18] Aslani Farhad, Nejadi Shami: **Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression**. *Composites: Part B*, Vol.53, 121-133, 2013.
- [19] AL-Ameeri Abbas: **The Effect of Steel Fiber on Some Mechanical Properties of Self Compacting Concrete**. *American Journal of Civil Engineering*, Vol.1, No.3, 102-110, 2013.
- [20] Zeyad Abdullah M.: **Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete**. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol.9, No.3, 4147-4158, 2020.
- [21] Grdić Zoran: **Betoni posebnih namena**. *Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu*, Niš, 2023.
- [22] Jevtić Dragica, Zakić Dimitrije, Savić Aleksandar: **Modeling of properties of fiber reinforced cement composites**. *Facta Universitatis Series: Architecture and Civil Engineering*, Vol. 6, No. 2, 165-172, 2008.
- [23] Ristić N, Grdić D., Bijelić J., Grdić Z., Topličić-Ćurčić G.: **Properties of Steel-Polypropilene Hybrid Fibers Reinforced Concrete**. *Facta Universitatis Series: Architecture and Civil Engineering*, Vol. 19, No. 3, 235-244, 2021.
- [24] SRPS EN 12390-3:2019: **Ispitivanje očvrslog betona – Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje**, Institut za standardizaciju Srbije, 2019.
- [25] SRPS EN 12390-6:2012: **Ispitivanje očvrslog betona – Deo 6: Čvrstoća pri cepanju zatezanjem uzoraka za ispitivanje**, Institut za standardizaciju Srbije, 2012.
- [26] SRPS EN 12390-5:2019: **Ispitivanje očvrslog betona – Deo 5: Čvrstoća pri savijanju uzoraka za ispitivanje**, Institut za standardizaciju Srbije, 2019.