

Primljen / Received: 20.4.2015.

Ispravljen / Corrected: 19.6.2016.

Prihvaćen / Accepted: 20.7.2016.

Dostupno online / Available online: 10.10.2016.

Utjecaj obloženih E-staklenih vlakana na svojstva čvrstoće betona

Autori:



Prof. dr. sc. **Sabapathy Yogeewaran Kanag**
SSN Tehničko sveučilište
Građevinski fakultet
sabkan@gmail.com



Yeshwant Kumar Anandan, dipl.ing. građ.
SSN Tehničko sveučilište
Građevinski fakultet
yeshwantkumaranandan@gmail.com



Prathulya Vaidyanath, dipl.ing. građ.
SSN Tehničko sveučilište
Građevinski fakultet
prathulyavaidyanath@gmail.com



Prashaanth Baskar, dipl.ing. građ.
SSN Tehničko sveučilište
Građevinski fakultet
prashaanthpb1794@gmail.com

Prethodno priopćenje

Sabapathy Yogeewaran Kanag, Yeshwant Kumar Anandan, Prathulya Vaidyanath, Prashaanth Baskar

Utjecaj obloženih E-staklenih vlakana na svojstva čvrstoće betona

U radu su prikazani rezultati ispitivanja o utjecaju E-staklenih vlakana obloženih epoksidom na tlačnu i vlačnu čvrstoću betona. Kao parametri ispitivanja su odabrana tri različita razreda betona s varirajućim volumnim udjelima vlakana (0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 %). Uočeno je da se najveća tlačna čvrstoća postiže pri volumnom udjelu vlakana od 1,5 %, a vlačna čvrstoća cijepanjem povećava se kako se povećava volumni udio vlakana. Na temelju rezultata ispitivanja razvijen je matematički model primjenom metode regresijske analize.

Ključne riječi:

obložena staklena vlakna, beton ojačan vlaknima, volumni udio vlakana, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem

Scientific paper - Preliminary report

Sabapathy Yogeewaran Kanag, Yeshwant Kumar Anandan, Prathulya Vaidyanath, Prashaanth Baskar

Strength properties of coated E-glass fibres in concrete

Test results obtained by studying the influence of epoxy coated E-glass fibre composites on the compressive and splitting tensile strengths of concrete are reported in the paper. Three grades of concrete and varying fibre volume fractions (0.5 %, 1 %, 1.5 % and 2 %) were used as test variables. It was observed that the maximum compressive strength was attained for the fibre volume fraction of 1.5%, whereas the splitting tensile strength was found to increase with an increase in the fibre volume fraction. Based on the test results, a mathematical model was developed using regression analysis.

Ključne riječi:

coated glass fibres, fibre reinforced concrete, fibre volume fraction, compressive strength, splitting tensile strength

Vorherige Mitteilung

Sabapathy Yogeewaran Kanag, Yeshwant Kumar Anandan, Prathulya Vaidyanath, Prashaanth Baskar

Einfluss beschichteter E-Glasfasern auf die Festigkeitseigenschaften von Beton

In dieser Arbeit werden Resultate von Untersuchungen zum Einfluss mit Epoxid beschichteter Glasfasern auf die Druck- und Zugfestigkeit von Beton dargestellt. Als Untersuchungsparameter wurden drei verschiedene Betonklassen mit verschiedenen Faservolumenanteilen (0,5 %, 1 %, 1,5 % und 2 %) gewählt. Es wurde festgestellt, dass die größte Druckfestigkeit bei einem Faservolumenanteil von 1,5% erzielt wird, während die Spaltzugfestigkeit mit dem Faservolumenanteil ansteigt. Aufgrund der experimentellen Resultate wurde aufgrund Methoden der Regressionsanalyse ein mathematisches Modell entwickelt.

Ključne riječi:

beschichtete Glasfasern, faserverstärker Beton, Faservolumenanteil, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit

1. Uvod

Dobro je poznato da korištenje vlakana u betonu smanjuje širinu pukotina koje se pojavljuju uslijed vanjskih opterećenja. Osim toga, vlakna pridonose i povećanju žilavosti betona, poboljšavaju post-pukotinsko ponašanje betona te je takav beton otporniji na visoka udarna opterećenja. Dosadašnja istraživanja pokazuju da ponašanje betona ojačanog vlaknima ovisi o faktorima kao što su oblik vlakana, geometrija vlakana, omjer duljine i promjera vlakana, volumen vlakana, način njegovanja i vrijeme njegovanja betona, upotreba superplastifikatora, itd. (Trottier, J. F., i Banthia, N., 1994 [1], Jianming Gao i dr., 1997 [2], K. Ramesh i dr., 2003 [3], A. Sivakumar i Manu Santhanam, 2007 [4]). Također je dokazano da su raspodjela i orijentacija vlakana važni faktori koji utječu na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju, što su predložili Bensaid Boulekbache i dr. [5].

Beton ojačan staklenim vlaknima pronalazi sve veću primjenu u arhitektonskim i konstrukcijskim betonskim elementima zahvaljujući svojim antikorozivnim svojstvima u kombinaciji sa visokim čvrstoćama koje nadilaze čvrstoće betona ojačanih čeličnim vlaknima. Junji Takagi [6] istraživao je utjecaj nasumično orijentiranih staklenih vlakana na čvrstoću pri savijanju, tlačnu čvrstoću i vlačnu čvrstoću cijepanjem, te Youngov modul elastičnosti betona. Junji Takagi [6] je na temelju svojih istraživanja zaključio da se čvrstoća povećava s povećanjem udjela vlakana. Međutim, istraživanja su pokazala i da primjena neobloženih E-staklenih vlakana u betonu utječe na trajnost takvih betona zbog visokoalkalne okoline u samom betonu koja oslabljuje vlakna, što posljedično utječe na ukupnu čvrstoću betona. Primjenom alkalnootpornih staklenih vlakana (eng. *Alkaline Resistant Glass Fibers – AR*) [7] otklonjen je negativni utjecaj vlakana na trajnost betona jer se pokazalo da AR vlakna smanjuju širenje pukotina nastalih uslijed skupljanja betona [8] te poboljšavaju vlačnu čvrstoću betona i čvrstoću betona na savijanje [9].

Iako je provedeno nekoliko istraživanja o betonu ojačanim alkalnootpornim staklenim vlaknima, utjecaj kratkih obloženih E-staklenih vlakana u betonu se tek treba istražiti. Valja naglasiti da oblaganje staklenih vlakana ne štiti samo vlakna od alkalne okoline već također značajno poboljšava i njihovu vlačnu čvrstoću [10]. Iako je trajnost obloženih vlakana ključna, taj aspekt nadilazi okvire ovog istraživanja. Predmet budućih istraživanja svakako bi mogla biti trajnost obloženih krutih vlakana, i to samih vlakana bez betona te zatim betona ojačanog takvim vlaknima. Nadalje, u budućnosti je potrebno provesti i troškovnu analizu obloženih vlakana te ih usporediti s ostalim vrstama vlakana. Ovaj rad je usmjeren na istraživanje svojstava betona ojačanog obloženim E-staklenim vlaknima (eng. *Coated E-Glass Fiber Reinforced Concrete – CGFRC*). S ciljem utvrđivanja utjecaja tih vlakana na svojstva betona izloženog tlačnom i vlačnom opterećenju, varirani su volumni udjeli vlakana i razredi betona. Ispitivanja konzistencije betona slijeganjem provedena su zbog utjecaja vlakana na svojstva tečenja betona, tj. njegovu obradljivost. Obloga tih vlakana poboljšava njihovu krutost čime se sprječava stvaranje nakupina (gnijezda) vlakana, pojave

uočene u slučaju korištenja neobloženih vlakana. Omjer duljine i promjera vlakana od 30 je zadržan konstantnim tijekom cijelog istraživanja. Takav omjer se smatra nižim od optimalnih omjera duljine i promjera čeličnih vlakana koji drugi istraživači koriste u betonu ojačanom vlaknima [11]. Nizak omjer duljine i promjera obloženih E-staklenih vlakana se smatrao nužnim zbog povećanja njihove krutosti i male posmične čvrstoće. Cilj je ovog istraživanja utvrditi otpornost obloženih E-staklenih vlakana u betonu u odnosu na tlačna i vlačna opterećenja. Na temelju rezultata ispitivanja, razvijeni su matematički modeli kako bi se izrazila čvrstoća betona ojačanog vlaknima.

2. Materijali

Za pripremu betona upotrijebljen je obični portlandski cement određen prema normi IS: 8112 [12] (istovjetno s normom ASTM – Tip-I vrsta cementa), specifične gustoće 3,15 g/cm³. Korišteni su sitni agregat specifične gustoće 2,6 g/cm³ i krupni agregat specifične gustoće 2,7 g/cm³. Oba agregata su prosijana i granulometrijski sastav im je određen prema normi IS 383 [13]. Za pripremu obloženih vlakana korišten je namotaj E-staklenih vlakana težine 1200 Tex s prosječnim promjerom niti od 17 μm i gustoće 2,65 g/cm³. Vlakna nisu bila prethodno tretirana. Za oblaganje vlakana korištena je epoksidna smola s odgovarajućim očvršćivačem.

Obložena E-staklena vlakna, prikazana na slici 1. pripremljena su u laboratoriju. Namotaj E-staklenih vlakana je presvučen epoksidnom smolom, a višak smole je uklonjen kroz uski prorez. Vlažna obložena vlakna su sušena na sobnoj temperaturi 24 sata u razvučenom položaju kako bi se izbjegla pojava nabora na obloženim vlaknima. Zatim su vlakna naknadno njegovana dva sata u pećnici. Osušena vlakna su rezana na zahtijevane duljine kako bi se zadržao traženi omjer duljine i promjera vlakana od 30. Svojstva obloženih staklenih vlakana prikazana su u tablici 1.



Slika 1. Obložena E-staklena vlakna

Tablica 1. Svojstva obloženih E-staklenih vlakana

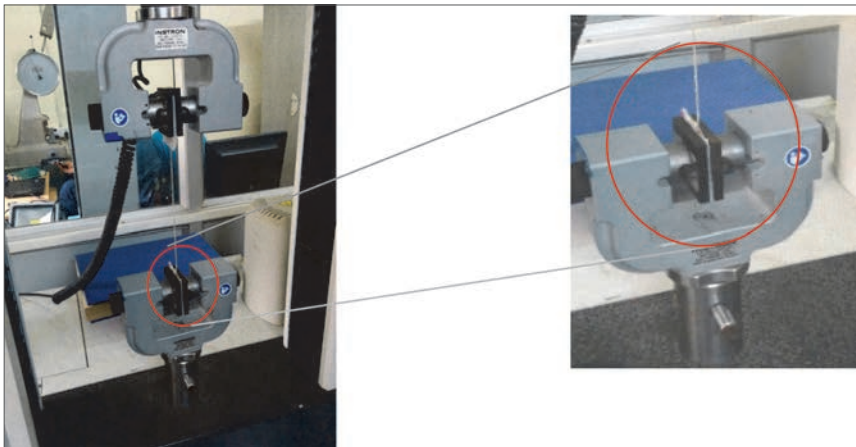
Oblik vlakna	Ravan
Duljina vlakna [mm]	30
Promjer vlakna [mm]	1
Omjer duljine i promjera vlakana	30
Produljenje [mm]	4,273
Modul [GPa]	55,737
Vlačna čvrstoća [MPa]	1587,779

Tri različite betonske mješavine, sastava prikazanih u tablici 2., pripravljene su za izradu ispitnih uzoraka. Najprije su zamiješani cement, pijesak i krupni agregat zajedno s vodom kako bi se pripremio svježi beton. Obložena vlakna, prethodno umiješana u cementnu pastu, dodavana su u malim količinama svježem betonu i temeljito miješana. Vlakna su prethodno umiješana u cementnu pastu kako bi se poboljšala svojstva prionljivosti obloženih vlakana i betona. Beton s umiješanim vlaknima je ugrađen u metalne kalupe i vibriran mehaničkim vibratorom kako bi se smanjila količina pora i ostvarilo dobro zbijanje. Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata i njegovani u vodi 28 dana, a onda posve osušeni pripremljeni za ispitivanja.

3. Eksperimentalno istraživanje

3.1. Ispitivanje vlakana

Vlačna čvrstoća obloženih E-staklenih vlakana je određena prema normama ispitivanja ASTM D2343-03 [14] upotrebom

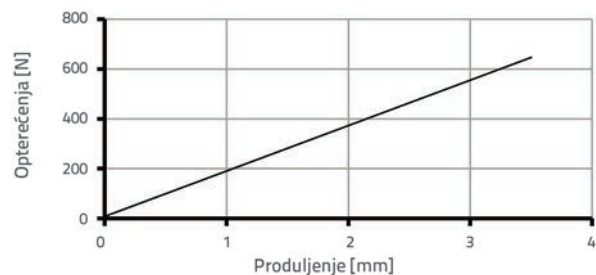


Slika 2. Postav za vlačno ispitivanje i čeljusti za prihvat uzoraka

Tablica 2. Sastavi kontrolnih mješavina

Broj serije	Udio cementa [kg/m ³]	Vodo-cementni omjer	Sitni agregat [kg/m ³]	Krupni agregat [kg/m ³]	Udio vode [l/m ³]
CGFRC-1	372	0,5	580	1177	186
CGFRC-2	413	0,45	552	1154	185
CGFRC-3	450	0,4	444	1265	180

uređaja za ispitivanje materijala kao što je prikazano na slici 2. Pet vlačnih uzoraka, svaki od njih ukupne duljine 250 mm i 150 mm u duljini mjerne trake, pripravljeno je tako da su njihovi krajevi pričvršćeni u čeljusti uređaja. Uzorke je trebalo posebno pridržati da se spriječi pucanje vlakana i omogućiti nužni zahvat tijekom testiranja na vlak. Uzorak je ispitivan kontrolom pomaka te je povećanje opterećenja iznosilo 5 mm/min. Vlačna čvrstoća i moduli obloženih E-staklenih vlakana izračunani su pomoću izraza iz navedene norme. Izračunane vrijednosti su prikazane u tablici 1. Zabilježeni odnos opterećenja i produljenja prikazan je na slici 3.



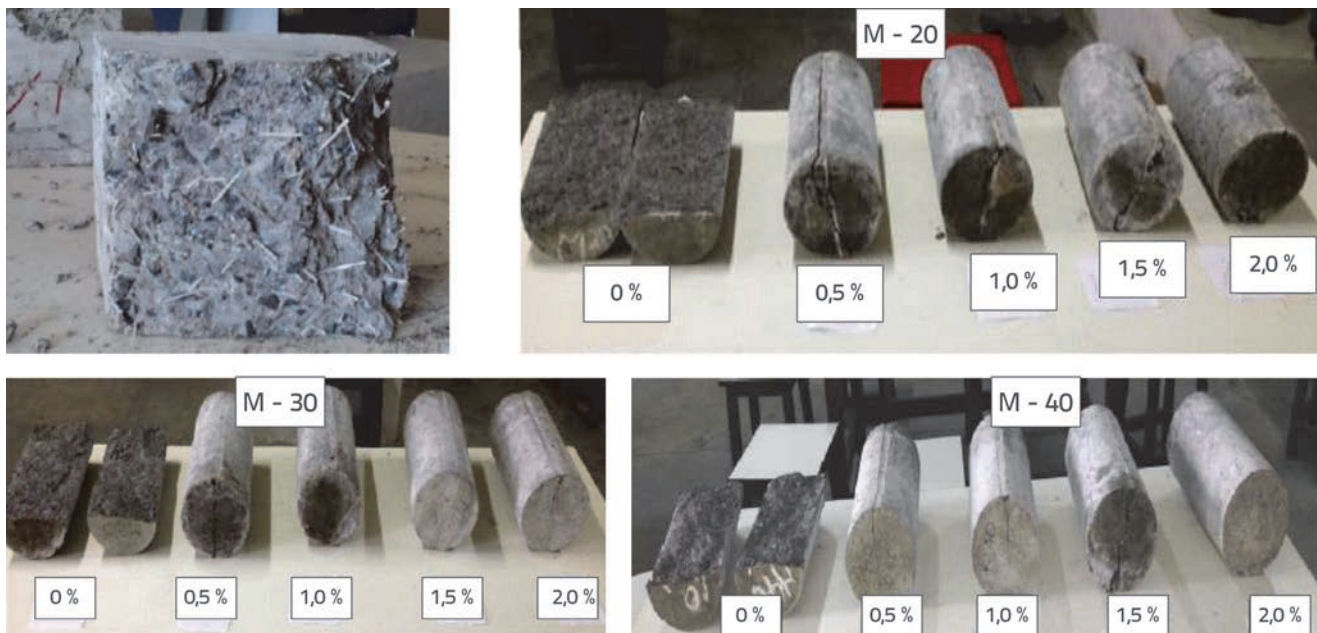
Slika 3. Grafički prikaz odnosa opterećenja i produljenja

3.2. Metodologija ispitivanja betona

Ispitivanja obradljivosti betona ojačanog obloženim E-staklenim vlaknima provedena su primjenom metode slijeganja, u skladu s normom IS:1199:1959 [15]. Za ispitivanje tlačne čvrstoće betona korišteni su uzorci oblika kocke, dimenzija 150 x 150 x 150 mm, u skladu s normom IS 516 [16]. Pripravljene su tri serije uzoraka, gdje je svaka serija bila drugi razred betona što je u kombinaciji

s varirajućim udjelom vlakana (0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % i 2 %) činilo ukupno 45 uzoraka kocki kojima je ispitana tlačna čvrstoća. Za ispitivanje tlačne čvrstoće korišten je uređaj kapaciteta od 2000 kN. Prirast opterećenja prilikom ispitivanja iznosio je 14 MPa/min. Slično tome, 45 uzoraka u obliku valjka dimenzija 150 x 300 mm ugrađeno je i ispitano im je vlačna čvrstoća cijepanjem. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem uzoraka jednostavno je i pouzdano ispitivanje za određivanje vlačne čvrstoće betona [17], a provedeno je u skladu s normom IS 5816 [18].

Na uzorcima prikazanim na slici 4. vidljivo je da je jezgra ostala netaknuta kod svih betonskih kocki ojačanih vlaknima, ali se beton po rubnim dijelovima odlomio i otpao. Ta pojava se može pripisati činjenici da su vlakna u području jezgre uzoraka jače pričvršćena (zaglavljena) i time mogu pružiti veći otpor stvaranju i širenju pukotina u usporedbi s vlaknima na rubnim djelovima uzoraka. U slučaju



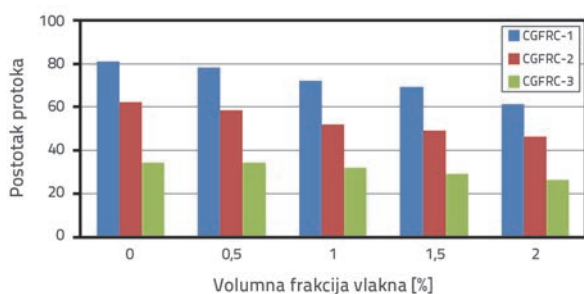
Slika 4. Lomovi betonskih kocki i valjaka

uzoraka u obliku valjka, samo se valjak bez vlakana raspolovio u dva dijela, a ostali valjci – iako raspucali nisu se raspolovili, što upućuje na učinkovitost vlakana pri pružanju otpora na vlačna naprezanja.

4. Rezultati ispitivanja i rasprava

4.1. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Budući da prisutnost vlakana umanjuje svojstva tečenja betona u svježem stanju, njihov je utjecaj na obradljivost betona određen metodom slijeganja. Relativno tečenje različitih razreda betona s različitim volumnim udjelima vlakana prikazano je na slici 5.



Slika 5. Prikaz svojstava tečenja betona ojačanih obloženim E-staklenim vlaknima

Može se uočiti da se tečenje smanjuje s povećanjem volumnog udjela vlakana. Tečenje je smanjeno za manje od 25 % kada se volumni udio vlakana poveća s 0 na 2 %. Navedena pojava se može pripisati ravnom obliku obloženih vlakana i njihovoj kratkoj duljini, te takav oblik i duljina vlakana mogu biti povoljni jer uzrokuju minimalno smanjenje tečenja betona.

4.2. Rezultati ispitivanja betona u očvrslom stanju

4.2.1. Rezultati tlačne čvrstoće

Analizirane su srednje vrijednosti tlačnih čvrstoća za tri različita razreda betona s varirajućim udjelom vlakana, čiji su rezultati prikazani u tablici 3. Nakon rastvaranja ispitnih uzoraka uzduž pukotina, uočena je prilično dobra raspodjela vlakana, bez prisutnosti gnijezda, što se može pripisati kratkoj duljini vlakana te njihovom krutom i ravnom obliku. Također, nije bilo naznake odvajanja vlakana od betona. Najveće opterećenje je postignuto pri volumenu vlakana od 1,5 %. Pri daljnjem povećanju volumena vlakana iznad 1,5%, primijećen je nagli pad tlačne čvrstoće betona tijekom dodavanja vlakana sve do 2 %. Pad čvrstoće se može pripisati lošem zbijanju betona zbog prisutnosti veće količine vlakana, kao što je primijećeno i u istraživanjima provedenim na temu betona ojačanog čeličnim vlaknima [19]. Oblaganje vlakana je povećalo njihovu krutost i time onemogućilo pravilno zbijanje betona.

4.2.2. Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem

Zabilježeno je maksimalno opterećenje svakog ispitnog uzorka kako bi se proračunala vlačna čvrstoća cijepanjem. Prosječne vlačne čvrstoće cijepanjem su prikazane u tablici 3. Uočeno je da se s povećanjem volumnog udjela vlakana povećava vlačna čvrstoća cijepanjem. Kod obje vrste ispitnih uzoraka, od običnog i vlaknima ojačanog betona, došlo je do loma pri izloženosti maksimalnim opterećenjima, ali je cijepanje valjaka na dva odvojena dijela zabilježeno samo kod ispitnih uzoraka od običnog betona. Navedena pojava potvrđuje da obložena E-staklena vlakna učinkovito pridonose otpornosti na vlačna

Tablica 3. Rezultati ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće

Serija	Volumni udio vlakana [%]	Tlačna čvrstoća		Vlačna čvrstoća cijepanjem	
		f_c [MPa] (prosječne vrijednosti)	Relativna vrijednost f_c [%]	f_{st} [MPa] (prosječne vrijednosti)	Relativna vrijednost f_{st} [%]
CGFRC-1	0	28	100	2,65	100
	0,5	31,11	111,11	3,15	118,67
	1,0	31,56	112,70	3,33	125,33
	1,5	33,78	120,63	3,43	129,07
	2,0	28,44	101,59	3,63	136,8
CGFRC-2	0	37,33	100	3,40	100
	0,5	41,33	110,71	3,57	105
	1,0	44,44	119,05	3,82	112,5
	1,5	45,78	122,62	4,08	120,21
	2,0	39,11	104,76	4,50	132,5
CGFRC-3	0	46,67	100	3,75	100
	0,5	46,22	99,05	3,85	102,64
	1,0	48,89	104,76	4,13	110,19
	1,5	50,67	108,57	4,27	113,96
	2,0	47,11	100,95	5,08	135,47

napreznja kod betona. Dubina i širina pukotina ispitnih uzoraka ojačanih vlaknima bile su manje od onih kod uzoraka od običnog betona što upućuje na učinkovitost obloženih vlakana i njihovu raspodjelu. Povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem s povećanjem volumena vlakana bilo je očekivano budući da prisutnost vlakana u ravnini loma pruža učinkovitiji otpor širenju pukotina.



Slika 6. Vlakna u betonu uzduž presjeka pukotine

Po jedan uzorak iz svake serije varijacije udjela vlakana je odabran te rastvoren po raspucaloj površini radi vizualnog pregleda. Uočena je jednolika raspodjela vlakana u betonu. Vlakna prisutna uzduž pukotine su fizički izbrojana kako bi se odredila efektivna vlakna koja su pružila otpor vlačnom opterećenju prilikom cijepanja. Slika 6. prikazuje vlakna u betonu uzduž pukotine. Kako je ustanovljeno i prethodnim istraživanjima, orijentacija krutih vlakana također pridonosi učinkovitosti vlakana na otpornost širenju pukotina [20]. Prilikom pregleda slomljenih uzoraka i brojenja vlakana uzduž pukotine, uočeno je da je 10 do 20 % vlakana od ukupnog

broja uzduž pukotine orijentirano okomito u odnosu na ravninu opterećenja. Preostala vlakna su bila pod različitim kutovima u odnosu na pukotinu loma. Pregledom samih vlakana ustanovljeno je da nije došlo do njihova sloma uslijed djelovanja opterećenja te da je prisutna dobra prionjivost između vlakana i betona.

5. Analiza rezultata ispitivanja

Analiza rezultata ispitivanja je provedena pomoću metode višestruke regresijske analize kako bi se odredio odnos između variranih parametara ispitivanja, razredi betona i postotak volumena vlakana, prema svojstvima čvrstoće. Odnos je uspostavljen kako bi se ustanovio utjecaj vlakana na tlačnu (f_c) i vlačnu (f_{st}) čvrstoću cijepanjem betona. Predloženi opći model predviđanja dan je izrazom:

$$f_{CGFRC} = A(f_c')^\alpha + B V_f + C V_f^2 \quad (1)$$

gdje je:

f_c' - tlačna čvrstoća betona pri starosti od 28 dana

V_f - volumni udio vlakana

A, B, C - koeficijenti regresije

α - vrijednost mu je 0,5 za vlačnu čvrstoću cijepanjem te 1,0 za tlačnu čvrstoću.

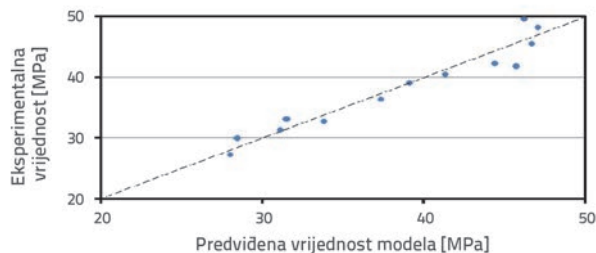
Izraz (1) uzima u obzir učinak karakteristične čvrstoće betona, a ostali izrazi (2) i (3) ovise o volumnom udjelu vlakana prisutnih u betonu. Predloženi model je sličan onome koji su predložili Song i suradnici [21], a različiti su koeficijenti koji predstavljaju obložena E-staklena vlakna umjesto čeličnih vlakana.

$$f_c = 0.98 \cdot f_c^i + 10.325 \cdot V_f - 4.526 \cdot V_f^2 \tag{2}$$

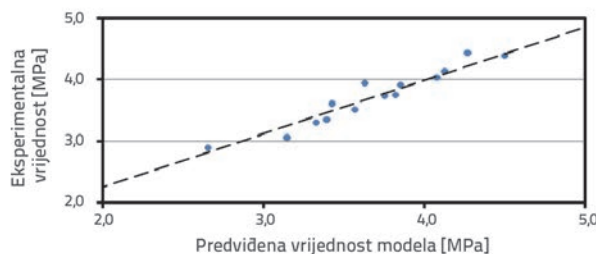
$$f_{st} = 0.546 \cdot \sqrt{f_c} + 0.276 \cdot V_f + 0.123 \cdot V_f^2 \tag{3}$$

Koeficijent determinacije (eng. COD) iznosi 0,91 za obje predložene jednadžbe (2) i (3). Uočeno je da tlačna čvrstoća betona opada s dodatkom 2 % vlakana. U jednadžbi (2) koeficijent V_f^2 je važan zbog nelinearnog ponašanja tlačne čvrstoće betona prilikom dodavanja vlakana. Vlačna čvrstoća cijepanjem betona je varirala linearno s dodatkom vlakana. Koeficijent V_f^2 je bio vrlo nizak zbog linearnosti rezultata ispitivanja.

Poznato je da čvrstoća CGFRC-a ovisi i o raznim čimbenicima poput oblika vlakana, njihove duljine, omjera duljine i promjera vlakana, orijentacije vlakana, ugrađenih duljina i svojstva betona. Zbog nedostatka dostupne literature u području obloženih E-staklenih vlakana u betonu, daljnja istraživanja su potrebna kako bi se potvrdile i validirale predložene jednadžbe s dodatnim eksperimentalnim podacima. Veza između predviđenih i eksperimentalnih vrijednosti je prikazana u tablici 4., gdje je vidljivo da predviđene vrijednosti uvjerljivo odgovaraju eksperimentalnim vrijednostima. Korelacija između eksperimentalnih vrijednosti i predviđenih vrijednosti iz modela čvrstoće (prema izrazima (2) i (3)) prikazana je na slikama 7. i 8. Poklapanje eksperimentalnih i predviđenih vrijednosti opisano je linearnim trendom na slikama 7. i 8.



Slika 7. Odnos između eksperimentalno dobivenih i modelom predviđenih vrijednosti tlačne čvrstoće



Slika 8. Odnos između eksperimentalno dobivenih i modelom predviđenih vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem

6. Zaključak

Na osnovi provedenih ispitivanja i analizom dobivenih rezultata svojstva čvrstoće betona ojačanog obloženim E-staklenim vlaknima, može se zaključiti sljedeće:

Tablica 4. Usporedba predviđenih i eksperimentalno dobivenih vrijednosti

Serija	Volumni udio vlakana [%]	Tlačna čvrstoća			Vlačna čvrstoća cijepanjem		
		Eksperimentalna ($f_{c,exp}$)	Predviđena ($f_{c,pre}$)	$(f_{c,pre}) / (f_{c,exp})$	Eksperimentalna ($f_{st,exp}$)	Predviđena ($f_{st,pre}$)	$(f_{st,pre}) / (f_{st,exp})$
CGFRC-1	0	28	27,44	0,98	2,65	2,89	1,08
	0,5	31,11	31,47	1,01	3,15	3,06	0,97
	1,0	31,56	33,24	1,05	3,33	3,29	0,99
	1,5	33,78	32,74	0,97	3,43	3,58	1,05
	2,0	28,44	29,98	1,05	3,63	3,94	1,08
CGFRC-2	0	37,33	36,59	0,98	3,40	3,34	0,98
	0,5	41,33	40,62	0,98	3,57	3,51	0,98
	1,0	44,44	42,39	0,95	3,82	3,74	0,98
	1,5	45,78	41,89	0,92	4,08	4,03	0,99
	2,0	39,11	39,13	1,00	4,50	4,39	0,97
CGFRC-3	0	46,67	45,73	0,98	3,75	3,73	1,00
	0,5	46,22	49,76	1,08	3,85	3,90	1,01
	1,0	48,89	51,53	1,05	4,13	4,13	1,00
	1,5	50,67	51,04	1,01	4,27	4,43	1,04
	2,0	47,11	48,28	1,02	5,08	4,78	0,94

- Dodavanje vlakana je, očekivano, utjecalo na svojstva tečenja betona, ali se pritom nije pokazalo kao velika prepreka tečenju zbog ravnog oblika vlakana. Izmjerena svojstva tečenja betona su pokazala da se tečenje postupno smanjuje za 25 % pri povećanju količine vlakana s 0 do 2 %.
- Ustanovljen je porast tlačne čvrstoće betona s povećanjem volumnog udjela vlakana. Međutim, dodavanje vlakana iznad 1,5 % imalo je negativan učinak na tlačnu čvrstoću. Pri volumnom udjelu vlakana do 1,5 %, porast čvrstoće se nalazi u rasponu od 10 % do 20 % u odnosu na čvrstoću kontrolne mješavine betona.
- U slučaju vlačne čvrstoće cijepanjem uočena je linearna varijacija u odnosu na povećanje volumnog udjela vlakana. Čvrstoća se poboljšala značajno, i to s porastom od približno 35 % u odnosu na kontrolnu mješavinu betona za volumni udio vlakana od 2 %. Vlakna su se pokazala učinkovitima tijekom pružanja otpora širenju vlačnih pukotina.
- Predloženi empirijski modeli temeljeni na višestrukoj regresijskoj analizi eksperimentalnih podataka kako bi se predvidjela svojstva čvrstoće betona ojačanog vlaknima, predviđaju rezultate slične rezultatima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima. Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se predložene jednadžbe modela potvrdile.

LITERATURA

- [1] Trottier, J.F., Banthia, N.: Toughness characterization steel fibers reinforced concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6 (1994) 4, pp. 264-289.
- [2] Gao, J., Sun, W., Morino, K.: Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, 19 (1997) 4, pp. 307-313.
- [3] Ramesh, K., Seshu, D.R., Prabhakar, M.: Constitutive Behavior of Confined Fiber Reinforced Concrete under axial compression, *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003) 3, pp. 343-350.
- [4] Sivakumar, A., Santhanam, M.: Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007) 7, pp. 575-581.
- [5] Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S.: Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 9, pp. 1664-1671.
- [6] Takagi, J.: Some Properties of glass fiber reinforced concrete, *Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-44, Detroit, Michigan*, pp. 93-111, 1974.
- [7] Brandt, A.M.: Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Composite Structures*, 86 (2008) 1-3, pp. 3-9.
- [8] Barluenga, G., Hernández-Olivares, F.: Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 12, pp. 1624-1638.
- [9] Ali, M.A., Majumdar, A.J., Singh, B.: Properties of glass fiber reinforced cement-the effect of fiber length and content, *Journal of Materials Science*, 10 (1975) 10, pp. 1732-1740.
- [10] Biswas, A.K., Cherif, C., Hund, R.D., Shayed, M.A., Hossain, M.: Influence of Coatings on Tensile Properties of Glass Fiber, *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)*, 20 (2014) 1, pp. 50-54.
- [11] Yazici, S., Inan, G., Tabak, V.: Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 6, pp. 1250-1253.
- [12] IS: 8112(1989). Specification for 43 Grade Ordinary Portland Cement, Second Revision, Reprint 2013, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [13] IS: 383(1970). Specification for Coarse and Fine Aggregate from Natural Sources For Concrete, Second Revision, Reprint 2002, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [14] ASTM D 2343, "Standard Test Method for Tensile Properties of Glass Fiber Strands, Yarns, and Rovings Used in Reinforced Plastics", ASTM Standards, 2003.
- [15] IS: 1199(1959). Methods of Sampling and Analysis of Concrete, Reprint 2004, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [16] IS: 516(1959). Method of Tests for Strength of Concrete, Amendment No. 2, Reprint 1993, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [17] Rocco, C., Guinea, G.V., Planas, J., Elices, M.: Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view, *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 1, pp. 73-82.
- [18] IS: 5816(1999). Splitting Tensile Strength of Concrete-Method of Test, First Revision, Reprint 1999, Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [19] Mohammadi, Y., Singh, S.P., Kaushik, S.K.: Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 9, pp. 956-965.
- [20] Folgar, F.: Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 3 (2000) 2, pp. 98-119.
- [21] Song, P.S., Hwang, S.: Mechanical Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 9, pp. 669-673.