

ANALIZA MEHANIČKIH SVOJSTAVA BETONA OJAČANOG VLAKNIMA

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED CONCRETE

Melchior Gnadekpa*, Ante Džolan**

Sažetak

Još od samog njegova otkrića beton je jedan od najkorištenijih građevinskih materijala u svijetu, ako ne i najkorišteniji. Danas postoje mnoge vrste betona, kao što su armirani beton (AB), beton visokih uporabnih svojstava (BVUS), beton visokih čvrstoća (BVČ), samo-zbijajući beton (SCC), laki beton, beton od recikliranog agregata, itd. Među ovim različitim vrstama betona, beton ojačan vlaknima (BOV) tema je brojnih istraživanja. Ova vlakna služe kao ojačanje betona na sličan način kao armaturne šipke – njima se premošćuju pukotine u betonu. Bez obzira na dobra svojstva betona kao materijala, on posjeduje neke slabosti kao što je mala vlačna čvrstoća. Ojačavanjem betona vlaknima nastoji se poboljšati njegovu vlačnu čvrstoću, te se u tu svrhu koriste različite vrste vlakana: čelična, staklena, sintetička, karbonska i prirodna vlakna. U ovom radu dan je pregled korištenja tih vlakana u svrhu dobivanja BVUS-a s osvrtom na njihov utjecaj na mehanička svojstva dobivenog materijala: tlačnu, vlačnu i savojnu čvrstoću.

Ključne riječi: betona visokih uporabnih svojstava (BVUS), vlakna za ojačavanje betona, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, savojna čvrstoća

Abstract

Since its invention, concrete has been one of the most used structural materials in the world, if not the most used. Today, there are many types of concrete, such as reinforced concrete (RC), ultra-high-performance concrete (UHPC), high-strength concrete (HSC), self-consolidating concrete (SCC), lightweight concrete, recycled aggregate concrete, etc. Among these different types of concrete, fiber-reinforced concrete (FRC) is the subject of numerous studies. These fibers serve as

* Nacionalni konzervatorij za umjetnost i obrt (CNAM), Reims, Francuska

E-mail: melchiorgdk@gmail.com

** Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: ante.dzolan@gradri.uniri.hr

reinforcement of concrete in a similar way like reinforcing bars – they bridge cracks in concrete. Regardless of the good properties of concrete as a material, it has some weaknesses such as low tensile strength. Reinforcing concrete with fibers aims to improve its tensile strength. Different types of fibers are used for this purpose: steel, glass, synthetic, carbon and natural fibers. This paper provides an overview of the use of these fibers for the purpose of obtaining UHPC with a focus on their influence on the mechanical properties of the resulting material: compressive, tensile and flexural strengths.

Key words: *ultra-high-performance concrete (UHPC), fibers for reinforcing concrete, compressive strength, tensile strength, flexural strength*

1. Uvod

Od njegova otkrića, beton je jedan od najčešće korištenih, ako ne i najkorišteniji građevinski materijal na svijetu. Danas postoje mnoge vrste betona, kao što su armirani beton (AB), beton visokih uporabnih svojstava (BVUS), beton velike čvrstoće (BVČ), samo-zbijajući beton (SCC), lagani beton, beton od recikliranih agregata, itd.

Među novijim je vrstama betona koje se razvijaju u području inženjerstva i beton ojačan vlaknima (BOV), tj. BVVS, koji je česta tema znanstvenih istraživanja [1-9]. Beton se ojačava vlaknima, na sličan način kao i običnom armaturom, u cilju minimalizacije mana koje ga karakteriziraju. Naime, beton, iako izvrstan i široko korišten materijal, ima svoje „karakterne“ nedostatke, a najveći mu je mala vlačna čvrstoća. Razlikujemo različite vrste vlakana koje se mogu koristiti za ojačavanje betona:

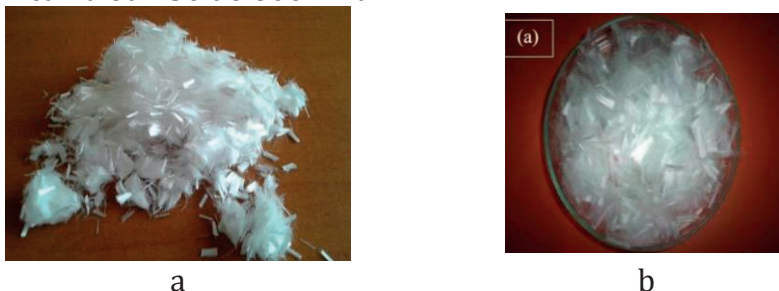
Čelična vlakna (Slika 1) značajno poboljšavaju vlačnu čvrstoću betona i čine ga izdržljivijim. Ova vrsta vlakana koristi se za montažne betonske proizvode, podove ili čak pločnike. Ova vlakna mogu biti različitih oblika, kako je prikazano na slikama 1.-a–c. Modul elastičnosti im je 200 GPa, dok im vlačna čvrstoća doseže i 1500 MPa.



Slika 1. Različite vrste čeličnih vlakana: ravna vlakna [1] (a), vlakna s kukastim krajem [6] (b) i valovita vlakna [2] (c)

Staklena vlakna [3], kao i čelična vlakna, pridonose povećanju vlačne čvrstoće običnog betona. Štoviše, pomažu u sprječavanju korozije. Beton od staklenih vlakana često se koristi u arhitekturi i u dekorativne svrhe.

Sintetička vlakna [5-9] dobivaju su kemijskim tehnikama. Izrađene su od materijala kao što su polipropilen, najlon, poliester, itd. (Slika 2). Korištenje sintetičkih vlakana način je recikliranja plastike. Sintetička vlakna pomažu u poboljšanju otpornosti na pucanje, tj. žilavosti betona. Modul elastičnosti ovakvih vlakana kreće se u granicama od 3,5 do 4 GPa, dok im vlačna čvrstoća varira u granicama od 250 do 600 MPa.



Slika 2. Različite vrste sintetičkih vlakana: polivinil alkoholna vlakna [5] (a) i polipropilenska vlakna [6] (b)

Karbonska vlakna su izvrstan materijal s dobrim svojstvima (modul elastičnosti im je 230 GPa, a vlačna čvrstoća oko 4000 MPa). Kada se koriste s betonom, pružaju izniman omjer čvrstoće i težine te otpornost na koroziju. Koriste se za građevinske objekte poput mostova.

Prirodna vlakna potječu od biljaka i drveća (na primjer, sisal, juta ili kokos, banana - Slika 3 [4]). Ova vlakna imaju prednost jer su održiva i ekološki prihvatljiva alternativa u usporedbi s prethodnima, čak i ako pružaju niža mehanička svojstva (tako je modul elastičnosti vlakana od banane oko 3,5 MPa, dok im je vlačna čvrstoća oko 60 MPa).



Slika 3. Vlakna od banane [4]

Svaka vrsta vlakana koja se koristi u betonu ima svoje prednosti i nedostatke, prikladne za specifične primjene.

Osim povećanja vlačne čvrstoće, BOV omogućuje smanjenje pojave i širenja pukotina u betonu. Također povećava kapacitet disipacije energije i nosivost, bilo u slučajevima statičkog ili dinamičkog opterećenja.

BOV se izrađuje kao standardni beton, počevši od odabira prave vrste vlakana, miješanja različitih sastojaka betona (pijesak, agregati, cement, voda, vlakna, aditivi) u točnim omjerima, a zatim miješanja cjeline pomoću miješalice za beton.

U ovom radu dat će se prikaz mehaničkih svojstava betona armiranog vlaknima, slijedeći gornji sažetak. Za to se koriste rezultati nekoliko objavljenih znanstvenih radova i istraživanja.

2. Mehanička svojstva

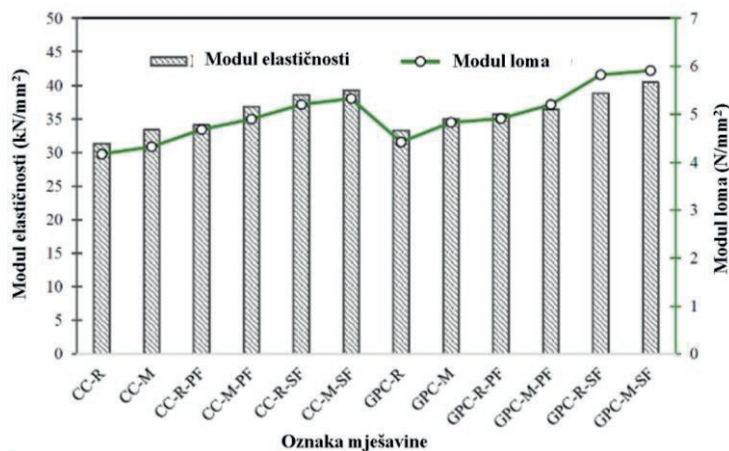
2.1 Moduli elastičnosti materijala

Za procjenu mehaničkog ponašanja betona ojačanog vlaknima koriste se Youngov modul. Također poznat kao modul elastičnosti, Youngov modul pokazuje sposobnost deformiranja materijala, a daje vezu naprezanja i deformacije.

U [8] je ispitivan modul elastičnosti betona ojačanog čeličnim i polipropilenskim vlaknima. Ne uzimajući u obzir količinu vlakana, uočljivo je da dodavanje vlakana povećava vrijednost modula elastičnosti.

Modul elastičnosti običnog betona (CC-M) bio je 33,38 GPa, dok je kod beton ojačanoga polipropilenskim (CC-M-PF) vlaknima dobivena vrijednost od 36,86 MPa, te, konačno, kod betona armiranog čeličnim vlaknima (CC-M-SF) 39,3 MPa (Slika 4). Za pripremanje mješavina korišten je umjetno proizvedeni pijesak (eng. manufactured sand).

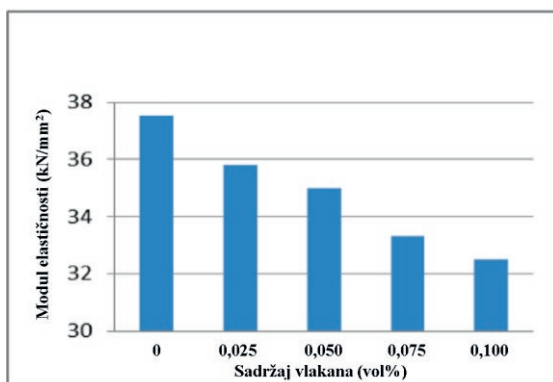
To dovodi do zaključka kako dodavanje vlakana u beton pridonosi povećanju njegova modula elastičnosti ovisno o vrsti vlakana. Uočeno je povećanje od oko 10 % za slučaj ojačavanja betona polipropilenskim vlaknima i gotovo dvostruko veće (18 %) za slučaj ojačavanja čeličnim vlaknima.



Slika 4. Rezultati promjene modula elastičnosti ovisno o vrsti vlakana objavljeni u [8]

U [9] je mjereno utjecaj različitih količina vlakana na nekoliko svojstava betona, kao što su tlačna, vlačna i savojna čvrstoća. Beton korišten za ispitivanja sadrži leteći pepeo, a sadržaj vlakana mu se kreće od 0 vol% do 0,1 vol%. Za ojačavanje betona korištena su poliesterska vlakna.

Uočeno je kako povećanje količine vlakana dovodi do smanjenja njegova modula elastičnosti (Slika 5). Iz Slike 5 vidljivo je kako beton ojačan s 0,1 vol% vlakana ima oko 13 % manji modul elastičnosti od običnog betona.



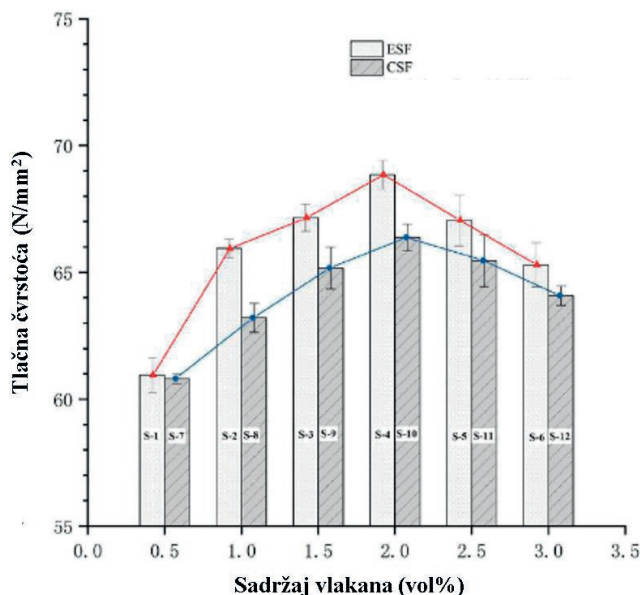
Slika 5. Rezultati promjene modula elastičnosti ovisno o količini vlakana objavljeni u [9]

Iz prethodne analize može se zaključiti kako varijacije modula elastičnosti uvelike ovise o vrsti korištenih vlakna.

2.2 Tlačna čvrstoća

Kada se radi o uobičajenim građevinskim materijalima, njihova tlačna čvrstoća jedan je od najvažnijih ispitanih parametara. U ovom se dijelu procjenjuje utjecaj dodavanja vlakana u betonsku mješavinu na tlačnu čvrstoću očvrstnalog betona.

U [6] su istraživači proučavali mješavine od čeličnih i polipropilenskih vlakana kako bi se odredila optimalna mješavina s obzirom na tlačnu čvrstoću materijala. Također su proučavali utjecaj nekoliko frakcija vlakana na tlačnu čvrstoću. Ovdje se promatraju dva tipa čeličnih vlakna: CSF-valovita čelična vlakna i ESF-čelična vlakna s kukama na krajevima. Slika 6 prikazuje rezultate istraživanja.



Slika 6. Rezultati promjene tlačne čvrstoće ovisno o količini vlakana objavljeni u [6]

Može se primijetiti kako se tlačna čvrstoća povećava povećavanjem sadržaja vlakana do određene vrijednosti (2 vol%) – tlačna čvrstoća betona ojačanog s 2 vol% vlakana je oko 13 % veća nego u betonu ojačanom s 0,5 vol% vlakana. Daljnje povećanje sadržaja vlakana dovodi do smanjivanja tlačne čvrstoće te se može zaključiti kako optimalni sadržaj

vlakana iznosi 2 vol% (za 3 vol% vlakana tlačna čvrstoća je oko 6 % manja nego za slučaj 2 vol% vlakana).

Slični rezultati dobiveni su u [10]. Optimalni sadržaj vlakana u mješavini ojačanoj čeličnim vlaknima iznosi 1,5 vol%, dok u mješavini ojačanoj polipropilenskim vlaknima iznosi 0,3 vol%. Tim vrijednostima sadržaja vlakana u mješavinama odgovaraju tlačne čvrstoće 54,44 MPa za beton ojačan čeličnim vlaknima i 51,25 MPa za beton ojačan polipropilenskim vlaknima. Ove vrijednosti predstavljaju prosječno povećanje tlačne čvrstoće od 25 % u usporedbi s običnim betonom.

Rezultati prikazani u [11] dobiveni su u istraživanjima provedenim na betonu ojačanom plastičnim vlaknima. Ova vlakna dobivena su reciklažom plastičnih boca iz restorana. Istraživači su primijetili da beton postiže svoju maksimalnu čvrstoću kad sadržaj vlakana iznosi 1,5 % sadržaja sitnog agregata. Isto se može reći i za staklena vlakna u [12], s rastom tlačne čvrstoće od 6 % u usporedbi s običnim betonom. Maksimalna postignuta tlačna čvrstoća je 33,51 MPa te odgovara betonskoj mješavini kod koje sadržaj staklenih vlakana iznosi 1,5 % sadržaja cementa.

Različite vrste vlakana mogu se miješati u istu betonsku mješavinu [1]. To je također učinjeno u [9]. Optimalna mješavina je 1 vol% čeličnih vlakana + 0,3 vol% polipropilenskih vlakana.

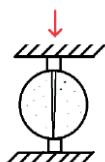
2.3 Vlačna čvrstoća

Iako pokazuje izvrsne karakteristike u pritisku, tj. tlaku, manjkavosti betona do izražaja dolaze pri pojavi zatežućih, tj. vlačnih naprezanja. Zato ga je u područjima gdje se očekuje pojava vlačnih naprezanja potrebno ojačati. U ovom djelu analizira se utjecaj dodavanja vlakana u obični beton na vlačnu čvrstoću cijepanjem.

Za izvođenje ovog ispitivanja izlije se cilindrični betonski uzorak. Uzorak se postavi vodoravno između dvije ploče, a zatim se na uzorak nanosi tlačno opterećenje. Na kraju ispitivanja uzorak se raspada na dva dijela uslijed neizravnog vlačnog naprezanja. Stvarna vlačna čvrstoća uzorka dobiva se pomoću izraza 1:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D}, \quad (1)$$

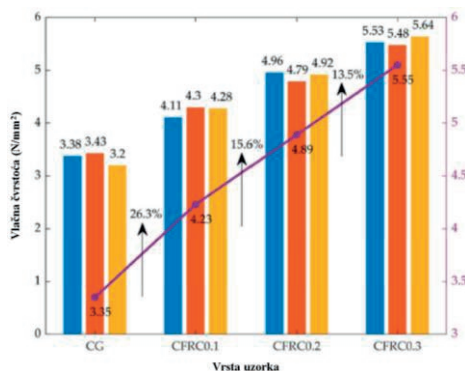
gdje je P maksimalna sila tlaka pri slomu, L duljina uzorka, a D njegov promjer.



Slika 7. Ilustracija ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Postoji još jedan način ispitivanja vlačne čvrstoće betona – metoda direktnog ispitivanja vlačne čvrstoće. Za razliku od prethodne metode, u direktnom ispitivanju vlačne čvrstoće vlačno naprezanje se aksijalno nanosi na uzorak do njegova sloma. U nastavku se daje prikaz rezultata nekih istraživanja s obzirom na vlačnu čvrstoću betona ojačanog vlaknima.

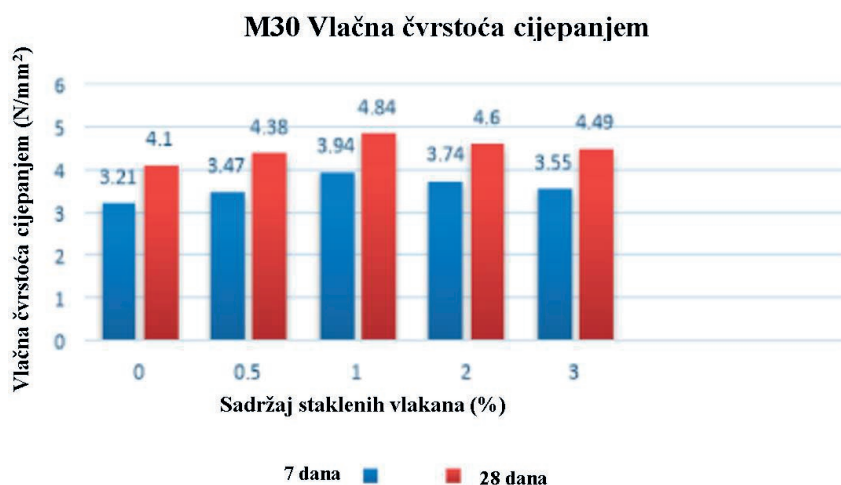
Vlačna čvrstoća betona ojačanog karbonskim vlaknima ispitivana je u [13]. Sadržaj vlakana u betonskoj mješavini povećan je s 0 na 0,3 vol%. Rezultati pokazuju porast vlačne čvrstoće s porastom sadržaja vlakana u mješavini. Vlačna čvrstoća običnog betona bila je 3,38 MPa, dok je dodavanjem 0,3 vol% karbonskih vlakana u mješavinu ona porasla na 5,53 MPa (Slika 8.). Prema tome, rast vlačne čvrstoće uslijed ojačavanja betona karbonskim vlaknima bio je 65 %.



Slika 8. Utjecaj sadržaja karbonskih vlakana na vlačnu čvrstoću betona [13]

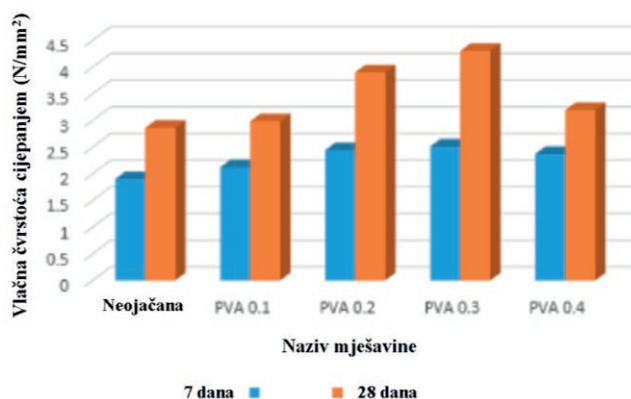
Gotovo isti zaključci mogli bi se dati za rezultate prikazane u [1]. Prirast vlačne čvrstoće iznosio je 40 % za slučaj ojačavanja betona čeličnim vlaknima velike čvrstoće, što je 25 % manje nego u slučaju ojačavanja karbonskim vlaknima.

Rezultati istraživanja provedenih kod betona ojačanih staklenim vlaknima dani su u [14] i prikazani na Slici 9. Uočava se povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem kad sadržaj vlakana iznosi maksimalno 1 % sadržaja cementa u betonskoj mješavini. Daljnjim povećanjem sadržaja vlakana, vlačna čvrstoća se smanjuje. Najveća dobivena vrijednost vlačne čvrstoće za mješavinu M30 je 4,84 MPa (za 1 % vlakana), dok je čvrstoća mješavine ojačane s 3 % vlakana 4,49 MPa. Čvrstoća referentne, neojačane mješavine bila je 4,10 MPa. Stoga, prirast vlačne čvrstoće betona ojačanog s 1 % vlakana iznosi 18 % u odnosu na referentnu mješavinu. Povećanjem sadržaja vlakana s 1 na 3 % dolazi do gubitka vlačne čvrstoće od 7,20 %.



Slika 9. Utjecaj sadržaja staklenih vlakana na vlačnu čvrstoću betona cijepanjem [14]

Slično ponašanje (Slika 10) istraživači su uočili kod ojačavanja betona polivinil alkoholnim vlaknima [5]. Vlačna čvrstoća cijepanjem referentne mješavine bila je 2,7 MPa, dok dodavanjem vlakana raste. Za mješavinu kod koje je sadržaj vlakana 0,3 % sadržaja cementa čvrstoća je iznosila 4,1 MPa (rast oko 52 %). Daljnjim povećanjem sadržaja vlakana u mješavini vlačna čvrstoća opada te iznosi 3 MPa u mješavini ojačanoj s 0,4 % vlakana (pad čvrstoće za oko 27 % u odnosu na maksimalnu ostvarenu vrijednost).



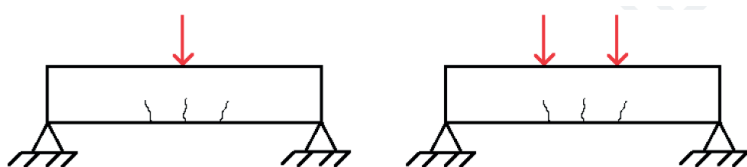
Slika 10. Utjecaj sadržaja polivinil alkoholnih vlakana na vlačnu čvrstoću betona cijepanjem [5]

U mješavini ojačanoj s 4 vol% vlakna od banane vlačna čvrstoća cijepanjem iznosila je 5,94 MPa, dok je kod referentne mješavine bila 4,03 MPa [4]. Prema tome, zabilježen je rast čvrstoće od 47 %. Daljnjim povećanjem sadržaja vlakana čvrstoća opada te u mješavini ojačanoj s 6 vol% vlakana iznosi 4,65 MPa, što predstavlja pad od 22 % u odnosu na mješavinu ojačanu s 4 vol% vlakana.

2.4 Čvrstoća na savijanje

Glavni konstruktivni elementi, kao što su grede, ploče, i sl., dominantno su opterećeni na savijanje, što čini čvrstoću na savijanje važnom karakteristikom pri projektiranju. Savijanje je zapravo kombinacija tlačnih i vlačnih naprezanja na element. Poznato je da obični beton ima veliku tlačnu i malu vlačnu čvrstoću.

Obično se čvrstoća na savijanje mjeri provođenjem ispitivanja savijanja u 3 ili 4 točke (Slika 11). Oba ova ispitivanja izvode se po istom principu: uzorak grede postavlja se na dva nosača i postupno opterećuje pomoću hidrauličke preše. Ta postavka stvara moment savijanja u gredi. Tijekom ispitivanja mjere se opterećenje i progib grede te se dobiveni rezultati koriste za određivanje njene čvrstoće na savijanje.



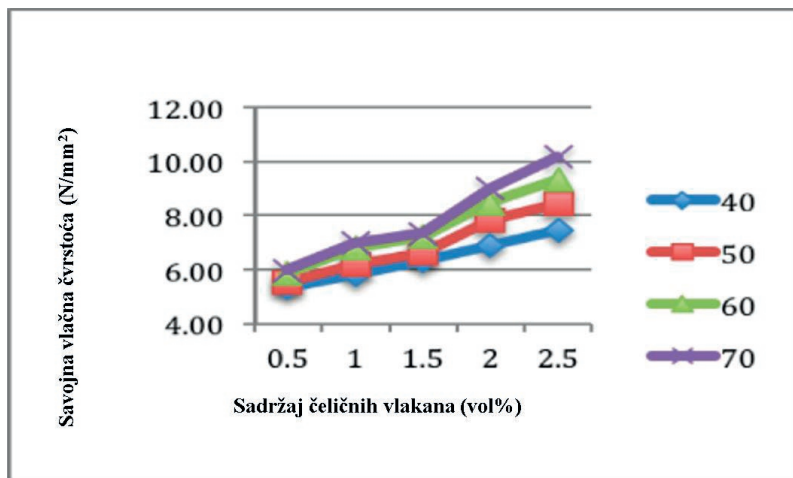
Slika 11. Shematski prikaz ispitivanja na savijanje

Rezultati istraživanja prikazani u [10] pokazuju rast čvrstoća na savijanje povećavanjem sadržaja vlakana u betonskoj mješavini. Ta činjenica je neovisna o starosti ispitanih uzoraka u trenutku ispitivanja (7 ili 28 dana), iako se uočava veći utjecaj kod uzoraka opterećenih pri starosti od 28 dana. Međutim, postoji optimalan sadržaj vlakana u mješavini čijim se premašivanjem gubi pozitivni utjecaj na povećanje čvrstoće na savijanje. Optimalni sadržaj vlakana u mješavini iznosi 1,5 vol% za beton ojačan čeličnim i 0,3 vol% za beton ojačan polipropilenskim vlaknima. Rezultati istraživanja objavljeni u [15,16] potvrđuju prethodno prezentirane rezultate. Povećanje čvrstoće na savijanje u odnosu na obični beton iznosi 34 % za beton ojačan čeličnim i 25 % za beton ojačan polipropilenskim vlaknima [10] (Tablica 1).

Tablica 1. Rezultati istraživanja čvrstoće na savijanje objavljeni u [10]
(BOČV-beton ojačan čeličnim vlaknima; BOPV-beton ojačan polipropilenskim vlaknima)

Vrsta betona	Sadržaj vlakana (vol%)	Čvrstoća na savijanje (N/mm ²)	
		7 dana	28 dana
Obični beton	0,0	3,58	4,64
BOČV	0,5	3,82	4,95
BOČV	1,0	3,88	5,42
BOČV	1,5	3,93	6,22
BOČV	2,0	3,85	5,82
BOPV	0,1	3,55	4,78
BOPV	0,2	3,64	5,26
BOPV	0,3	3,96	5,81
BOPV	0,4	3,80	5,56

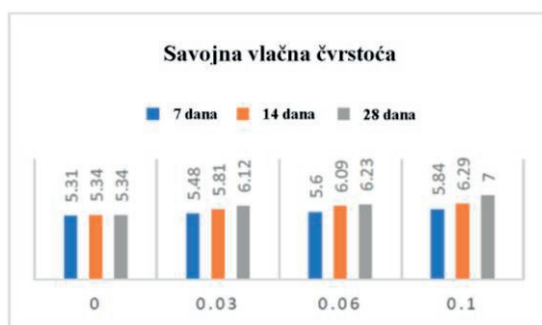
Na osnovi rezultata objavljenih u [17] uočljivo je kako čvrstoća na savijanje značajno raste povećanjem sadržaja vlakana po volumenu ispitanih uzoraka (Slika 12). To je zbog činjenice da čelična vlakna povećavaju elastičnost običnog betona čineći ga otpornijim na vlak.



Slika 12. Utjecaj sadržaja čeličnih vlakana na čvrstoću na savijanje [17]

Sa slike 12 može se vidjeti i utjecaj dimenzija vlakana (odnosa dužine (L) i promjera (D)) na savojnu čvrstoću očvrsnulog betona. Uočljivo je kako povećanje ovog odnosa pridonosi povećanju čvrstoće te za maksimalni odnos L/D prirast čvrstoće na savijanje iznosi oko 67 %.

Pozitivan utjecaj sadržaja vlakana na čvrstoću na savijanje zamijećen je i kod ojačavanja betona staklenim vlaknima. Tako rezultati objavljeni u [3] pokazuju porast čvrstoće na savijanje za 31 % u odnosu na obični beton u slučaj ojačavanja betona s 0,1 vol% staklenih vlakana. Najveća dobivena vrijednost čvrstoće na savijanje iznosila je 7 MPa (Slika 13).

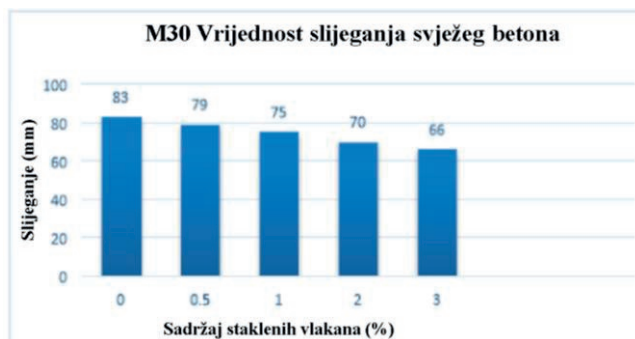


Slika 13. Utjecaj sadržaja staklenih vlakana na čvrstoću na savijanje [3]

2.5 Obradivost betona ojačanog vlaknima

Izraz „slump“ koristi se za opisivanje konzistencije svježeg napravljenog betona prije nego očvrstne. Mjeri se „slump“-testom. Što je slijeganje svježeg betona manje, to mu je manja obradivost. Rezultati

istraživanja objavljeni u [3,14] pokazuju kako se slijeganje svježeg betonske mješavine smanjuje povećavanjem sadržaja vlakana u njoj. Oba ova rada istražuju betonsku mješavinu ojačanu staklenim vlaknima. Međutim, na osnovi rezultata objavljenih [9], isto je uočljivo u slučaju ojačavanja betona plastičnim vlaknima.



Slika 14. Utjecaj sadržaja staklenih vlakana na obradivost svježeg betonske mješavine [14]

3. Zaključak

Rad daje pregled literature koja obrađuje beton ojačan različitim vrstama vlakana, tzv. beton visokih uporabnih svojstava (BVUS). Iz korištene literature preuzeti su rezultati koji pokazuju utjecaj ojačavanja betona vlaknima na njegova mehanička svojstva i obradivost.

Analizirana mehanička svojstva su tlačna i vlačna čvrstoća te čvrstoća na savijanje. Bez obzira o kojoj od ovih čvrstoća bila riječ i bez obzira kojom vrstom vlakana je betonska mješavina ojačana, vidljivo je kako sadržaj vlakana u mješavini doprinosi rastu čvrstoće. Međutim, potrebno je biti oprezan s količinom vlakana u betonskoj mješavini. Za svaku vrstu vlakana vidljivo je kako postoji optimalan sadržaj vlakana, dok se njegovim daljnjim povećavanjem gubi njegov pozitivni utjecaj na čvrstoću, tj. dolazi do smanjenja postignute čvrstoće za slučaj optimalnog sadržaja.

Iz prikazanih rezultata je također vidljivo da sadržaj vlakana u betonskoj mješavini dovodi do smanjenja obradivosti same mješavine te je potrebno voditi računa i o tome aspektu pri odabiru količine vlakana u mješavini. Naime, svojstva BVVS znatno se mogu poboljšati usmjeravanjem vlakana u pravcu vlačnih naprezanja. Ovo se može postići 3D printanjem betona, ali samo u slučaju ako se osigura zadovoljavajuća obradivost betonske mješavine.

Literatura

- [1] Ammeri, A., Neifar, M. (2019) High Strength Fiber Reinforced Concrete with Local Materials. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8/10, 403-406.
- [2] Athiappan, K., Subbaram, S. (2024) Strength and Durability Performance of Fibre Reinforced Pavement Quality Concrete with Copper Slag as Fine Aggregate. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 11/7, 28-35.
- [3] Bishetti, P., Ameersohel, Basavannevva, N., Suhas, M., Veergangadhar, A. (2019) Glass Fiber Reinforced Concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 6/6, 23-26.
- [4] Chandre Mouli, K., Anitha, V., Sree Naga Chaitanya, J. (2018) Comparative Study of Banana Fibre Reinforced Concrete with Normal concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, Special issue ICITSET, 73-76.
- [5] Devi, M., Kannan, L., Ganeshkumar, M., Venkatachalam, T.S. (2017) Flexural Behavior of Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 4/6, 27-30.
- [6] Gao, P., Xie, W., Ling, Y., Xu, H. (2025) Optimal Fiber Mix and Prediction Model for Compressive Strength of Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *PLOS ONE* 20/2, e0318713.
- [7] Kayalvizhi, M., Sasikala, K., Vijaya Pandi, A. (2019) Test on the Behaviour of Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, Special issue ICTER, 56-63.
- [8] Porpadham, T., Thirugnanasambandam, S. (2024) Mechanical and Durability Performance of Fiber Reinforced Geopolymer Concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 11/11, 45-57.
- [9] Tharun, A.P.J., Mohan N.V., Aswathy, L.S., Sreekumar, S., Aparna A.V. (2018) Strength Characteristic Study of Polyester Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, Special Issue, 1-6.
- [10] Vijaykumar. (2020) Comparison of Properties of Fiber Reinforced Concrete with Conventional Concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 11/10, 174 – 182.
- [11] Sanjaykumar, B., Daule, S.N. (2017) Use of Plastic Fiber in the Concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 4/11, 4-7.
- [12] Priya, P. (2017) Experimental Study on Flexural Behaviour of Glass Fiber Reinforced Concrete Beam using Self Compacting Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6/06 978-981.
- [13] Chen, Z.Y., Yang, J. (2021) Experimental Study on Dynamic Splitting Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Concrete. *Materials*, 14, 94. <https://doi.org/10.3390/ma14010094>

- [14] Wala, M.S., Mire, A. (2019) Strength Characteristics of Glass Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8/06, 824-828.
- [15] Rai, R., Upreti, M., Nayal, M. (2018) Synthetic Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 7/11, 67-67.
- [16] Verma, B. (2015) Use of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) over Plain Concrete for Shotcrete in Underground Tunneling. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 2/7, 9-12.
- [17] Shweta, P., Kavilkar, R. (2014) Study of Flexural Strength in Steel Fibre Reinforced Concrete. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2/5, 13-16.