

Stefan Mitrović¹, Dragana Popović², Miroslav Tepavčević³, Dimitrije Zakić⁴

FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA OJAČANIH ČELIČNIM VLAKNIMA (UHPSFRC)

Rezime:

Tema rada su betoni ultra visokih čvrstoća sa dodatkom čeličnih vlakana, u stručnoj literaturi poznati kao „Ultra-High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete“ (UHPSFRC). U prvom delu rada prikazan je kratak istorijat razvoja i primene UHPSFRC betona. Drugi deo rada predstavlja eksperimentalni deo istraživanja sa prikazom rezultata sprovedenih testova fizičko-mehaničkih svojstava. Na kraju je dat zaključak na osnovu analize rezultata ispitivanja, kao i ocena mogućnosti primene ovog kompozitnog materijala u našim uslovima.

Ključne reči: fizičko-mehanička svojstva, cement, betoni ultra visokih čvrstoća, čelična vlakna

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRA HIGH PERFORMANCE STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE

Summary:

The subject of this paper is ultra high strength concrete made with addition of steel fibers, also known as „Ultra-High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete“ (UHPSFRC). In the first part of the paper, short history of development and application of UHPSFRC concrete is presented. The second part deals with the experimental investigation, presenting the results of material characterization obtained from physical-mechanical tests. Finally, the conclusions are drawn based on the analysis of the test results, together with the assessment of possible applications of this composite material in practical engineering.

Keywords: physical-mechanical properties, cement, ultra high strength concrete, steel fibres

¹ Asistent, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, smitrovic@imk.grf.bg.ac.rs

² Student master studija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, dragaanaaa.popovic@gmail.com

³ Dipl. ing. građ., DNEC, Abu Dhabi, UAE, miroslav@dnec.com

⁴ Dr, V. prof, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, dimmy@imk.grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Tehnološki napredak na polju građevinskih materijala rezultovao je ubrzanim razvojem u pogledu poboljšanja karakteristika i proširenja namene betona. Mnoga istraživanja i ankete su pokazale da beton ima vodeću ulogu pri izradi različitih konstrukcija, bilo u osnovnoj formi ili u kombinaciji sa drugim materijalima, pri čemu se ističu armirani beton i prethodno napregnuti beton.

Najveći napredak u pogledu razvoja fizičko-mehaničkih svojstava dostignut je kroz mikroarmirane betone visokih čvrstoća ili u stručnoj literaturi poznati pod oznakom UHPSFRC. UHPSFRC predstavlja novu klasu betona razvijenu u nekoliko poslednjih decenija kroz mnogobrojna istraživanja, analize, probna ispitivanja i potvrđenu primenu u praksi.

Ovaj beton se odlikuje čvrstoćom pri pritisku u rasponu 125-180 MPa, čvrstoćom pri savijanju 20-30 MPa kao i povećanom otpornošću na delovanje agresivne sredine, što omogućava duži vek trajanja i veću održivost konstrukcija i različitih infrastrukturnih objekata.

Istraživanja i eksperimentalna ispitivanja UHPSFRC su počela krajem 80-tih godina prošloga veka, a značajnija ispitivanja počinju od 2000. godine sa razvojem i pojavom novih komponentnih materijala za ovu vrstu betona.

Razni autori u svojim radovima su za bitan aspekt po pitanju ovih betona uzeli količinu cementa i mikrosilike u mešavini. Kao cement se koristi u većini slučajeva čist portland cement (CEM I) klase 42,5 ili 52,5 (po mogućstvu sa ubrzanim priraštajem čvrstoće, tj. sa oznakom R). Rossi[5] i Yu i ostali [6] su u svojim istraživanjima za ispitivanje osobina i ponašanja UHPSFRC koristili oko 1000 kg/m³ cementa. Kako je ovo značajna količina cementa koja za cilj ima da se dobiju što bolje mehaničke osobine, ali zato kao posledicu ima težu ugradnju i lošije reološke karakteristike, mnogi autori su u svojim radovima koristili razne dodatke poput zgure i mikrosilike kako bi zamenili deo cementa u mešavini. S tim u vezi, autori poput El-Dieb [14] su koristili oko 900 kg/m³ cementa i 135 kg/m³ mikrosilike, Tayeh i ostali [1] 770 kg/m³ cementa i 200 kg/m³ mikrosilike. Autori N. Cauberg, J. Piérard i O. Remy [3] su koristili oko 833 kg/m³ cementa i 167 kg/m³ mikrosilike. Komercijalni UHPSFRC betoni kao što su „Ductal“ i „Dura“ u svom sastavu imaju 712 i 911 kg/m³ cementa, respektivno [4].

Pojedini istraživači poput Yang-a [9] su pokušali da prirodnim peskom iz lokalnih nalazišta u izvesnoj meri zamene skupi kvarcni pesak koji je osnovna komponenta pri proizvodnji UHPSFRC. Pokazalo se da zamenom kvarcnog peska dobijaju slabiji rezultati po pitanju mehaničkih karakteristika kompozita.

Sa razvojem tehnologije proizvodnje i primene materijala značajno je porasla praktična upotreba UHPSFRC. Imajući u vidu da su navedene mehaničke karakteristike značajno poboljšane, kao i ugradljivost u elemente konstrukcije, UHPSFRC se nametnuo kao materijal za višestruku primenu kako za višespratne konstrukcije, tako i za mostove, a takođe i za elemente konstrukcija izloženih dejstvu morske vode poput marina, gasnih i naftnih platformi, pri čemu veliku ulogu ima i pri rekonstrukciji i sanaciji oštećenja postojećih konstrukcija.

Povećana upotreba UHPSFRC zahteva potporu u vidu odgovarajućih standarda za proračun konstrukcija koji su još uvek u fazi izrade. Određene zemlje poput Francuske, Nemačke i Japana su donele tehničke propise kojima se detaljnije utvrđuju zahtevi koje UHPSFRC mora zadovoljiti da bi se koristio u izgradnji.

2. OPŠTE O UHPSFRC BETONU

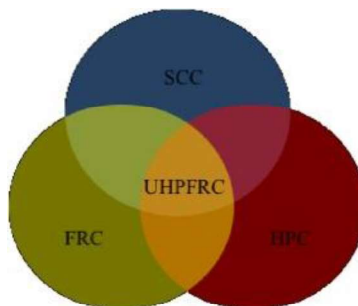
2.1 DEFINICIJA UHPSFRC BETONA

Betoni visokih čvrstoća sa dodatkom čeličnih vlakana u literaturi poznati kao „Ultra-High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete“ (UHPSFRC) predstavljaju po nekim autorima najveće dostignuće u razvoju betona visokih čvrstoća, koji su u literaturi poznati kao „High Performance Concrete“ (HPC).

Po definiciji UHPSFRC betoni predstavljaju kombinaciju tri posebne vrste betona, pri čemu ovaj kompozit poseduje sve ključne osobine sva tri pojedinačna materijala:

- SCC beton- samozbijajući ili samougrađujući beton,
- FRC beton- mikroarmirani beton sa dodatkom čeličnih vlakana,
- HPC beton- beton visoke čvrstoće pri pritisku.

Upotrebom odgovarajućih materijala u propisanoj razmeri i pravilnim postupkom mešanja možemo dobiti cementni kompozit takav da ima osobine sva tri prethodno pomenuta materijala.



Slika 1 – Definicija UHPSFRC betona (preuzeto iz [4])

2.2 OSOBINE UHPSFRC BETONA

Povoljne osobine UHPSFRC betona se ogledaju kroz sledeće:

- Poboľšane mehaničke karakteristike betona u pogledu nosivosti pri pritisku koja uz dodatak čeličnih vlakana može dostići i vrednosti preko 150 MPa, takođe čvrstoće pri savijanju od 25 MPa,
- Značajno veća trajnost i otpornost na agresivno delovanje sredine što se odnosi na povećanu otpornost po pitanju karbonatizacije i penetracije hlorida, zatim na povećanu otpornost na habanje, kao i na različite vrste udara i eksplozija,
- Sa dodatkom čeličnih vlakana stvaramo mogućnost izostanka klasične armature, što za posledicu ima jednostavniju i bržu izgradnju konstrukcije,
- Upotrebom čeličnih vlakana dobijamo veću duktilnost (žilavosti) betona što je naročito značajno u seizmički aktivnim područjima,
- Uspešno se može koristiti u različite svrhe kako pri izradi novih konstrukcija tako i pri rekonstrukciji, sanaciji i ojačanju postojećih i oštećenih konstrukcija, a takođe i za

izradu elemenata različitih oblika poprečnog preseka što je omogućeno dobrom ugradljivošću bez mnogo vibriranja,

- Može se koristiti i za izradu različitih vrsta prethodno napregnutih konstrukcija bilo u fabričkim pogonima (prednaprezanje na „stazi“), ili direktno na mestu izgradnje.

Negativne karakteristike UHPSFRC betona su sledeće:

- Velika količina cementa koja se koristi za spravljanje mešavine, što utiče na zagađenje životne sredine, jer poznato je da proizvodnja cementa predstavlja jedan od najvećih emitera CO₂ u atmosferu [15],
- Nedostatak propisa i standarda za dimenzionisanje i izvođenje konstrukcija od UHPSFRC betona,
- Veći početni troškovi ulaganja koji se odnose na nabavku potrebnih materijala i opreme za spravljanje i ugradnju ovoga betona,
- Nedostatak obučene radne snage za spravljanje ovoga materijala i ugradnju betona u oplatu elemenata.

Na osnovu ove rekapitulacije može se videti da betoni visokih performansi („Ultra-High Performance Concrete“ - UHPC), bilo sa dodatkom ili bez čeličnih vlakana, imaju dosta povoljnih osobina, što predstavlja dobru polaznu tačku za dalja istraživanja kako bi se navedeni nedostaci otklonili. Određeni napredak je već viđen. Mnogi autori su u svojim istraživanjima smanjili količinu cementa koristeći različite dodatke tzv. „filere“ kao i optimalno pakovanje zrna po modelu Andersen & Andersen, čime su zadržane povećane mehaničke karakteristike uz smanjenu količinu cementa. Mnoge zemlje poput Francuske, Sjedinjenih Američkih Država, Malezije, Nemačke, Japana i drugih su ušle u proces izrade tehničke legislativne, gde su u pomenutim zemljama na snazi tzv. "model kodovi" koji su preteča propisa i standarda.

2.3 PRIMENA UHPSFRC BETONA

UHPSFRC je našao široku primenu u savremenom konstrukterstvu za izradu različitih infrastrukturnih i drugih objekata. Velika primena je prisutna u oblasti sanacija i rekonstrukcija oštećenih objekata, kao i kod ojačanja postojećih konstrukcija, zatim u postizanju da konstrukcija bude sposobna da apsorbuje energiju zemljotresa tako da ne doživi kolaps ili oštećenja koja mogu ugroziti njenu funkcionalnost. Sa čeličnim vlaknima kao mikroarmaturom se vrši adekvatno i efikasno utezanje preseka bez postavljanja dodatne armature i uz manje dimenzije preseka. U Sjedinjenim Američkim Državama UHP beton sa dodatkom čeličnih vlakana se uspešno koristi i za izradu šipova pri temeljenju objekata.

U zgradarstvu se primena ogleda prvenstveno u izradi konstruktivnih elemenata u pogledu ostvarivanja većih mehaničkih zahteva, ali i prilikom izrade fasada, krovova, zaštitnih i akustičnih panela i elemenata koji su značajno izloženi agresivnom delovanju sredine. Primeri konstrukcija gde je korišćen UHP beton u navedene svrhe su: „MuCEM Museum“ u Marselju izgrađen 2013. godine gde su stubovi i fasada izvedeni od ovoga betona sa dodatkom čeličnih vlakana, kao i „The Shawnessy Light Rail Transit (LRT) Station“ izgrađena tokom jeseni 2003. i zime 2004. godine. Na konkretnom objektu UHP beton korišćen je za izradu ploče nadstrašnice, grednih nosača i stubova.

Značajna primena UHP betona tokom poslednjih nekoliko godina uočena je u mostogradnji, bilo za izgradnju ili rekonstrukciju i ojačanje postojećih konstrukcija. Prva primena UHP betona je zabeležena krajem 80-ih godina prošloga veka od strane Inženjerske jedinice vojske

Sjedinjenih Američkih Država. Prvi objekat ikada napravljen od UHP betona je pešački most „Sherbrooke Pedestrian Overpass, Quebec“ u Kanadi izveden 1997. godine raspona od 60 m što ujedno predstavlja i prvu konstrukciju napravljenu od ovog betona na teritoriji Kanade. Primeri pešačkih mostovskih konstrukcija od UHP betona: „The Peace Bridge in Seoul“, lučni pešački most u Južnoj Koreji izgrađen 2004. godine raspona 120 m korišćenjem komercijalnog UHP betona „Ductal“, zatim „Sakata Mirai“ pešački most u Japanu sandučastog poprečnog preseka, raspona 50 m, koji je izveden 2002. godine takođe od komercijalnog UHP betona „Ductal“. Od drumskih mostova istakli su se: „Bourg-lès-Valence“ drumski most u istoimenom mestu u Francuskoj izgrađen 2005. godine i „Mars Hill Bridge“ u Sjedinjenim Američkim Državama izgrađen 2006. godine što predstavlja prvi most od UHP betona izgrađen u ovoj zemlji.

Do sada je uočena mnogostruka primena u raznim zemljama poput: Sjedinjenih Američkih Država, Kanade, Nemačke, Francuske, Italije, Holandije, Kine, Malezije, Južne Koreje, Australije, Novog Zelanda...



Slika 2 – Konstrukcija „MuCEM Museum“ i „The Peace Bridge in Seoul“

3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

3.1 POSTAVKA EKSPERIMENTA I PROGRAM ISPITIVANJA

Ispitivanja su obuhvatala određivanje zapreminske mase, čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju i pull-off test. Uzorci korišćeni pri ispitivanju su kocke dimenzija 10x10x10 cm, prizme 4x4x16 cm i ploče dimenzija 10x10x5 cm. Starost uzoraka pri kojima su određivane pomenute fizičko-mehaničke karakteristike su 1, 3 i 28 dana. Treba napomenuti da su uzorci spravljeni sa različitim procentom čeličnih vlakana (0, 1 i 2%) i sa različitim vrstama cementa (klasa 42,5R i

52,5R) koji su dobijeni od dva lokalna proizvođača. Na ovaj način definisano je za potrebe ispitivanja šest različitih mešavina koje su označene slovnim oznakama A, B, C, D, E i F što je prikazano u tabeli 2.

3.2 USVOJENA RECEPTURA I IZRADA MEŠAVINA

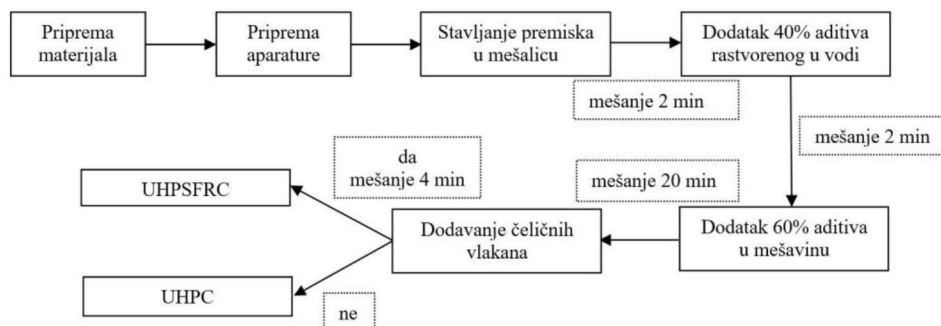
U nastavku teksta tabelarno će biti dat spisak materijala sa njihovim količinama koji su korišćeni za izradu mešavine. Šematski su prikazani koraci u izradi mešavine koristeći navedene materijale na slici 3. Treba napomenuti da je postojalo više mešavina u zavisnosti od primenjene količine čeličnih vlakana i vrste cementa. Takođe, zarad lakše izrade mešavine, u proizvodnom pogonu su pomešani zajedno cement, kvarcni pesak i silikatna prašina u vidu „premijsa“, pri čemu se za izradu jedne mešavine koristila vreća „premijsa“ od 20 kg. Sve mešavine su spravljane po istoj recepturi koja je prikazana u tabeli 1.

Tabela 1 – Korišćeni materijali i količine u izradi mešavina

| <i>Materijal</i> | <i>Vrsta</i> | <i>Proizvođač</i> | <i>Zapreminska masa (kg/m³)</i> | <i>Količina (kg)</i> |
|-------------------|---------------------|--------------------|--|----------------------|
| Cement | CEM I 42,5 (52,5) R | Lokalni proizvođač | ~ 3150 | “premijs” 20 |
| Pesak | Kvarcni pesak | Rgotina | 2640 | “premijs” 20 |
| Silikatna prašina | Mikro-silika | Italija | 2200 | “premijs” 20 |
| Aditiv | Superplastifikator | BASF | 1050 | 0.345 |
| Vlakna | Čelična vlakna | Spajić d.o.o | 7850 | 0/0.765/1.530 |
| Voda | Pijaća voda | Vodovod | 1000 | 1.720 |

Tabela 2 – Mešavine korišćene pri ispitivanju

| <i>Mešavina</i> | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> | <i>F</i> |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Vrsta cementa | CEM I 52,5 R | CEM I 52,5 R | CEM I 52,5 R | CEM I 42,5 R | CEM I 42,5 R | CEM I 42,5 R |
| Procenta vlakana (%) | 0 | 1 | 2 | 0 | 2 | 2 |



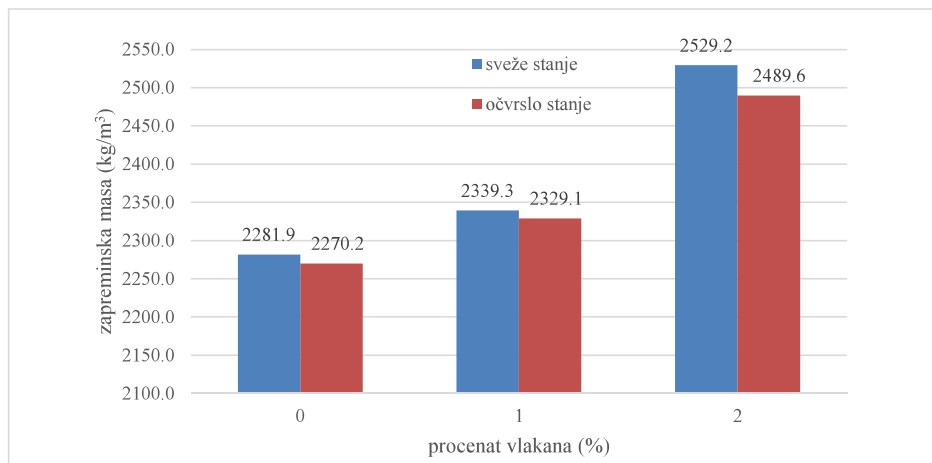
Slika 3 – Šematski prikaz postupka izrade mešavine sa i bez čeličnih vlakana

3.3 REZULTATI ISPITIVANJA I NJIHOVA ANALIZA

U nastavku rada najvažnije osobine ovih betona biće pokazane kroz rezultate ispitivanja zapreminskih masa u svežem i suvom stanju, čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju i pull-off testa. Poseban akcenat u analizi je na poređenju rezultata dobijenih sa različitim sadržajem čeličnih vlakana i različitim vrstama korišćenog cementa.

3.3.1 Zapreminska masa

Jedan o bitnih pokazatelja pri ispitivanju svojstava bilo kog betona je zapreminska masa. Ona neposredno pre samog ispitivanja može pokazati kakve rezultate treba da očekujemo, a samim tim i da se vidi koliki uticaj ima ugradnja betona na rezultate. Uporedna analiza zapreminskih masa je izvršena u odnosu na procenat čeličnih vlakna i stanje u kome se uzorak nalazi - sveže ili očvrslilo (nakon 24 h).

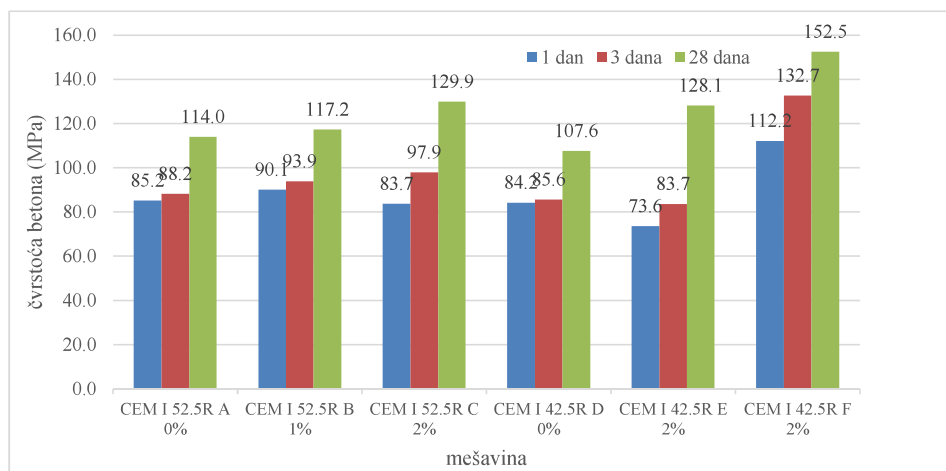


Slika 4 – Zapreminska masa u svežem i očvrslom stanju

Zapreminska masa u očvrslom stanju je manja u odnosu na sveže stanje za 0.5%, 0.4% i 1.6%, respektivno u odnosu na procenat vlakana (0, 1 i 2%). Takođe, porast učešća vlakana utiče na porast zapreminske mase i to: 2.5% za mešavinu sa 1% vlakana u odnosu na mešavinu bez vlakana, dok sa 2% vlakana imamo porast od 9.3%.

3.3.2 Čvrstoća pri pritisku

Ovo mehaničko svojstvo predstavlja najvažniju osobinu svih cementnih betona, a pogotovo UHPC i UHPSFRC betona koji se ističu čvrstoćama i preko 125 MPa pri starosti od 28 dana. Čvrstoća pri pritisku je ispitana prema standardu SRPS EN 12390-3:2014 (*Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje*). Ispitivanje je izvršeno na presi proizvođača *Matest* (kapaciteta 2000 kN) na uzorcima oblika kocke dimenzija 10x10x10 cm koncentrisanim apliciranjem sile pritiska na presi, pri čemu čvrstoća predstavlja silu podeljenu sa naležućom površinom pri otkazu uzorka. Uporedna analiza je sprovedena poređenjem čvrstoća pri različitim starostima (1, 3 i 28 dana), procentima čeličnih vlakana (0, 1 i 2%), kao i pri upotrebi različitih vrsta cementa (42,5R i 52,5R), nabavljenih od lokalnih proizvođača.



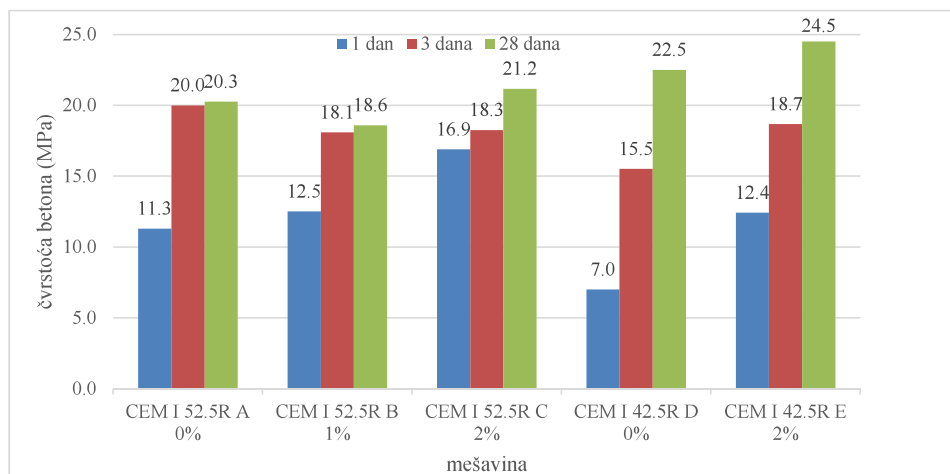
Slika 5 – Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku za razmatrane mešavine pri različitim starostima

Na slici 5. prikazan je porast čvrstoće tokom vremena za svih šest razmatranih mešavina, gde se može videti razlika u vrednostima u slučaju kada imamo vlakna u određenom procentu. Takođe dobijaju se različiti rezultati u zavisnosti od primenjenog tipa cementa.

3.3.3 Čvrstoća pri savijanju

Zbog prisustva čeličnih vlakana kao mikroarmature ispitana je čvrstoća pri savijanju uzoraka gde bi se moglo videti kakav doprinos na ovo svojstvo imaju vlakna. Analizirani su uzorci sa i bez čeličnih vlakana pri starostima od 1, 3 i 28 dana proizvedeni sa različitim vrstama cementa (42,5R i 52,5R). Čvrstoća pri savijanju je ispitana prema standardu SRPS EN 1015-

11:2008 (*Metode ispitivanja za zidanje - Deo 11: Određivanje čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku očvrstlog maltera*). Ispitivanja su se sprovodila na uzorcima oblika prizme dimenzija 4x4x16 cm apliciranjem koncentrisane sile preko trna na presi. Ispitivanja su vršena na presi proizvođača *Amsler*, gde je kontrolisano nanošena sila sve do otkaza uzorka što se registruje i pojavom prsline na uzorku.



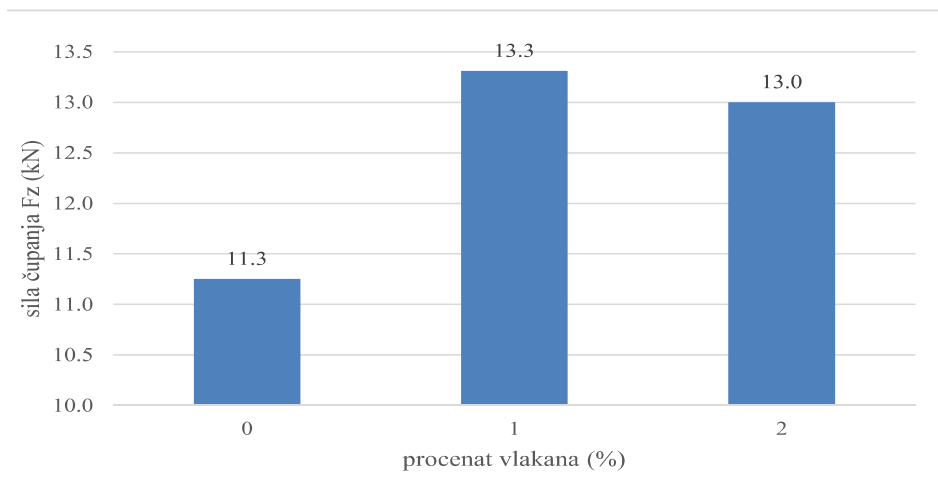
Slika 6 – Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju za razmatrane mešavine pri različitim starostima

Na slici 6. prikazan je uticaj vlakana na prihvatanje napona zatezanja koji se javljaju u betonu pri ispitivanju. Može se jasno videti porast čvrstoće tokom vremena, kao i uticaj količine vlakana i vrste cementa u mešavini na vrednost čvrstoće betona pri savijanju.

3.3.4 Pull-off test

Pull-off test predstavlja jednu od metoda lokalne destrukcije koja se koristi za ocenu čvrstoće betona na osnovu merenja sile koja je potrebna da se sa površine betonskog elementa „otkine“ komad betona određene veličine. Za uporednu analizu korišćeni su rezultati ispitivanja dobijeni na uzorcima oblika ploče i kocke dimenzija 15x15x5 i 10x10x10 cm, respektivno. Korišćeni su uzorci napravljeni od cementa CEM I 52,5R sa dodatkom čeličnih vlakana u procentu 0, 1 i 2%, odnosno razmatrane su mešavine oznake A, B i C.

Na osnovu Slike 7 može se videti da ne postoji značajnija razlika u vrednosti sile između uzoraka sa 1% i 2% vlakana (svega oko 2.3%), dok je vrednost sile čupanja dobijena na uzorcima bez vlakana za 15.5% manja od uzoraka u kojima su prisutna vlakna.



Slika 7 – Rezultati ispitivanja putem pull-off testa (0, 1 i 2% vlakana, CEM I 52,5R)

4. DISKUSIJA REZULTATA I ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

UHP betoni sa dodatkom čeličnih vlakana ulaze u sve širu upotrebu u praksi za različite namene. Takođe, na temu ovih betona sve više ima stručnih i naučnih radova u kojima se ispituju i unapređuju osobine ovoga betona. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Zapreminska masa betona i u svežem i očvrslom stanju raste sa dodatkom čeličnih vlakana, što je i očekivano s obzirom da se dodaje još jedna komponenta u mešavinu. Takođe, veće vrednosti se dobijaju u svežem nego u očvrslom stanju zbog prisustva viška vode koja vremenom ispari. Porast zapreminske mase je od 50-100 kg/m³ sa porastom procenta vlakana. Sa dodatkom čeličnih vlakana od 2% vidimo da je zapreminska masa oko 2500 kg/m³ što odgovara i običnim armiranim betonima. Uz ovu činjenicu i manje dimenzije poprečnog preseka elemenata ukupna težina konstrukcije je dosta manja nego u slučaju primene običnih cementnih betona;
- Čvrstoća pri pritisku raste sa porastom učešća čeličnih vlakana što je pokazano za sve razmatrane mešavine, ali u mnogome zavisi od vrste cementa koja se koristi. Najbolji rezultati su postignuti u slučaju mešavine F sa cementom CEM I 42,5R i učešćem od 2% čeličnih vlakana. Prosečna vrednost čvrstoće pri starosti od 28 dana iznosila je 152.5 MPa za pomenutu mešavinu, što predstavlja i maksimalnu vrednosti dobijenu za sve mešavine. Maksimalna čvrstoća pri pritisku za uzorke bez vlakana postignuta je kod mešavine A i iznosila je 114.0 MPa. Na osnovu slike 5. može se uočiti velika razlika u rezultatima između mešavina pojedinačno gledajući što je posledica ugradljivosti i obradljivost mešavina pri izlivanju u kalupe. Na pomenuti fenomen u mnogome utiče konzistencija, koja direktno zavisi od količine vode i finoće mliva i hemijskog sastava korišćenog cementa. Kod ovih betona primećen je veliki priraštaj čvrstoće u vremenu što doprinosi

da uzorci od UHP betona bez i sa vlaknima posle 24 h imaju preko 80 MPa. Uzimajući sve mešavine u obzir, nakon 28 dana prosečna čvrstoća ovih betona sa dodatkom čeličnih vlakana iznosi 135 MPa, što je 3-5 puta veće nego u slučaju običnih cementnih betona;

- Vlakna pozitivno utiču na čvrstoću pri savijanju, što je jedan od glavnih razloga za njihovu primenu; vlakna omogućavaju dobijanje većih čvrstoća, ali i da sa pojavom prsline ne dođe do otkaza uzorka, nego da uzorak i dalje može da prima opterećenje, što se videlo i pri samom ispitivanju. Kod mešavina A, B i C može se videti na osnovu slike 6. raznolikost između rezultata što je posledica obradljivosti i ugradljivosti. Na 28. danu dobijene su prosečne vrednosti 20.3, 18.6 i 21.2 MPa respektivno za mešavine A, B i C (0, 1 i 2% vlakana). Najveća čvrstoća bez vlakana je dobijena kod mešavine D sa cementom CEM I 42,5R oko 22.50 MPa, odnosno 24.50 MPa za 2% vlakana pri starosti od 28 dana za mešavinu E sa cementom CEM I 42,5R. Kod ove dve mešavine može se videti da su veće vrednosti čvrstoća pri savijanju u prisustvu vlakana (2%). U proseku gledajući za ove betone može se očekivati čvrstoća pri savijanju od 20 MPa bez i 22.50 MPa sa vlaknima što je oko 5-7 puta veće nego kod običnih cementnih betona;
- Ispitivanje uzoraka pull-off metodom pokazalo je da prisustvo vlakana povećava silu koja je potrebna da se „otkine“ komad betona sa površine uzorka, što je i očekivano jer prisustvo vlakna ukružuje cementu matricu i na taj način povećava kompaktnost betona - što na kraju rezultuje povećanom čvrstoćom pri savijanju. Razmatrane su samo mešavine sa cementom CEM I 52,5R iz razloga optimalnog obima ispitivanja;
- Ispitivanje karakteristika UHP betona sa dodatkom čeličnih vlakana kroz šest razmatranih mešavina sa zadatom recepturom pokazalo je da su parametri koji bitno utiču na rezultate - ugradljivost i obradljivost. Prilikom izrade mešavina dobijane su kruće konzistencije, pri čemu je primećeno da neposredno nakon mešanja cement počinje da vezuje i smesa postaje kruća i teško ugradljiva. Razlog ovome je što na konzistenciju mešavine dosta utiče sadržaj vode, a i prisustvo vlakana u mnogome doprinosi većoj krutosti mešavine. Kako su sve mešavine spravljane sa istom količinom vode, kao i sa istim količinama ali različitim vrstama cementa, pri spravljanju se pokazalo da mešavine imaju različitu konzistenciju - što je posledica finoće mliva i sastava primenjenih cemenata. Odnosno, pojedini cementi zahtevaju više vode u odnosu na druge kako bi se dobila konzistencija koja će obezbediti zahtevani nivo ugradnje. Naredni korak predstavlja pronalaženje optimalne mešavine u cilju dobijanja tečnije konzistencije, čime bi se obezbedila lakša ugradnja uz ostvarivanje zahtevanih fizičko-mehaničkih karakteristika.

Smernice i preporuke za dalji rad se sastoje pre svega u pronalaženju optimalnijih mešavina sa manjom količinom cementa i daljom optimizacijom pakovanja komponenti, što će za posledicu imati manje troškove po pitanju materijala, kao i smanjenje uticaja na životnu sredinu i reoloških efekata (skupljanje i tečenje). Takođe bitan parametar je i donošenje odgovarajućih standarda i pravilnika, koji će omogućiti lakšu primenu kompozita tipa UHPSFRC. Posebnu pažnju treba posvetiti izvođenju konstrukcija od ovog betona, gde je potrebno imati odgovarajuću opremu i obučenu radnu snagu. Treba imati na umu da je izvođenje konstrukcija od predmetnih betona znatno skuplje nego u slučaju običnih cementnih betona, što je rezultat viših

cena komponentnih materijala, skuplje opreme i većih dnevnica za radnu snagu koja je visoko kvalifikovana.

LITERATURA

- [1] B. Tayeh, B. Bakar, M. Johari, Y. Voo , Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay, [Construction and Building Materials](#) (2012)
- [2] М. Мурављов. *Грађевински материјали*. Београд (1995) : Грађевински факултет Универзитета у Београду
- [3] N. Cauberg & J. Pierard, O. Remy, Ultra High Performance Concrete: Mix design and practical applications, Tailor Made Concrete Structures (2008)
- [4] N. M. Azmee, N. Shafiq, Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications, Case Studies in Construction Materials (2018)
- [5] P. Rossi, Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra high-performance cement-based composites, [Cement and Concrete Composites](#) (2013)
- [6] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H Brouwers, Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), Cem. Conc. Res. (2013)
- [7] S. Yang, S. Millard, M. Soutsos, S. Barnett, T. Le, Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), [Construction and Building Materials](#) (2009)
- [8] SRPS EN 1015-11:2008: Metode ispitivanja maltera za zidanje - Deo 11: Određivanje čvrstoće pri savijanju i čvrstoće pri pritisku očvrslog maltera (2008): Institut za standardizaciju Srbije
- [9] SRPS EN 12350-2:2010: Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja (2010): Institut za standardizaciju Srbije
- [10] SRPS EN 12390-1:2014: Ispitivanje očvrslog betona – Deo 1: Oblik, dimenzije i ostali zahtevi za uzorke i kalupe (2014): Institut za standardizaciju Srbije
- [11] SRPS EN 12390-2:2014: Ispitivanje očvrslog betona – Deo 2: Izrada i negovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće (2014): Institut za standardizaciju Srbije
- [12] SRPS EN 12390-3:2014: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje (2014): Institut za standardizaciju Srbije
- [13] A. El-Dieb, Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers, [Materials & Design](#) (2009)
- [14] J. Zhang, G. Liu, B. Chen, D. Song, J. Qi, X. Liu, Analysis of CO2 Emission for the Cement Manufacturing with Alternative Raw Materials: A LCA-based Framework, Energy Procedia (2014)