

Mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava

Marijan Skazlić, Dubravka Bjegović, Silvija Mrakovčić

Ključne riječi

beton od reaktivnog praška, čelična vlakna, čvrstoća, mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava, njegovanje, žilavost

Key words

reactive powder concrete, steel fibers, strength, high performance fiber reinforced concrete, cure, toughness

Mots clés

béton à poudre réactif, fibres d'acier, résistance, bétons fibrés à hautes performances, cure, dureté

Ключевые слова

бетон из реактивного порошка, стальные волокна, прочность, микроармированный бетон высоких потребительных свойств, уход за бетоном, твердость

Schlüsselworte

Beton aus Reaktivpulver, Stahlfasern, Festigkeit, mikrobewehrter Beton hoher Benutzungseigenschaften, Nachbehandlung, Zähigkeit

M. Skazlić, D. Bjegović, S. Mrakovčić

Izvorni znanstveni rad

Mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava

Opisuju se osnovne karakteristike betona visokih uporabnih svojstava, mikroarmiranih čeličnim vlaknima. Građivo je podijeljeno na poznate vrste, a posebno su obrađena svojstva betona od reaktivnog praška. U eksperimentalnom dijelu prikazano je istraživanje u kojem je određen utjecaj vrste čeličnih vlakana i načina njegovanja na mehanička svojstva toga betona. Dobiveni rezultati su korišteni za usporedbu sa običnim mikroarmiranim betonom i betonom visokih uporabnih svojstava.

M. Skazlić, D. Bjegović, S. Mrakovčić

Original scientific paper

High performance fiber reinforced concrete

Basic properties of the high performance concrete reinforced with steel fibers are described. This material is classified into known types, and properties of the reactive powder concrete are analyzed in more detail. In the experimental section, the authors present results of the analysis aimed at determining the influence of steel fibers and curing on mechanical properties of this concrete. Results obtained during this analysis are used for comparison with an ordinary fiber reinforced concrete and high performance concrete.

M. Skazlić, D. Bjegović, S. Mrakovčić

Ouvrage scientifique original

Béton fibré à hautes performances

Propriétés principales du béton à hautes performances, renforcé de fibres d'acier, sont décrites. Ce matériau est classifié en types connus, et les propriétés du béton à poudre réactif sont analysées en plus de détail. Dans la partie expérimentale, les auteurs présentent résultats de l'analyse visant à l'influence des fibres d'acier et de la cure sur le propriétés mécaniques de ce béton. Les résultats obtenus au cours de cette analyse ont été utilisés pour comparaison avec le béton fibré ordinaire et le béton à hautes performances.

М. Сказлич, Д. Бегович, С. Мракович

Оригинальная научная работа

Микроармированные бетоны высоких потребительных свойств

В работе описываются основные характеристики бетона высоких потребительных свойств, микроармированных стальными волокнами. Материал статьи, поделён на известные типы, а специально обработаны свойства бетона из реактивного порошка. В экспериментальной части описано исследование, в котором определено влияние типа стальных волокон и способа ухода на механические свойства бетона. Полученные результаты использовались для сравнения с обычным микроармированным бетоном и бетоном высоких потребительных свойств.

M. Skazlić, D. Bjegović, S. Mrakovčić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Mikrobewehrter Beton hoher Benutzungseigenschaften

Beschrieben sind die Hauptmerkmale des Betons hoher Benutzungseigenschaften, der mit Stahlfasern mikrobewehrt ist. Das Baustoff ist in bekannte Sorten aufgeteilt, und die Eigenschaften des Betons aus Reaktivpulver sind abgesondert bearbeitet. Im Teil der Experimentbeschreibung ist die Untersuchung dargestellt mittels der der Einfluss der Stahlfaserart und der Weise der Betonbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften dieses Betons bestimmt wurden. Die erhaltenen Ergebnisse benützte man zum Vergleich mit gewöhnlichem mikrobewehrtem Beton und mit Beton hoher Benutzungseigenschaften.

Autori: Mr. sc. **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; mr.sc. **Silvija Mrakovčić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

1 Uvod

Postavljanje sve složenijih zahtjeva na izvedene konstrukcije, a time i na sam beton kao gradivo rezultiralo je pojavljivanjem novih vrsta betona krajem prošlog stoljeća. Među njima značajno mjesto zauzimaju i mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava (*Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete*) UHPFRC.

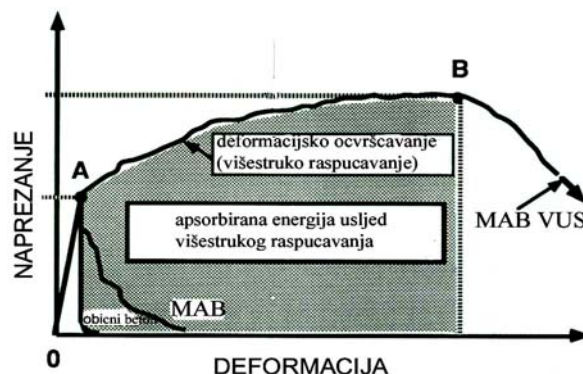
Mikroarmirani je beton visokih uporabnih svojstava (skraćeno MAB VUS) kompozitno gradivo sa cementnom matricom karakteristične tlačne čvrstoće veće od 150 MPa i s dodatkom vlakana koja služe za poboljšanje duktilnosti pri vlačnom opterećenju. U svijetu su se pojavili prije deset do petnaest godina i od tada se intenzivno proučavaju njihova svojstva, struktura i tehnologija. Razlikuju se od običnih betona i betona visokih uporabnih svojstava prema strukturi, svojstvima i načinu proizvodnje. [1] Pod betonom visokih uporabnih svojstava (skraćeno BVUS) podrazumijeva se gradivo koje se razlikuje od običnog betona prema povećanoj čvrstoći i po barem jednom preostalom, poboljšanom svojstvu. Postoje različite klasifikacije betona visokih uporabnih svojstava, a jedna od često rabljenih prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Klasifikacija betona visokih uporabnih svojstava na BVUS, vrlo visokih i ultra visokih čvrstoća-MAB VUS [2]

Parametar	Visoka čvrstoća	Vrlo visoka čvrstoća	Ultra visoka čvrstoća
Tlačna čvrstoća [MPa]	42-100	100-150	> 150
Vodovezivni omjer	0,45-0,30	0,30-0,24	< 0,24
Kemijski dodatak	plastifikator/superplastifikator	superplastifikator	superplastifikator
Mineralni dodatak	lebdeći pepeo, silikatna prašina	silikatna prašina	silikatna prašina
Koeficijent propusnosti [cm/s]	10^{-11}	10^{-12}	$< 10^{-14}$
Zaštita od smrzavanja i odmrzavanja	aeriranje	aeriranje	nema slobodne vode

Glavna razlika između MAB VUS-a i običnog mikroarmiranog betona jest prema obliku krivulje naprezanje-deformacija pod savojnim opterećenjem, a što se vidi na slici 1. MAB VUS sadrži mnogo veću količinu vlakana i kompaktniju matricu od običnog mikroarmiranog betona, pa se zato odlikuje znatno poboljšanim mehaničkim i trajnosnim svojstvima. Gledajući dijagram naprezanje-deformacija MAB VUS-a (slika 1.) može se uočiti da nakon početnog linearnog područja do pojave prve pukotine (točka A) dolazi do deformacijskog očvršćivanja, koje je popraćeno višestrukim raspucavanjem, i na taj

način do apsorbiranja velike količine energije. Potom krivulja doseže svoju najveću vrijednost (točka B), nakon čega se vlakna počinju izvlačiti iz matrice i krivulja poprima opadajući oblik, što u konačnici dovodi do sloma probnog uzorka ili elementa [3].



Slika 1. Usporedba dijagrama naprezanje-deformacija pri savojnom opterećenju između običnog betona, mikroarmiranog betona i mikroarmiranog betona visokih uporabnih svojstava [3]

Trajnost MAB VUS-a predstavlja bitnu prednost pred ostalim cementnim kompozitima jer se pravilnim projektiranjem, ugradnjom i njegovanjem ovog gradiva znatno produžava vijek trajanja konstrukcija u različitim agresivnim sredinama, a da su pritom troškovi održavanja i sanacije građevina svedeni na minimum.

Početni razvoj MAB VUS-a s čeličnim vlaknima išao je u tri različita smjera. Tako su vremenskim redoslijedom nastajala gradiva poznata po skraćenim nazivima CRC, RPC i MSFRC. CRC (*Compact Reinforced Composites*) razvijen je u danskoj tvrtki Aalborg Portland, a u svom sastavu ima 5 do 10% volumnog udjela ravnih čeličnih vlakana duljine 6 mm i promjera 0,15 mm. RPC (*Reactive Powder Concrete*) ili u nas poznatiji pod nazivom beton od reaktivnog praška, jest MAB VUS razvijen u francuskoj tvrtki Bouygues, a u svom originalnom sastavu sadrži 2,5 vol.% čeličnih vlakana duljine 13 mm i promjera 0,16 mm. MSFRC (*Multi-Scale Fibre Reinforced Concrete*) otkriven je u Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Francuska), a karakterističan je po tome što u svom sastavu ima i kratka i duga čelična vlakna. [4]

Nakon otkrića i početnih spoznaja o nabrojene tri vrste MAB VUS-a u posljednje vrijeme sve su učestalija istraživanja modifikacije njihovih originalnih sastava i principa prema kojima su dobiveni. Neki od na taj način dobivenih mikroarmiranih kompozita visokih uporabnih svojstava jesu Ductal i CEMTEC_{multiscale} [5].

Osim prethodno nabrojanih postoji i određeni broj mikroarmiranih kompozita visokih uporabnih svojstava koji se pored čeličnih koriste i drugim vrstama vlakana, ali u ovome radu nisu predmet razmatranja [4].

Jedan od glavnih ciljeva istraživanja i razvoja MAB VUS-a jest dobivanje što veće vlačne čvrstoće i duktilnosti dodavanjem velike količine vlakana. Na taj način, ovisno o vrsti i opterećenju konstrukcije, moguće je izvoditi konstruktivne elemente bez klasične armature isključivo s prednaprežanjem za preuzimanje primarnih vlačnih naprezanja, dok bi samo gradivo preuzimalo sekundarna vlačna naprezanja i ostala djelovanja na konstrukciju. Tako se postiže zanimljivo svojstvo da beton više nije samo tlačni element, koji treba armirati za preuzimanje vlačnih naprezanja, već postaje i vlačni element s povoljnim karakteristikama za preuzimanje određenih vlačnih naprezanja bez uporabe klasične armature, pa u nekim slučajevima čak i bez prednapinjanja. Budući da je za postizanje takvog ponašanja MAB VUS-a prvenstveno potrebno odabrati prikladnu vrstu vlakna, u ovom je radu eksperimentalno prikazan utjecaj vrste čeličnih vlakana (uključujući i hibridna vlakna) na svojstva MAB VUS-a pod nazivom beton od reaktivnog praška.

Pripremanje MAB VUS-a može se obavljati uobičajenim načinom kao i kod običnog betona, ali s manjim izmjenama u redoslijedu i duljini miješanja. Njegovanje ovog gradiva moguće je isto tako ostvariti uobičajenim postupkom, ali se vrlo često primjenjuje postupak toplinskog zaparivanja koji utječe na brže očvršćivanje, reduciranje skupljanja i puzanja te poboljšanje trajnosti. S obzirom na to da o načinu njegovanja direktno ovisi primjena (monolitna ili predgotovljena gradnja) MAB VUS-a, u ovom je radu razmatran i utjecaj načina njegovanja betona od reaktivnog praška na njegova mehanička svojstva.

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betona od reaktivnog praška uspoređeni su s istim vrijednostima dobivenim za beton visokih uporabnih svojstava i obični mikroarmirani beton. Svi eksperimentalno dobiveni rezultati su statistički analizirani uz uporabu jednoparametarskog modela analize varijance. Rezultati provedene analize pokazuju znatne prednosti kojima se odlikuje MAB VUS prema drugim ispitivanim vrstama betona.

2 Beton od reaktivnog praška

Beton od reaktivnog praška (*Reactive Powder Concrete-RPC*) jest MAB VUS koji je otkriven početkom devedesetih godina prošlog stoljeća. Uzimajući u obzir činjenicu da betoni od reaktivnog praška u svom sastavu uopće nemaju krupnog agregata može ih se nazvati i mortovima od reaktivnog praška. Betoni od reaktivnog praška posjeduju vrlo visoke tlačne čvrstoće (200-800 N/mm²), a za njih su karakteristične i izuzetno velike savojne čvrstoće (25-150 N/mm²). Kako su postignute tlačne čvrstoće u rasponu od 200 do 800 N/mm², tako su ovi betoni i dobili nazive RPC 200 i RPC 800. Poboljšanja koja su postignuta s RPC 800 u odnosu na RPC 200

posljedica su određenih promjena u sastavu mješavine, načinu pripremanja i njegovanja. Velika prednost RPC 200 jest da ga je moguće proizvoditi, ugraditi i njegovati koristeći se uobičajenim metodama kao kod običnog betona. [6, 7] Osnovne mehaničke karakteristike betona od reaktivnog praška prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Neke od mehaničkih karakteristika betona od reaktivnog praška [6, 7]

	RPC 200	RPC 800
tlačna čvrstoća [N/mm ²]	170-230	490-810
savojna čvrstoća [N/mm ²]	30-60	45-141
energija loma [J/m ²]	20 000 - 40 000	1 200 - 20 000
modul elastičnosti [GPa]	50-60	65-75

Beton od reaktivnog praška baziran je na principu da će materijal s minimumom defekata, kao što su mikropukotine i pore, biti sposoban ostvariti veći postotak potencijalne čvrstoće definirane njegovim visokokvalitetnim komponentama. U sastav tih betona ulaze cementi visokih čvrstoća, kvarcni pijesak, specijalni dodaci (superplastifikatori, silikatna prašina) i vlakna, koja su najčešće čelična. Prema tome, beton od reaktivnog praška sadrži čestice manje od 0,1 μm pa do približno 300-600 μm, kako bi se dobila što homogenija masa s minimalnim udjelom mikropora.

Razvoj RPC-a proveden je u smislu zadovoljenja nekoliko osnovnih principa:

- povećanje homogenosti eliminiranjem krupnog agregata,
- povećanje gustoće ugrađenog betona optimaliziranjem granulometrijskog sastava te primjenom pritiska prije i za ugradnje,
- poboljšanje mikrostrukture toplinskim tretiranjem ugrađenog betona,
- poboljšanje duktilnosti dodavanjem čeličnih vlakana,
- mogućnost proizvodnje u već postojećim pogonima [8].

Pridržavajući se prvih triju principa moguće je postići vrlo visoke tlačne čvrstoće, ali uz vlačne čvrstoće i duktilnost ne mnogo bolju od običnih betona. Međutim, dodavanjem vlakana poboljšava se vlačna čvrstoća, a postiže se i željeni stupanj duktilnosti.

Kod RPC-a se upotrebom superplastifikatora (reduciraju potrebu za vodom) i optimalizacijom granulometrijskog sastava u mješavini postiže smanjenje potrebne količine vode, znatno snižavanje vodovezivnog omjera (0,14-0,20), a time i reduciranje poroznosti betona. Ekstremno mala poroznost čini RPC gotovo nepropusnim materijalom te mu osigurava izvanredne karakteristike trajnosti.

Poboljšanja kojima se RPC odlikuje u odnosu prema običnom betonu mogu se svesti na sljedeće konstruktivne prednosti:

- vrlo visoka čvrstoća omogućuje smanjenje dimenzija konstruktivnih elemenata,
- velika duktilnost i sposobnost apsorpcije energije omogućava veću pouzdanost konstrukcija pri preopterećenju ili potresu,
- izvanredna savojna čvrstoća dopušta eliminiranje konvencionalne meke armature i daje veliku slobodu u konstruktivnom oblikovanju,
- povećana abrazivna otpornost daje dulji vijek trajanja kolničkih ploča mostova i industrijskih podova,
- vrlo malena poroznost pospješuje antikorozivnu otpornost te produžava vijek trajanja konstrukcija u nepovoljnim i kemijski agresivnim sredinama, a troškovi održavanja i sanacije građevina svedeni su na minimum,
- fina struktura materijala omogućava visokokvalitetnu obradu površina.

Prva konstrukcija napravljena od RPC-a je pješačko-biclistički most u Sherbrooku u Kanadi raspona 60 metara. Gradnja ovog mosta završena je u ljeto 1997. godine [9]. Nakon toga do danas su sagrađena još dva pješačka (Sakata Mirai Bridge u Japanu i Sunyudo Bridge u Koreji) i dva cestovna mosta (Bourg-Les-Valence Bridges u Francuskoj). [10, 11] Nosači od RPC-a korišteni su za nadograđivanje tornjeva za hlađenje u nuklearnoj elektrani Cattenon (Francuska) i za izradu krovne konstrukcije cementnog silosa u Illinoisu (SAD) [12]. Izvanredne mehaničke i trajnosne karakteristike RPC-a, velika sloboda u konstruktivnom oblikovanju i mogućost kvalitetne obrade površine omogućili su uporabu ovog gradiva za različite vrste konstruktivnih elemenata (podložne pločice za geotehnička sidra u Calgaryju (Kanada) i na La Reunion Islandu (Francuska), arhitektonski paneli u podzemnoj željeznici u Monacu (Francuska), konstrukcija željezničke stanice u Calgaryju (Kanada) te visoke skulpture pod nazivom Martel Tree u Francuskoj i slično) [10, 12].

Iskustva stečena u gradnji nekih od prethodno navedenih objekata te višegodišnje laboratorijska ispitivanja gradiva rezultirali su 2002. godine objavljivanjem prvih preporuka za projektiranje, proizvodnju i izgradnju konstrukcija od MAB VUS-a. [13]

3 Eksperimentalni rad

3.1 Cilj i program istraživanja

Ciljevi istraživanja su sljedeći:

- eksperimentalno postići vrijednosti tlačnih i savojnih čvrstoća na uzorcima od 170 i 30 MPa, koje su karakteristične za beton od reaktivnog praška,

- analizirati utjecaj vrste čeličnih vlakana na mehanička svojstva betona od reaktivnog praška,
- analizirati utjecaj načina njegovanja na mehanička svojstva betona od reaktivnog praška,
- usporediti dobivene rezultate s vrijednostima dobivenim za obični mikroarmirani beton i beton visokih uporabnih svojstava.

Na mješavinama se ispituju sljedeća svojstva prema navedenim normama ili preporučenim postupcima:

- određivanje gustoće, sadržaja zraka i temperature svježeg betona (HRN.B.C8.050),
- određivanje konzistencije svježeg betona prema preporučenom postupku [14],
- ispitivanje tlačne i savojne čvrstoće (HRN.B.C8.022),
- ispitivanje žilavosti (ASTM C 1018).

Rezultati ispitivanja obrađeni su uz uporabu jednoparametarskog modela analize varijance. [15] Glavni problem jednofaktorske analize varijance sastoji se u određivanju postupka za testiranje nulte-hipoteze

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m$$

$$\text{Vrijednost } v = \frac{s_1^2}{s_2^2} \text{ test statistike } V = \frac{S_1^2}{S_2^2} \sim F(m-1, n-m)$$

uzima se kao kriterij o donošenju odluke o prihvatanju ili odbijanju hipoteze H_0 . Hipoteza H_0 odbacuje se ako se dobije prevelika vrijednost za v , tj. ako se dobije

$$v \geq F_{m-1, n-m}^{-1}(1-\alpha),$$

gdje je α ($0 < \alpha < 1$) zadana razina značajnosti, a $F_{m-1, n-m}^{-1}$ inverzna funkcija od funkcije razdiobe vjerojatnosti za F -razdiobu sa $(m-1, n-m)$ stupnjeva slobode. Drugim riječima, ako vrijednost test-statistike v padne u kritično područje hipoteza H_0 se odbacuje.

Pri statističkoj obradi rezultata iz eksperimentalnog rada uzimana je vrijednost razine značajnosti od $\alpha = 0.05$, a opći oblik ANOVA tablice za rješavanje problema jednofaktorskog modela analize varijance prikazan je u tablici 3.

Ako se dobije negativno rješenje tj. neprihvatanje nulte-hipoteze H_0 ovog modela, tada se može reći da postoji značajna razlika između izmjerenih vrijednosti mehaničkih svojstava promatranih betonskih mješavina. Suprotno tome, u slučaju potvrde početne hipoteze može se ustvrditi da ne postoji značajna razlika između rezultata ispitivanja pojedinih betonskih mješavina.

Tablica 3. Opći oblik tablice za jednofaktorski model analize varijance

Izvor rasipanja	Broj stupnjeva slobode	Zbroj kvadrata odstupanja	Korigirana varijanca	Vrijednost test-statistike	Prilivacanje ili neprilivacanje hipoteze H_0
razlika među nizovima	m-1	$q_1 = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2$	$s_1^2 = \frac{1}{m-1} q_1$	$v = \frac{s_1^2}{s_2^2}$	
slučajna greška	n-m	$q_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$s_2^2 = \frac{1}{n-m} q_2$	Vrijednost $F_{m-1, n-m}^{-1}(1-\alpha)$	
ukupno	n-1	$q = q_1 + q_2$			

3.2 Upotrijebljeni materijali, receptura, način pripremanja i njegovanja uzoraka

Komponente za pripremanje betona od reaktivnog praška trebaju posjedovati vrlo kvalitetna svojstva. Osim toga, sastavne komponente za pripremanje ovog gradiva moraju biti međusobno kompatibilne, a što se posebno odnosi na odabrani cement i superplastifikator. U prethodnom istraživačkom radu [16], pronađene su sastavne komponente za beton od reaktivnog praška koje su dostupne na hrvatskom tržištu, a koje se u pogledu kvalitete mogu upotrijebiti za pripremanje ovog gradiva. Također, preliminarnim istraživanjima pronađena je i prikladna receptura za pripremanje betona od reaktivnog praška, pa je prema njoj i izvođen eksperimentalni rad [17, 18].

U eksperimentima je upotrijebljen cement PC 55 od hrvatskog proizvođača. Rabio se tekući superplastifikator na polikarboksilatnoj bazi, jer usporedbom s ostalim vrstama superplastifikatora najviše umanjuje potrebu za vodom, a što je bitno pri pripremanju betona s niskim vodovezivnim omjerom. Ispitivanjem svojstava silikatne prašine ustanovljeno je da je udio SiO_2 veći od 89%, te ima specifičnu površinu oko $20 \text{ m}^2/\text{g}$. Agregat uporabljen pri izradi uzoraka jest kvarcni pijesak s veličinom najvećeg zrna $0,5 \text{ mm}$.

U ispitivanjima su uporabljena dva različita tipa čeličnih vlakana visoke vlačne čvrstoće. Kraća ravna čelična vlakna su duljine 13 mm , promjera $0,2 \text{ mm}$ i imaju faktor oblika od 65. Minimalna vlačna čvrstoća ovih vlakana iznosi 2600 MPa . Dulja čelična vlakna izrađena su sa zakrivljenim krajevima i njihova duljina je 40 mm , a promjer $0,5 \text{ mm}$. Njihov faktor oblika jest 80. Minimalna vlačna čvrstoća ovih vlakana jest 2610 MPa . U ovom su radu upotrijebljena čelična vlakna visoke vlačne čvrstoće radi postizanja dostatne duktilnosti, jer je utvrđeno da postoji mogućnost sloma drukčijeg tipa čeličnih vlakana u visokokvalitetnoj betonskoj matrici [3]. U tablici 4. prikazani su sastavi ispitivanih mješavina betona od reaktivnog praška.

Mješavina se pripremila u prisilnoj laboratorijskoj miješalici maksimalnog volumena 100 litara .

Tablica 4. Sastav mješavina betona od reaktivnog praška

Sastav mješavina [kg/m^3]	Oznaka mješavina		
	RPC 1	RPC 2	RPC 3
cement PC 55	720	720	720
silikatna prašina	230	230	230
voda	170	170	170
čelična vlakna 40/0,5 mm	-	76	152
čelična vlakna 13/0,2 mm	190	190	-
kvarcni pijesak	1235	1235	1235
superplastifikator	24,5	28,5	24
vodovezivni omjer	0,18	0,18	0,18
omjer masa agregata i veziva	1,3	1,3	1,3
superplastifikator (% $m_{\text{cem+sf}}$)	2,6	3	2,5
čelična vlakna (vol %)	2,5	3,5	2

Mješavine betona od reaktivnog praška u svježem su stanju ugrađene u prizmatične kalupe dimenzija $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ (za ispitivanje tlačne i savojne čvrstoće) i $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ (za ispitivanje žilavosti).

Dio uzoraka njegovan je pod vodom do dana ispitivanja, tj. starosti od 28 dana. Drugi dio uzoraka je nakon 24 sata podvrgnut toplinskom tretmanu u trajanju od 24 sata na 80°C . Ovi uzorci u daljnjem tekstu osim oznake mješavine imaju i oznaku "tt", što znači da su bili izloženi toplinskom tretmanu. Potrebno je naglasiti da je prije i poslije toplinskog tretmana uzoraka izvršeno njihovo predgrijavanje i ohlađivanje u trajanju od po 3 sata kako ne bi došlo do raspucavanja uzoraka zbog nagle promjene temperature. Nakon završenog toplinskog tretmana i ovi su uzorci njegovani pod vodom do starosti od 28 dana. Svojstva betona od reaktivnog praška u svježem stanju prikazana su u tablici 5.

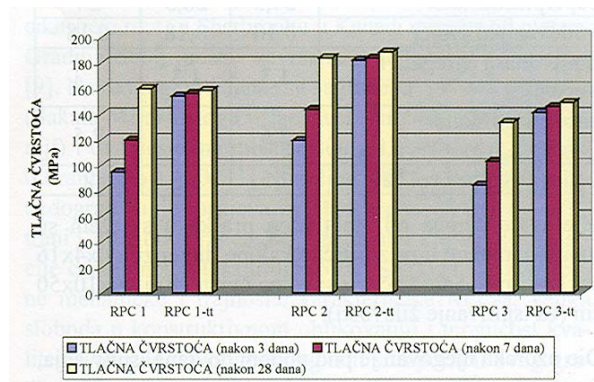
Tablica 5. Rezultati ispitivanja betona od reaktivnog praška u svježem stanju

Ispitivano svojstvo	Oznaka mješavine		
	RPC 1	RPC 2	RPC 3
konzistencija (mm)	160	160	160
sadržaj zraka (%)	4,4	4,6	5,5
temperatura ($^\circ\text{C}$)	27,5	28,6	27,8
gustoća (kg/m^3)	2366	2459	2309

3.3 Analiza rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće

Srednje vrijednosti i standardne devijacije od po 6 rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 3, 7 i 28 dana prikazani su u tablici 6. i na slici 2.

Usporedbom dobivenih rezultata ispitivanja tlačnih čvrstoća, na ispitivanim mješavinama može se uočiti da su najveće vrijednosti tlačne čvrstoće postignute kombinacijom čeličnih vlakana. Najveća postignuta tlačna čvrstoća nakon 28 dana iznosila je 188.5 MPa, a što se prema specificiranim mehaničkim karakteristikama u tablici 2. može svrstati u betone od reaktivnog praška. Postignute 28-dnevne tlačne čvrstoće kod mješavina s kratkim i dugim čeličnim vlaknima (oznake mješavina RPC 1 i RPC 3) bile su manje od 170 MPa, pa se ova gradiva prema istom kriteriju ne mogu okarakterizirati kao betoni od reaktivnog praška. Statističkom analizom dobivenih rezultata tlačnih čvrstoća utvrđeno je da postoji značajna razlika u dobivenim vrijednostima tlačnih čvrstoća među mješavinama s različitim vrstama čeličnih vlakna, i to u obadva slučaja njegovanja.



Slika 2. Dijagram vrijednosti dobivenih tlačnih čvrstoća za betone od reaktivnog praška nakon 3, 7 i 28 dana

Postoji nekoliko razloga zbog čega kod svih mješavina nisu postignute dostatne čvrstoće. Prvenstveno je potrebna daljnja optimalizacija međusobnog udjela cementa, silikatne prašine i kvarcnog pijeska da bi se omogućilo op-

timalno pakiranje. Nadalje, treba modificirati postupke pripremanja i toplinskog zavarivanja uzoraka. Međutim, proizvodnja svakog inovativnog gradiva susreće se s nekim od problema, stoga je razumljivo da je i ovdje potreban dugotrajniji istraživački rad kako bi se svi procesi proizvodnje, njegovanja i uporabe betona od reaktivnog praška optimalizirali.

Tlačne čvrstoće nakon 28 dana postignute s mješavinom RPC 1 veće su od istih rezultata dobivenih s mješavinom RPC 3, što se može protumačiti postojanjem većeg sučeljka između vlakana i cementne matrice u slučaju kada se rabe dulja čelična vlakna. Naime, poznato je da se površina sučeljka treba minimalizirati radi postizanja što boljih tlačnih čvrstoća betona u očvrslom stanju. Ova pretpostavka može se i provjeriti analizom mikrostrukture ispitivanih uzoraka pod elektronskim mikroskopom. Dakle, kratka čelična vlakna su sa stajališta rezultata postignutih tlačnih čvrstoća kod betona od reaktivnog praška pogodnija od duljih vlakana.

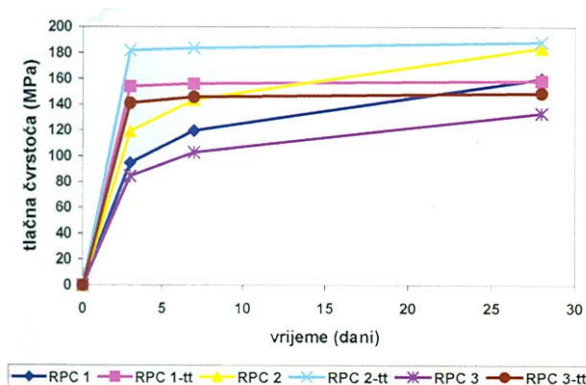
Potom pri određivanju tlačne čvrstoće kod uzoraka oznake RPC 3 u pojedinim je primjerima uočen vrlo eksplozivan tip sloma, za razliku od uzoraka s oznakama RPC 1 i RPC 2. Navedena činjenica također utječe na eliminiranje uporabe isključivo dugih čeličnih vlakana pri pripremanju ovog gradiva.

Uspoređujući prirast dobivenih rezultata tlačnih čvrstoća tokom vremena, može se reći da svi ispitivani uzorci posjeduju brži prirast tlačnih čvrstoća od običnih betona. To se može objasniti djelovanjem vrlo reaktivnih komponenata u sastavu ovih betona koje utječu na brži i rani prirast tlačnih čvrstoća.

Analizirajući dva različita načina njegovanja uzoraka, tj. s toplinskim tretmanom i bez njega, može se zaključiti da način njegovanja uzoraka utječe na prirast i na krajnju vrijednost dobivenih tlačnih čvrstoća. Toplinski tretman uzrokuje brži prirast tlačnih čvrstoća tako da uzorci na kojima je on proveden imaju poslije toga vrlo maleni porast tlačne čvrstoće, a što se vidi na slikama 2. i 3. Koначne vrijednosti tlačnih čvrstoća nakon 28 dana su u

Tablica 6. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona od reaktivnog praška

Oznaka mješavine	Tlačna čvrstoća nakon 3 dana [N/mm ²]		Tlačna čvrstoća nakon 7 dana [N/mm ²]		Tlačna čvrstoćanakon 28 dana [N/mm ²]	
	srednja vrijednost	standardna devijacija	srednja vrijednost	standardna devijacija	srednja vrijednost	standardna devijacija
RPC 1	94,7	9,3	119,8	6,6	160,0	7,3
RPC 1-tt	154,2	8,1	156,3	7,9	158,5	4,9
RPC 2	119,3	3,4	143,8	6,1	184,0	8,4
RPC 2-tt	182,1	7,8	183,9	7,7	188,5	7,4
RPC 3	84,4	10,0	102,9	8,0	133,3	8,7
RPC 3-tt	141,2	11,5	145,8	14,6	148,8	6,3



Slika 3. Prirast tlačne čvrstoće ispitivanih uzoraka betona od reaktivnog praška tokom vremena

slučaju toplinskog tretiranja uzoraka prema njegovanju u vodi veće kod mješavina s oznakama RPC 2 i RPC 3, a isto nije slučaj kod mješavina s oznakom RPC 1. Navedene razlike su vrlo malene, a ovisno o uzorku, iznose najviše do 10-ak%. S obzirom na to da toplinski tretman utječe na poboljšanje mikrostrukture uzoraka, a time i na kvalitetu sučeljka koji je pogotovo velik ako se koristimo čeličnim makrovlaknima, kao kod mješavina RPC 2 i RPC 3, razumljiv je ovakav rezultat krajnjih tlačnih čvrstoća ovisno o načinu njegovanja uzoraka. Statističkom obradom rezultata ispitivanja tlačnih čvrstoća uočeno je da samo u slučaju kada se rabe dulja čelična vlakna način njegovanja znatnije utječe na dobivene vrijednosti tlačnih čvrstoća.

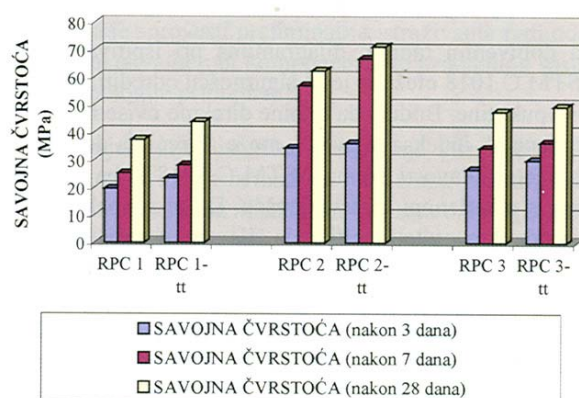
3.4 Analiza rezultata ispitivanja savojne čvrstoće

Srednje vrijednosti i standardne devijacije od po 3 rezultata ispitivanja savojne čvrstoće nakon 3, 7 i 28 dana prikazani su u tablici 7. i na slici 4.

Najveća postignuta savojna čvrstoća dobivena je na uzorcima s oznakom RPC 2 i iznosi 71,2 MPa. Dakle, uporabom hibridnih čeličnih vlakana postižu se bolje vrijednosti savojne čvrstoće nego u slučaju kada upotrebljavamo samo jednu vrstu čeličnih vlakana. Statistička obrada rezultata ispitivanja pokazala je da postoji značajna

razlika u savojnim čvrstoćama među mješavinama s različitim vrstama čeličnih vlakana, i to neovisno o načinu njegovanja uzoraka. Na svim ispitivanim uzorcima postignute savojne čvrstoće nakon 28 dana iznosile su više od 30 MPa, a što prema tablici 2. pripada kategoriji betona od reaktivnog praška. Daljnjom optimalizacijom uporabe različitih čeličnih vlakana ove se vrijednosti mogu još poboljšati.

Savojne čvrstoće nakon 28 dana postignute kod mješavine RPC 3 imale su veće vrijednosti nego isti rezultati kod mješavine RPC 1, što se može obrazložiti različitim faktorima oblika uporabljenih čeličnih vlakana. S obzirom na to da dulja čelična vlakna, koja su upotrebljena za mješavinu RPC 3, imaju veći faktor oblika od vlakana u mješavini RPC 1, razumljiv je ovakav rezultat.



Slika 4. Vrijednosti dobivenih savojnih čvrstoća betona od reaktivnog praška

Uspoređujući vrijednosti savojnih čvrstoća nakon 3, 7 i 28 dana ovisno o načinu njegovanja uzoraka. Očito je da svi uzorci imaju veću savojnu čvrstoću ako su bili izloženi toplinskom tretmanu. Stoga se može reći da tretman toplinskog zagrijavanja uzoraka poboljšava mikrostrukturu ovih gradiva, a time utječe i na povećanje prionljivosti matrice i vlakana, što djeluje povoljno na postizanje većih vrijednosti savojnih čvrstoća. Vrijednosti savojnih čvrstoća uzoraka koji su imali toplinski tretman

Tablica 7. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće betona od reaktivnog praška

Oznaka mješavine	Savojna čvrstoća nakon 3 dana (N/mm ²)		Savojna čvrstoća nakon 7 dana (N/mm ²)		Savojna čvrstoća nakon 28 dana (N/mm ²)	
	srednja vrijednost	standardna devijacija	srednja vrijednost	standardna devijacija	srednja vrijednost	standardna devijacija
RPC 1	19,6	3,7	25,2	4,5	37,3	3,1
RPC 1-tt	23,4	2,1	28,1	3,7	43,8	5,1
RPC 2	34,4	3,6	57,0	10,1	62,4	4,3
RPC 2-tt	36,1	2,9	66,8	1,0	71,2	3,0
RPC 3	26,6	4,8	34,3	3,9	47,5	7,4
RPC 3-tt	30,0	2,6	36,4	8,1	49,4	11,4

prema onima koji nisu veći su u prosjeku za 5 do 15%. Međutim, jednoparametarski model analize varijance pokazuje da značajnija razlika u vrijednostima savojnih čvrstoća mješavina pri različitim uvjetima njegovanja postoji samo ako se rabe hibridna čelična vlakna.

Za razliku od slučaja pri određivanju tlačnih čvrstoća, vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka nakon tretmana toplinskog zagrijavanja i dalje imaju značajan prirast do dana zadnjeg ispitivanja, to jest starosti uzoraka od 28 dana.

3.5 Analiza rezultata ispitivanja žilavosti

Ispitivanje žilavosti savijanjem izvršeno je u preši s kontroliranim pomakom u skladu s ASTM C 1018 pri starosti uzoraka od 90 dana, vidi [19], a obrada dobivenih rezultata obavljena je prema ASTM C 1018 i JCI-SF 4.

Na dobivenim radnim dijagramima pri ispitivanju po ASTM C 1018 otežano je sa sigurnošću odrediti pojavu prve pukotine. Budući da o tome direktno ovise rezultati izračunanih indeksa žilavosti, može se reći da dobivene parametre žilavosti prema ASTM C 1018 treba uzeti u obzir s određenom rezerviranošću. Da bi se ipak dobili mjerodavni rezultati ispitivanja žilavosti primijenjena je japanska norma JCI-SF 4, gdje računanje žilavosti ne ovisi u tolikoj mjeri o mjestu pojavljivanja prve pukotine u radnom dijagramu. Parametri žilavosti koji su računani prema JCI-SF 4 jesu žilavost T_b do progiba od 2 mm te faktor žilavosti $\bar{\sigma}_b$, a prikazani su u tablici 8.

Ovaj se princip, koji podrazumijeva ispitivanje po jednom standardu i usporedbu rezultata po drugom standardu, često rabi u znanstvenim radovima u ovom području. [20, 21]

Tablica 8. Rezultati ispitivanja žilavosti na uzorcima betona od reaktivnog praška

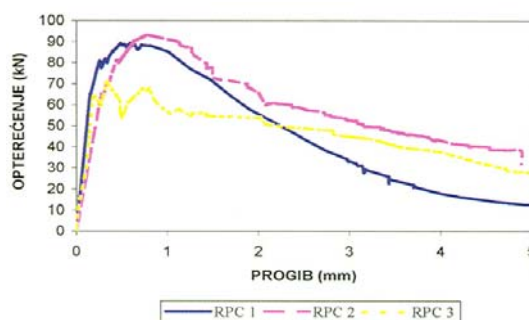
oznaka mješavine	broj uzorka	T_b (Nm)	\bar{T}_b (Nm)	$\bar{\sigma}_b$ (MPa)
RPC 1	1	143,692	107,743	20,451
	2	94,587		13,475
	3	84,951		13,550
RPC 2	1	97,811	125,602	14,114
	2	143,344		20,302
	3	135,650		19,136
RPC 3	1	82,003	84,910	11,637
	2	64,449		9,146
	3	108,279		15,380

U dijagramu na slici 6. vidi se da nakon pojave prve pukotine slijedi deformacijsko očvršćivanje uz višekratno raspucavanje, što rezultira povećanjem kapaciteta apsorbirane energije. Primjer višestrukog raspucavanja uzoraka pri ispitivanju žilavosti prikazan je na slici 5. Kod



Slika 5. Primjer višestrukog raspucavanja u srednjoj trećini raspona pri ispitivanju žilavosti savijanjem

pojedinih uzoraka mješavina RPC 1 i RPC 2 uočeno je da nakon pojave prve pukotine uzorci mogu nositi i do 40% veće opterećenje. Ovo nije bio slučaj sa svim uzorcima RPC 3 što je jedan od pokazatelja da se radi poboljšanja svojstava žilavosti betona od reaktivnog praška preporučuje uporabiti kombinaciju duljih i kraćih čeličnih vlakana velike vlačne čvrstoće, a ne isključivo čelična makrovlakna. Također, vrlo dobri rezultati ispitivanja



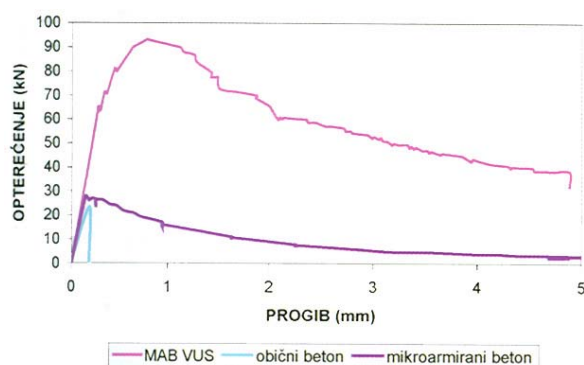
Slika 6. Reprezentativni dijagrami žilavosti dobiveni ispitivanjem žilavosti na uzorcima betona od reaktivnog praška

žilavosti postignuti su i upotrebom samo kratkih čeličnih vlakana, što se može objasniti postojanjem dobre prionljivosti između kratkih čeličnih vlakana i kompaktne, guste cementne matrice s malim maksimalnim zrnom agregata.

Rezultati usporedbe srednjih vrijednosti žilavosti prema JCI SF-4 u tablici 8. pokazuju prednost uporabe hibridnih čeličnih vlakana prema jednoj vrsti čeličnih vlakana. Statistička analiza ovih rezultata po jednoparametarskom modelu analize varijance nije pokazala postojanje značajnije razlike među ispitivanim mješavinama u pogledu žilavosti.

3.6 Usporedba RPC-a, mikroarmiranog betona i betona visokih uporabnih svojstava

Komparativne mješavine običnoga mikroarmiranog betona i betona visokih uporabnih svojstava pripremljene



Slika 7. Usporedba reprezentativnih dijagrama dobivenih pri ispitivanju žilavosti MAB VUS-a, BVUS-a i mikroarmiranog betona

su s istim komponentama, ali s razlikom što mikroarmirani beton u svom sastavu ima 1 vol.% (76 kg/m^3) čeličnih vlakana. Obadje mješavine pripravljene su sa 364 kg/m^3 cementa, količinom vode od 150 l/m^3 , $1,8 \text{ l/m}^3$ karboksilatnog superplastifikatora i $1799,5 \text{ kg/m}^3$ agregata (0-4 mm = 50%, 4-8 mm = 16%, 8-16 mm = 34%).

Svi su uzorci njegovani u laboratorijskim uvjetima do dana ispitivanja, kada su na njima određeni tlačna čvrstoća (HRN EN 12390-3), savojna čvrstoća (HRN EN 12390-5) i žilavost (ASTM C 1018, obrada rezultata po JCI-SF 4).

Tablica 9. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne i savojne čvrstoće, faktora žilavosti i žilavosti

Ispitivano gradivo	Tlačna čvrstoća (MPa)	Savojna čvrstoća (MPa)	Žilavost T_b (Nm)	Faktor žilavosti $\bar{\sigma}_b$ (MPa)
MAB VUS	188,5	71,2	125,6	17,9
BVUS	53	8,4	2,9	0,4
mikroarmiran i beton (1 vol.% čel. vlakana)	58,4	9,0	45,4	6,6

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 9., gdje su za komparaciju dani i rezultati dobiveni za mješavinu RPC

2-tt. U dijagramu na slici 7. prikazane su karakteristične krivulje gradiva dobivene pri ispitivanju žilavosti savijanjem.

Statistička analiza dobivenih rezultata ispitivanja MAB VUS-a, BVUS-a i mikroarmiranog betona pokazuje da među navedenim gradivima postoji značajna razlika što se tiče tlačne i savojne čvrstoće te žilavosti.

4 Zaključak

Mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava nova su tehnologija betona u svjetskom graditeljstvu. Nakon provedenoga eksperimentalnog rada u laboratoriju može se reći da je moguće postići mehanička svojstva karakteristična za beton od reaktivnog praška koristeći se komponentama sastava dostupnim na hrvatskom tržištu. Prije toga potrebno je sprovesti preliminarna istraživanja radi odabira visokokvalitetnih komponenata te prikladnog sastava i tehnologije pripremanja.

Analizirajući utjecaj načina njegovanja i vrste čeličnih vlakana na svojstva betona od reaktivnog praška može se reći da se najbolja mehanička svojstva dobivaju uporabom hibridnih čeličnih vlakana i njegovanjem postupkom toplinskog zaparivanja. Statističkom obradom dobivenih rezultata s pomoću jednoparametarskog modela analize varijance pokazano je da postoji značajna razlika među mješavinama betona od reaktivnog praška s različitim čeličnim vlaknima u pogledu tlačne i savojne čvrstoće, ali ne i što se tiče žilavosti, i to neovisno o načinu njegovanja uzoraka.

Statistička analiza dobivenih eksperimentalnih rezultata pokazuje da beton od reaktivnog praška posjeduje znatno bolja mehanička svojstva (tlačna i savojna čvrstoća, žilavost) od betona visokih uporabnih svojstava i običnog mikroarmiranog betona.

U nastavku istraživanja, koji je u tijeku, potrebno je sprovesti daljnje optimaliziranje sastava, strukture i tehnologije betona od reaktivnog praška radi dobivanja još boljih uporabnih svojstava.

LITERATURA

- [1] Petitjean, J.; Resplendino, J.: *French recommendations for Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes*, Proceeding of 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, Germany, 2002, 485-499
- [2] Nawy, E.: *Fundamentals of high-performance concrete*, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [3] Naaman, A. E.; Reinhardt, H. W.: *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC 2)*, Proceedings of the Second International RILEM Workshop «High Performance Fiber Reinforced Cement Composites», Ann Arbor, USA, E & FN Spon, 1996
- [4] Rossi, P.: *Ultra high performance fiber-reinforced concretes (UHPRC): an overview*, Proceedings of the Fifth International

- RILEM Symposium: Fiber-reinforced concrete (FRC), BEFIB 2000, Lyon, France, 2000, 87 – 100
- [5] Rossi, P.: *Development of new cement composite materials for construction*, Proceedings of the International Conference held at University of Dundee, Scotland, UK, 2002, 17-30
- [6] Cheyrezy, M.: *Structural applications of RPC*, FIP International Conference New Technologies in Structural Engineering, on CD, Lisbon, Portugal, 1997
- [7] Richard, P.; Cheyrezy, M.: *Composition of Reactive Powder Concretes*, Cement and Concrete Research, Vol. 25 (1995), No. 7, 1501-1511
- [8] Aitcin, P. C.: *High-Performance Concrete*, E&FN SPON, London, 1998
- [9] Aitcin, P. C.; Lachemi, M.; Adeline, R.; Richard, P.: *The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge*, Structural Engineering International, No. 2 (1998), 140-144
- [10] <http://www.taiheiyo-cement.co.jp/ductal/pdf/ductalall.pdf>
- [11] Simon, A.; Hajar, Z.; Lecointre, D.; Petitjean, J.: *Realization of two road bridges with Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, Proceeding of 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete , Leipzig, Germany, 2002, 753-768
- [12] Jovanovic, I.; Castagne, T.: *Ductal®-a New Generation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*, Proceeding of 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, Germany, 2002, 1089-1096
- [13] *Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, Interim Recommendations, AFGC/SETRA working group, 2002
- [14] Coppola, L.; Troli, R.; Collepardi, S.; Borsoi, A.; Cerulli, T.; Collepardi, M.: *Innovative Cementitious Materials: from HPC to RPC*. Part II. The Effect of Cement and Silica Fume Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete, L'Industria Italiana del Cemento, 707, Roma, Italia, 1996, 112-125
- [15] Pauše, Ž.: *Uvod u matematičku statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [16] Skazlić, M.: *Hibridni mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, magistrski rad na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003
- [17] Bjegović, D.; Skazlić, M.; Čandrlić, V.: *Croatian experience with RPC*, Proceeding of the 6th International Conference on Short & Medium Span Bridges, 2002., Vancouver, Canada, 355-362
- [18] Čandrlić, V.; Bjegović, D.; Skazlić, M.: *RPC Structures in Croatia*, Proceeding of the International Conference on Performance of Construction Materials In The New Millenium, Kairo, Egipat, 2003, 961-970
- [19] Šušterčić, J.: *Vlaknasti betoni visokih uporabnih svojstava*, doktorska disertacija na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1998
- [20] Banthia, N.; Bindiganavile, V.: *Repairing with Hybrid-Fiber-Reinforced Concrete*, Concrete International, 2001, 29 – 32
- [21] Banthia, N.; Yan, C.; Bindiganavile, V.: *Development and application of high performance hybrid fiber reinforced concrete*, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium: Fibre-reinforced concrete (FRC), BEFIB 2000, Lyon, France, 2000, 471-480