

Struktura i svojstva betona povećane tlačne čvrstoće

Marijan Skazlić, Dubravka Bjegović

Ključne riječi

svojstva betona,
beton visokih čvrstoća,
beton ultravisokih
čvrstoća,
projektiranje sastava,
razred tlačne čvrstoće,
trajnost

Key words

concrete properties,
high strength concrete,
ultra-high strength
concrete,
composition design,
compressive strength class,
durability

Mots clés

propriétés du béton,
béton à haute résistance,
béton à ultra haute
résistance,
étude de composition,
catégorie de la résistance
à la compression,
durabilité

Ключевые слова

свойства бетона,
бетон высоких прочностей,
бетон ультравысоких
прочностей,
проектирование
состава,
класс прочности на
сжатие, долговечность

Schlüsselworte

Betoneigenschaften,
Beton von hoher
Druckfestigkeit,
Beton von ultrahoher
Druckfestigkeit,
Entwurf der Zusammensetzung
Klasse der ruckfestigkeit
Dauerhaftigkeit

M. Skazlić, D. Bjegović

Izvorni znanstveni rad

Struktura i svojstva betona povećane tlačne čvrstoće

S obzirom na tlačne čvrstoće prikazana je podjela betona na obične, betone visokih i ultravisokih čvrstoća. Dana su pravila za projektiranje sastava i odabir sastavnih komponenti ovih betona. Prikazana su komparativna istraživanja svojstava i strukture betona normalnih čvrstoća, betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća. Dobiveni rezultati su statistički analizirani koristeći jednoparametarski model analize varijance i analizu varijance hijerarhijskih modela.

M. Skazlić, D. Bjegović

Original scientific paper

Structure and properties of high strength concrete varieties

The classification of concrete into normal concrete, high strength concrete and ultra-high strength concrete, as based on compressive strength values, is presented. The rules for designing composition and selecting components of these concrete types are given. Comparative studies of the properties and structure of the normal strength concrete, high strength concrete, and ultra-high strength concrete, are presented. The results obtained are analyzed statistically using the analysis of variance for the single parameter model and for hierarchical models.

M. Skazlić, D. Bjegović

Ouvrage scientifique original

Structure et propriétés des bétons à résistance élevée

La classification des bétons en béton normal, béton à haute résistance et béton à ultra haute résistance, basée sur les valeurs de la résistance à la compression, est présentée. Les règles pour la détermination de la composition et pour la sélection des composants de ces types de béton, sont fournies. Les études comparatives des propriétés et de la structure du béton normal, du béton à haute résistance et du béton à ultra haute résistance, sont présentées. Les résultats obtenus sont analysés statistiquement en utilisant l'analyse de la variance pour le modèle à un seul paramètre et pour les modèles hiérarchiques.

M. Сказлич, Д. Бегович

Оригинальная научная работа

Структура и свойства бетона повышенной прочности на сжатие

В работе, принимая во внимание прочность на сжатие, показано разделение бетонов на обычные, бетоны высоких и ультравысоких прочностей. Даны правила по проектированию состава и выбору компонент этих бетонов. Показаны сравнительные исследования свойств и структуры бетонов нормальных прочностей, бетонов высоких прочностей и бетонов ультравысоких прочностей. Полученные результаты статистически анализированы, используя однопараметрическую модель анализа дисперсии и анализ дисперсии иерархических моделей.

M. Skazlić, D. Bjegović

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Struktur und Eigenschaften des Betons von erhöhter Druckfestigkeit

Dargestellt ist die Aufteilung des Betons vom Blickpunkt der Druckfestigkeit auf gewöhnliche und Betone von hoher und ultrahoher Druckfestigkeit. Dargelegt sind Grundsätze für die Auswahl der Komponenten und die Zusammensetzung dieser Betone. Dargestellt sind komparative Untersuchungen der Eigenschaften und Struktur der Betone von normaler, hoher und ultrahoher Druckfestigkeit. Die erhaltenen Ergebnisse wurden statistisch analysiert, wobei man das einparametersche Modell der Varianzanalyse und die Varianzanalyse hierarchischer Modelle benutzte.

Autori: Doc. dr. sc. **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ.,
Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet, Kačićeva 26

1 Uvod

Beton je građevni materijal koji se najviše rabi i prema statističkim podacima na svakog stanovnika našeg planeta proizvede se više od 1 m³ betona na godinu [1]. Povećani zahtjevi za gradnjom novih, modernijih građevina i obnovom dotrajalih konstrukcija posljednjih su desetak godina doveli su do otkrića, razvoja i primjene novih vrsta betona. Razvoj novih vrsta betona može se ostvariti samo ako se na ispravan način povežu razvoj mikrostrukture betona, njegove tehnologije i uporabnih svojstava [2].

Prema novim je hrvatskim normama za beton tlačna čvrstoća okarakterizirana kao njegovo jedino osnovno svojstvo [3, 4]. Paralelno s uvođenjem novih hrvatskih norma i svrstavanjem betona u razrede tlačne čvrstoće regulirano je i pitanje granica između betona običnih čvrstoća, betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća.

Tako se danas pod betone običnih čvrstoća svrstavaju svi betoni do najvišega razreda tlačne čvrstoće C50/60. Razredi tlačnih čvrstoća koji odgovaraju betonima visokih čvrstoća su od C55/67 pa do C100/115. Najviši razred tlačne čvrstoće prema hrvatskom propisu za betonske konstrukcije jest C100/115. Betoni s vrijednostima tlačne čvrstoće većima od razreda tlačne čvrstoće C100/115 ubrajaju se u betone ultravisokih čvrstoća [3, 4].

Betoni ultravisokih čvrstoća dobiveni su krajem prošlog stoljeća modificiranjem nekih postojećih pravila za projektiranje sastava i odabir sastavnih materijala. Ova vrsta betona ima karakteristične tlačne čvrstoće u pojedinim slučajevima i veće od 200 MPa, ali uz to posjeduje i znatno poboljšano vlažno ponašanje, krutost i trajnost u odnosu prema drugim vrstama betona [5, 6].

Betoni ultravisokih čvrstoća u posljednjih su nekoliko godina razvijeni i u Hrvatskoj te je o njima već objavljeno više radova [6, 7, 8].

Prve preporuke za proizvodnju, projektiranje, građenje i ocjenu sukladnosti betona ultravisokih čvrstoća objavljene su 2002. u Francuskoj [9]. Nakon njih isto su učinili i Japanci [10], a tijekom ove godine izaći će i nje-mačke preporuke za ovu vrstu betona.

Međutim, stručnjaci i znanstvenici u zemljama gdje se istražuje i primjenjuje beton ultravisokih čvrstoća ne slažu se u dosta pitanja vezanih uz ovu vrstu betona. Zbog toga je FIB formirao radnu grupu 8.6 pod nazivom *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPFRC) glavni zadatak koje je donošenje jedinstvenih propisa za betone ultravisokih čvrstoća.

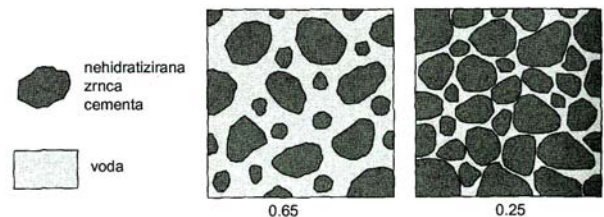
Za dobivanje betona visokih i betona ultravisokih čvrstoća potrebno je pridržavati se posebnih pravila za projektiranje sastava i odabir sastavnih komponenata, a koji

kod betona običnih čvrstoća ne moraju biti potpuno zadovoljeni. U ovom radu je dan prikaz glavnih načela kojima treba udovoljiti kako bi se dobili betoni visokih čvrstoća i betoni ultravisokih čvrstoća.

S obzirom na to da je prema novim hrvatskim normama tlačna čvrstoća okarakterizirana kao glavni parametar betona u radu su eksperimentalno istraživana mehanička svojstva, ali i trajnost te struktura betona različitih tlačnih čvrstoća. Eksperimentalni rad je proveden na uzorcima betona običnih čvrstoća, betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća. Treba naglasiti da eksperimentalno istraživanje betona ultravisokih čvrstoća nije provedeno na betonu s maksimalno mogućim vrijednostima čvrstoća (> 200 MPa), već na betonu s nešto manjim tlačnim čvrstoćama, ali koji su uz to ekonomski bitno povoljniji.

Dobiveni su rezultati iz eksperimentalnog rada statistički analizirani uporabom jednoparametarskoga modela analize varijance i analize varijance hijerarhijskih modela.

Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da se s porastom vrijednosti tlačnih čvrstoća betona poboljšane mikrostrukture poboljšavaju i druga njegova svojstva – mehanička, trajnost te struktura građiva.



Slika 1. Slikovit prikaz dviju mješavina svježeg betona s različitim vodocementnim faktorima: 0,65 i 0,25 [11]

2 Pravila za projektiranje sastava i odabir sastavnih komponenata

Za postizanje većih vrijednosti tlačnih čvrstoća potrebna je posebna pažnja pri izboru i kompatibilnosti sastojaka (cement, agregat, mineralni i kemijski dodaci, vlakna) i tehnologiji betona (proizvodnja, ugradnja, njega, transport, kontrola kvalitete). Iz tih je razloga projektiranje sastava i proizvodnja betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća složeniji posao od istog postupka kod običnog betona [6, 11, 12].

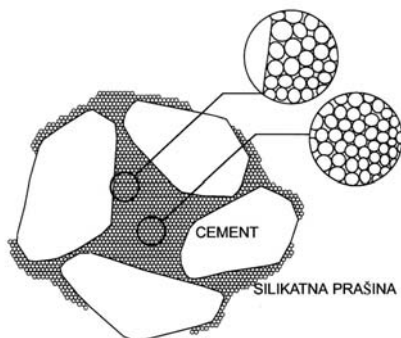
Tlačna se čvrstoća betona povećava uporabom kvalitetnih sastavnih komponenata, povećanjem broja kontakata između čestica, homogeniziranjem građiva te reduciranjem poroznosti i defekata unutar strukture.

Povećanje broja kontakata među česticama i homogeniziranje betona moguće je ostvariti uporabom veće količine veziva, reduciranjem vodovezivnog omjera, smanji-

vanjem ukupne količine agregata i veličine najvećega zrna agregata.

Smanjenje poroznosti postiže se uporabom niskoga vodovezivnog omjera i uporabom superplastifikatora, ali uz uvjet da se osigura dostatna obradljivost u svježem stanju te zamjenom dijela cementa pucolanskim dodacima. Dodatkom znatno manje količine vode u sastavu nego kod običnog betona smanjuje se razmak između zrnaca cementa i mineralnih dodataka u svježem stanju (slika 1.). Na taj se način smanjuje i kapilarna poroznost, a mnogo je manji i prostor koji moraju popuniti produkti hidratacije [6, 11, 12].

Smanjenje vodovezivnog omjera i upotreba mineralnih dodataka pozitivno utječu i na poboljšanje sučeljka cementnog kamena i agregata, kao najslabije karike u strukturi betona. Najbolji je dodatak cementu silikatna prašina koja sa vrlo malim zrcima (10-ak puta manjim od zrna cementa) i velikom specifičnom ploštinom utječe na povećanje obujma koji okružuje cementne čestice te radi veće reaktivnosti i na ubrzanu hidrataciju (slika 2.). Osim toga silikatna prašina reagira sa slobodnim vaponom, najlošijim sastojkom cementa, stvarajući pritom CSH gel [6, 11, 12].



Slika 2. Progušćivanje strukture betona popunjavanjem prostora između cementnih zrnaca dodatkom silikatne prašine [11]

Povećanjem vrijednosti tlačnih čvrstoća betona raste i njegova krhkost. Ova se pojava može riješiti dodatkom vlakana u sastav betona. Glavni razlog uporabe vlakana u slaboj, krhkoj matrici jest poboljšanje duktilnosti cementne matrice. Intenzitet poboljšanja svojstava zbog mikroarmiranja vlaknima varira ovisno o količini i vrsti dodanih vlakana, prionljivosti vlakana i cementne matrice te kvaliteti same cementne matrice [6].

Da bi se dobili betoni ultravisokih čvrstoća, čije su tlačne čvrstoće veće od 150 MPa, potrebno je, osim prethodno nabrojenog, držati se i sljedećih osnovnih načela:

- povećanja homogenosti eliminiranjem krupnog agregata
- povećanja gustoće ugrađenog betona optimaliziranjem granulometrijskog sastava tako da se postigne najveće pakiranje čestica

- poboljšanja mikrostrukture toplinskim tretiranjem ugrađenog betona
- količina vode u betonu maksimalno se smanjuje pa tako njezina količina nije dovoljna za hidrataciju cementa; ovo načelo dovodi do toga da se smanjuje količina slobodne vode koja isušivanjem može dovesti do stvaranja mikropukotina, nehidratizirani se cement ponaša kao reaktivni mikroagregat visokog modula elastičnosti koji može naknadno hidratizirati
- poboljšanja duktilnosti dodavanjem veće količine vlakana [13].

Tablica 1. Sastavi betonskih mješavina

Komponente sastava (kg/m ³)	OZNAKA MJEŠAVINE		
	NSC	HSC	UHSC
Cement 30dz 45S	350	400	-
Cement PC 55	-	-	600
Silikatna prašina	-	30	59
Sitni agregat (riječni)	961,7	918,5	-
Krupni agregat (riječni)	887,8	882,5	-
Sitni agregat (dijabaz)	-	-	943,5
Krupni agregat (dijabaz)	-	-	647,6
Voda	190	150,5	145
Superplastifikator	-	3	5,2
Čelična vlakna 30/0,8 mm, zakrivljeni krajevi	-	-	67
Čelična vlakna 60/1,0 mm, zakrivljeni krajevi	-	-	33
Vodovezivni omjer	0,54	0,35	0,22
Najveće zrno agregata (mm)	32	16	11
Omjer mase agregata i mase veziva	5,3	4,2	2,4
Količina silikatne prašine (% m _{cem})	-	7,5	9,8
Količina superplastifikatora (% m _{cem+sil})	-	0,7	0,8

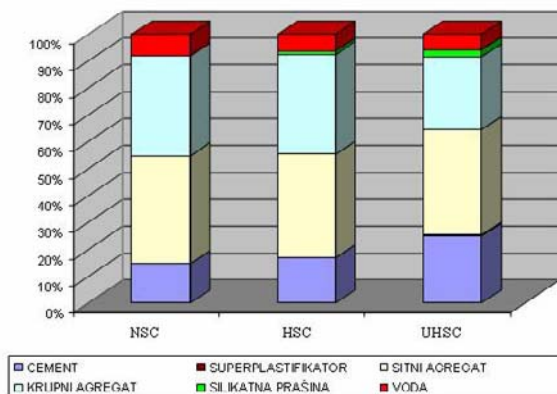
3 Eksperimentalni rad

3.1 Program istraživanja

Istraživanje je provedeno na 3 različite betonske mješavine. Sastavi mješavina prikazani su u tablici 1. i na slici 3. Svaka se pojedina mješavina pripremljala po tri puta, da bi se pokazala ponovljivost rezultata ispitivanja pojedinih svojstava.

Sastav mješavina odabran je na temelju prethodnih istraživanja da bi se postigle tlačne čvrstoće karakteristične za betone običnih čvrstoća, betone visokih čvrstoća i betone ultravisokih čvrstoća. S obzirom na to da povećanjem tlačne čvrstoće betona raste njegova krhkost, u mješavinu betona ultravisokih čvrstoća dodana su i čelična vlakna.

Sve su se mješavine pripremale u betonskoj miješalici najvećega obujma 70 litara. Uzorci su zbijani na vibrostolu frekvencije 150 Hz. Do dana ispitivanja uzorci su njegovani u vodi temperature $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Slika 3. Grafički prikaz sastava betonskih mješavina

3.2 Karakteristična svojstva materijala upotrijebljenih za pripremu betonskih mješavina

3.2.1 Cement

Tablica 2. Mineraloški sastavi cementa

Cement	Udio minerala (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
PC 30dz 45S	37,7	12,2	11,1	13,4
PC 55	70,7	3,5	8,2	9,1

U eksperimentalnom su radu upotrijebljene dvije vrste cementa. Cement PC 30 dz 45 S uporabljen je za pripremu mješavina NSC i HSC, a cement PC 55 je upotrijebljen za pripremu mješavine UHSC. Rezultati proračuna mineraloških sastava prema Bogueu na osnovi rezultata

kemijske analize dani su u tablici 2., a rezultati ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava cementa su prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička i fizikalna svojstva cementa

Svojstvo	Metoda ispitivanja	Vrsta cementa	
		PC 30dz 45S	PC 55
Čvrstoća na savijanje (nakon 28 dana)	HRN EN 196-1	8,1 MPa	9,0 MPa
Tlačna čvrstoća (nakon 28 dana)	HRN EN 196-1	42,0 MPa	59,9 MPa
Gustoća	ASTM C-188	2,87 g/cm ³	3,12 g/cm ³
Specifična ploština	HRN EN 196-6	4086 cm ² /g	5030 cm ² /g
Voda potrebna za standardnu konzistenciju	HRN EN 196-3	27,6% mase	30,0% mase
Početak/kraj vezivanja	HRN EN 196-3	260/330 min	180/250 min

3.2.2 Silikatna prašina

U eksperimentalnom radu je iskorištena silikatna prašina u suhom obliku pakirana u vreće. Ispitivanjima su utvrđene njezine sljedeće karakteristike:

- gustoća 2,22 g/cm³
- specifična ploština 18 595 cm²/g
- sadržaj ukupnog SiO₂ 93,02 %

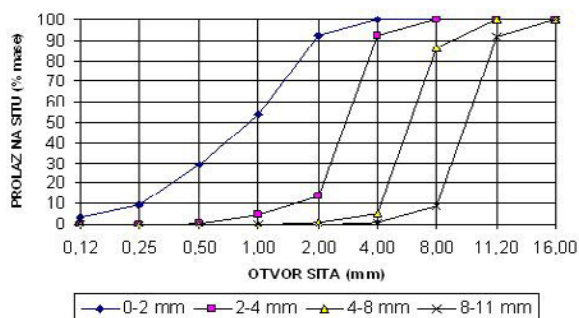
3.2.3 Superplastifikator

Upotrijebljen je superplastifikator na osnovi karboksil akrilnih estera. To je tekućina smeđe boje topljiva u vodi.

Tablica 4. Ispitivanje utjecaja dodatka superplastifikatora na svojstva cementne paste i morta

Svojstvo	Mjerna jedinica	Metoda ispitivanja	Etalon	Dodatak superplastifikatora u odnosu na masu cementa (% mase)	
				0,5	1,0
Standardna konzistencija	%	HRN.B.C8.023	24,8	20,5	19,7
Smanjenje vode pri istom razastiranju standardnog morta	ml	HRN.B.C8.042	225	199	189
Sadržaj zraka u svježem mortu	% vol.	HRN.B.C8.050	6,5	6,3	4,5
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana	MPa	HRN.B.C8.022	49,1	46,5	48,2
Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana	MPa	HRN.B.C8.022	8,4	5,8	5,2

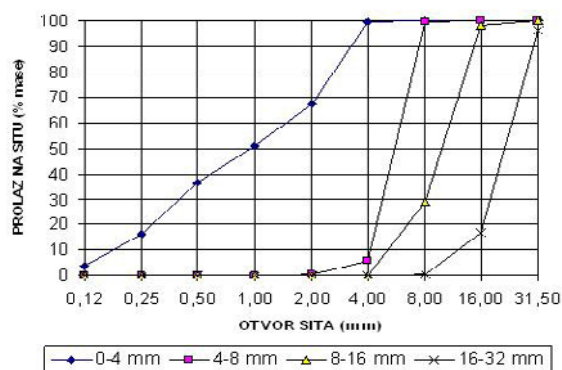
Volumenska masa u tekućem stanju prema HRN.U.M1.039 jest $1,066 \text{ g/cm}^3$. Ispitane karakteristike superplastifikatora prikazane su u tablici 4.



Slika 4. Granulometrijski dijagrami frakcija drobljenog agregata

3.2.4 Agregat

U eksperimentalnom istraživanju korištene su dvije različite vrste agregata. Eruptivni drobljeni agregat (dijabaz) je upotrijebljen za mješavinu UHSC, a riječni agregat za mješavine NSC i HSC. Svojstva agregata prikazana su u tablici 5., a krivulje prosijavanja na slikama 4. i 5.



Slika 5. Granulometrijski dijagrami frakcija riječnog agregata

Tablica 5. Ispitana svojstva riječnog i drobljenog agregata

Vrsta agregata i frakcija [mm]	Svojstvo			
	Volum. masa [kg/m^3]	Apsorpcija vode [% mase]	Oblik zrna	Sadržaj sitnih čestica [% mase]
riječni, 0-4	2670	1,1	-	2,65
riječni, 4-8	2700	1,8	0,24	0,04
riječni, 8-16	2680	1,4	0,27	0,02
riječni, 16-31,5	2690	0,6	0,31	-
drobljeni 0-2	2670	2,5	-	9,2
drobljeni 2-4	2650	1,6	-	2,0
drobljeni 4-8	2660	1,2	0,25	0,05
drobljeni 8-11	2680	1,1	0,22	0,02

3.2.5 Vlakna

U eksperimentalnom su radu upotrijebljene dvije vrste čeličnih vlakana. Njihov je proizvođač Fibrin, a svojstva su im dana u tablici 6.

Tablica 6. Karakteristike upotrijebljenih vlakana

Ispitivano svojstvo	Vlakna sa zakrivljenim krajevima 30/0,8 mm	Vlakna sa zakrivljenim krajevima 60/1,0 mm
Duljina vlakna (mm)	30 ± 3	60 ± 5
Dimenzija poprečnog presjeka (mm)	$0,8 \pm 0,05$	$1 \pm 0,1$
Koeficijent oblika	38	60
Vlačna čvrstoća (MPa)	1398	1096

3.2.6 Voda

U eksperimentima je upotrijebljena pitka voda iz vodovoda.

3.3 Ciljevi istraživanja

Ciljevi istraživanja su sljedeći:

- postizanje tlačnih čvrstoća karakterističnih za obične betone, betone visokih čvrstoća i betone ultravisokih čvrstoća
- usporedba mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti između običnih betona, betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća
- usporedba strukture između običnih betona, betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća
- analiza strukture betona povećane tlačne čvrstoće i njezina utjecaja na njegova trajnosna svojstva.

3.4 Metode istraživanja

Na mješavinama su ispitana sljedeća svojstva u svježem stanju:

- konzistencija slijeganjem (HRN EN 12350-2)
- sadržaj zraka (HRN EN 12350-7)
- temperatura
- gustoća (HRN EN 12350-6)

Ispitana su sljedeća svojstva u očvrnulom stanju:

- tlačna čvrstoća (HRN EN 12390-3)
- čvrstoća na savijanje (HRN EN 12390-5)
- statički modul elastičnosti (HRN.U.M1.025)
- dinamički modul elastičnosti (HRN.U.M1.026)
- plinopropusnost (EN 993-4)
- kapilarno upijanje vode (HRN.U.M8.300)
- difuzija iona klora (ASTM C 1202)
- analiza strukture *scanning* elektronskim mikroskopom.

Sva ispitivanja, osim analize strukture SEM elektronskim mikroskopom, provedena su u laboratoriju Zavoda za gradiva na Građevinskom fakultetu u Zagrebu.

3.5 Metode statističke obrade podataka

Statistička obrada rezultata ispitivanja izvršena je uz pomoć jednoparametarskog modela analize varijance (ANOVA) i analize varijance hijerarhijskih modela.

3.5.1 Analiza varijance (ANOVA)

Kod analize varijance polazi se od pretpostavke da su uzorci iz populacije uzeti slučajnim odabirom, da su pogreške međusobno neovisne i da imaju normalnu razdiobu s istim, odnosno homogenim varijancama.

Ako se uzme da se uzorak sastoji od više skupina, tada svaka skupina može imati različiti broj varijanata. Postavlja se nulta hipoteza da te skupine pripadaju istome uzorku. Pritom se može promatrati varijabilnost između skupina i varijabilnost unutar skupina preko odgovarajućih varijanci. U ovome eksperimentalnom radu uzorak, tj. ispitivano svojstvo mješavine sastoji se od tri skupine jer se svaka mješavina pripremala tri puta. Pri tome svaka skupina ima proizvoljni broj varijanata, tj. rezultata ispitivanja nekog svojstva.

Ako je varijanca između skupina jednaka varijanci unutar skupina, može se pouzdano zaključiti da skupine imaju istu razdiobu odnosno da pripadaju istom uzorku, a to znači da postoji ponovljivost rezultata ispitivanja.

Ako je varijanca između skupina značajno veća od varijance unutar skupina, tada skupine ne pripadaju istoj distribuciji, odnosno istome uzorku.

Provesti analizu varijance znači računski definirati ukupnu varijabilnost uzorka, podijeliti je na varijabilnost unutar skupina i varijabilnost između skupina i testirati hipotezu da skupine pripadaju istom uzorku, odnosno da se njihove prosječne vrijednosti ne razlikuju znatno. Varijabilnosti se brojačno izražavaju preko varijanci.

Nulta se hipoteza (H_0) o varijancama može testirati s pomoću F-testa. Proračun analize varijance započinje izračunavanjem eksperimentalnog F-faktora kao odnosa varijanci između skupina i unutar skupina:

$$F_{\text{exp}} = \frac{s^2 \text{ između skupina}}{s^2 \text{ unutar skupina}}$$

Tablični F-faktor (F_{tabl}) očitava se iz tablica za slobodne varijante dviju pripadajućih varijanci uz odabranu vjerojatnost pogreške od 0,05.

Usporedbom F_{exp} i F_{tabl} donosi se odluka o prihvatanju ili odbacivanju hipoteze da skupine pripadaju istom uzorku.

Ako je $F_{\text{exp}} < F_{\text{tabl}}$ prihvaća se nulta hipoteza H_0 . Zaključuje se da skupine pripadaju istoj distribuciji, odnosno istom uzorku. Na taj se način dokazuje da postoji ponovljivost između rezultata ispitivanja nekog svojstva promatrane mješavine.

Ako je $F_{\text{exp}} > F_{\text{tabl}}$ odbacuje se nulta hipoteza H_0 . Zaključuje se da skupine ne pripadaju istoj distribuciji, odnosno istom uzorku. U ovome slučaju ne postoji ponovljivost između rezultata ispitivanja nekog svojstva promatrane mješavine. Odbacivanje nulte hipoteze H_0 , odnosno zaključak da skupine ne pripadaju istom uzorku, ne mora značiti da se sve skupine međusobno razlikuju, ali to svakako znači da su bar dvije značajno različite [14].

3.5.2 Analiza varijance hijerarhijskih modela

Ako se pretpostavi da se uzorak sastoji od više skupina, tada svaka skupina može imati više podskupina, a svaka podskupina svoje podskupine itd. U tom slučaju govori se o tzv. hijerarhijskim modelima. Iako hijerarhijska struktura može ići proizvoljno u dubinu, u ovome se radu razmatra slučaj da se uzorak sastoji od više skupina, svaka skupina od više podskupina, a svaka podskupina ima različit broj varijanata. Pritom se pod skupinom podrazumijeva određena mješavina betona (NSC, HSC ili UHSC). S obzirom na to da je svaka mješavina priređena po tri puta, svaki od ta tri pokusa čini podgrupu, a svaka podskupina ima varijante, tj. rezultate ispitivanja određenog svojstva.

U tom slučaju postavljaju se dvije nulte hipoteze. Prva je da skupine pripadaju istom uzorku, a druga se hipoteza odnosi na to da podskupine u skupinama pripadaju istom uzorku. Može se promatrati varijabilnost između skupina, varijabilnost između podskupina i varijabilnost unutar podskupina preko odgovarajućih varijanci.

Ako je varijanca između skupina jednaka varijanci između podskupina, može se pouzdano zaključiti da skupine imaju istu razdiobu odnosno da pripadaju istom uzorku. Ako je varijanca između podskupina jednaka varijanci unutar podskupina, može se pouzdano zaključiti da podskupine imaju istu razdiobu odnosno da pripadaju istom uzorku.

Ako je varijanca između skupina značajno veća od varijance između podskupina, tada skupine ne pripadaju istoj distribuciji, odnosno istom uzorku. Ako je varijanca između podskupina značajno veća od varijance unutar podskupina, tada podskupine ne pripadaju istoj distribuciji, odnosno istom uzorku.

Provesti analizu varijance znači računski definirati ukupnu varijabilnost uzorka, raščlaniti je na varijabilnost između skupina, varijabilnost između podskupina, te varijabilnost unutar podskupina i testirati hipoteze da skupine pripadaju istom uzorku, odnosno da podskupine pripadaju istom uzorku. Varijabilnosti se brojačno izražavaju preko varijanci.

Provjera nulte hipoteze (H_0) o varijancama testira se s pomoću F-testa. Postupak analize varijance hijerarhijskih modela započinje izračunavanjem eksperimentalnih F-faktora:

$$F_{exp1} = \frac{s^2 \text{ izmedju skupina}}{s^2 \text{ izmedju podskupina}}$$

$$F_{exp2} = \frac{s^2 \text{ izmedju podskupina}}{s^2 \text{ unutar podskupina}}$$

Tablični F-faktor (F_{tab1}) očitava se iz tablica za slobodne varijante dviju pripadajućih varijanci uz odabranu vjerojatnost pogreške od 0,05.

Usporedbom F_{exp} i F_{tab1} donosi se odluka o prihvatanju ili odbacivanju hipoteze da skupine, odnosno podskupine pripadaju istomu uzorku.

Ako je $F_{exp1} < F_{tab1}$ zaključuje se da skupine pripadaju istoj distribuciji, odnosno istomu uzorku, odnosno da između skupina nema znatnih razlika. To znači da među analiziranim mješavinama ne postoji znatna razlika što se tiče ispitivanog svojstva.

Ako je $F_{exp2} < F_{tab2}$ zaključuje se da podskupine pripadaju istoj distribuciji, odnosno istomu uzorku, odnosno da između podskupina nema znatnih razlika.

Ako je $F_{exp1} > F_{tab1}$ zaključuje se da skupine ne pripadaju istoj distribuciji, odnosno istomu uzorku, odnosno da između skupina ima znatnih razlika. To znači da među promatranim mješavinama postoji znatna razlika što se tiče ispitivanog svojstva.

Ako je $F_{exp2} > F_{tab2}$ zaključuje se da podskupine ne pripadaju istoj distribuciji, odnosno istomu uzorku, odnosno da između podskupina postoje znatne razlike.

Odbacivanje prve nulte hipoteze, odnosno zaključak da skupine ne pripadaju istomu uzorku, ne mora značiti da se sve skupine međusobno razlikuju, ali to svakako znači da su bar dvije signifikantno različite.

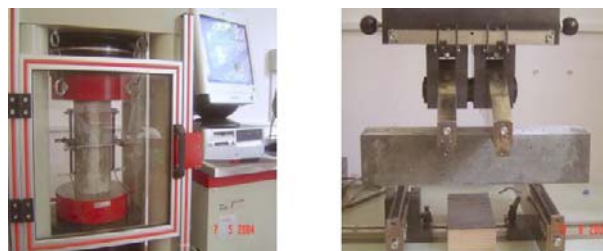
Odbacivanje druge nulte hipoteze, odnosno zaključak da podskupine skupine ne pripadaju istomu uzorku, ne mora značiti da se sve podskupine međusobno razlikuju, ali to svakako znači da su bar dvije signifikantno različite. [15, 16]

3.6 Analiza rezultata ispitivanja mješavina u svježem stanju

U tablici 7. prikazana su svojstva mješavina u svježem stanju. Sve mješavine su u svježem stanju imale plastičnu konzistenciju. Može se uočiti da s povećanjem tlačne čvrstoće betona raste i njegova gustoća u svježem stanju.

Tablica 7. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja svojstava u svježem stanju

Ispitivano svojstvo	Mjerna jedinica	Oznaka mješavine		
		NSC	HSC	UHSC
Konzistencija slijeganjem	cm	6	10	10
Sadržaj zraka	%	1,9	2,5	2
Temperatura	°C	21	23,5	27
Gustoća	g/cm ³	2,34	2,42	2,52



Slika 6. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti (lijevo) i čvrstoće na savijanje (desno)

3.7 Analiza rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava u očvrslom stanju

Dobiveni rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća i čvrstoća na savijanje prikazani su u tablici 8., a rezultati ispitivanja statičkog i dinamičkog modula elastičnosti u tablici 9.

Provedene statističke analize rezultata ispitivanja mješavina NSC, HSC i UHSC jednoparametarskim modelom analize varijance pokazuju da za sve mješavine postoji ponovljivost rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i statičkog modula elastičnosti.

Rezultati statističke analize varijance hijerarhijskih modela pokazuju da među mješavinama NSC, HSC i UHSC postoji znatna razlika tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i statičkog modula elastičnosti.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje; tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje za svaku su mješavinu ispitane na ukupno 9 uzoraka

Oznaka mješavine	TLAČNA ČVRSTOĆA		ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE	
	Srednja vrijednost (MPa)	Standardna devijacija (MPa)	Srednja vrijednost (MPa)	Standardna devijacija (MPa)
NSC	39,8	3,6	5,5	0,5
HSC	70,5	4,2	7,1	0,6
UHSC	141,7	7,0	13,3	1,2

Tablica 9. Rezultati ispitivanja statičkog i dinamičkog modula elastičnosti, statički je modul elastičnosti za svaku mješavinu ispitan na 9 uzoraka, a dinamički modul elastičnosti na 3 uzorka

Oznaka mješavine	Statički modul elastičnosti		Dinamički modul elastičnosti	
	Srednja vrijednost (GPa)	Standardna devijacija (GPa)	Srednja vrijednost (GPa)	Standardna devijacija (GPa)
NSC	29,2	2,6	36,4	1,0
HSC	34,4	2,3	40,8	1,9
UHSC	40,8	1,5	55,7	1,1

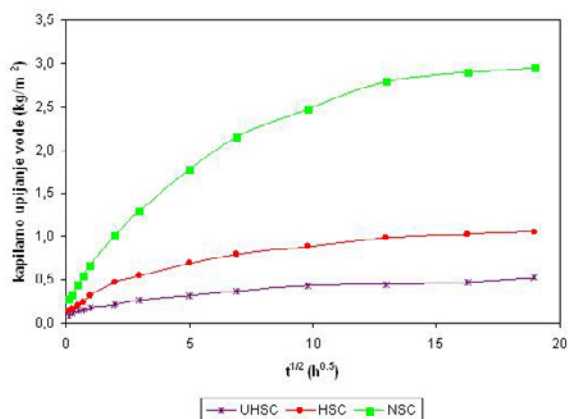
3.8 Analiza rezultata ispitivanja trajnosti u očvrslom stanju

Dobiveni rezultati ispitivanja koeficijenta plinopropusnosti, koeficijenta kapilarnog upijanja vode i difuzije iona klora prikazani su u tablici 10.

Dijagrami ispitivanja kapilarnog upijanja vode za sve mješavine prikazani su na slici 8. Vidljivo je da betoni veće tlačne čvrstoće imaju manje kapilarno upijanje vode.



Slika 7. Ispitivanje difuzije iona klorida (lijevo) i plinopropusnosti (desno)



Slika 8. Dijagrami srednjih vrijednosti ispitivanja kapilarnog upijanja vode

Analiza rezultata ispitivanja koeficijenta plinopropusnosti, prema [17], pokazuje da mješavina običnog betona NSC ima veliku plinopropusnost, mješavina betona visokih čvrstoća HSC ima srednju plinopropusnost, a

mješavina betona ultravisokih čvrstoća UHSC ima malu plinopropusnost.

Ocjena rezultata ispitivanja difuzije iona klorida prema tablici 11. pokazuje da obični beton ima umjerenu propusnost za ione klorida, a betoni visokih i ultravisokih čvrstoća imaju vrlo malu propusnost za ione klorida.

Tablica 10. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja koeficijenta plinopropusnosti, koeficijenta kapilarnog upijanja vode i difuzije iona klorida

Oznaka mješavine	Koeficijent plinopropusnosti (m ²)	Koeficijent kapilarnog upijanja vode (kg/m ² ·h ^{1/2})	Difuzija iona klorida (Coulomb)
NSC	3,4·10 ⁻¹⁶	0,354	3 937
HSC	1,3·10 ⁻¹⁷	0,138	766
UHSC	1,3·10 ⁻¹⁸	0,06	416

Tablica 11. Ocjena rezultata ispitivanja difuzije klorida po ASTM C 1202

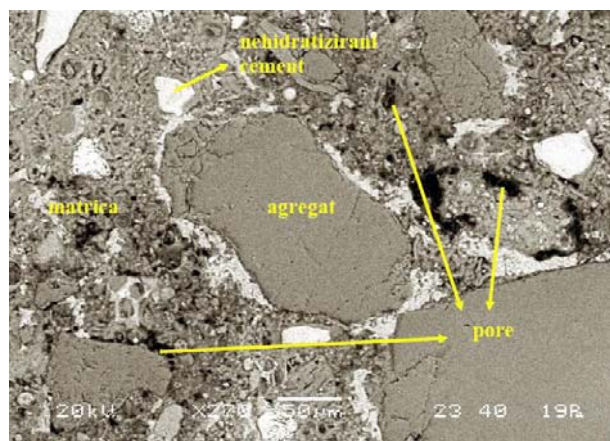
Difuzija iona klorida (Coulomb)	>4000	2000-4000	1000-2000	100-1000	<100
Propusnost iona klorida	visoka	umjerena	mala	vrlo mala	neznatna



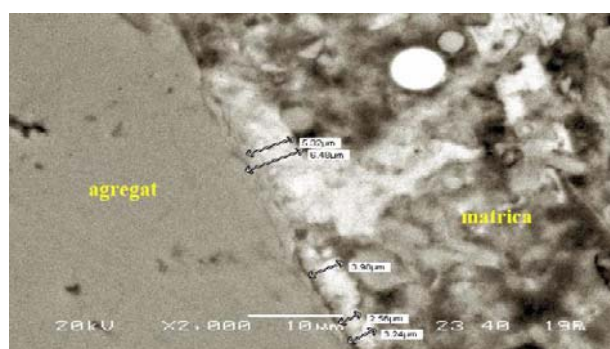
Slika 9. Analiza mikrostrukture betona scanning elektronskim mikroskopom

3.9 Analiza rezultata ispitivanja strukture scanning elektronskim mikroskopom (SEM)

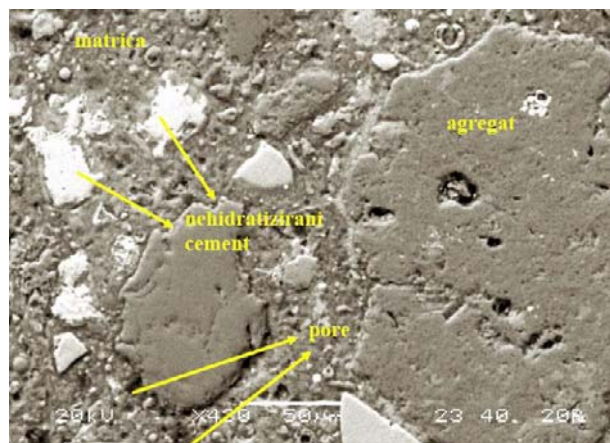
Analiza strukture betonskih mješavina scanning elektronskim mikroskopom (SEM) provedena je na uzorcima dimenzija 4 x 4 x 1 cm. Na slici 9. prikazan je način ispitivanja scanning elektronskim mikroskopom.



Slika 10. Izgled strukture na uzorku mješavine NSC

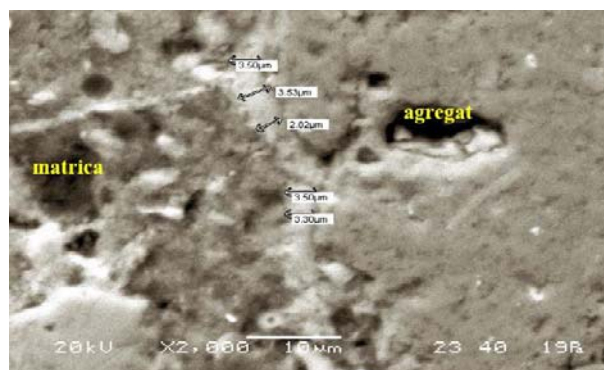


Slika 11. Sučeljak agregata i cementnog kamena na uzorku mješavine NSC

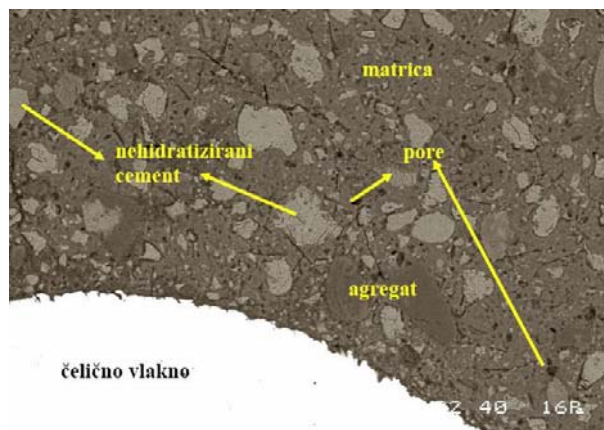


Slika 12. Izgled strukture na uzorku mješavine HSC

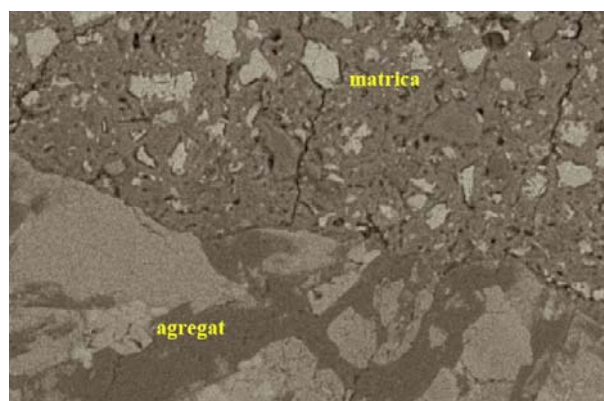
Na slikama 10. do 15. dane su neke od karakterističnih snimaka strukture betona NSC, HSC i UHSC. Pri tome su mikroskopske snimke na slikama 10., 12. i 14. s manjim povećanjem, pa se vidi veći dio strukture ispitivanih betona. Na slikama 11., 13. i 15. prikazane su mikroskopske snimke sučeljka agregata i cementnog kamena. Kod mješavine UHSC uočava se manja količina i broj kapilarnih pora nego kod mješavina HSC i NSC. Sučeljak agregata i cementnog kamena kvalitetniji je kod betona UHSC nego kod HSC i NSC. Za razliku od toga



Slika 13. Sučeljak agregata i cementnog kamena na uzorku mješavine HSC



Slika 14. Izgled strukture na uzorku mješavine UHSC



Slika 15. Sučeljak agregata i cementnog kamena na uzorku mješavine UHSC

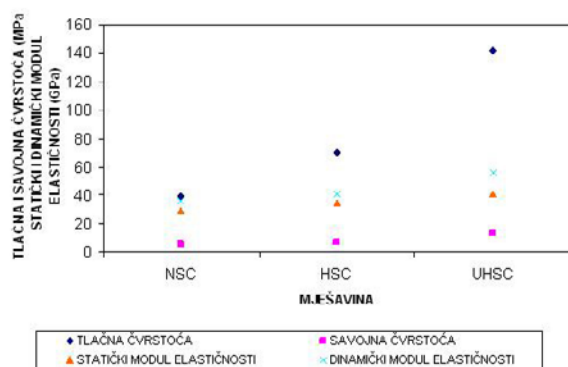
kod mješavina NSC i HSC sučeljak agregata i cementnog kamena razlikuje se po slabijoj kvaliteti i većoj propusnosti od ostatka strukture. Na slikama 11. i 13. prikazane su dimenzije sučeljka agregata i cementnog kamena za mješavine NSC i HSC.

Analizom mikrostrukture vidljivo je i da UHSC ima veću količinu nehidratiziranog cementa od drugih ispitivanih betona. Prionljivost je čeličnih vlakana i matrice u mješavini UHSC dobra jer se analizom strukture sučelj-

ka čeličnih vlakana i matrice vidi da on ne sadrži zrnca nehidratiziranog cementa, nije porozan i ispunjen je gustom i kvalitetnom cementnom matricom.

3.10 Analiza utjecaja povećanja tlačne čvrstoće betona na njegovu strukturu, mehanička svojstva i trajnost

U eksperimentalnom radu uspoređivane su mješavine betona običnih čvrstoća (NSC), betona visokih čvrstoća (HSC) i betona ultravisokih čvrstoća (UHSC).

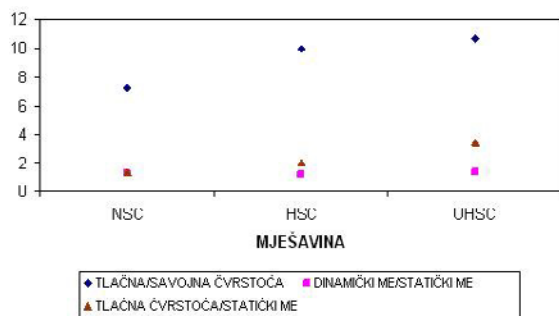


Slika 16. Usporedba rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava

Rezultati statističke analize varijance hijerarhijskih modela pokazuju da među ispitivanim mješavinama NSC, HSC i UHSC postoji znatna razlika u tlačnoj čvrstoći, čvrstoći na savijanje i statičkom modulu elastičnosti (slika 16.). Na taj se način dokazuje da povećanjem razreda tlačne čvrstoće betona ne samo što znatno rastu vrijednosti tlačnih čvrstoća, već se znatnije povećavaju čvrstoće na savijanje i statički moduli elastičnosti. Analiza varijance (ANOVA) pokazuje da među mješavinama postoji ponovljivost rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava.

Dobiveni rezultati pokazuju i da povećanjem vrijednosti tlačnih čvrstoća, zbog homogenije strukture tih betona, rastu i njihovi dinamički moduli elastičnosti (slika 16.).

Usporedbom odnosa pojedinih ispitanih mehaničkih svojstava (slika 17.) može se reći da se s porastom vrijednosti



Slika 17. Odnosi pojedinih mehaničkih svojstava za mješavine NSC, HSC i UHSC

tlačnih čvrstoća betona povećava i omjer između tlačne čvrstoće betona i njegove čvrstoće na savijanje. Ovaj je rezultat dobiven čak i u slučaju kada su kod mješavine UHSC upotrijebljena čelična vlakna koja djeluju na povećanje čvrstoće na savijanje, pa prema tome i na smanjenje omjera između tlačne i čvrstoće na savijanje.

Porastom tlačne čvrstoće betona dobiva se i veći omjer između tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti. Ovim se pokazuje da porast vrijednosti tlačne čvrstoće nije popraćen sa znatnijim povećanjem krutosti betona.

Bez obzira na vrijednost tlačne čvrstoće, svi ispitivani betoni imaju približno isti omjer između dinamičkog i statičkog modula elastičnosti.

Rezultati ispitivanja svojstava trajnosti betona prikazani u tablici 10. pokazuju da povećanje tlačne čvrstoće betona utječe i na poboljšavanje njegove trajnosti. Iz tog je razloga razumljivo zašto se betoni visokih čvrstoća ili betoni ultravisokih čvrstoća ponekad nazivaju i betonima visokih uporabnih svojstava.

Dodatno pojašnjenje dobivenih rezultata mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti razmatranih mješavina može se dobiti uvidom u njihovu strukturu s pomoću *scanning* elektronskog mikroskopa. Betonima veće tlačne čvrstoće zbog svoga specifičnog sastava imaju znatno homogeniju strukturu. Povećanjem tlačne čvrstoće betona bitno se smanjuje njegova ukupna poroznost te količina i broj kapilarnih pora.

Nadalje, porastom tlačne čvrstoće betona poboljšava se i kvaliteta sučeljka agregata i matrice. Tako su kod betona visokih čvrstoća (HSC) i betona ultravisokih čvrstoća (UHSC) sučeljci agregata i matrice bitno kvalitetniji nego kod betona običnih čvrstoća (NSC) i nisu slaba karika u strukturi betona. Najbolji sučeljak agregata i matrice ima beton UHSC. Analiza mikrostrukture sučeljka agregata i matrice betona UHSC pokazuje da on ne sadrži zrnca nehidratiziranog cementa, nije porozan i ispunjen je gustom i kvalitetnom cementnom matricom. Za razliku od toga kod mješavine NSC sučeljak agregata i cementnog kamena razlikuje se po slabijoj kvaliteti i većoj propusnosti od ostatka strukture.

Analizom strukture vidi se i da betoni veće tlačne čvrstoće radi smanjenja vodovezivnog omjera imaju veću količinu nehidratiziranog cementa, ali on ne utječe negativno na njihova mehanička svojstva i svojstva trajnosti.

4 Zaključak

Prema novim hrvatskim normama za beton, tlačna je čvrstoća okarakterizirana kao njegovo jedino osnovno svojstvo. Prema vrijednostima tlačnih čvrstoća betoni se mogu podijeliti na obične betone, betone visokih čvrstoća i betone ultravisokih čvrstoća.

U eksperimentalnom su se radu ispitivala mehanička svojstva i svojstva trajnosti te je analizirana struktura betona običnih čvrstoća (obični beton), betona visokih čvrstoća i betona ultravisokih čvrstoća.

Statistička analiza dobivenih rezultata ispitivanja jedno-parametarskim modelom analize varijance pokazuje da među mješavinama postoji ponovljivost rezultata ispitivanja tlačne i čvrstoće na savijanje te modula elastičnosti.

Statističkom analizom rezultata hijerarhijskim modelom analize varijance utvrđeno je da porast tlačne čvrstoće betona utječe, osim bitnog poboljšanja tlačne čvrstoće, i na znatnije povećanje vrijednosti čvrstoće na savijanje i modula elastičnosti.

Porastom vrijednosti tlačne čvrstoće betona povećava se omjer između tlačne i čvrstoće na savijanje te omjer iz

među tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti betona. Za razliku od toga vrijednost tlačne čvrstoće betona ne utječe bitnije na omjer vrijednosti između dinamičkog i statičkog modula elastičnosti.

Rezultati ispitivanja svojstava trajnosti betona pokazuju da povećanje tlačne čvrstoće betona utječe i na poboljšavanje njegove trajnosti. Zbog toga se betoni visokih čvrstoća i betoni ultravisokih čvrstoća ponekad nazivaju i betonima visokih uporabnih svojstava.

Analizom strukture utvrđeno je da betoni veće tlačne čvrstoće imaju znatno homogeniju strukturu, s manje pora i defekata te s poboljšanim sučeljkom između agregata i matrice.

LITERATURA

- [1] Bjegović, D.: *From Durable Material Towards Structural Durability*, Proceeding of the International Symposium Durability and Maintenance of Concrete Structures, Dubrovnik, Croatia, 2004., 19-30
- [2] Skazlić, M.; Bjegović, D.: *Perspectives of designing with new concrete types*, Annual 2005 of the Croatian Academy of Engineering, Zagreb, 2005., 167.-178.
- [3] *Priručnik za betonske konstrukcije*, Zbornik radova sa Prvih hrvatskih dana betona, Cavtat, 2005., 1.-820.
- [4] *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, Zbornik radova sa Prvih hrvatskih dana betona, Secon HDGK, Cavtat, 2005., 821.-868.
- [5] Walraven, J.: *Designing with ultra high strength concrete: basics, potential and perspectives*, International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Germany, 2004., 853-864
- [6] Skazlić, M.: *Mikroarmirani predgotovljeni elementi sekundarne tunelske obloge*, disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [7] Skazlić, M.: *Hibridni mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2003.
- [8] Skazlić, M.; Bjegović, D.; Mrakovčić, S.: *Mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, Građevinar 56 (2004) 2, 69.-78.
- [9] *Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, Interim Recommendations, AFGC/SETRA working group, 2002
- [10] *JSCE Recommendations for Design and Construction of Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures (UFC)*, Japanese Society of Civil Engineers, 2004
- [11] Aitcin, P. C.: *High-Performance Concrete*, E&FN SPON, London, 1998
- [12] Nawy, E.: *Fundamentals of high-performance concrete*, Second edition, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2001.
- [13] Richard P., Cheyrezy, M.: *Composition of Reactive Powder Concretes*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, 1995, 1501-1511
- [14] Pauše, Ž.: *Uvod u matematičku statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [15] Triola, M. F.: *Elementary statistic*, The Benjamin/Comings Publishing Company, New York, 1989
- [16] Steel, R. G. D., Torrie, J. H.: *Principles and Procedures of Statistics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1960
- [17] Ukrainczyk, V., Bjegović, D.: *Ispitivanje gradiva u sustavu osiguranja trajnosti betonskih konstrukcija*, Građevni godišnjak, HDGI, Zagreb, 1994., 210-285