

Primljen / Received: 9.6.2015.
 Ispravljen / Corrected: 16.3.2016.
 Prihvaćen / Accepted: 27.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.5.2016.

Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona

Autori:



Petar Matulić, dipl.ing.građ.
 INSTITUT IGH d.d. – RC Split
petar.matulic@igh.hr



Prof.dr.sc. **Sandra Juradin**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Splitu
 Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
sandra.juradin@gradst.hr



Dr.sc. **Elica Marušić**, dipl.ing.građ.
 INSTITUT IGH d.d. – RC Split
elica.marusic@igh.hr



Ante Domazet, dipl.ing.građ.
 INSTITUT IGH d.d. – RC Split
antundomazet@gmail.com

Stručni rad

Petar Matulić, Sandra Juradin, Elica Marušić, Ante Domazet

Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona

U radu su opisana laboratorijska ispitivanja uzoraka mlaznog betona ugrađivanog u primarni podgradni sustav tunela Sveti Ilija. Promatran je utjecaj dimenzija ispitnih uzoraka mlaznog betona na tlačnu čvrstoću i dinamički modul elastičnosti običnog i mikroarmiranog betona izrađenog in situ. Pregledom dobivenih rezultata analizirana je i opravdanost procjene tlačne čvrstoće na temelju rezultata dinamičkog modula elastičnosti.

Ključne riječi:

mlazni beton, tlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti, visina ispitnog uzorka

Professional paper

Petar Matulić, Sandra Juradin, Elica Marušić, Ante Domazet

Effect of test specimen size on mechanical properties of shotcrete

Laboratory testing of shotcrete installed in the primary support system of the Sveti Ilija Tunnel is described in the paper. The effect of the size of shotcrete specimens on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of the plain concrete and fibre reinforced concrete produced in-situ is analysed. The results are used to analyse suitability of estimating compressive strength based on the dynamic modulus of elasticity results.

Key words:

shotcrete, compressive strength, dynamic modulus of elasticity, size of test specimen

Fachbericht

Petar Matulić, Sandra Juradin, Elica Marušić, Ante Domazet

Einfluss der Probengröße auf die mechanischen Eigenschaften von Spritzbeton

In dieser Arbeit werden Laborversuche an Proben des in das primäre Unterbausystem des Tunnels Sv. Ilija eingebauten Spritzbetons beschrieben. Dabei wird der Einfluss der Dimensionen von Versuchsproben des Spritzbetons auf die Druckfestigkeit und das dynamische Elastizitätsmodul für herkömmlichen und mikroarmierten in situ hergestellten Beton betrachtet. Anhand der gegebenen Resultate wurde auch die Rechtfertigung von Abschätzungen der Druckfestigkeit aufgrund ermittelter Werte des dynamischen Elastizitätsmoduls analysiert.

Schlüsselwörter:

Spritzbeton, Druckfestigkeit, dynamisches Elastizitätsmodul, Höhe der Versuchsprobe

1. Uvod

Budući da se ispitivanje tlačne čvrstoće očvrstlog betona provodi prema normi HRN EN 12390-3 [1] na vodom zasićenim uzorcima oblika kocke brida 15 cm, ili valjka promjera 15 cm i visine 30 cm, postavlja se pitanje što s tlačnom čvrstoćom uzoraka koji svojim dimenzijama odstupaju od onih standardnih. Naime, ispitni uzorci različitih dimenzija izrađeni od istog betona imaju različite tlačne čvrstoće [2-5]. U tim se slučajevima primjenjuju koeficijenti pomoću kojih se postojeća čvrstoća uzoraka svodi na čvrstoću uzoraka standardnih dimenzija. Cilj ovog rada je analizirati utjecaj različitih dimenzija uzoraka običnog i mikroarmiranog mlaznog betona na tlačnu čvrstoću i dinamički modul elastičnosti te usporediti odnose tlačne čvrstoće uzoraka različitih dimenzija dobivene ispitivanjem mlaznog betona s odnosima koji vrijede za normalni beton. Analizirana je veza tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti, odnosno mogućnost procjene vrijednosti tlačne čvrstoće mlaznog betona na temelju rezultata mjerenja dinamičkog modula elastičnosti. Ovakav način procjene čvrstoće betona u praksi je vrlo praktičan jer se dinamički modul određuje ultrazvučnim uređajem koji je jednostavan za upotrebu i lako prenosiv.

Problematika utjecaja veličine uzoraka na mehanička svojstva betona kroz povijest je bila tema brojnih istraživanja, a prva je proveo Gonnerman 1920. godine [6] ispitujući tlačnu čvrstoću valjaka dimenzija 3,8 x 7,6 cm te 15 x 30 cm, ovisno o vodocementnom omjeru. Ispitivanjima je došao do zaključka da uzorci manjih dimenzija imaju veću tlačnu čvrstoću u odnosu na uzorke većih dimenzija.

Harris i White [7] ispitivali su valjke različitih visina i promjera kako bi utvrdili utjecaj veličine uzorka na tlačnu čvrstoću betona. Rezultati ovog istraživanja pokazali su da tlačna čvrstoća uzoraka opada s povećanjem njihovih dimenzija. Uzorci manjih dimenzija su, osim većih vrijednosti tlačne čvrstoće, imali i brži prirast čvrstoće.

Pang i Tsui [8, 9] su utjecaj veličine uzorka promatrali na betonima izrađenim s cementom visoke početne čvrstoće i s pet različitih frakcija kvarcnog pijeska. Valjci su bili dimenzija 2,5 x 5 cm te 15 x 30 cm. Zaključili su da se s povećanjem dimenzija uzorka smanjuje tlačna čvrstoća, kao i standardna devijacija čvrstoće.

Nevilleova istraživanja [4, 10, 11] također pokazuju da se sa smanjenjem veličine uzorka povećava tlačna čvrstoća i njena standardna devijacija. Čvrstoću betona (P) prikazao je u funkciji volumena uzorka (V), promjera uzorka (d) te odnosa h/d , gdje je h visina uzorka. Utjecaj ostalih faktora na čvrstoću betona nije uzimao u obzir budući da za njih nisu postojali značajniji eksperimentalni podaci.

Autor je pokušao uspostaviti odnos tlačne čvrstoće uzorka proizvoljnih dimenzija i kocke dimenzije 6 inča (15 cm). Korišteni podaci o betonu rezultat su eksperimentalnih radova dvanaest različitih istraživača. Odnos tlačne čvrstoće uzorka i kocke stranice 15 cm dan je relacijom:

$$\frac{P}{P_0} = 0,56 + 0,697 \left(\frac{d}{\frac{V}{6h} + h} \right) \quad (1)$$

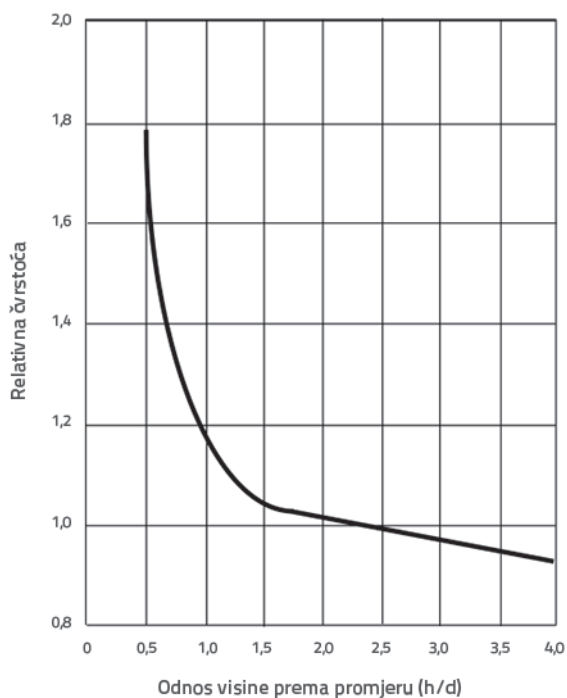
gdje se h i d zadaju u inčima, a V u kubnim inčima.

Ispitivanja Bureau of Reclamation [12] pokazala su da povećanje dimenzija uzoraka iznad određene veličine više ne utječe na tlačnu čvrstoću. Rezultat njihovog istraživanja bio je i to da je opadanje čvrstoće s povećanjem dimenzija uzoraka manje izraženo kod mršavih betona.

Prema Griffithu [13], s povećanjem veličine ispitnog uzorka povećava se vjerojatnost pojave najslabije karike u njemu. Lom dolazi uslijed nastanka najveće mikropukotine koja je posljedica koncentracije napreznja pri djelovanju opterećenja. Ako pukotinu promatramo kao lokalni defekt u materijalu, onda je s obzirom na strukturu betona, statistički gledano, pojavu pukotine opravdano prije očekivati u uzorcima većih dimenzija, što rezultira njihovom manjom čvrstoćom.

Krolo [14] je ispitivao utjecaj nehomogenosti betona na osnovne parametre mehanike loma na uzorcima betona kod kojih se mijenjala čvrstoća, maksimalno zrno agregata i veličina uzorka. Između ostalog, autor je zaključio da vrijednosti parametara mehanike loma ovise o geometriji uzorka.

Na tlačnu čvrstoću betona utječe i trenje [3] koje se javlja između ispitnih ploča i uzoraka. Trenjem se sprječava bočno širenje uzorka što rezultira većim tlačnim čvrstoćama betona. Utjecaj dimenzija valjaka na čvrstoću betona prikazan je na slici 1.



Slika 1. Utjecaj odnosa visine i promjera ispitnog valjka na relativnu čvrstoću [4]

Uzorcima kod kojih je odnos visine i promjera baze valjka $h/d < 1,5$, čvrstoća naglo raste sa smanjenjem tog odnosa, dok kod uzoraka s $h/d > 1,5$, s povećanjem odnosa h/d čvrstoća naglo opada zbog utjecaja vitkosti. Bitno je naglasiti da u području odnosa h/d od 1,5 do 2,5 čvrstoća betona odstupa od čvrstoće valjka standardnih dimenzija samo 5 %.

Day [15] je proveo opsežna ispitivanja utjecaja veličine i materijala kalupa na tlačnu čvrstoću betona. Promjeri ispitnih valjaka bili su 7,5, 10 i 15 cm uz omjer $h/d = 2,0$ kod svih uzoraka. Kalupi su bili od kartona i plastike. Prosječna čvrstoća na uzorcima iz 15 cm plastičnih kalupa bila je za približno 1,4 MPa manja u odnosu na druge tipove kalupa. Uzorci promjera 7,5 cm, bilo iz kartonskog ili plastičnog kalupa, u prosjeku su imali za približno 1 MPa veću čvrstoću u odnosu na uzorke iz većih kalupa.

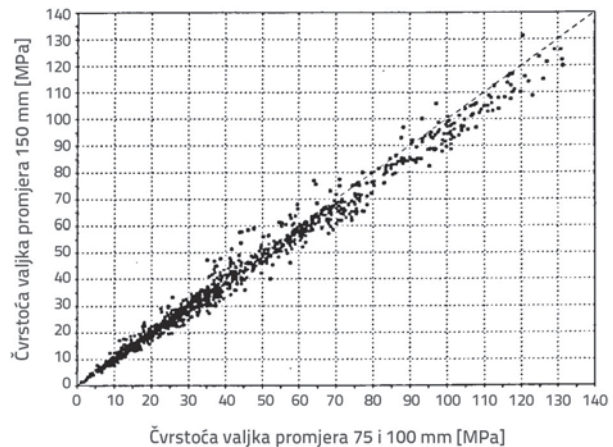
Isti autor je u [16] obradio više od 8000 rezultata čvrstoće te je prikazao i veze između čvrstoće valjka promjera 100 (f_{100}) i 150 mm (f_{150}) koje su dobili drugi autori (tablica 1.).

Tablica 1. Veza f_{100} i f_{150} prema podacima iz literature [16]

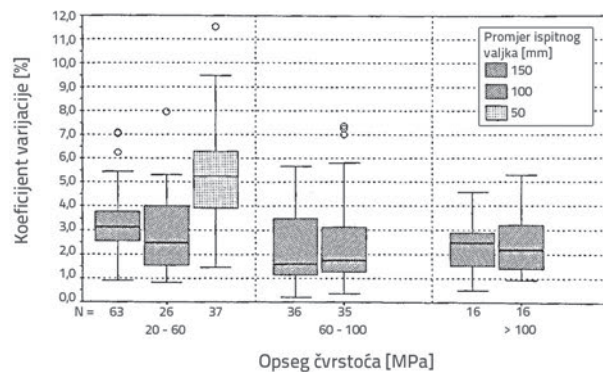
Izvor	Predložena veza	Opseg čvrstoća [MPa]
Aitcin i ostali autori (1992,)	$f_{100} = 1,16 \cdot f_{150} - 8,5$	80 - 100
Carrasquillo i Carrasquillo (1988,)	$f_{100} = 0,93 \cdot f_{150}$	50 - 80
Date i Schnormeier (1984,)	$f_{100} = 1,04 \cdot f_{150}$	< 35
Day i Haque (1993,)	$f_{100} = f_{150}$	< 40
Day (1994,)[15]	$f_{100} = f_{150}$	< 50
Forstie i Schnormeier (1981,)	$f_{100} = f_{150}$	30 - 50
Forstie i Schnormeier (1981,)	$f_{100} = f_{150}$; $f_{100} > f_{150}$ za $f > 34,5$	< 50
Gonnerman (1925,)[6]	$f_{100} = 1,01 \cdot f_{150}$	< 32
Lessard i Aitcin (1992,)	$f_{100} = 1,05 \cdot f_{150}$	35 - 120
Malhotra (1976,)	$f_{100} = (0,85 \text{ do } 1,05) \cdot f_{150}$	< 50
Cook (1989,)	$f_{100} = 1,05 \cdot f_{150}$	< 90
Peterman i Carrasquillo (1983,)	$f_{100} = (1,10 \text{ do } 1,15) \cdot f_{150}$	50 - 80
Janak (1985,)	$f_{100} = 1,03 \cdot f_{150}$	< 56
Chojnacji i Read (1990,)	$f_{100} = (1,02 \text{ do } 1,04) \cdot f_{150}$	58 - 97
Pistilli i Willems (1993,)	$f_{100} = f_{150}$ (sumporni poklopac)	27 - 104
Pistilli i Willems (1993,)	$f_{100} = f_{150}$ (polimerni uložak)	28 - 62
Carrasquillo i ost, (1981,)	$f_{100} = 0,90 \cdot f_{150}$	30 - 80

Na temelju podataka iz 22 studije (1168 rezultata) grafički je prikazao odnos čvrstoća na uzorcima valjaka promjera 75 ili 100 mm i 150 mm, slika 2. Prema slici, s povećanjem vrijednosti čvrstoće povećava se odstupanje rezultata od pravca $f_{75/100} = f_{150}$. Analizirajući dobivene koeficijente varijacije (slika 3.) autor je zaključio da je u području čvrstoće od 20 do 60 MPa koeficijent varijacije čvrstoće na najmanjim uzorcima (75 mm) 5,2 %, dok je na većim uzorcima oko 3 %. U području većih čvrstoća, za uzorke promjera 100 i 150 mm koeficijent varijacije je između 1,7 i 2,2 %. U zaključku stoji: "Vidljivo je da je čvrstoća uzorka

izrađenog u kalupu oblika valjka promjera 100 mm, bilo čeličnog, bilo plastičnog, u rangu ispitnih čvrstoća od 20 do 100 MPa, za oko 5 % veća od rezultata dobivenog na uzorcima promjera 150 mm". U području manjih ispitnih čvrstoća od 20 do 60 MPa prihvatljivo je iz praktičnih razloga uzeti da je $f_{100} = f_{150}$, što opet treba potvrditi ovlaštena institucija za standarde."



Slika 2. Prikaz veze čvrstoća na valjcima promjera 100 i 150 mm [16]



Slika 3. Prikaz ovisnosti koeficijenta varijacije o čvrstoći i promjeru valjka [16]

Vandergrift i Schindler [17] pokušali su odrediti faktor konverzije između čvrstoće uzoraka promjera 100 i 150 mm, te su proveli statističku obradu rezultata. Rezultati su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Faktor konverzije k , $f_{100} = k \cdot f_{150}$ [17]

Opseg čvrstoće [MPa]	Minimum	Srednja vrijednost	Maksimum
30	0,94	1,08	1,19
40	0,88	0,97	1,03
60	0,68	0,83	0,93
Sve čvrstoće	0,68	0,96	1,19

Prema [18], "Uporaba kalupa promjera (100 x 200) mm jednostavnija je za ugradnju uzoraka, traži manje materijala

i jednostavnija je za rukovanje u odnosu na kalup dimenzija 150 x 300 mm, te zauzima manje prostora za njegu uzoraka". Standardna devijacija i koeficijent varijacije čvrstoće manjih uzoraka nešto su viši ili isti kao kod uzoraka promjera 150 mm [19].

Iz ovih istraživanja, kao opći zaključak proizlazi da je čvrstoća betona zaista funkcija dimenzije ispitnih uzoraka. Povećanjem dimenzija ispitnih uzoraka dolazi do smanjenja čvrstoće betona, kao i standardne devijacije te koeficijenta varijacije čvrstoće. No utjecaj dimenzije na čvrstoću betona ipak je ograničen, te nakon neke vrijednosti daljnje povećanje dimenzija uzoraka više ne utječe na smanjenje tlačne ili vlačne čvrstoće betona.

Ekperimentalni dio rada

2. Priprema i ispitivanje uzoraka

Ispitivani su uzorci običnog i mikroarmiranog mlaznog betona korištenog pri izradi primarnog podgradnog sustava tunela Sveti Ilija. Uzorci su izvađeni iz lamela napravljenih *in situ*. Tunel Sveti Ilija (slika 4.) spaja mjesta Rastovac pokraj Zagvozda, na sjevernoj strani, s Bastom pokraj Baške Vode na južnoj strani i predstavlja značajan objekt na spojnoj cesti od autoceste A1 kod Zagvozda do ceste D8. Projektirana duljina tunela iznosi 4,1 km.



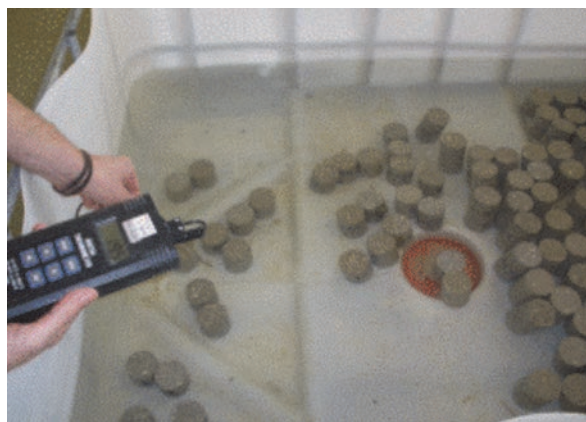
Slika 4. Primarni podgradni sustav tunela Sveti Ilija [24]

Ispitni uzorci oblika valjka promjera 5 cm, bušenjem izvađeni iz lamela, prepiljeni su na visinu od 15 cm. Ukupno su izvađena 133 uzorka, a od toga 129 uzoraka visine 15 cm, tri uzorka visine 10 cm i jedan uzorak visine 5 cm. Iz ukupnog skupa uzoraka, 89 uzoraka izrađeno je od običnog mlaznog betona, a 44 uzorka od mikroarmiranog mlaznog betona.

Tablica 3. Sastav i zahtijevana svojstva betona

Sastav betona		
Komponente betona	Običan mlazni beton [kg]	Mikroarmirani mlazni beton [kg]
Cement – CEM II/B (S-LL) 42,5 N	480	475
Agregat - drobljeni		
0-4 mm	1394	1428
4-8 mm	246	252
Dodaci		
D1 – ubrzivač (alkalna baza)	19,2	19
D2 – čelična vlakna 35/0,65		30
D3 – superplastifikator (naftalen-sulfatna baza)		1,75
Voda	220	210
v/c	0,45	0,44
Ukupno	2340	2395
Zahtijevana svojstva betona		
Razred tlačne čvrstoće	25/30	25/30
Razred izloženosti	XC1	XC1
Konzistencija (slump)	S2 (50 – 90 mm)	S3 (100 – 150 mm)

Ravnost uzoraka zahtijevana normom HRN EN 12390-1 [20] postignuta je brušenjem baza, pri čemu se posebno pazilo o okomitosti izvodnice na bazu valjka, a dimenzije su dobivene kao srednja vrijednost triju mjerenja. Uzorci su do potpunog zasićenja, što je utvrđeno mjerenjem njihove mase, držani u vodi temperature 20 ± 2 °C (slika 5.).



Slika 5. Držanje uzoraka u vodi do potpunog zasićenja [24]

Ultrazvučnim uređajem s cilindričnim sondama nazivne frekvencije od 54 Hz mjerilo se vrijeme prolaska ultrazvučnog vala kroz ispitni uzorak. Brzina prolaska ultrazvučnog vala izračunana je na temelju izmjerenog vremena i visine uzorka u skladu s normom HRN EN 12504-4:2004 [21]. Kako je

ispitivanje trajalo više dana, prije početka mjerenja određivalo se vrijeme prolaska vala kroz etalonski valjak koji je ispitao proizvođač uređaja, nakon čega su izvršene korekcije svih rezultata. Dinamički modul elastičnosti izračunat je prema izrazu

$$E_{din} = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{(1-\nu)} \cdot 10^9 \quad (2)$$

gdje je:

E_{din} - dinamički modul elastičnosti [GPa]

v - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

ν - Poissonov koeficijent

ρ - gustoća uzorka [kg/m³].

Poissonov koeficijent može varirati u granicama od 0,15 do 0,25, a za potrebe ovog ispitivanja uzeta je vrijednost 0,20. Uzorci su neposredno prije ispitivanja obrisani, a osnovice premazane sredstvom za bolje provođenje ultrazvučnog vala.

Nakon određivanja dinamičkog modula elastičnosti na uzorcima visine 15 cm, uzorci su prepiljeni na dva uzorka visine 5 cm i 10 cm. Ponovljen je postupak brušenja baza radi postizanja tražene ravnosti, te su točno određene dimenzije prepiljenih uzoraka na kojima je nakon određivanja dinamičkog modula elastičnosti ispitana tlačna čvrstoća u skladu s normom o ispitivanju očvrslog betona HRN EN 12390-3 i u skladu s normom za ispitivanje betona u konstrukcijama HRN EN 12504-1 [22] na koju se poziva norma za ispitivanje HRN EN 14488-1 [23]. Za ispitivanje je služila preša razreda točnosti 1, koja je umjerena u području od 30 kN do 300 kN (slika 6.). Uzorci su centrirani s točnošću od 1 % dimenzije uzorka, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je 0,6 MPa/s.

Tlačna čvrstoća dobivena je prema izrazu (3):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

gdje je:

f_c - tlačna čvrstoća betona [MPa]

F - opterećenje pri lomu [N]

A_c - površina poprečnog presjeka okomito na smjer djelovanja opterećenja [mm²].



Slika 6. Ispitivanje tlačne čvrstoće [24]

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

Formiran je skup rezultata ispitivanja od 89 uzoraka običnog i 43 uzorka mikroarmiranog mlaznog betona. Ukupni rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4. Provedeni su statistički F i t-test (tablica 5.), te korelacijska analiza kako bi se utvrdila povezanost promatranih skupova.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja s pripadajućim statističkim veličinama

Dinamički modul elastičnosti		E_{MIN} [GPa]	E_{MAX} [GPa]	E_{SRED} [GPa]	V [%]	σ [GPa]
Običan beton	h = 15 cm	30,1	44,8	37,3	9,23	3,44
Mikroarmirani beton		29,9	45,6	40,8	7,87	3,21
Običan beton	h = 10 cm	31,3	43,2	38,3	7,70	2,95
Mikroarmirani beton		31,0	46,3	41,5	7,21	2,99
Običan beton	h = 5 cm	27,4	39,2	34,4	7,85	2,70
Mikroarmirani beton		30,3	42,1	38,0	6,62	2,51
Tlačna čvrstoća		f_{MIN} [MPa]	f_{MAX} [MPa]	f_{SRED} [MPa]	V [%]	σ [MPa]
Običan beton	h = 5 cm	22,9	64,3	42,3	22,70	9,60
Mikroarmirani beton		28,3	61,9	50,9	16,44	8,36
Običan beton	h = 10 cm	17,9	57,8	35,3	24,72	8,74
Mikroarmirani beton		20,1	52,5	40,5	16,89	6,84

Tablica 5. Rezultati F i t-testa

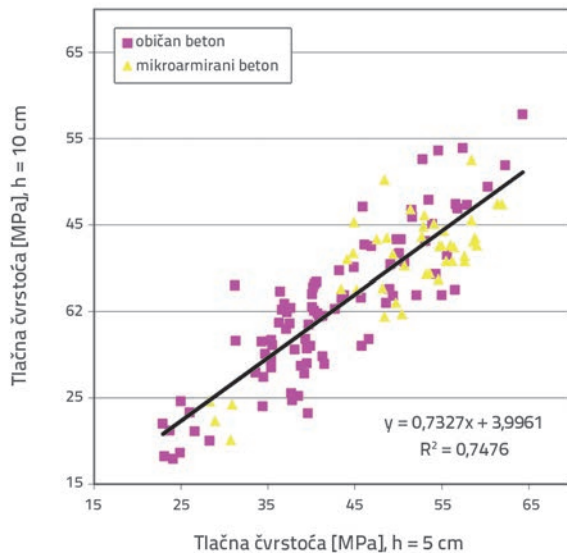
Odnosi	$F_0; F$	$t_0; t$	F-test ($\alpha = 0,05$)	t-test ($\alpha = 0,05$)	Sred. vrijednost	Varijanca	Stand. devijacija
σ/E za $h = 5$ cm, običan beton	$F_0 = 1,28$	$t_0 = 10,07$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	značajne stat. razlike između arit. sredina	1,22	0,0449	0,2119
σ/E za $h = 10$ cm, običan beton	$F = 1,43$	$t = 1,96$			0,92	0,0351	0,1874
σ/E za $h = 5$ cm, mikroarmirani beton	$F_0 = 1,88$	$t_0 = 11,15$	ima stat. značajnih razlika između varijanci	značajne stat. razlike između arit. sredina	1,33	0,0297	0,1724
σ/E za $h = 10$ cm, mikroarmirani beton	$F = 1,67$	$t = 1,96$			0,97	0,0158	0,1258
σ/E za $h = 5$ cm, običan beton	$F_0 = 1,51$	$t_0 = 3,14$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	značajne stat. razlike između arit. sredina	1,22	0,0449	0,2119
σ/E za $h = 5$ cm, mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			1,33	0,0297	0,1724
σ/E za $h = 10$ cm, običan beton	$F_0 = 2,21$	$t_0 = 1,76$	ima stat. značajnih razlika između varijanci	nema značajne stat. razlike između arit. sredina	0,92	0,0351	0,1874
σ/E za $h = 10$ cm, mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			0,97	0,0158	0,1258
$\sigma_{h=5\text{ cm}}/\sigma_{h=10\text{ cm}}$ običan beton	$F_0 = 1,48$	$t_0 = 1,89$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	nema značajne stat. razlike između arit. sredina	1,21	0,0243	0,1557
$\sigma_{h=5\text{ cm}}/\sigma_{h=10\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			1,26	0,0164	0,1281
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=10\text{ cm}}$ običan beton	$F_0 = 1,35$	$t_0 = 1,76$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	nema značajne stat. razlike između arit. sredina	0,9	0,0029	0,0535
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=10\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			0,92	0,0021	0,046
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ običan beton	$F_0 = 1,1$	$t_0 = 0,85$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	nema značajne stat. razlike između arit. sredina	0,93	0,0022	0,0469
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			0,93	0,0020	0,045
$E_{h=10\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ običan beton	$F_0 = 1,43$	$t_0 = 1,32$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	nema značajne stat. razlike između arit. sredina	1,03	0,0020	0,0452
$E_{h=10\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			1,02	0,0014	0,0373
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ običan beton	$F_0 = 1,1$	$t_0 = 15,15$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	značajne stat. razlike između arit. sredina	0,93	0,0022	0,0469
$E_{h=10\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ običan beton	$F = 1,43$	$t = 1,96$			1,03	0,0020	0,0452
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F_0 = 1,43$	$t_0 = 9,72$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	značajne stat. razlike između arit. sredina	0,93	0,0020	0,045
$E_{h=10\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F = 1,67$	$t = 1,96$			1,02	0,0014	0,0373
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=10\text{ cm}}$ običan beton	$F_0 = 1,32$	$t_0 = 3,37$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	značajne stat. razlike između arit. sredina	0,9	0,0029	0,0535
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ običan beton	$F = 1,43$	$t = 1,96$			0,93	0,0022	0,0469
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=10\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F_0 = 1,05$	$t_0 = 1,75$	nema stat. značajnih razlika između varijanci	nema značajne stat. razlike između arit. sredina	0,92	0,0021	0,046
$E_{h=5\text{ cm}}/E_{h=15\text{ cm}}$ mikroarmirani beton	$F = 1,67$	$t = 1,96$			0,93	0,0020	0,045

3.1. Odnos tlačne čvrstoće uzoraka različitih dimenzija

Iz tablice 4. vidljivo je da su rezultati tlačne čvrstoće običnog i mikroarmiranog mlaznog betona u širokom rasponu vrijednosti. Razlog tome je specifičan način ugradbe mlaznog betona *in situ*, gdje se prskanjem teško može postići beton ujednačene kvalitete uslijed količine odskoka, koja u nekim slučajevima može biti i 40 % količine početne mješavine. Bez obzira na dobivene raspone rezultata, uzorci su reprezentativni, jer je promatran odnos tlačne čvrstoće uzoraka visine $h = 5$ cm i $h = 10$ cm, koji su napravljeni od istog uzorka mlaznog betona visine $h = 15$ cm. Odnos srednje vrijednosti tlačne čvrstoće običnog mlaznog betona uzoraka visine 5 cm naspram uzoraka visine 10 cm je 1,20, dok je taj isti odnos kod mikroarmiranog mlaznog betona 1,26. Za određivanje tlačne čvrstoće betona u konstrukcijama, u normi HRN EN 13791:2007 [25] navedeno je da tlačna čvrstoća valjaka s odnosom visine i promjera približno 1 odgovara tlačnoj čvrstoći kocke brida 15 cm.

Norma HRN EN 206-1:2006 [26] ([1]) definira karakterističnu tlačnu čvrstoću betona kao tlačnu čvrstoću kocke brida 15 cm, odnosno valjka promjera baze 15 i visine 30 cm. Odnos čvrstoće tih dvaju tijela prema navedenoj normi iskazan je u definiciji razreda. Za vrijednosti tlačne čvrstoće ispitanih uzoraka koje se iskazuju od razreda C16/20 do C55/67, taj odnos je od 1,20 do 1,25. Zaključuje se da odnos tlačne čvrstoće uzoraka, s odnosom dimenzija 1:1 i tlačne čvrstoće uzoraka s odnosom promjera baze i visine 1:2 dobiveni ispitivanjem mlaznog betona odgovara odnosu tlačne čvrstoće ispitivanih tijela koji je definiran normama za normalni beton.

Rezultati ispitivanja pokazali su da uzorci od mikroarmiranog mlaznog betona imaju 15-20 % veću tlačnu čvrstoću u odnosu na obični mlazni beton uz manju disipaciju rezultata, što se potvrđuje vrijednošću koeficijenta varijacije. Za navedeni odnos uspostavljena je korelacijska veza (slika 7.), kojom se mjeri stupanj jakosti stohastičkih veza koeficijentima korelacije, a sadrži grafički prikaz i intenzitet te smjer povezanosti između promatranih varijabli.



Slika 7. Regresijski pravac tlačnih čvrstoća uzoraka visine $h = 5$ i $h = 10$ cm ($R = 0,86$)

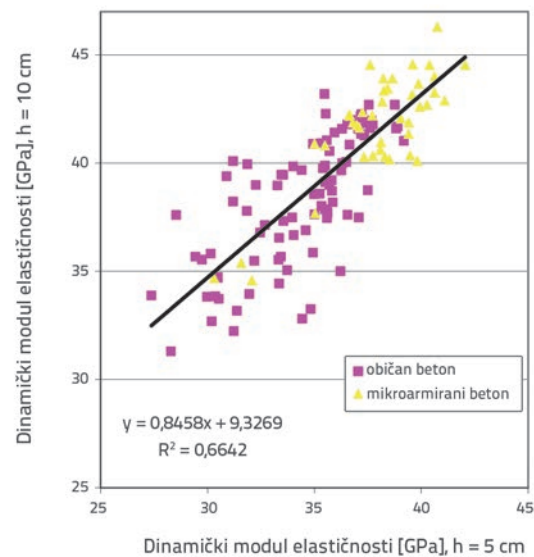
Koeficijent korelacije od $R = 0,86$ upućuje na vrlo veliku povezanost promatranih veličina [27]. Rezultati F i t-testa tlačnih čvrstoća valjaka visine 5 i 10 cm od običnog mlaznog i mikroarmiranog mlaznog betona pokazali su da ne postoji značajna statistička razlika između ispitanih skupova, odnosno da se rezultati običnog i mikroarmiranog betona mogu promatrati zajedno (tablica 5.).

3.2. Odnos dinamičkog modula elastičnosti uzoraka različitih dimenzija

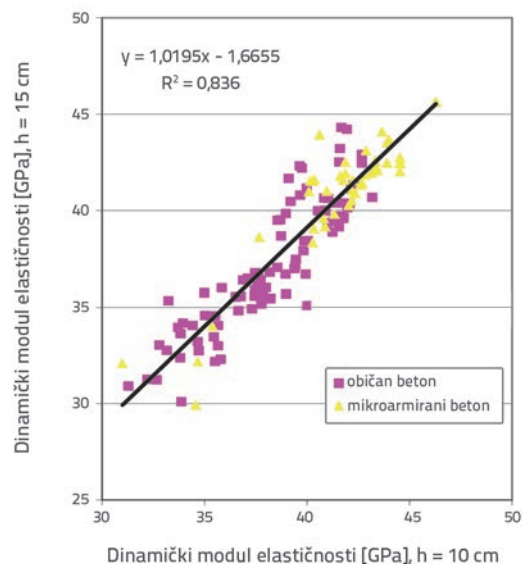
Najveću srednju vrijednost dinamičkog modula elastičnosti, običnog mlaznog i mikroarmiranog mlaznog betona, imali su uzorci visine 10 cm. Odnos vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine 5 cm i uzoraka visine 10 cm, odnosno 15 cm je 0,9. Odnos vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine 10 cm i 15 cm je 1,03. Dakle, uzorci dimenzija visine manjih od 10 imaju veću tlačnu čvrstoću, ali im je dinamički modul elastičnosti manji. Vjerojatno uzrok ovoj pojavi leži u obilježju razorne i nerazorne metode ispitivanja. Kod uzoraka većih dimenzija veća je vjerojatnost nailaženja lokalnih defekata na koje je razorna metoda ispitivanja tlačne čvrstoće očito osjetljivija od nerazorne metode mjerenja dinamičkog modula elastičnosti. Pretpostavka je da kod uzoraka većih dimenzija nailazak na defekt manje utječe na brzinu prolaska ultrazvučnog vala nego kod uzoraka manjih dimenzija, jer isti defekt relativno više produžuje put ultrazvučnog vala kod kraćeg uzorka, pa time više smanjuje brzinu vala i dinamički modul elastičnosti u odnosu na duži uzorak. Dobiveni rezultati, gdje s povećanjem dimenzija ispitnog uzorka visine iznad 10 cm više ne dolazi do opadanja vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti, podudaraju se s dosadašnjim istraživanjima Bungeya [28, 29]. Na temelju

provedenih istraživanja autor je predložio da "minimalna duljina uzorka bude 100 i 150 mm za betone s maksimalnim zrnom agregata veličine 20 odnosno 40 mm" [28]. Kako su u ovom radu ispitni betoni napravljeni s maksimalnim zrnom agregata $D = 8$ mm, preporučena minimalna visina uzorka od 10 cm može se primijeniti i na betone s manjim maksimalnim zrnom agregata.

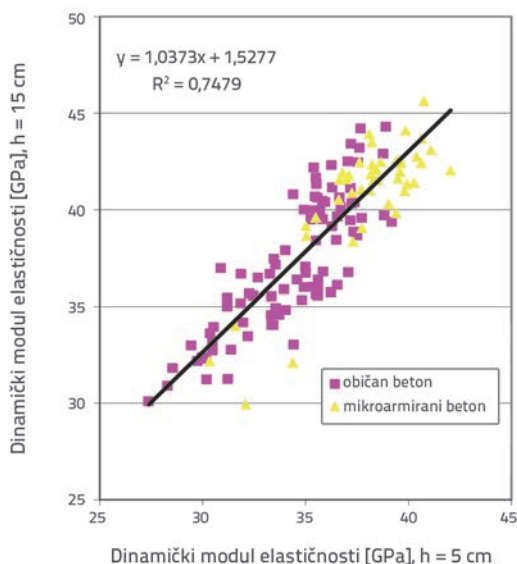
Za promatrane odnose, prikazane na slikama 8., 9. i 10., uspostavljena je korelacijska veza koja je također pokazala vrlo visoku povezanost promatranih veličina. U ovoj je analizi od uzoraka običnog i mikroarmiranog betona formiran jedinstveni skup u skladu s rezultatima F i t-testa (tablica 5.).



Slika 8. Regresijski pravac dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine $h = 5$ i $h = 10$ cm ($R = 0,81$)



Slika 9. Regresijski pravac dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine $h = 10$ i $h = 15$ cm ($R = 0,91$)

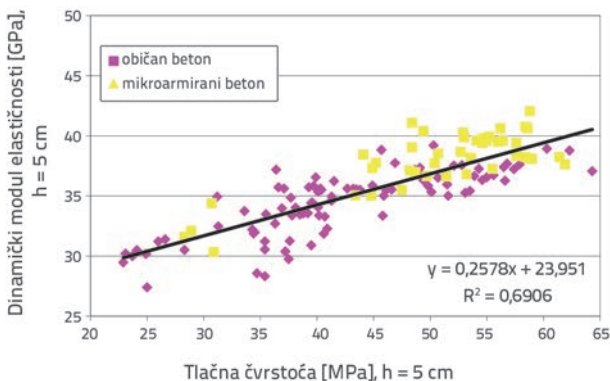


Slika 10. Regresijski pravac dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine h = 5 i h = 15 cm (R = 0,86)

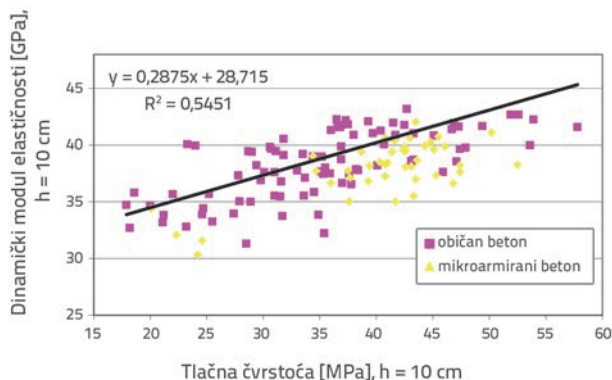
Kod odnosa dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine 5 i 10 cm, visine 5 i 15 cm, te visine 10 i 15 cm za obje vrste ispitanih mlaznih betona, kao i odnosa dinamičkog modula elastičnosti visine 5 cm i 10 cm u odnosu na uzorke visine 5 cm i 15 cm mikroarmiranog betona, rezultati F i t-testa pokazali su da nema značajnih statističkih razlika (tablica 5.).

3.3. Veza tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti uzoraka različitih dimenzija

Jedna od zadaća ovog rada, odnosno analize rezultata ispitivanja uzoraka mlaznog betona, bila je i uspostava veze između tlačne čvrstoće betona i dinamičkog modula elastičnosti. Odnos tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti definiran je pravcem regresije. Na takav način dobivena je bolja veza između promatranih svojstava betona, nego kada se ista ta svojstva analiziraju u odnosu na kalibracijsku krivulju koju definira norma HRN EN 13791:2007 [30].



Slika 11. Regresijski pravac dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće uzoraka visine h = 5 cm (R = 0,83)



Slika 12. Regresijski pravac dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće uzoraka visine h = 10 cm (R = 0,74)

Koeficijenti korelacije rezultata ispitivanja upućuju na značajnu povezanost tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti (slike 11. i 12.). Ipak treba biti oprezan kad se ovaj odnos primjenjuje na ocjenu tlačne čvrstoće budući da pravac regresije ima mali nagib prema osi tlačne čvrstoće. Posljedica toga je da već mala pogreška pri mjerenju dinamičkog modula elastičnosti može rezultirati značajnom promjenom tlačne čvrstoće mlaznog betona. Tako za ispitne uzorke visine 5 cm promjena dinamičkog modula elastičnosti od 1 GPa odgovara promjeni od 3,9 MPa tlačne čvrstoće, dok kod ispitnih uzoraka visine 10 cm ta promjena iznosi 3,5 MPa. Zbog toga pri procjeni tlačne čvrstoće na temelju rezultata dinamičkog modula elastičnosti treba biti svjestan nesigurnosti koju ona nosi.

4. Zaključak

Analizom rezultata utvrđeno je da odnos tlačne čvrstoće uzoraka običnog mlaznog betona visine 5 cm i 10 cm bez dodatka vlakana iznosi 1,20, a taj odnos kod uzoraka od mikroarmiranog betona iznosi 1,26. Dobiveni rezultati potvrđuju odnose tlačnih čvrstoća uzoraka omjera dimenzija 1:1 i uzoraka omjera promjera baze i visine 1:2 definirane u normama HRN EN 13791:2007 te HRN EN 206-1:2006. Kod uzoraka s dodatkom vlakana i superplastifikatora postiže se veća homogenost, pa dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće pokazuju manje rasipanje. Koeficijent varijacije je manji kod uzoraka manje visine, što upućuje na veću vjerojatnost nailaženja na lokalne defekte kod uzoraka većih dimenzija.

Za razliku od tlačne čvrstoće, uzorci visine 5 cm, odnosno uzorci odnosa visine i promjera baze 1:1 imaju približno 10 % manji dinamički modul elastičnosti od uzoraka visine 10 cm i 15 cm, koji imaju približno iste vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti. Dakle, promjena veličine uzorka različito utječe na promjene tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti, što se može protumačiti razlikom u obilježju nerazorne i razorne metode ispitivanja. Dobiveni rezultati potvrđuju dosadašnju preporuku za minimalnu visinu ispitnog uzorka od 10 cm za betone, a ovim se istraživanjem utvrdilo da to ograničenje visine uzorka vrijedi i za betone s

manjim maksimalnim zrnom agregata. Koeficijent varijacije dinamičkog modula elastičnosti manji je kod uzoraka s dodatkom vlakana i superplastifikatora.

Ispitivanja su potvrdila određenu povezanost rezultata tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti uzoraka mlaznog betona visine 5 cm i 10 cm, te su dani izrazi dobiveni korelacijskom analizom za procjenu tlačne čvrstoće na temelju rezultata dinamičkog modula elastičnosti. No pri procjeni tlačne čvrstoće na temelju rezultata ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti ultrazvučnim uređajem treba biti svjestan

nesigurnosti metode, budući da mala pogreška mjerenja dinamičkog modula elastičnosti uzrokuje značajnu pogrešku u procjeni tlačne čvrstoće mlaznog betona. Dobivena veza može vrijediti za ovu vrstu betona koja je ugrađivana u primarni podgradni sustav tunela, dok za druge vrste betona može poslužiti samo kao gruba procjena. Također valja napomenuti kako su ispitivanja rađena na vodom zasićenim uzorcima, pa primjena veza između tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti na nekim suhim uzorcima može dovesti do nekih odstupanja.

LITERATURA

- [1] HRN EN 12390-3:2009, Ispitivanje očvrstlog betona - 3.dio: Tlačna čvrstoća uzorka (EN 12390-3:2009)
- [2] Krstulović, P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [3] Ukrainczyk, V.: *Beton, struktura, svojstva, tehnologija*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [4] Neville, A.M.: *Properties of Concrete*, Pearson Education Limited, 2000.
- [5] Sabnis, G.M., Mirza, S.M.: *Size Effect in Model Concretes*, Journal of the Structural Division, 105 (1979) 6, pp. 1007-1020
- [6] Gonnerman, H.F.: *Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete*, Proc. A.S.T.M, 25, Part II, pp. 237-50, 1925.
- [7] Harris, H.G. Sabins, G.M., White, R.N.: *Small Scale Direct Models of Reinforced and Prestresses Concrete Structures*, Report No. 326, School of Civil Engineering, Cornell University, Ithaca, N.Y. Sept., 1966.
- [8] Pang, C.L.: *Reliability of Model sin the Analysis of Prestressed Concrete Beams in Flexure*, thesis presented to McGill University, Montreal, Canada, 1965.
- [9] Tsui, S.H., Mirza, M.S.: *Model Micro-concrete Mixes*, Structural Concrete Series No. 3, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, Nov. 1969.
- [10] Neville, A.M.: *Concrete compression test cubes*, Civil Engineering, 52, No. 615, p. 1045, London, 1957.
- [11] Neville, A.M.: *The influence of size of concrete test cubes on mean strength and standard deviation*, Magazin of. Concrete Research, 8 (1956) 23, pp. 101-10
- [12] U.S. BUREAU OF RECLAMATION, *Effect of maximum size of aggregate upon compressive strength of concrete*, Mines Branch Investigation Report, I R 71-50 (Department of Ebergy, Mines and Resources, Ottawa, July 1971.
- [13] Griffith, A.A.: *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philosophical Transactions of Royal Society of London, 221 (1902) Series A, pp. 163-198.
- [14] Krolo, J.: *Određivanje parametara mehanike loma betona*, Građevinar, 55 (2005) 12, pp. 967-976.
- [15] Day, R.L.: *The Effect of Mold Size and Mold Material on Compressive Strength Measurement Using Concrete Cylinders*, Cement, Concrete and Aggregates, 16 (1994) 2, pp. 159-166.
- [16] Day, R.L.: *Strength Mesurement of Concrete Using Different Cylinder Sizes: A Statistical Analysis*, Cement, Concrete and Aggregates, 16 (1994) 2, pp. 159-166
- [17] Vandergrift, Jr. D., Schindler, A.K.: *The Effect of Test Cylinder Size on the Compressive Strenght of Sulfur Capped Concrete Specimens*, Department of Civil Enginnering at Auburn Univesity, 2006.
- [18] *Design and Control of Concrete Mixtures*, EB001
- [19] Pistilli, M.F., Willems, T.: *Evaluation of Cylinder Size and Capping Method in Compression Strength of Concrete*" Cement, Concrete and Aggregates 15 (1993) 1, pp. 59-69.
- [20] HRN EN 12390-1:2001, Ispitivanje očvrstlog betona - 1.dio: Oblik, dimenzije i drugi zahtjevi za uzorke i kalupe (EN 12390-1:2000)
- [21] HRN EN 12504-4:2004, Ispitivanje betona - 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa (EN 12504-4:2004)
- [22] HRN EN 12504-1:2009, Svojstva betona u konstrukcijama - 1. dio: Izvađeni uzorci - Uzimanje, pregled i ispitivanje tlačne čvrstoće (EN 12504-1:2009)
- [23] HRN EN 14488-1:2005, Ispitivanje mlaznog betona - 1.dio: Uzorkovanje svježega i očvrstlog betona (EN 14488-1:2005).
- [24] Matulić, P.: *Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona*, diplomski rad, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2009.
- [25] HRN EN 13791:2007, Ocjena in-situ tlačne čvrstoće u konstrukcijama i predgotovljenim betonskim dijelovima (EN 13791:2007)
- [26] HRN EN 206-1:2006, Beton - 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost (uključuje amandmane A1:2004 i A2:2005) (EN 206-1:2000+A1:2004+A2:2005)
- [27] Pavlič, I.: *Statistička teorija i primjena*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1985.
- [28] Bungey, J.H., Millard, G.S., Grantham, M.G.: *Testing of concrete in structures*, 4th Edition, Taylor & Francis, London and New York, 2006.
- [29] Bungey, J.H.: *The validity of ultrasonic pulse velocity testing of in-place concrete for strength*. NDT International, IPC Press, pp. 296-300, 1980.
- [30] EN 13791:2007: Ocjena in-situ tlačne čvrstoće u konstrukcijama i predgotovljenim betonskim dijelovima