

# Utjecaj veličine ispitnog tijela i maksimalnog zrna agregata na mehaničke karakteristike očvrslog betona

---

**Beretin, Marko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:074271>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Beretin**

**Split, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Marko Beretin**

**Utjecaj veličine ispitnog tijela i maksimalnog zrna  
agregata na mehaničke karakteristike očvrslog betona**

**Diplomski rad**

**Split, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: Marko Beretin  
BROJ INDEKSA: 728  
KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**  
PREDMET: Građevinski materijali I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Utjecaj veličine ispitnog tijela i maksimalnog zrna agregata na mehaničke karakteristike očvrslog betona

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti načine ispitivanja čvrstoće betona kao i dosadašnja ispitivanja vezana za temu utjecaja veličine i oblika uzorka na rezultate čvrstoće. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi tri mješavine betona sa maksimalnim zrnim agregatom od 8, 16 i 31,5 mm. U svježem stanju je potrebno ispitati obradivost betona metodom slijeganja. Mješavine je potrebno ugraditi u kalupe oblika prizme 10x10x40 cm, kocke stranice 10 cm i kocke stranice 15 cm. Kod starosti uzoraka od 28 dana, potrebno je ispitati dinamički modul elastičnosti na svim uzorcima, čvrstoću na savijanje na uzorcima oblika prizme, te tlačnu čvrstoću na uzorcima oblika kocke i polovicama prizama nakon ispitivanja savijanja. Među dobivenim rezultatima potrebno je utvrditi vezu, te komentirati dobivene rezultate.

U Splitu, 09.03.2020.

Voditelj Diplomskog rada:

Prof.dr.sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:

Doc. dr. sc. Ivo Andrić

## ZAHVALA

---

*Izražavam veliku i iskrenu zahvalnost svojoj mentorici prof. dr. sc. **Sandri Juradin** na suradnji, vodstvu, pomoći i pristupačnosti tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem na velikom strpljenju s obzirom na otežane uvjete prilikom izrade rada.*

*Najveće hvala vodstvu tvrtke **TPA - Strabag, Dugopolje** na omogućenom laboratoriju za izradu i ispitivanje materijala u trenucima otežanih uvjeta rada, gdje su dotični bili izuzetno susretljivi.*

*Također, od srca se zahvaljujem mojoj obitelji i svim dragim prijateljima na pruženoj podršci i vjeri u mene tijekom svih ovih godina studiranja.*

# **Utjecaj veličine ispitnog tijela i maksimalnog zrna agregata na mehaničke karakteristike očvrstlog betona**

## ***Sažetak:***

Čvrstoća betona osnovni je pokazatelj kvalitete betona, a tlačna čvrstoća je okarakterizirana kao glavni pokazatelj kvalitete betona ugrađenog u konstrukcije. Cilj ovog rada je ispitati mogućnost određivanja tlačne čvrstoće betona na polovicama prizmi, nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje. Za tu svrhu su izrađene prizme dimenzija 10x10x40 cm, kocke brida 10 cm i kocke brida 15 cm.

Izrađene su 3 mješavine sa različitim maksimalnim zrnom agregata, te jednakom količinom cementa i jednakim vodocementnim faktorom. Ispitana su i analizirana sljedeća svojstva: konzistencija, dinamički modul elastičnosti, čvrstoća na savijanje i tlačna čvrstoća. Uspostavljena je veza između izmjerenih vrijednosti čvrstoća na različitim uzorcima.

## ***Ključne riječi:***

Beton, maksimalno zrno agregata, dinamički modul elastičnosti, čvrstoća na savijanje, tlačna čvrstoća, veličina ispitnog uzorka

## **The influence of the test specimen's size and maximum aggregate grain on the mechanical characteristics of a hardened concrete**

## ***Abstract:***

The strength of concrete is the basic indicator of concrete quality, and compressive strength is characterized as the main indicator of the quality of concrete built-in constructions. This paper aims to examine the possibility of determining the compressive strength of concrete on the halves of prisms, after testing the flexural strength.

Prisms measuring 10x10x40 cm, cubes with an edge length of 10 cm, and cubes with an edge length of 15 cm were made for this purpose. 3 mixtures were made with different maximum aggregate grain, the same amount of cement, and the same w/c factor. The following properties were tested and analyzed: consistency, dynamic modulus of elasticity, flexural strength, and compressive strength. A relation was established between the measured strength values on different specimens.

## ***Ključne riječi:***

Concrete, maximum aggregate grain, dynamic modulus of elasticity, flexural strength, compressive strength, size of the test specimen

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	ČVRSTOĆE BETONA I ISPITNI UZORCI .....	3
2.1.	Tlačna čvrstoća betona: definicija i izrada uzoraka.....	3
2.1.1.	Izrada uzoraka i ispitivanje tlačne čvrstoće.....	4
2.1.2.	Razredi tlačne čvrstoće.....	5
2.1.3.	Faktori o kojima ovisi tlačna čvrstoća betona .....	6
2.1.4.	Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću .....	6
2.1.5.	Utjecaj vlage na tlačnu čvrstoću.....	7
2.1.6.	Utjecaj starosti uzorka na tlačnu čvrstoću .....	7
2.1.7.	Utjecaj vrste cementa i karakteristike agregata na tlačnu čvrstoću .....	8
2.1.8.	Utjecaj vodocementnog faktora i poroznosti na tlačnu čvrstoću.....	9
2.1.9.	Utjecaj aditiva na tlačnu čvrstoću.....	9
2.2.	Vlačna čvrstoća .....	10
2.3.	Čvrstoća na posmik, udar i umor.....	11
2.4.	Računska čvrstoća .....	12
2.5.	Višeosna čvrstoća .....	13
3.	UTJECAJ VELIČINE UZORKA NA VRIJEDNOSTI TLAČNE ČVRSTOĆE.....	14
4.	UTJECAJ VELIČINE UZORAKA NA REZULTATE – PREGLED DOSADAŠNJIH ISPITIVANJA.....	19
4.1.	Koeficijenti pretvorbe tlačne čvrstoće betona na koju utječu oblik i veličina uzorka; Zabihi i Eren [11].....	19
4.2.	Odnos između tlačne čvrstoće uzorka kocke i valjka; Ritu Kumari [12].....	24
4.3.	Utjecaj oblika i dimenzija uzorka na tlačnu čvrstoću betona visoke čvrstoće; del Viso, Carmona i Ruiz [13].....	26
4.4.	Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona; Matulić, Juradin, Marušić, Domazet [9].....	35
5.	EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	42
5.1.	Uvod u eksperimentalni dio rada.....	42
5.2.	Korišteni materijali.....	43
5.2.1.	Agregat .....	43
5.2.2.	Cement.....	46
5.2.3.	Voda .....	47
5.3.	Priprema i izrada mješavina i uzoraka.....	48
5.3.1.	Mješavina sa maksimalnim zrnom agregata 8mm; B1.....	49
5.3.2.	Mješavina sa maksimalnim zrnom agregata 16mm; B2.....	54
5.3.3.	Mješavina sa maksimalnim zrnom agregata 31,5mm; B3.....	59

5.4.	Metode ispitivanja betona.....	64
5.4.1.	Ispitivanje konzistencije metodom slijeganja.....	64
5.4.2.	Ispitivanje tlačne čvrstoće betona.....	66
5.4.3.	Ispitivanje čvrstoće na savijanje.....	67
5.4.4.	Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti.....	69
6.	REZULTATI ISPITIVANJA EKSPERIMENTALNOG DIJELA RADA.....	70
6.1.	Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; metoda slijeganja.....	70
6.1.1.	Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; mješavina B1.....	70
6.1.2.	Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; mješavina B2.....	71
6.1.3.	Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; mješavina B3.....	72
6.2.	Rezultati ispitivanja betona u očvrsлом stanju.....	73
6.2.1.	Rezultati ispitivanja betona u očvrsлом stanju; mješavina B1.....	74
6.2.1.1.	Masa uzoraka.....	74
6.2.1.2.	Dimenzije i gustoće uzoraka.....	75
6.2.1.3.	Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka.....	76
6.2.1.4.	Tlačna čvrstoća uzoraka i čvrstoća na savijanje uzoraka prizme.....	77
6.2.2.	Rezultati ispitivanja betona u očvrsлом stanju; mješavina B2.....	79
6.2.2.1.	Masa uzoraka.....	79
6.2.2.2.	Dimenzije i gustoće uzoraka.....	81
6.2.2.3.	Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka.....	82
6.2.2.4.	Tlačna čvrstoća uzoraka i čvrstoća na savijanje uzoraka prizme.....	83
6.2.3.	Rezultati ispitivanja betona u očvrsлом stanju; mješavina B3.....	86
6.2.3.1.	Masa uzoraka.....	86
6.2.3.2.	Dimenzije i gustoće uzoraka.....	87
6.2.3.3.	Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka.....	87
6.2.3.4.	Tlačna čvrstoća uzoraka i čvrstoća na savijanje uzoraka prizme.....	89
6.2.4.	Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja u odnosu na mješavine.....	92
6.2.4.1.	Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti.....	92
6.2.4.2.	Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće.....	93
6.2.4.3.	Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje.....	94
6.3.	Rasprava o rezultatima.....	95
6.3.1.	Rezultati dinamičkog modula elastičnosti.....	95
6.3.2.	Rezultati tlačne čvrstoće.....	97
6.3.3.	Rezultati čvrstoće na savijanje.....	99
7.	ZAKLJUČAK.....	100
8.	LITERATURA.....	101



# 1. UVOD

Beton je kao najrasprostranjeniji i najkorišteniji materijal na čitavoj planeti, proizveden miješanjem nekog veziva (npr. cementa, sadre, bitumena, asfalta), agregata (npr. pijeska, šljunka, drobljenca, troske, drobljene opeke), vode i različitih dodataka (aeranti, plastifikatori i superplastifikatori, usporivači vezanja betona, aditivi za vodonepropusnost, aditivi za betoniranje na niskim temperaturama, ubrzivači i slično).

Glavna mehanička karakteristika betona je upravo čvrstoća betona. Postoji više vrsta čvrstoće betona: tlačna, vlačna, čvrstoća na posmik, udar i umor, računski čvrstoća, višeosna čvrstoća. Čvrstoća betona je osnovni pokazatelj kvalitete betona, te ona raste s vremenom sve od samog ugrađivanja betona. Čvrstoća je također i pokazatelj drugih svojstava betona.

Čvrstoća na pritisak mora biti u skladu sa propisima i standardima koji detaljno navode kriterije i postupak za dokazivanje kvalitete betona. Za kontrolu proizvodnje betona koriste se razorne metode ispitivanja te ispitivanje betona u svježem stanju, dok se kod ugrađenog betona u konstrukcije koriste razorne i nerazorne metode ispitivanja. Pod razorne metode se ubraja ispitivanje tlačne čvrstoće betona tako da se uzorci betona (kocka, valjak) lome u preši prema normi za ispitivanje (HRN EN 12390-3). Ovakav postupak ispitivanja je standard za klasifikaciju betona koja se vrši po razredima čvrstoće C (čvrstoća valjka/čvrstoća kocke). Također postoje posebni razredi čvrstoće za laki beton te za teški beton i razredi izloženosti oznaka X, XC, XS, XD, XF i XA.

Naknadno dokazivanje postignute čvrstoće na pritisak očvrstlog betona provodi se u slučajevima kada je nedovoljan broj uzoraka za osnovno ispitivanje ili kada beton nije dosegao traženu projektom propisanu čvrstoću pri osnovnom ispitivanju. Istraživanja su dokazala kako čvrstoća betona nije jednaka u konstrukciji i ispitnom uzorku. Postavlja se pitanje utjecaja dimenzija uzoraka na čvrstoću betona jer, mnogo slučajeva dimenzije uzoraka sa gradilišta ne odgovaraju standardnim dimenzijama uzoraka. Za utjecaj dimenzija i oblika uzoraka ne postoji strogo objašnjenje. Utjecaju dimenzije uzoraka treba posvetiti veliku pažnju jer beton istog sastava, ispitan na uzorcima različitih dimenzija, može pokazivati značajne oscilacije rezultata. [1] Tlačna čvrstoća betona vrši se prema spomenutoj normi na uzorku oblika kocke brida 15 cm ili valjka promjera 15 cm i visine 30 cm.

Prilikom ispitivanja čvrstoće cementa prema HRN EN 196-1:2016, cementne prizme, dimenzija 4×4×16 cm, ispituju se na čvrstoću na savijanje a zatim se na polovicama prizme ispituje tlačna čvrstoća. Cilj ovog rada je ispitati mogućnost određivanja tlačne čvrstoće betona na polovicama prizmi, nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje. U tu svrhu izraditi će se prizme dimenzija 10x10x40 cm, kocke brida 10 i kocke brida 15 cm. Predviđena je izrada 3 vrsta mješavina sa različitim maksimalnim zrnima agregata D = 8, 16 i 31.5 mm. Pokušat će se uspostaviti veza između tlačne čvrstoće na polovicama prizmi i tlačne čvrstoće dobivene na kockama odgovarajućih dimenzija. Ispitivanje će se provesti u laboratoriju TPA, Strabag, Svetog Mihovila 1, Dugopolje(slika 1.).

**STRABAG**  
TEAMS WORK.

Slika 1. Firma TPA, Strabag

## 2. ČVRSTOĆE BETONA I ISPITNI UZORCI

### 2.1. Tlačna čvrstoća betona: definicija i izrada uzoraka

Tlačna čvrstoća je test koji pokazuje kvalitetu betona i njegovu izdržljivost u trenutku djelovanja opterećenja na sami beton. Definira se kao maksimalna postignuta sila u trenutku loma podijeljena sa nominalnom površinom poprečnog presjeka uzorka[3]:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

gdje je:

$f_c$  - tlačna čvrstoća betona (MPa)

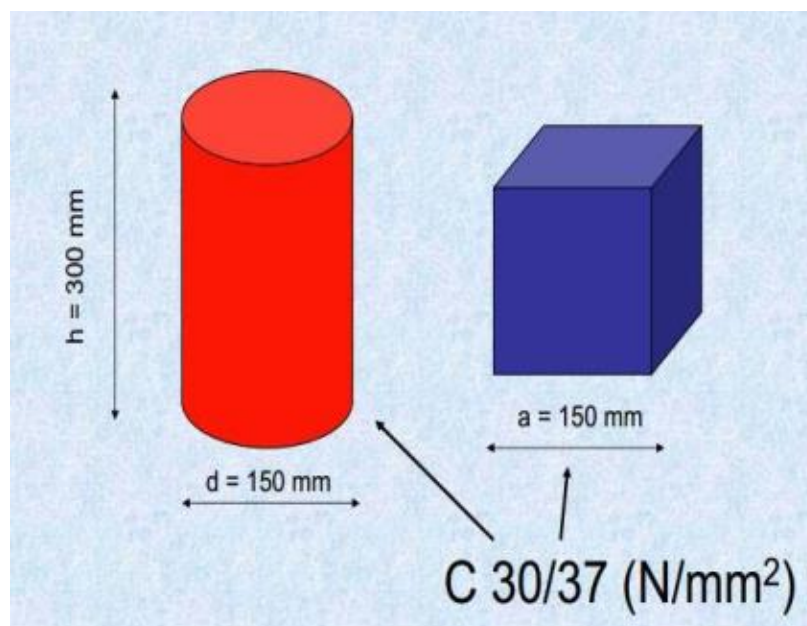
$F$  - opterećenje pri lomu(N)

$A_c$  - površina poprečnog presjeka okomito na smjer djelovanja opterećenja(mm<sup>2</sup>)

Općenito, dobiveni rezultati se karakteriziraju kao jednoosna tlačna čvrstoća, iako je u početku uzorak pod troosnim naprežanjem zbog djelovanja bočnog trenja između ploče i samog uzorka.

Tlačna čvrstoća betona prvenstveno ovisi o obliku i veličini ispitnog uzorka.

Prema normi HRN EN 12390-1 [2] ispitivanje se vrši na vodom zasićenim uzorcima oblika kocke brida 15 cm, ili valjka promjera 15 cm i visine 30 cm(slika 2.1.).



Slika 2.1. Dimenzije uzoraka prema HRN EN 12390-1 [2]

### 2.1.1. Izrada uzoraka i ispitivanje tlačne čvrstoće

Beton se u svježem stanju ugrađuje u kalupe izrađene od polimernih ili čeličnih materijala koji su vodonepropusni, preciznih su dimenzija sa minimalnim odstupanjima.

Pri ugrađivanju, beton se zbija (probadanjem šipki za ispitivanje slijeganja, pomoću željeznog nabijača mase 12 kg, pomoću uranjajućeg vibratora ili vibrostola), a zatim se gornja (otvorena) površina se zaglađuje i zaštićuje.

Ugrađeni beton stoji u kalupu 24 sata u uvjetima relativne vlažnosti zraka 95% i temperature  $20\pm 3$  °C (HRN EN 12390-2). Kada je beton dovoljno očvrstnuo, vadi se iz kalupa i ostavlja u identičnim uvjetima ili se stavlja u vodu temperature  $20\pm 3$ °C s optimalnim uvjetima vlažnosti prostorije (95%) do samog dana ispitivanja.[1]

Uzorak pred ispitivanje mora biti ispunjen vlagom, ne smije se dozvoliti isušivanje uzorka pred ispitivanje. Prije ispitivanja, uzorak se izmjeri i izvaži radi određivanja volumne mase betona i površine djelovanja pritiska.

Uzorak se zatim lomi u hidrauličkoj preši (slika 2.2.). Opterećuje se prenosi preko krutih i ravnih čeličnih ploča, od kojih je donja fiksna a gornja zgloбно pričvršćena. Uzorak mora biti dobro centriran. Opterećenje se nanosi postepeno, propisanom brzinom od  $0.6\pm 0.4$  MPa/s do loma.( HRN EN 12390-3; HRN EN 14488-1)

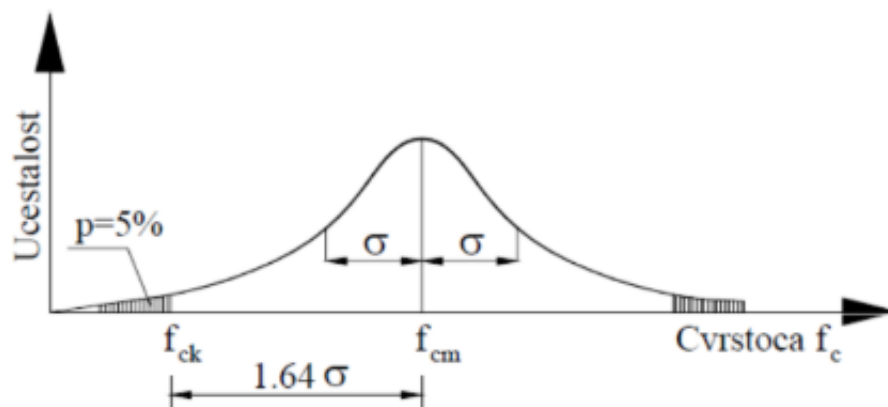


Slika 2.2. Hidraulička preša

### 2.1.2. Razredi tlačne čvrstoće

Razred tlačne čvrstoće betona (klasa betona – C) je projektom propisana, tj. uvjetovana karakteristična tlačna čvrstoća betona. Razred tlačne čvrstoće betona određuje se na osnovi vjerojatnosti i statistike. Kod proračuna razreda koriste se standardne dimenzije betonskih uzoraka prema normi HRN EN 12390-3 (valjci visine 30 cm i promjera 15 cm, te kocke dimenzija brida 15 cm).

Prema normi se zahtjeva da najmanje 95% ispitanih uzoraka bude jednake ili veće tlačne čvrstoće od predviđene čvrstoće razreda(klase) betona. Po Eurocode-u 2 uzima se 5%-tni fraktil s koeficijentom vjerojatnosti iznosa  $\lambda = 1,64$ . Statistička raspodjela rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće se izjednačava sa Gaussovom(lognormalnom) krivuljom(slika 2.3.).



Slika 2.3. Gaussova (lognormalna) krivulja raspodjele rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće betona [3]

Srednja tlačna čvrstoća ( $\bar{f}_{ck}$ ), koja se dobije kao aritmetička sredina svih uzoraka, mora biti veća od zahtijevane karakteristične čvrstoće ( $f_{ck}$ ), uvećane za vrijednost  $k_1$ (2), dok vrijednost tlačne čvrstoće svakog uzorka mora biti veća od razlike karakteristične tlačne čvrstoće i vrijednosti  $k_2$ (3):

$$\bar{f}_{ck} \geq f_{ck} + k_1$$

$$f_{ck,i} \geq f_{ck} - k_2 \quad (2) \quad (3)$$

Vrijednosti  $k_1$  i  $k_2$  ovise o broju uzoraka na kojem se vrši ispitivanje.

Ovisno o rezultatima, normalni beton se svrstava u 9 razreda tlačne čvrstoće oznake(tablica 2.1.):

C čvrstoća valjka/čvrstoća kocke

Razredi tlačne čvrstoće betona										Analički izraz
Oznaka razreda	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	
$f_{ck}$ [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	
$f_{ck,cub}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	
$f_{cm}$ [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ [MPa]
$f_{clm}$ [MPa]	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	$f_{clm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{(2/3)}$
$f_{ck,0.05}$ [MPa]	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9	$f_{ck,0.05} = 0.7 \cdot f_{clm}$
$f_{ck,0.95}$ [MPa]	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3	$f_{ck,0.95} = 1.3 \cdot f_{clm}$
$E_{cm}$ [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	$E_{cm} = 22[f_{cm}/10]^{0.3}$

Tablica 2.1. Razredi čvrstoće betona i modul elastičnosti [4]

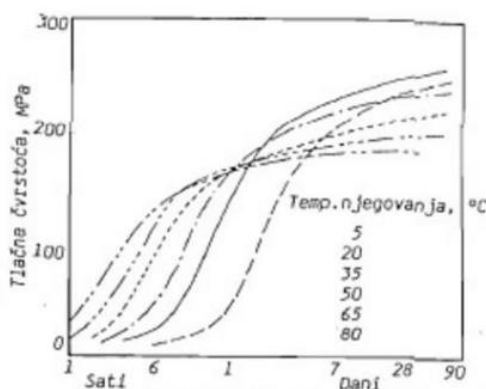
### 2.1.3. Faktori o kojima ovisi tlačna čvrstoća betona

Na postignutu tlačnu čvrstoću betona utječe niz faktora: temperatura, vlaga, starost betona u trenutku ispitivanja, vrsta i klasa cementa, svojstva agregata, vodocementni faktor, dodaci i način ugradnje betona. [1]

### 2.1.4. Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću

Dokazano je da, ovisno o klasi cementa, najveću konačnu čvrstoću postiže beton koji je održavan na temperaturi od 13 °C. Pri povišenim temperaturama (oko 55 °C), beton pak ima nagli prirast čvrstoće u prva 24 sata, međutim njegova konačna čvrstoća je nešto niža. [1]

Pri temperaturi od 5 °C čvrstoća betona je niža od čvrstoća pri visokoj temperaturi, prirast čvrstoće je također slabiji stoga se ova temperatura naziva granicom niske temperature betona. Međutim, niže temperature su zahvalnije kada se beton održava na njima te nakon toga na referentnoj temperaturi (20 °C) nego kada se održava na visokim temperaturama pa nakon toga na referentnoj. U tom slučaju (na 20 °C) čvrstoća betona prelazi čvrstoću pri niskim temperaturama što nije slučaj pri prelazu sa visokih temperatura na referentnu (slika 2.4.). [1]



Slika 2.4. Čvrstoća uzorka pri različitim temperaturama [5]

### 2.1.5. Utjecaj vlage na tlačnu čvrstoću

Tlačna čvrstoća vlažnog uzorka znatno je veća od čvrstoće suhog uzorka. Poželjno je da se betonski uzorak njeguje u bazenima napunjenima vodom sa optimalnom vlažnošću prostorije. Općenito, ako se njegovani uzorak prestane vlažiti, on gubi na svojoj tlačnoj čvrstoći. Betonski uzorak koji je naknadno njegovan također neće imati tlačnu čvrstoću kao uzorak koji je konstantno njegovan (od trena vađenja iz kalupa do dana testiranja). Ako se beton neposredno prije ispitivanja kratko vrijeme osuši, čvrsti slojevi unutar cementnog kamena se evaporacijom vode približe, formiraju se meniskusi u porama, aktiviraju kapilarne sile, koje pojačaju skupljanje vanjskog dijela betona, tako da unutrašnjost dođe pod tlak. Što se voda više povlači u sitnije kapilare, to su meniskusi jače zakrivljeni, a sile privlačenja stijenki veće. Zbog toga se pod opterećenjem čvrsti slojevi betona teže razmiču, što rezultira povećanom čvrstoćom (povećanje čvrstoće do 20%)[5]. Na slici 2.5 prikazan je utjecaj vlažnosti uzorka na tlačnu čvrstoću betonskog uzorka.



Slika 2.5. Utjecaj vlažnosti uzorka na tlačnu čvrstoću [5]

### 2.1.6. Utjecaj starosti uzorka na tlačnu čvrstoću

Općenito se betonski uzorci ispituju nakon 2, 3, 7 ili 28 dana starosti [1]. Beton nakon mjesec dana ima najveći prirast tlačne čvrstoće, no taj prirast ne prestaje rasti (iako rast slabi s vremenom) te beton koji je star godinu dana ima čak 30% veću tlačnu čvrstoću nego beton star 28 dana. Zaključak je da beton ima veću tlačnu čvrstoću što je stariji. U tablici 2.2. prikazan je omjer tlačne čvrstoće betona ovisno o starosti betona naspram starosti betona od 28 dana.

dani (t)	$f_{cm}(t)/f_{cm}(28)$
1	0,27
3	0,59
7	0,78
14	0,89
21	0,96
28	1,00

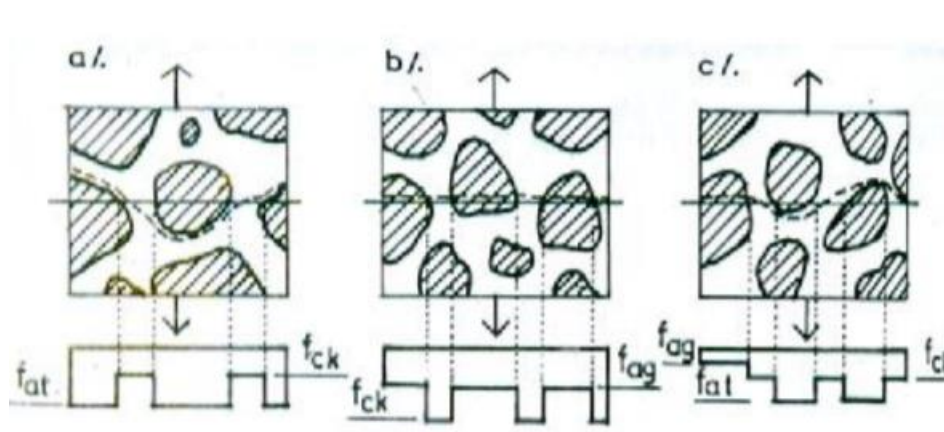
Tablica 2.2. Tlačna čvrstoća betona u funkciji vremena [6]

### 2.1.7. Utjecaj vrste cementa i karakteristike agregata na tlačnu čvrstoću

Čvrstoća betona i čvrstoća cementa linearno su proporcionalni. Najosjetljivije mjesto loma je spoj cementnog kamena i zrna agregata, stoga čvrstoća ponajviše ovisi o teksturi zrna. Čvrstoća cementnog kamena je manja nego čvrstoća zrna agregata.

Za betone čvrstoće oko 30 MPa ploha loma (slika 2.6.) prolazi kroz cementni kamen, te oko zrna agregata (kontaktna zona). Ako su čvrstoće na pritisak veće, ploha loma prolazi i kroz samo zrno. Čvrstoća betona se povećava korištenjem agregata dovoljno visoke čvrstoće.

Indirektno na čvrstoću utječe i oblik zrna i hrapavost površine. Agregat nepovoljnog oblika stvara poteškoće u obradljivosti pa je potrebna veća količina paste da bi se obavilo zrno, što rezultira smanjenjem čvrstoće. [3]

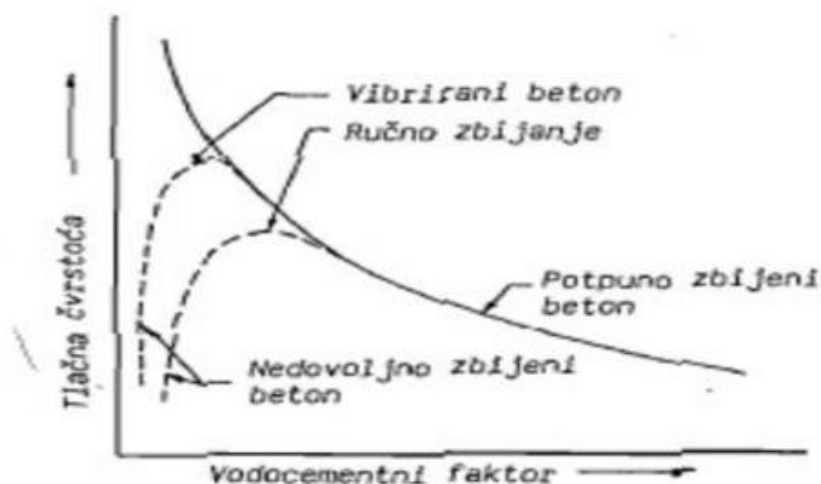


Slika 2.6. Osnovni tipovi loma betona [6]



### 2.1.8. Utjecaj vodocementnog faktora i poroznosti na tlačnu čvrstoću

Poroznost ima značajan utjecaj na čvrstoću, jer se povećanjem poroznosti za 1% čvrstoća smanji za 3-5%. [5] Poroznost cementnog kamena ima odlučujući utjecaj na čvrstoću, međutim nepraktična je za određivanje čvrstoće betona. Zbog toga se koristi odnos čvrstoće betona prema vodocementnom faktoru (slika 2.7.). Prema slici, niži vodocementni faktor daje betone bolje čvrstoće, ali uz njegovu potpunu zbijenost. Poznato je da manji vodocementni faktor daje betone slabije obradivosti, te je za njegovo pravilno i potpuno zbijanje potrebno uložiti više energije.



Slika 2.7. Odnos vodocementnog faktora i čvrstoće betona [5]

### 2.1.9. Utjecaj aditiva na tlačnu čvrstoću

Aditivi su tvari koje, dodane u svježu mješavinu tijekom miješanja ili transporta, modificiraju svojstva svježeg ili očvrstlog betona, morta ili cementne paste. Dodavanjem aditiva dobivaju se bolje karakteristike betona kao što su čvrstoća na vlak i pritisak, brži razvoj čvrstoće betona, veća čvrstoća betona u ranom periodu te se konzistencija svježeg betona postiže sa manjim v/c faktorom.

Aditivi tj. konkretno plastifikatori snižavaju površinsku napetost vode u betonu, olakšavajući namakanje zrna cementa vodom što dovodi do upotrebe manje količine vode za pripremu betonske mješavine. Dodavanjem zraka stvara se velik broj mjehurića zraka malih dimenzija (50- 300  $\mu\text{m}$ ), čime se znatno smanjuje opasnost od štetnog djelovanja mraza, poboljšava se obradivost i smanjuje segregacija u betonu. Glavni razlog unošenja sitnih mjehurića u beton je povećanje njegove otpornosti na djelovanje mraza. [4] Aeranti djeluju na tlačnu čvrstoću tako da je održavaju konstantnom (istom) dok za istu čvrstoću smanjuju količinu potrebnog v/c faktora. Aditivi (ubrzivači ili usporivači vezivanja tj. retarderi) utječu na

vezivanje cementa s vodom, te vezivanjem cementne paste sa agregatom na način da ubrzaju ili uspore proces vezivanja.

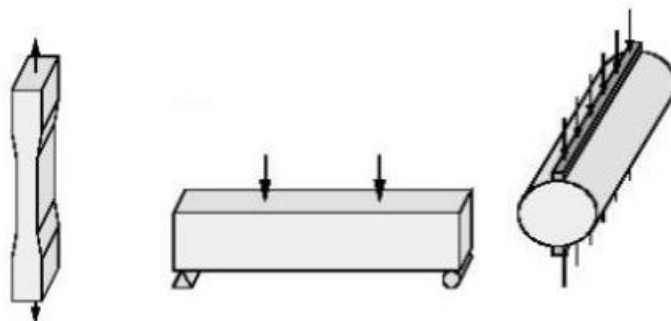
Količina aditiva koja se dodaje betonu u svježem stanju zove se doza (promil ili postotak). Iskazuje se težinski tj. u postocima mase cementa. [4]

## 2.2. Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća je značajno manja od tlačne čvrstoće i varira s obzirom na način ugradbe betona. U praksi se koristi pri provjeri glavnih vlačnih napona i graničnih stanja uporabljivosti. Tablica 2.1. prikazuje vlačne čvrstoće s obzirom na razred karakteristične tlačne čvrstoće betona. Obično se koristi srednja osna vlačna čvrstoća u tablici označena kao  $f_{ctm}$ , između gornje  $f_{ctk,0.95}$  i donje granice  $f_{ctk,0.05}$  karakteristične vlačne čvrstoće, odnosno one sa 5%-tim i druge s 10%tnim fraktilom. Donja granična vrijednost za vlačnu čvrstoću  $f_{ctk,0.05}$  predstavlja veličinu koja će imati ili čak prekoračiti 95% rezultata ispitivanja, a samo će 5% biti ispod nje. Gornja granična vrijednost za vlačnu čvrstoću  $f_{ctk,0.95}$  predstavlja veličinu koja će prekoračiti samo 5% rezultata, a 95% će dati vrijednost jednaku ili manju od nje. Vlačna čvrstoća vrlo je nepouzdana veličina, a kreće se okvirno od 1/5 do 1/15 tlačne čvrstoće. [4]

Vlačna čvrstoća betona može se ispitati na više različitih načina, od kojih su svi standardizirane metode (slika 2.8.) [1]:

- 1.) Ispitivanje pri čistom vlaklu (direktna metoda; direktno razvlačenje uzorka – određivanje čiste vlačne čvrstoće)
- 2.) Ispitivanje pri savijanju (određivanje savojne vlačne čvrstoće)
- 3.) Ispitivanje cijepanjem po izvodnici koja se još naziva i Brazilska metoda (metoda cijepanja valjka)



Slika 2.8. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona [4]

Ispitivanje vlačne čvrstoće betona se vrši na uzorcima valjka ili prizme koji variraju u dimenzijama. Prizme su veličine  $10 \times 10 \times 50\text{cm}$ ,  $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  ili  $12 \times 12 \times 45\text{cm}$  (ispitivanje savojne vlačne čvrstoće). Valjci su veličine  $D = 10\text{cm}$ , te visine  $20\text{cm}$  (Brazilska metoda).

### 2.3. Čvrstoća na posmik, udar i umor

Posmik se gotovo nikad ne javlja u čistom obliku, nego uvijek u kombinaciji sa ostalim naprezanjima. Čista posmična čvrstoća betona je negdje između tlačne i vlačne čvrstoće. Ne postoji funkcionalni odnos između udarne čvrstoće i statičke kratkotrajne čvrstoće, pa je treba odrediti eksperimentalno. Ispitivanje se vrši tako da se uzorak izloži ponavljanim uzorcima nekog padajućeg tereta, sve dok teret ne prestane odskakati. Time se dolazi do zaključka da se na uzorku pojavila pukotina. Mjera na otpornost udara je izračunata apsorbirana energija po jedinici volumena uzorka. Takva mjera prikladna je za uspoređivanje rezultata za različite visine ili veličine uzoraka, kao i tereta. [5]

Čvrstoća betona na udar raste kako raste i tlačna čvrstoća. Nadalje, može se zaključiti da se udarna čvrstoća povećava sa starošću betona. Na udarnu čvrstoću utječe oblik i tekstura krupnijih frakcija agregata. Bolji rezultati su se pokazali ako se koristi agregat koji je uglat i hrapav (drobljeni agregat). Povoljnije je i da je manje maksimalno zrno agregata, kao i modul elastičnosti agregata. Uzorci koji su prethodno posušeni daju bolje rezultate.

S obzirom da ne postoje normirane metode ispitivanja, koriste se empirijske metode za izračun posmika i odreza:

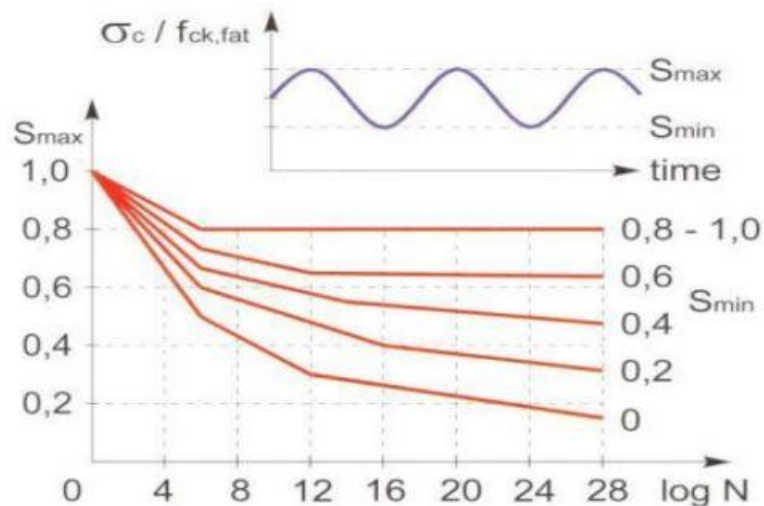
$$\begin{aligned} f_{cp} &\sim 3f_{ct,m} - \text{čisti odrez} \\ f_{cp} &\sim 2f_{ct,m} - \text{posmik} \end{aligned} \quad (4)$$

pri čemu su:

$f_{cp}$  – čvrstoća betona na odrez/posmik

$f_{ct,m}$  – srednja vrijednost vlačne čvrstoće za određenu klasu betona

Čvrstoća na umor je posljedica dugotrajnih cikličkih i dugih ponavljanja opterećenja. Samo povećavanje plastične deformacije je mjera koliko se uzorak kojeg ispitujemo približio zakazivanju zbog zamora. Kod dugotrajnog mirnog opterećenja plastične deformacije u cementnom kamenu agregat ne može slijediti te se veze među njima kidaju i stvaraju se pukotine, koje se pod tim nivoom opterećenja šire što dovodi do progresivnog sloma. Upravo to je i jedan od razloga uvođenja parcijalnog koeficijenta sigurnosti. [5] Ispitni uzorci izloženi su naprezanjima koja se mijenjaju od minimalne do maksimalne vrijednosti. Obično se navode relativne vrijednosti maksimalnog i minimalnog naprezanja i u odnosu na statičku čvrstoću betona. Slom ispitivanog uzorka nastaje nakon određenog broja ciklusa. Rezultat ispitivanja je niz krivulja čvrstoće na zamor koje su također poznate kao S-N krivulje ili Wohler krivulje (slika 2.9.). Kod betona, one predstavljaju odnos između maksimalnog naprezanja i broja 11 ciklusa N pri kojem se ispitivani uzorak slomio. Odnos je uvijek definiran za određeni nivo minimalnog naprezanja  $\sigma_{min}$ . [7]

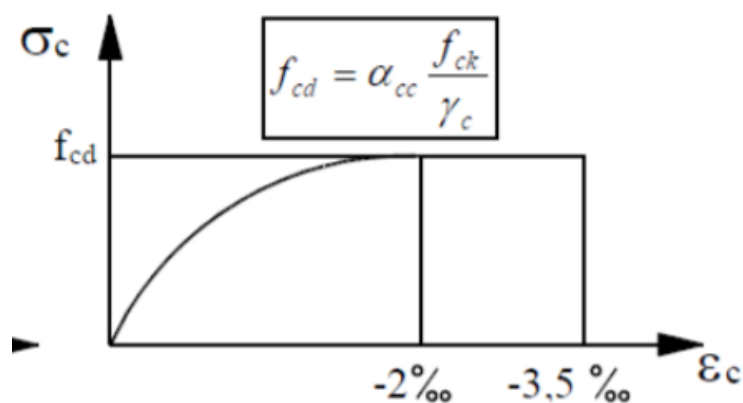


Slika 2.9. S – N krivulje [7]

## 2.4. Računska čvrstoća

Računska čvrstoća koristi se za dimenzioniranje prema graničnim stanjima nosivosti. Prema Eurocodeu 2, dijeljenjem tlačne čvrstoće dobivene ispitivanjem na valjku sa koeficijentom sigurnosti za materijale ( $\gamma_M = \gamma_C = 1.5$ ) te dodatnim reduciranjem koeficijentima  $\alpha = 0.85$  ili  $\alpha = 0.80$  zbog nepovoljnih učinaka dugotrajnog opterećenja i dinamičkog djelovanja te zbog razlike čvrstoće u konstrukciji i one probnih tijela (slika 2.10.), dobije se tražena računaska čvrstoća koja iznosi [4]:

$$\alpha \cdot f_{cd} = \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{1.5} \quad (5)$$

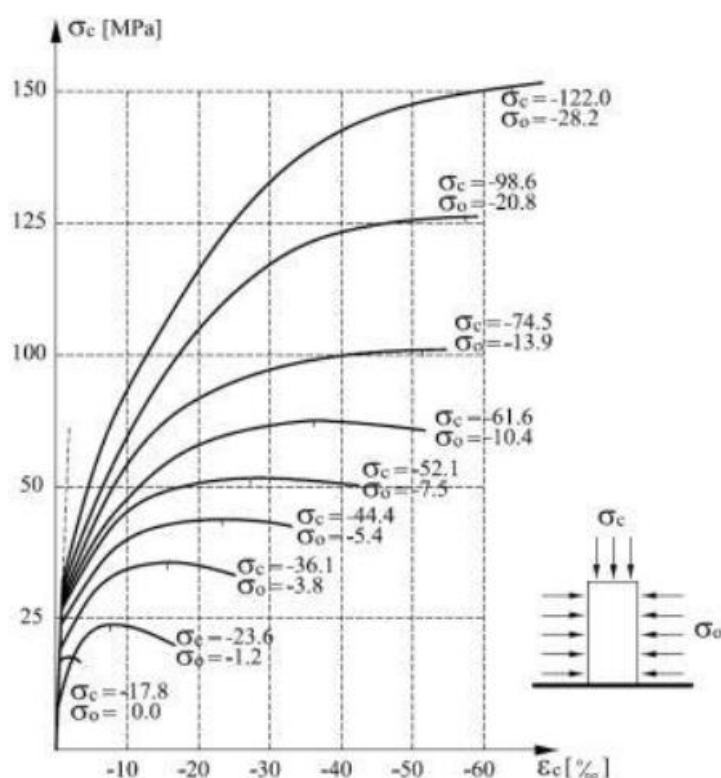


Slika 2.10. Računski dijagram betona [8]

## 2.5. Višeosna čvrstoća

Postoji razlika u čvrstoći betona ovisno radi li se o jednoosnom ili višeosnom stanju napreznja. Višeosna čvrstoća znatno je veća od jednoosne. Kod dvoosnog stanja napreznja odnos dvoosne prema jednoosnoj čvrstoći je oko 1,25 - 1,40, a kod troosnog stanja napreznja odnos troosne prema jednoosnoj čvrstoći je čak 4 - 7 puta. [4] Prema rezultatima ispitivanja u stanju troosnog tlačnog napreznja prema radovima Richarta, Balmera, Brandtzaega i Browna dolazi do velikog porasta čvrstoće i deformacije betona. Za isti razred betona, tlačna čvrstoća je i 6 puta veća. Beton ima nehomogenu strukturu, pa se teorije čvrstoće na betonu mogu primjenjivati uz aproksimaciju. [8]

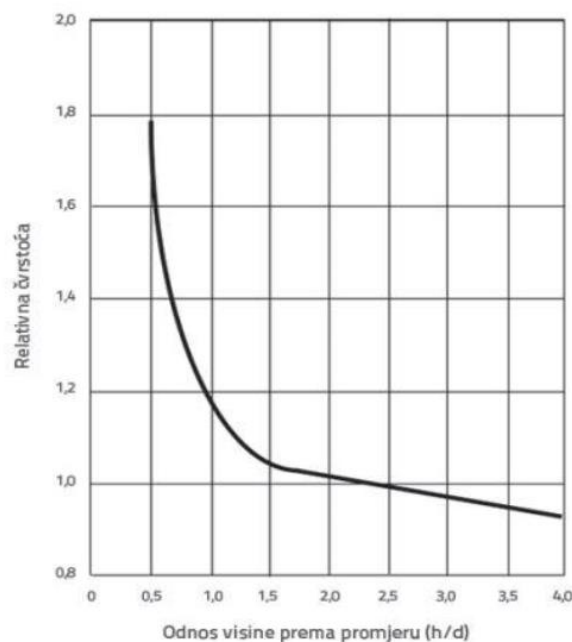
Troosno ispitivanje se vrši na troosnom uređaju s mjerenjem deformacija. Uzorak (valjak ili kocka standardnih dimenzija) se postavlja u uređaj te se prvo tlači kao kod ispitivanja tlačne čvrstoće (jednoosno napreznje  $\sigma_1$ ). Zatim se postupno dodavaju opterećenja sa strane uzorka ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) koja su jednake veličine te se mjere deformacije uzorka u vremenu. Bočna pritisak u pravilu ne prelazi 50% vrijednosti čvrstoće dobivene jednoosnim napreznjem. (slika 2.11.)



Slika 2.11 Troosno stanje napreznja [4]

### 3. UTJECAJ VELIČINE UZORKA NA VRIJEDNOSTI TLAČNE ČVRSTOĆE

U slučaju odstupanja dimenzija uzoraka (prvenstveno radi uzoraka koji se uzimaju na terenu iz dijelova konstrukcije) dolazi i do odstupanja rezultata čvrstoće. Za svođenje takvih čvrstoća na čvrstoću standardnog uzorka koriste se koeficijenti konverzije. Ti koeficijenti ovise i o određenim karakteristikama betona. Za primjer se može uzeti promjena tlačne čvrstoće uzorka valjka s obzirom na njegovu visinu (slika 1.3.).



Slika 1.3. Utjecaj odnosa visine i promjera valjka na relativnu čvrstoću [9]

Kod  $h/d < 1,5$  (gdje je  $h$  visina valjka, a  $d$  promjer baze valjka) čvrstoća naglo raste što se više smanjuje taj odnos (utjecaj spriječenosti bočnog širenja, opada sa homogenošću uzoraka). U rasponu odnosa od 1,5 do 4 neznatan je utjecaj na čvrstoću. Bitno je naglasiti da unutar raspona od 1,5 do 2,5 čvrstoća betona odstupa od čvrstoće valjaka standardnih dimenzija samo 5%. Kod uzoraka sa  $h/d > 4$  dolazi do naglog smanjena čvrstoće zbog utjecaja vitkosti. Iz priložene slike lako je zaključiti da je izabrani odnos visine i promjera 2 pogodan jer pri malim odstupanjima od ovog odnosa imamo neznatnu promjenu tlačne čvrstoće.

S obzirom da se ispitivanje tlačne čvrstoće betona izvodi na uzorcima dimenzija propisanih prema normi HRN EN 12390-3, pitanje je kakva je tlačna čvrstoća betona kod uzoraka koji su različitih dimenzija.

Naime, ispitni uzorci različitih dimenzija izrađeni od istog betona imaju različite tlačne čvrstoće. U tim se slučajevima primjenjuju koeficijenti pomoću kojih se postojeća čvrstoća uzoraka svodi na čvrstoću uzoraka standardnih dimenzija.

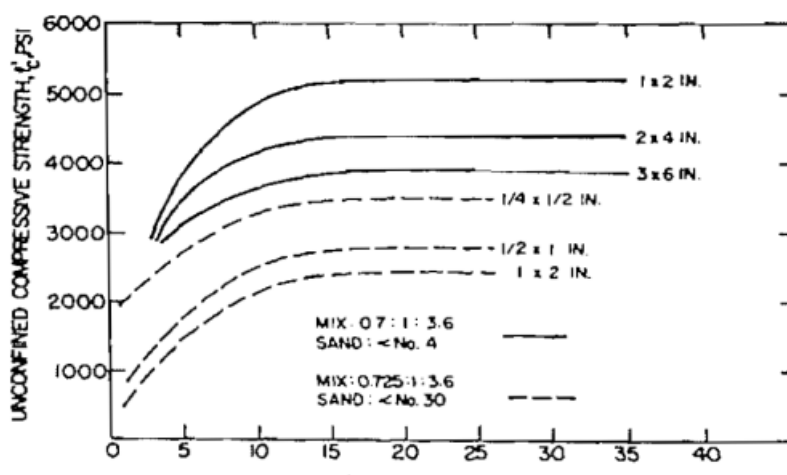
Prvo ispitivanje proveo je Gonnerman 1920. godine, kada je ispitivao tlačnu čvrstoću valjaka dimenzija 3,8 x 7,6 cm te 15 x 30 cm ovisno o vodocementnom omjeru. Ispitivanjem je potvrdio da uzorci manjih dimenzija imaju veću tlačnu čvrstoću nego uzorci većih dimenzija.

Četrdesetak godina kasnije, Jonhson je razvio postupke za testiranje čvrstoće betona pogodne za primjenu kod betonskih konstrukcija; maksimalnih zrna agregata od 15mm, 8mm, 4mm te 2 mm. U svim mješavinama koristio je brzovezujući Portland cement i prirodni pijesak. Testirao je valjke 28x76mm i 150x300mm te kocke brida 75mm. Njegovi zaključci podudarali su se s onima koje je Gonnerman ustanovio. [10]

Harris i White su ispitivali uzorke različitih dimenzija (50x100mm, 75x150mm). Rezultati ispitivanja su pokazali da tlačna čvrstoća opada povećanjem dimenzija uzoraka. Također su ustvrdili da uzorci manjih dimenzija imaju i veći prirast tlačne čvrstoće (slika 3.1.). [10]

Krolo je ustanovio da vrijednosti parametara mehanike loma ovise o geometriji uzorka. On je ispitivao utjecaj nehomogenosti betona na parametre mehanike loma sa različitim uzorcima betona sa različitim karakteristikama (čvrstoća, maksimalno zrno agregata, veličina uzorka). [9]

Trenje koje se javlja između uzorka i ispitnih ploča također utječe na tlačnu čvrstoću betona. Trenje sprječava bočno širenje uzorka što rezultira većim tlačnim čvrstoćama.



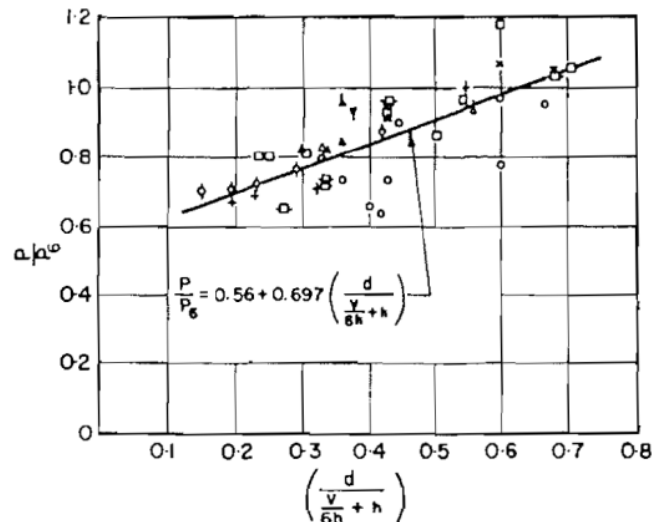
Slika 3.1. Rezultati ispitivanja Harris i Whitea [10]

Pang i Tsui su zaključili da se s povećanjem dimenzija uzoraka smanjuju tlačna čvrstoća i standardna devijacija čvrstoće. Koristili su uzorke betona izrađene s cementom visoke čvrstoće te s 5 različitih frakcija kvarcnog pijeska. Uzorci su bili dimenzija 2,5 x 5 cm te 15 x 30 cm (valjci). [10]

Neville je potvrdio u svojim istraživanjima da se sa smanjenjem veličine ispitnog uzorka povećava tlačna čvrstoća i standardna devijacija. Čvrstoću betona (P) prikazao je u funkciji volumena uzorka (V), promjera uzorka (d) te odnosa h/d, gdje je h visina uzorka. Neville je pokušao uspostaviti odnos čvrstoće uzorka različitih veličina te kocke dimenzija 15cm, te je uspostavio odnos koji je zadan relacijom:

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

$h$  i  $d$  su zadani u inčima, a  $V$  u kubičnim inčima. [10] Odnos je prikazao u grafu na slici 3.2.



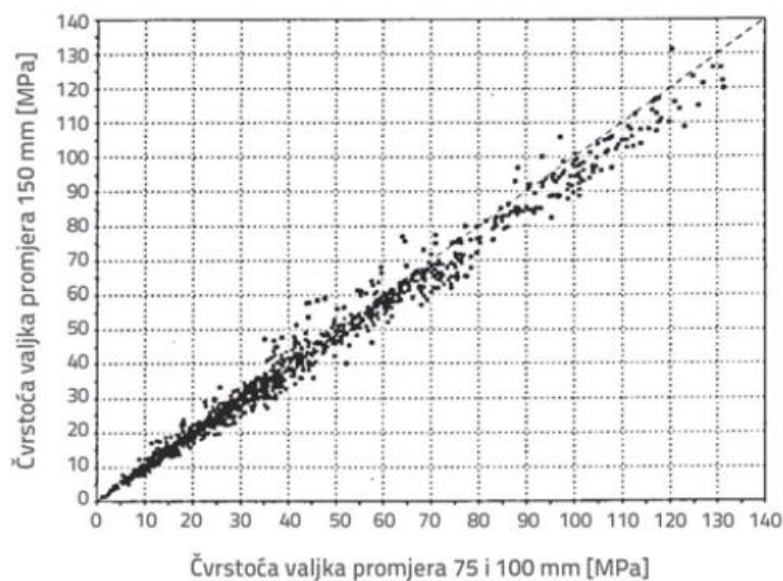
Slika 3.2. Nevilleovo istraživanje [10]

Ispitivanja Bureau of Reclamation 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. [1]

Griffith je ustanovio da s povećanjem veličine ispitnog uzorka dolazi do veće vjerojatnosti pojave najslabije karike u njemu. Lom se događa uslijed nastanka najveće mikropukotine koja je posljedica koncentracije naprezanja pri djelovanju opterećenja. Ako se pukotina promatra kao deformacija u materijalu, tada pojavu pukotine možemo očekivati u uzorcima većih dimenzija (manja čvrstoća uzorka). 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%. [1]

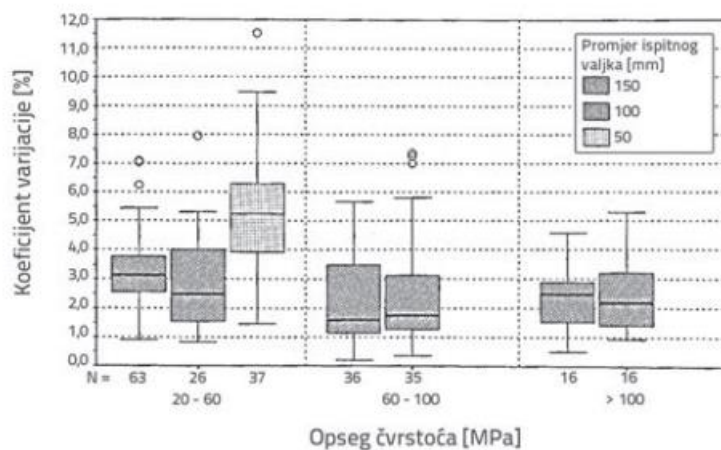
Day je ispitivao utjecaj veličine uzorka i materijal kalupa (karton i plastika) na tlačnu čvrstoću betona. Koristio je uzorke valjaka promjera 75, 100 i 150 mm. Omjer visine i promjera je 2 za sve uzorke. Uzorci promjera imali su u prosjeku za 1 MPa veću čvrstoću od uzoraka većeg promjera, dok su uzorci promjera 15 cm imali u prosjeku 1,4 MPa manju čvrstoću od uzoraka manjih promjera. Day je odradio ispitivanje na više od 8000 uzoraka, te je usporedio svoja ispitivanja s ispitivanjima ostalih autora. Također je prikazao veze čvrstoće valjka promjera 100 mm ( $f_{100}$ ) i 150 mm ( $f_{150}$ ). Autor je grafički prikazao odnos čvrstoća na uzorcima promjera 75, 100, 150 mm (slika 3.3). [9]





Slika 3.3. Veza čvrstoća na uzorcima 75, 100 i 150mm [9]

Na slici je vidljivo da se s povećanjem vrijednosti čvrstoće povećava i odstupanje rezultata od pravca veze  $f_{75/100} = f_{150}$ . autor je zaključio da je čvrstoća uzorka izrađenog u kalupu promjera 100mm(čelik, plastika) u rangu ispitnih čvrstoća od 20 do 100 Mpa za oko 5% veća od rezultata na uzorcima promjera 150 mm. Za područje manjih ispitnih čvrstoća(20 – 60 MPa) prihvatljivo je uzeti tezu  $f_{100} = f_{150}$ (slika 3.4.). Takvu tezu također treba potvrditi ovlašteni ispitivač.



Slika 3.4. Ovisnost koeficijenta varijacije o čvrstoći i promjeru valjka [9]

S obzirom da je upotreba kalupa dimenzija 100×200 mm jednostavnija za upotrebu te traži manje materijala, Vandergrift i Schindler su uspostavili faktor konverzije između uzoraka promjera 100 i 150 mm. Statistička obrada podataka prikazana je u tablici 3. [9]

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

Tablica 3. Faktor konverzije  $f_{100} = f_{150} \times k$  [9]

Standardna devijacija i koeficijent varijacije čvrstoće manjih uzoraka nešto su viši ili isti kao kod uzoraka promjera 150mm.

Za određivanje tlačne čvrstoće betona u konstrukcijama, u normi HRN EN 13791:2007 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] 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.

## 4. UTJECAJ VELIČINE UZORAKA NA REZULTATE – PREGLED DOSADAŠNJIH ISPITIVANJA

### 4.1. Koeficijenti pretvorbe tlačne čvrstoće betona na koju utječu oblik i veličina uzorka; Zabihi i Eren [11]

Zabihi i Eren u svom su radu koristili 2 mješavine različitih karakteristika u svrhu studije utjecaja dimenzije i oblika ispitnog uzorka na tlačnu čvrstoću uzorka pri raznim opterećenjima i uvjetima njegovanja. Prva mješavina je sadržavala čvrstoću manju od 54 MPa, dok je druga mješavina sadržavala čvrstoću manju od 73 MPa (tablica 4.1.).

Table 1: Mix design of strength level I and II

C (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	Fine (kg/m <sup>3</sup> )	D10 (kg/m <sup>3</sup> )	D14 (kg/m <sup>3</sup> )	D20 (kg/m <sup>3</sup> )	level	Range <sup>a</sup>
402	225	0.56	815	167	251	501	I	30-54
486	170	0.35	628	212	318	630	II <sup>b</sup>	50-73

<sup>a</sup>: Regardless of curing method; <sup>b</sup>: Super plasticizer (glenium, 0.6% by weight of cement) is used for this concrete strength levels

Tablica 4.1. Karakteristike mješavina Zabihi i Eren [11]

Za uzorke kocki su koristili 3 različite veličine (duljina brida 100, 150 i 200mm), te za uzorke valjaka 2 različite veličine (100×200mm i 150×300mm; promjer×visina) (slika 4.1.).

Table 2: Specimen shape and size

Specimen shape	Specimen size (mm)
Cylinder	100×200 (diameter×length)
Cylinder	150×300 (diameter×length)
Cube	100
Cube	150
Cube	200

Slika 4.1. Dimenzija uzoraka valjka i kocki [11]

Uzorci su ugrađeni u kalupe u 3 sloja, te su pred vibrirani na vibro stolu. Njega se odvijala tako da je dio uzoraka bio držan 24h u prostoriji sa vlažnošću većom od 90% i sobnom temperaturom oko 21 °C, dok je drugi dio uzoraka njegovan u vodi sve do trenutka testiranja.

Table 3: Results of hardened density and slump

Strength level	Hardened density (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (mm)
I	2385	65
II	2477	20

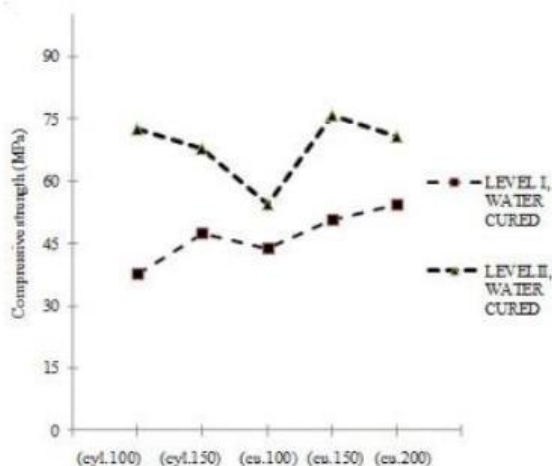
Slika 4.2. Gustoća i slump test mješavine 1 i 2 [11]

Table 4: Cross-sectional area of specimens

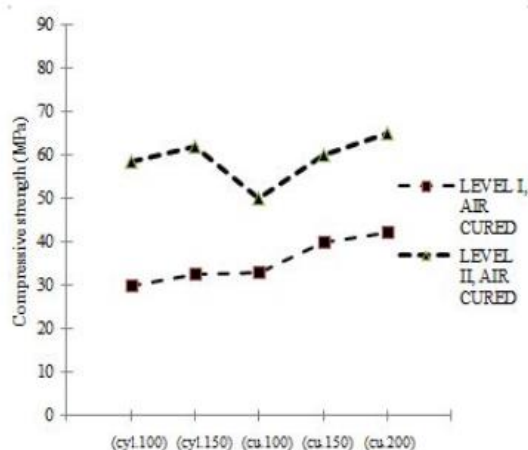
Specimen shape and size (mm)	Cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )
Cylinder 100×200	7854
Cylinder 150×300	17671
100 <sup>3</sup>	10000
150 <sup>3</sup>	22500
200 <sup>3</sup>	40000

Slika 4.3. Poprečni presjeci uzoraka

U prilogu su prikazani rezultati čvrstoća uzoraka njegovanih na zraku(slika 4.4.), te uzoraka njegovanih u vodi(slika 4.5.).



Slika 4.4. Čvrstoća uzoraka njegovanih na zraku [11]



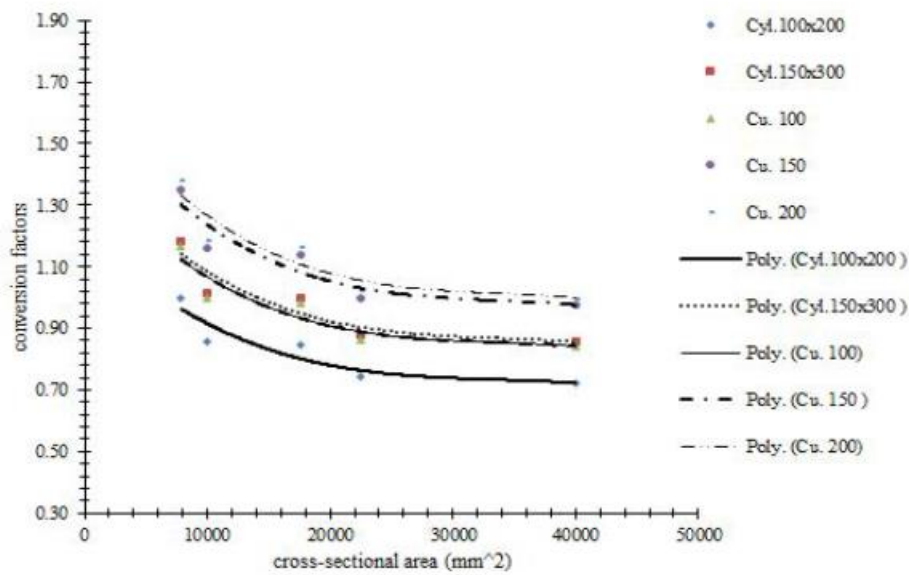
Slika 4.5. Čvrstoća uzoraka njegovanih u vodi [11]

Detaljni rezultati za mješavinu 1 prikazani su u idućim grafovima i tablicama: Tablica sa koeficijentima pretvorbe čvrstoće(tablica 4.2.), graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih u vodi(slika 4.6.), graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih na zraku(slika 4.7.) te tablica koeficijenata sa najboljim krivuljama faktora pretvorbe za mješavinu 1(tablica 4.3.).

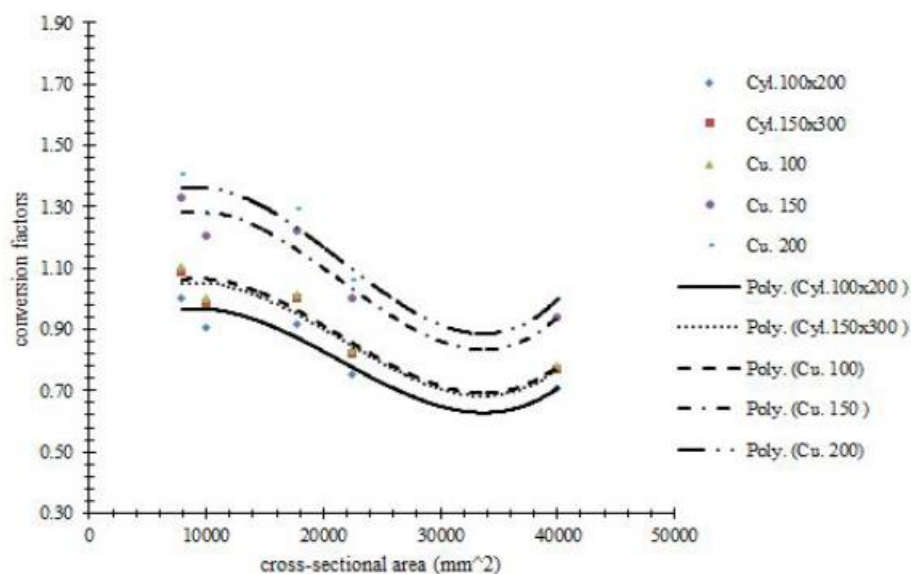
Table 5: Conversion factors for strength level I

Water cured	Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
Cylinder 100×200	1.00	1.18	1.16	1.35	1.38
Cylinder 150×300	0.84	1.00	0.98	1.14	1.17
100 <sup>3</sup>	0.86	1.02	1.00	1.16	1.19
150 <sup>3</sup>	0.74	0.88	0.86	1.00	1.02
200 <sup>3</sup>	0.72	0.86	0.84	0.98	1.00
Air cured	Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
Cylinder 100×200	1.00	1.09	1.10	1.33	1.41
Cylinder 150×300	0.92	1.00	1.01	1.22	1.30
100 <sup>3</sup>	0.91	0.99	1.00	1.21	1.28
150 <sup>3</sup>	0.75	0.82	0.83	1.00	1.06
200 <sup>3</sup>	0.71	0.77	0.78	0.94	1.00

Tablica 4.2. Tablica sa koeficijentima pretvorbe čvrstoće za mješavinu 1 [11]



Slika 4.6. Graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih u vodi [11]



Slika 4.7. Graf faktora pretvore u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih na zraku [11]

Table 6: Coefficients of best fitting curves of conversion factors-strength level I

		Water cured				
		Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
$Y = a + b/x + c/x^2 + d/x^3$						
a		5.23E-01	6.34E-01	6.14E-01	7.18E-01	7.29E-01
b		1.04E+04	1.19E+04	1.19E+04	1.39E+04	1.42E+04
c		-1.32E+08	-1.51E+08	-1.51E+08	-1.77E+08	-1.79E+08
d		6.23E+11	7.10E+11	7.10E+11	8.43E+11	8.39E+11
R <sup>2</sup>		0.94	0.93	0.93	0.93	0.92
		Air cured				
		Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
$Y = ax^3 + bx^2 + cx + d$						
a		5.03E-14	5.04E-14	5.04E-14	6.26E-14	6.97E-14
b		-3.25E-09	-3.25E-09	-3.25E-09	-4.03E-09	-4.51E-09
c		4.82E-05	4.69E-05	4.69E-05	5.86E-05	6.70E-05
d		7.61E-01	8.58E-01	8.68E-01	1.04E+00	1.08E+00
R <sup>2</sup>		0.88	0.88	0.88	0.88	0.87

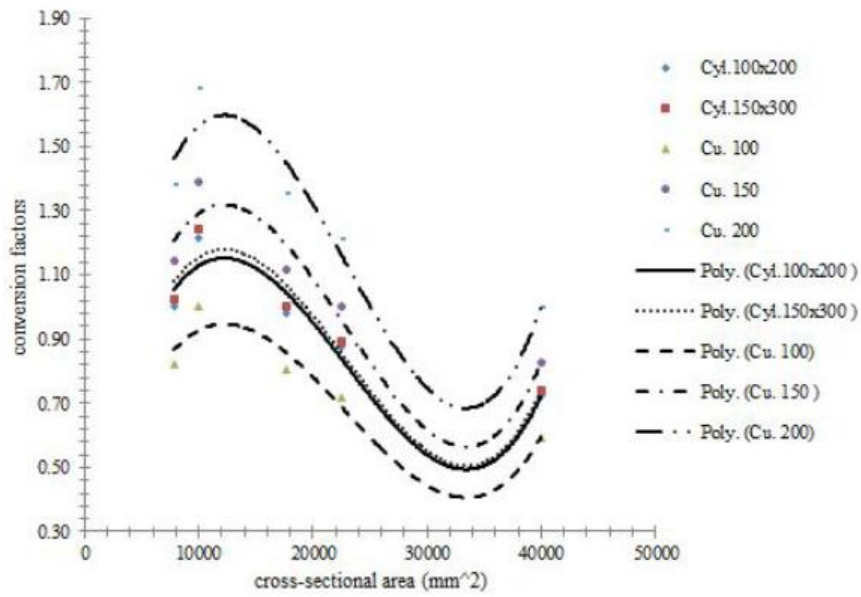
Tablica 4.3. Tablica koeficijenata sa najboljim krivuljama faktora pretvorbe za mješavinu 1 [11]

Detaljni rezultati za mješavinu 2 prikazani su u idućim grafovima i tablicama: Tablica sa koeficijentima pretvorbe čvrstoće (tablica 4.4.), graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih u vodi (slika 4.8), graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih na zraku (slika 4.9.) te tablica koeficijenata sa najboljim krivuljama faktora pretvorbe za mješavinu 2 (tablica 4.5.).

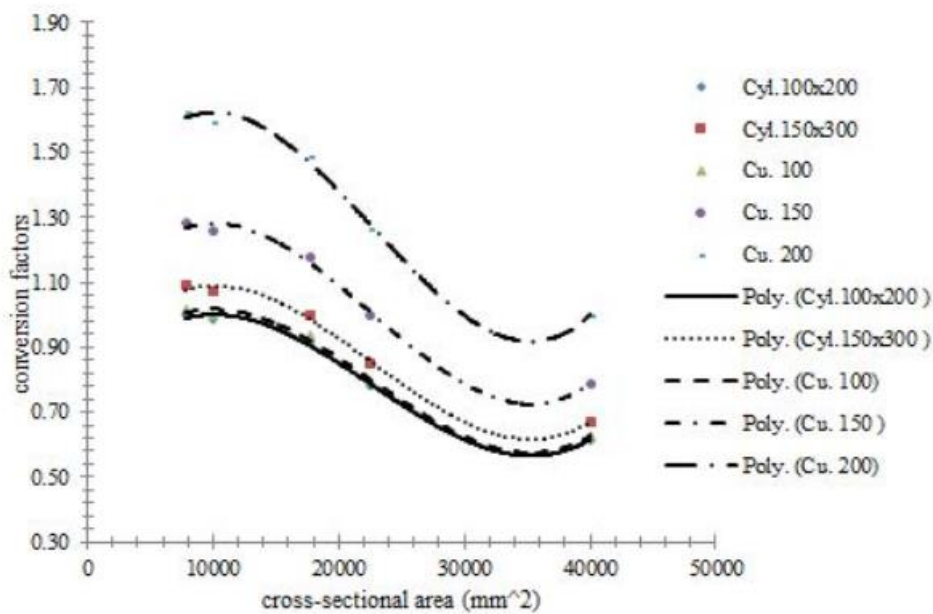
Table 7: Conversion factors for strength level II

		Water cured				
		Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
Cylinder 100×200		1.00	1.02	0.82	1.14	1.39
Cylinder 150×300		0.98	1.00	0.80	1.12	1.36
100 <sup>3</sup>		1.22	1.24	1.00	1.39	1.69
150 <sup>3</sup>		0.87	0.89	0.72	1.00	1.21
200 <sup>3</sup>		0.72	0.74	0.59	0.82	1.00
		Air cured				
		Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
Cylinder 100×200		1.00	1.09	1.02	1.28	1.62
Cylinder 150×300		0.92	1.00	0.93	1.18	1.49
100 <sup>3</sup>		0.98	1.07	1.00	1.26	1.60
150 <sup>3</sup>		0.78	0.85	0.79	1.00	1.27
200 <sup>3</sup>		0.62	0.67	0.63	0.79	1.00

Tablica 4.4. Tablica sa koeficijentima pretvorbe čvrstoće za mješavinu 2 [11]



Slika 4.8. Graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih u vodi [11]



Slika 4.9. Graf faktora pretvorbe u odnosu na poprečni presjek uzoraka njegovanih na zraku [11]



Table 8: Coefficients of best fitting curves of conversion factors-strength level II

		Water cured				
		Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
$Y = a + b/x + c/x^2 + d/x^3$						
a		6.77E-01	6.97E-01	5.50E-01	7.50E-01	9.31E-01
b		-3.29E+03	-3.29E+03	-2.35E+03	-2.50E+03	-3.98E+03
c		2.39E+08	2.39E+08	1.90E+08	2.54E+08	3.21E+08
d		-1.52E+12	-1.52E+12	-1.22E+12	-1.65E+12	-2.05E+12
R <sup>2</sup>		0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
		Air cured				
		Cylinder 100×200	Cylinder 150×300	100 <sup>3</sup>	150 <sup>3</sup>	200 <sup>3</sup>
$Y = ax^3 + bx^2 + cx + d$						
a		5.45E-14	5.82E-14	5.40E-14	7.24E-14	8.90E-14
b		-3.71E-09	-3.96E-09	-3.64E-09	-4.94E-09	-6.07E-09
c		5.83E-05	6.18E-05	5.59E-05	7.84E-05	9.56E-05
d		7.33E-01	8.09E-01	7.69E-01	9.20E-01	1.19E+00
R <sup>2</sup>		0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Tablica 4.5. Tablica koeficijenata sa najboljim krivuljama faktora pretvorbe za mješavinu 2 [11]

Zaključci koje su donijeli Zabihi i Eren na temelju eksperimentalnog dijela rada su slijedeći:

- Čvrstoća za svaki tip prateće krivulje očvršćivanja slijedi određeni model, za koji je utvrđeno da je inverzni polinom trećeg reda za uzorke njegovane vodom i zrakom
- Prema rezultatima ispitivanja, ponašanje faktora pretvorbe prema površinama presjeka betonskih uzoraka osciliraju sa promjenom čvrstoće uzoraka
- Razlog različitih oblika krivulja za vodom njegovane i zrakom njegovane uzorke mogu biti različiti utjecaji na uvjet stvrdnjavanja uzorka, te povećanje čvrstoće uzorka različitog oblika
- Spomenuti razlog može biti zapaženiji ako se razmotri utjecaj bočne površine uzoraka kocke i valjka

#### 4.2. Odnos između tlačne čvrstoće uzorka kocke i valjka; Ritu Kumari [12]

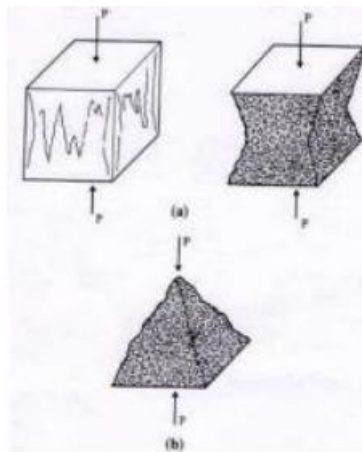
U svome radu Kumari je koristio standardne veličine uzoraka kocke (15×15×15 cm) i valjka (promjer 15 cm, visina 30 cm). Uzorci su bili ispitani nakon 7 i 28 dana njegovanja. Kumari je prvo utvrdio da slijedeći faktori utječu na čvrstoću kocke i valjka:

- Postupak ugradnje i očvršćivanja: lijevanje kocki se uglavnom radi u tri sloja. Svaki sloj betona treba zbijati pravilno sa štapom. Gornji sloj kocke treba biti ravnomjerno raspoređen tako da bude ravna površina. Standardni valjak također bi trebao biti lijevan vrlo pažljivo. Sloj treba zbijati uz pomoć štapa i vibratora. Valjke također treba ukloniti vrlo pažljivo iz kalupa da se ne stvore bilo kakve pukotine. Stvrdnjavanje betonske kocke/valjka se treba vršiti 7, 14 i 28 dana prema eksperimentalnim rezultatima. Kocku/valjak treba očistiti propisno
- Procedura testiranja kocke/valjka: kocka/valjak se trebaju ispitivati na ovjerenim prešama
- Veličina uzoraka: Faktori poput omjera oblika i veličine uzorka (h/d) kocke i valjka približno utječu na karakteristične čvrstoće



- Utjecaj veličine zrna agregata: Utjecaj veličine zrna agregata je od sekundarne važnosti za čvrstoću uzoraka. Općenito, maksimalna veličina zrna agregata bi trebala biti 20 mm, a minimalna veličina 10mm. Agregat treba biti postavljen tako da razmak između čestica bude minimalan kako bi se izbjegle velike praznine
- Razina čvrstoće betona: na omjer čvrstoće valja i kocke utječe normirana čvrstoća betona. Taj omjer čvrstoće opada sa samim povećanjem normirane čvrstoće betona

Prema BS1881: dio 116:1983, karakteristični oblici testiranih kocki mogu biti popucali i ne popucali.



Slika 4.10. Oblici testiranih uzoraka kocki [12]

Karakteristični testirani oblici valjka mogu biti: cijepani, smicani te cijepani i smicani.



Slika 4.11. Oblici testiranih uzoraka valjka [12]

Prema ispitanim uzorcima, rezultati čvrstoće kocke se veći nego rezultati čvrstoće valjka.

Kod ispitivanja kocke na uzorak utječu bočna naprezanja po cijeloj visini. U slučaju valjka na središnji dio ne utječu bočna naprezanja. Područje na 0,866d od vrha valjka i područje na 0,866d od dna valjka su pod utjecajem bočnih naprezanja, a na središnji dio od 0,268d ne utječu bočna naprezanja.

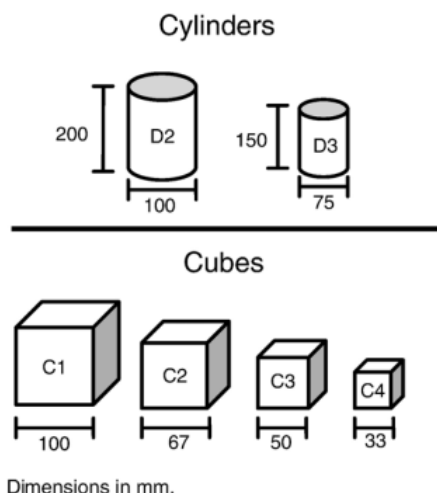
Na bazi svih eksperimentalnih rezultata Kumari je donio slijedeće zaključke:

- Prema utjecaju suzdržavanja, veća je mogućnost neuspjeha ispitivanja kocke nego valjka. Čvrstoća kocke je za otprilike 1,25 put veća nego čvrstoća valjka, ali stvari odnos čvrstoća ovih dvaju uzoraka ovisi o čvrstoći i stanju vlažnosti uzorka neposredno prije ispitivanja
- Postavlja se pitanje koji je bolji testni uzorak, kocka ili valjak? Za razliku od uzorka kocke, prednosti valjka su manje krajnje suzdržavanje uzorka i ujednačena raspodjela naprezanja po presjeku uzorka. Upravo zbog toga je čvrstoća valjka bliža pravoj jednoosnoj čvrstoći uzorka betona
- Prema IS-516-1979 je precizirano da će čvrstoća valjka biti različita od čvrstoće kocke. U pravilu se uvijek uzima da je čvrstoća valjka jednaka 0,8 iznosa čvrstoće kocke, no sudeći prema prethodnim eksperimentalnim istraživanjima nema jedinstvenog odnosa čvrstoće između kocke i valjka
- Prema svim eksperimentalnim podacima odnosa kocke i cilindra, konstatirano je da čvrstoća uzorka valjka nije konstantna vrijednost od 0,8 iznosa čvrstoće kocke. Čimbenici koji utječu na odnos čvrstoća su: vodocementni faktor, kvaliteta agregata (ocjena agregata, tekstura površine, oblik i čvrstoća zrna te krutost), maksimalna veličina zrna agregata, količina cementa i vrijeme njegovanja uzorka

### **4.3. Utjecaj oblika i dimenzija uzorka na tlačnu čvrstoću betona visoke čvrstoće; del Viso, Carmona i Ruiz [13]**

Eksperimentalni dio osmišljen je za proučavanje utjecaja oblika i dimenzija uzoraka na tlačnu čvrstoću betona visoke čvrstoće (HSC). Del Viso, Carmona i Ruiz su proučavali konkretan utjecaj veličine uzorka kocki na čvrstoću, te odnos između čvrstoće valjaka (C39) dimenzija 100×200 mm, te čvrstoće uzorka kocki. Također su analizirane varijacije u pukotinama u odnosu na mehaničko ponašanje zbog veličine i oblika uzorka.

Koristili su se uzorci kocki i valjaka različitih dimenzija za ovaj eksperimentalni dio rada. Dimenzije valjaka su: 75×100 mm, te 100×200 mm (promjer×visina). Dimenzije kocaka su: 33, 50, 67 i 100mm (duljina brida). Dimenzije uzorka valjaka su prikazane po visini D, dok su dimenzije uzorka kocki prikazane po bridu L. Oznake uzorka valjaka su prikazane kao D, odnosno kao C za kocke(npr. D2 je oznaka uzorka za valjak dimenzija 100×200mm). Izvedena su minimalno 4 ispitivanja za svaki tip uzorka. Za razliku od drugih radova, autori ovog rada su ispitivale slijedeće karakteristike betona: tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i energiju loma betona visoke čvrstoće(slika 4.12.).



Slika 4.12. Veličina ispitnih uzoraka del Viso, Caramona i Ruiz [13]

Korišteni materijali pri izradi i svojstva mješavina su slijedeći:

- Agregat maksimalnog zrna 12mm
- Cement ASTM tip 1
- Mikrosilika
- Superplastifikator BASF B-255
- Vodocementni faktor 0.28

Pri izradi uzoraka postojala je posebna kontrola da se minimalno smanji raspršivanje mješavine. Uzorci valjaka su nalijevani u 3 sloja, te zbijani šipkom i vibro pločom. Uzorci kocki su dobiveni mokrim piljenjem uzoraka prizmi dimenzija 100×100×420 mm koje su također ugrađene kao i uzorci valjka. Naknadno, uzorci su stvrdnjavani 24h, te su sušeni i skladišteni u vlažnoj komori pri temperaturi od 20 °C pri vlažnosti prostorije na 96%. Svi uzorci su nakon izrade bili brušeni sa mokrim dijamantnim zupcem kako bi se osigurala ravna površina svih stranica uzoraka. Uzorci su zatim ponovo njegovani sve do trenutka testiranja (6 mjeseci od pravljenja). Uzorcima su izmjereni duljina i težina prije ispitivanja.

U tablici 4.6. prikazane su karakteristike betona visoke čvrstoće.

High-strength concrete mechanical properties					
	$f_c^a$	$f_t^b$	$E_c$	$G_F$	$\ell_{ch}^c$
	MPa	MPa	GPa	N/m	mm
Mean	89.6	5.4	36.1	119.0	147.3
Std. dev.	7.13	0.6	1.1	13.5	-

<sup>a</sup> Cylinder, compression tests, D2.  
<sup>b</sup> Cylinder, splitting tests.  
<sup>c</sup>  $\ell_{ch} = \frac{E_c G_F}{f_t^2}$ .

Tablica 4.6. Karakteristike betona visoke čvrstoće(HSC) [13]

Ispitivanje tlačne čvrstoće se vršilo nad 4 uzorka valjka prema preporuci ASTM C39(100×200mm). Modul elastičnosti je ispitan prema preporuci ASTM C469 na uzorcima valjka(150×300mm). Brazilski test je izvršen na uzorcima valjka prema preporuci ASTM C494 dimenzija 150×300mm.

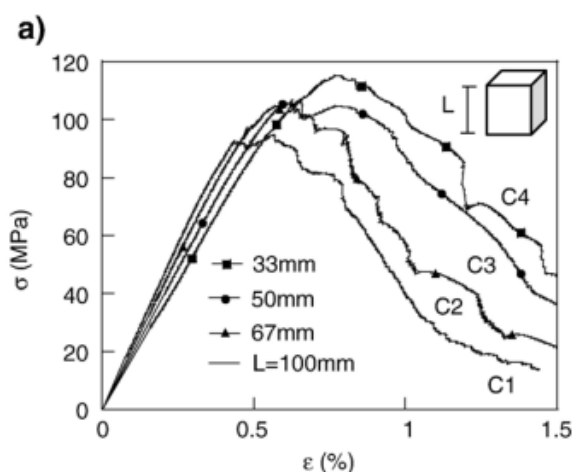
U rezultatima će se prvo predstaviti  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje, zatim će se diskutirati o utjecaju veličine kocki i valjaka, te će se na posljetku pričati o analizi pukotina. Naglasak je na konstantnoj brzini aksijalnog naprezanja pri kontroli naprezanja uzoraka.

U tablici 4.7. prikazane su srednje vrijednosti rezultata i standardne devijacije za tlačno naprezanje uzorka  $\sigma_c$ , deformacija pri vrhuncu naprezanja  $\varepsilon_c$ , krajnje naprezanje prije kolapsa uzorka  $\sigma_u$ , te odgovarajuću deformaciju  $\varepsilon_u$  za svaki uzorak. Tlačna čvrstoća, kao i deformacija uzorka se povećava sa samim smanjenjem veličine uzorka.

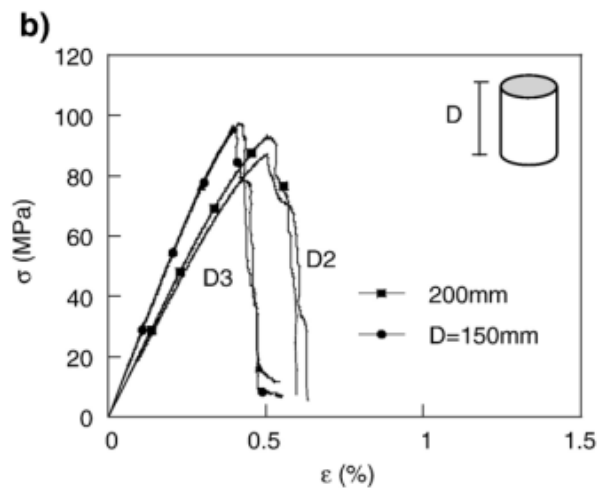
Strength and strain at peak and ultimate load					
Specimen		$\sigma_c$	$\varepsilon_c$	$\sigma_u$	$\varepsilon_u$
		MPa	%	MPa	%
D2	Mean	89.6	0.37	31.4	0.71
	Std. dev.	7.11	0.02	23.31	0.51
D3	Mean	89.9	0.34	41.6	0.22
	Std. dev.	4.65	0.02	22.08	0.42
C1	Mean	96.1	0.57	12.7	1.53
	Std. dev.	1.63	0.01	1.55	0.12
C2	Mean	102.4	0.61	20.9	1.59
	Std. dev.	9.93	0.03	1.81	0.19
C3	Mean	104.2	0.66	38.5	1.46
	Std. dev.	2.19	0.06	6.63	0.13
C4	Mean	110.0	0.85	33.8	1.94
	Std. dev.	7.34	0.09	5.09	0.35

Tablica 4.7. Srednje vrijednosti rezultata svih uzoraka [13]

Na slikama 4.13.(kocke) i 4.14.(valjci) prikazane su  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje za odabrane uzorke i oblike. Tipična krivulja započinje s linearnim rastom krivulje. Početni nagib ne pokazuje značajne razlike zbog veličine u slučaju uzoraka kocki dok su u valjcima manjih dimenzija pokazuje veći nagib. U oba slučaja dolazi do gubitka linearnosti prije nego što dostigne vršno opterećenje, što ukazuje na početak loma.



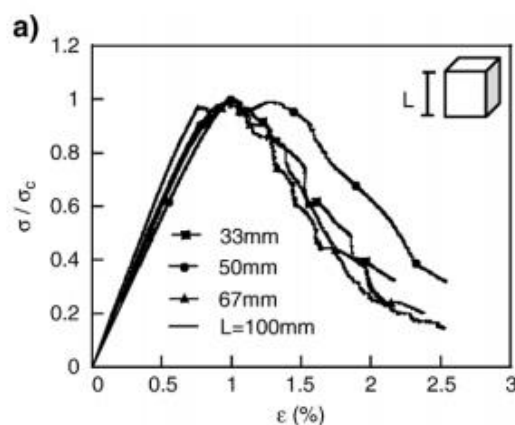
Slika 4.13.  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje za uzorke kocki [13]

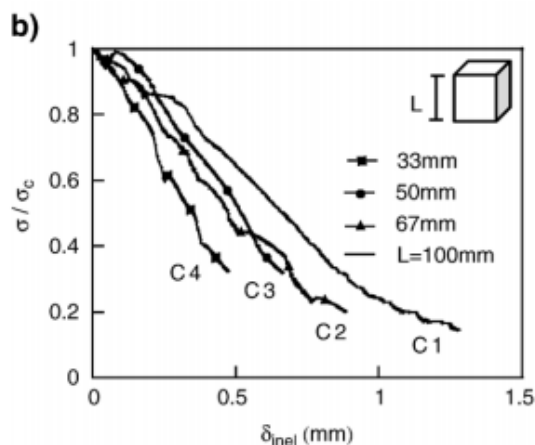
Slika 4.14.  $\sigma$ - $\epsilon$  krivulje za uzorke valjaka [13]

Ponašanje nakon dostizanja vršnog opterećenja ovisi o obliku uzorka. U slučaju valjka, slika 4.14., dolazi do naglog pada opterećenja nakon vršnog opterećenja i nema značajnijih promjena u krivuljama popuštanja između ispitivanih valjaka. U slučaju kocke, slika 4.13., krivulje  $\sigma$ - $\epsilon$  pokazuju ne tako strmo popuštanje krivulja koje su povezane s velikom količinom rasipanja energije, za razliku od primijećenog strmog popuštanja kod valjaka.

Slika 4.15. prikazuje odnos relativnog naprezanja  $\sigma/\sigma_c$  i deformacije  $\epsilon$  za različite dimenzije uzoraka kocki. Uočeno je da krivulje ni prije postizanja vršnog naprezanja ni nakon ne pokazuju značajne razlike radi promjene dimenzija.

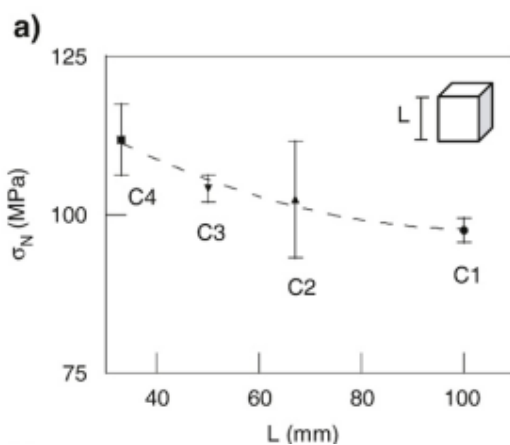
Slika 4.16. prikazuje odnos relativnog naprezanja  $\sigma/\sigma_c$  i krivulje plastičnog pomaka  $\delta_{inel}$  za različite dimenzije uzoraka kocki. Čini se da krivulje teže ka rezidualnom naprezanju što znači da će se komponenta zbog blokade agregata pojaviti u završnom dijelu testa.

Slika 4.15. Odnos relativnog naprezanja  $\sigma/\sigma_c$  i deformacije  $\epsilon$  za različite dimenzije uzoraka kocki [13]

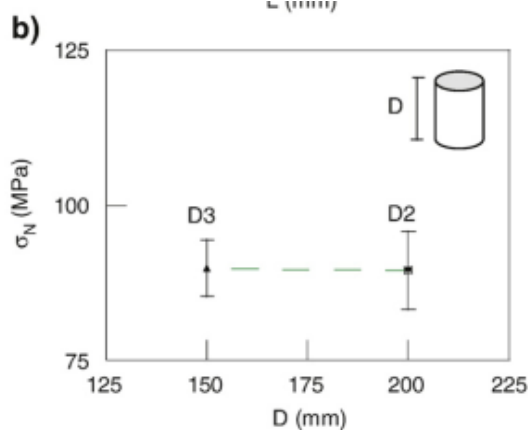


Slika 4.16. Odnos relativnog naprezanja  $\sigma/\sigma_c$  i krivulje plastičnog pomaka  $\delta_{inel}$  za različite dimenzije uzoraka kocki [13]

Slike 4.17. i 4.18. prikazuju nominalnu čvrstoću pri vršnom opterećenju  $\sigma_N$  dobivenu preko  $\sigma$ - $\epsilon$  krivulja za različite testirane uzorke naspram karakteristične dimenzije uzoraka.

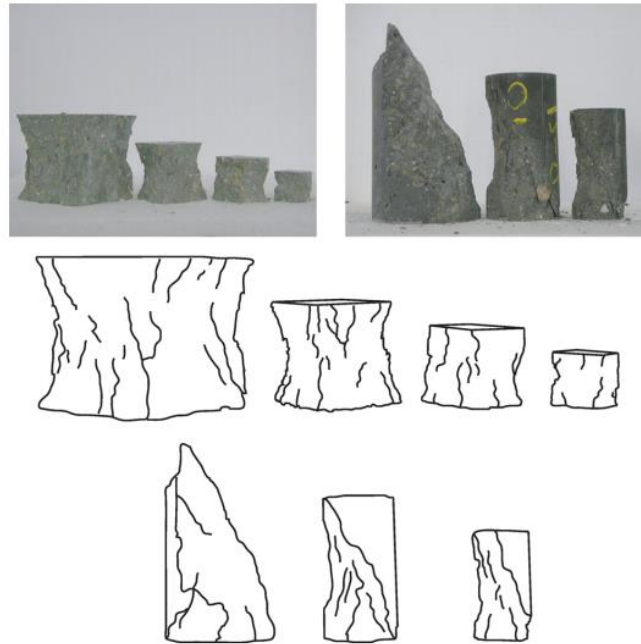


Slika 4.17. Nominalna čvrstoća pri vršnom opterećenju  $\sigma_N$  dobivenu preko  $\sigma$ - $\epsilon$  krivulja(kocke) [13]



Slika 4.18. Nominalna čvrstoća pri vršnom opterećenju  $\sigma_N$  dobivenu preko  $\sigma$ - $\epsilon$  krivulja(valjci) [13]

Što se tiče strukture pukotina, glavna površina loma je nepravilna u valjcima, dok je kod kocki lom vidljiv s bočnih strana te je okarakteriziram kao lom oblika pješčanog sata. U skladu s opažanjima  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje, vidljivo je da strmiji pad krivulja kod uzoraka valjaka ukazuje na nagnutu površinu loma ili konusa. Što se kocke tiče, proces loma izaziva opterećenje na samim kutovima uzorka kocke. Količina pucanja u ovom procesu loma je veća nego kod uzorka valjka.



Slika 4.19. Lomovi uzoraka [13]

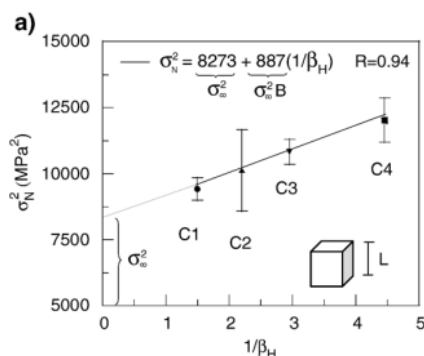
Što se tiče odnosa između čvrstoće kocke i valjka, Bažant je predložio generaliziranu formulu čvrstoće za red veličine pri pojavi pukotina.

$$\sigma_N = \sigma_\infty \left(1 + \frac{B}{\beta_H}\right)^{\frac{1}{r}}; \quad \sigma_\infty = \kappa \sigma_0 \quad (7)$$

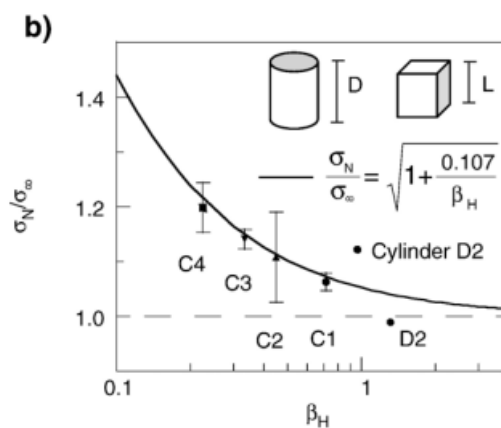
Koja se može pojednostavniti i napisati kao:

$$\sigma_N = \sigma_\infty \sqrt{1 + \frac{B}{\beta_H}} \quad (8)$$

Slika 4.20. prikazuje linearnu regresiju napravljenu na uzorcima kocki do dobiti konstante  $\kappa$  i  $B$ . Napominje se da je Pearsonov koeficijent korelacije  $R$  na slici 4.20. blizu 1. Slika 4.21. prikazuje rezultate ispitivanja u usporedbi s dobivenim zakonom učinka veličine. Može se naglasiti da učinak veličine ima tendenciju da nestane kada je  $L$  teži ka beskonačnosti.



Slika 4.20. Linearna regresija na uzorcima kocke [13]



Slika 4.21. Rezultati ispitivanja u usporedbi s dobivenim zakonom učinka veličine [13]

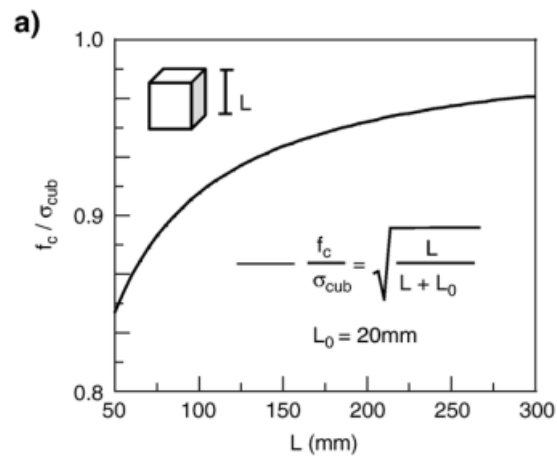
Na temelju svih činjenica, veza između čvrstoće kocke bilo koje veličine i kocke standardnih veličina (150mm duljina brida) i prikazuje se kao:

$$f_c = \sigma_{\text{cub}} \sqrt{\frac{L}{L + L_0}} \quad (9)$$

Gdje je  $L$  duljina brida kocke, a  $L_0$  empirijska konstanta jednaka 20mm u ovom slučaju.

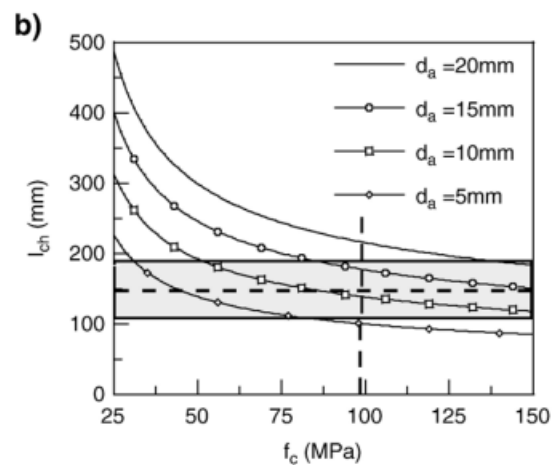
Slika 4.22. prikazuje odnos koeficijenta konverzije u odnosu na rub kocke. Primjećuje se kako se veličina kocke povećava, tako koeficijent teži ka iznosu 1.





Slika 4.22. Odnos koeficijenta konverzije u odnosu na rub kocke [13]

Raspon valjanosti jednadžbe (9), ovisi o pogrešci pri određivanju komponente  $l_{\text{ch}}$ , što je prikazano na slici 4.23. (zasjenjeni dio). Za izračun vrijednosti  $l_{\text{ch}}$  koristi su izrazi  $E_c$ ,  $G_f$  i  $f_t$  koristeći odnose u šifri modela.



Slika 4.23. Graf raspona valjanosti jednadžbe (9) [13]

Činjenica je da je kocke nekako lakše testirati jer kocke osiguravaju izravno dva para savršeno ravnih paralelnih površina i ne zahtijevaju nikakva ograničenja. Uzorci kocke čija čvrstoća (snaga) ne prelazi kapacitet snage standardne opreme sugerira da bi kocke bile dobra opcija za karakterizaciju ispitivanja tlačne čvrstoće betona visoke čvrstoće (HSC).

Slijedom svih karakteristika uzoraka i rezultata ispitivanja autori su donijeli slijedeće zaključke:

- Ponašanje krivulja prije i nakon vršnog naprezanja u  $\sigma$ - $\epsilon$  krivuljama ovisi o veličini i obliku uzorka. Nagibi krivulja za uzorke kocki blago opadaju što nije slučaj kod strmoglavom opadanja krivulja za uzorke valjka
- Rezultati ispitivanja prikazuju utjecaj veličine. Veliki uzorci se manje opiru opterećenjima nego manji uzorci. Utjecaj veličine uzorka kocki je znatno veći nego kod uzorka valjaka čija je čvrstoća konstantna u planiranome vremenu istraživanja
- Uzorak pukotina primijećen nakon testiranja je ovisan o obliku uzorka. Glavna nagnuta površina loma je nepravilna kod valjaka, dok se kod kocki događa „slijevanje“ bočnih stranica, te dolazi do fragmentacije prilikom drobljenja. To se događa u skladu s razlikama u opaženim  $\sigma$ - $\epsilon$  krivuljama kocke i valjka. Zanimljivo, model loma ne ovisi o promjenama dimenzije uzoraka
- Utjecaj veličine kod tlačne čvrstoće betona opisan je jednostavnim modelom zasnovanim na konceptu mehanike loma. Odnos između standardne čvrstoće uzorka valjka i čvrstoće uzorka kocke bilo koje veličine je izveden. On otkriva utjecaj dimenzije uzorka kocke, te može pomoći u zaključivanju odnosa između tlačne čvrstoće uzoraka kocke i valjka unutar teorijskog okvira mehanike loma

#### 4.4. Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona; Matulić, Juradin, Marušić, Domazet [9]

U ovom eksperimentalnom dijelu rada, autori su htjeli ispitati utjecaj veličine uzorka valjka na mehanička svojstva mlaznog betona. Korišteni su uzorci običnog i mikroarmiranog mlaznog betona projektiranog sastava (tablica 4.8.). Uzorci su vađeni pri izradi primarnog podgradnog sustava tunela Sveti Ilija.

Sastav betona		
Komponente betona	Običan mlazni beton [kg]	Mikroarmirani mlazni beton [kg]
Cement – CEM II/B (S-LL) 42,5 N	480	475
<b>Agregat - drobljeni</b>		
0-4 mm	1394	1428
4-8 mm	246	252
<b>Dodaci</b>		
D1 – ubrzivač (alkalna baza)	19,2	19
D2 – čelična vlakna 35/0,65		30
D3 – superplastifikator (naftalen-sulfatna baza)		1,75
<b>Voda</b>	220	210
w/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)

Tablica 4.8. Sastav i zahtjevna svojstva običnog i mikroarmiranog mlaznog betona [9]

Ispitni uzorci oblika valjka promjera su 5 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. Uzorci su izravnani brušenjem baza prema normi HRN EN 12390-1, te im je određena dimenzija kao srednja vrijednost triju mjerenja. Uzorci su do trenutka ispitivanja njegovani u vodi temperature  $20 \pm 2$  °C.

Svim uzorcima je preko ultrazvučne sonde ispitano vrijeme prolaska vala kroz uzorak, te su izračunati rezultati za modul elastičnosti preko izraza (10):

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

Elementi izraza su:

$E_{din}$  - dinamički modul elastičnosti [GPa]

$v$  - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

$\nu$  - Poissonov koeficijent

$\rho$  - gustoća uzorka [ $\text{kg/m}^3$ ].

Poissonov koeficijent je odabran kao vrijednost 0,20. nakon ispitivanja modula elastičnosti nad uzorcima je ispitana tlačna čvrstoća u ovjerenoj preši razreda točnosti 1. Svi rezultati su prikazani u tablici 4.9.

Dinamički modul elastičnosti		$E_{MIN}$ [GPa]	$E_{MAX}$ [GPa]	$E_{SRED}$ [GPa]	V [%]	$\sigma$ [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 [%]	$\sigma$ [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

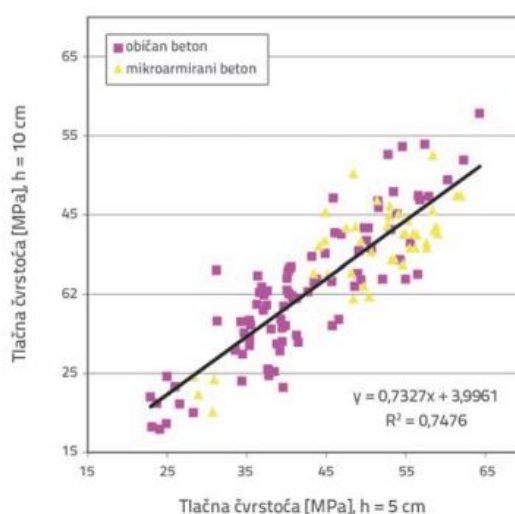
Tablica 4.9. Rezultati ispitivanja uzoraka valjka [9]

Također je izvršen i F i t-test te korelacijska analiza kako bi se utvrdila povezanost promatranih skupova (tablica 4.10.). [9]

Odnosi	$F_0; F$	$t_0; t$	F-test ( $\alpha = 0,05$ )	t-test ( $\alpha = 0,05$ )	Sred. vrijednost	Varijanca	Stand. devijacija
$\sigma/E$ 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
$\sigma/E$ za $h = 10$ cm, običan beton	$F = 1,43$	$t = 1,96$			0,92	0,0351	0,1874
$\sigma/E$ 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
$\sigma/E$ za $h = 10$ cm, mikroarmirani beton	$F = 1,67$	$t = 1,96$			0,97	0,0158	0,1258
$\sigma/E$ 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
$\sigma/E$ za $h = 5$ cm, mikroarmirani beton	$F = 1,58$	$t = 1,96$			1,33	0,0297	0,1724
$\sigma/E$ 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
$\sigma/E$ 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

Tablica 4.10. Rezultati F i t-testa [9]

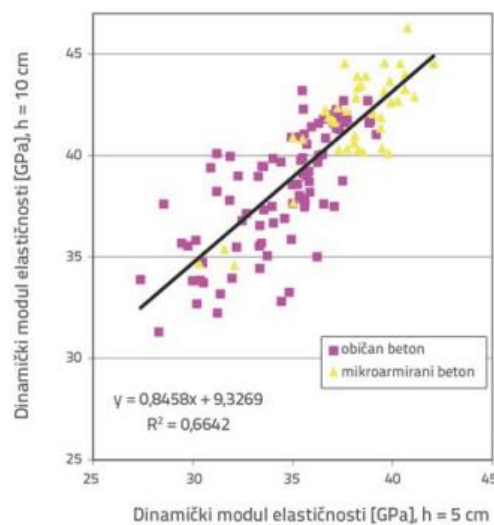
Prema rezultatima iz tablice 4.9. vidljivo je da odstupaju rezultati između uzoraka visine 5 i 10 cm. Odnos srednje vrijednosti čvrstoće između uzoraka je približno 1,20 za običan beton, tj. 1,26 za mikroarmirani beton. Prema rezultatima ispitivanja, uzorci mikroarmiranog betona imaju oko 15 – 20% veću čvrstoću naspram uzoraka običnog betona uz manju dispaciju rezultata.

Slika 4.24. Regresijski pravac uzoraka visine 5 i 10cm ( $R = 0,86$ ) [9]

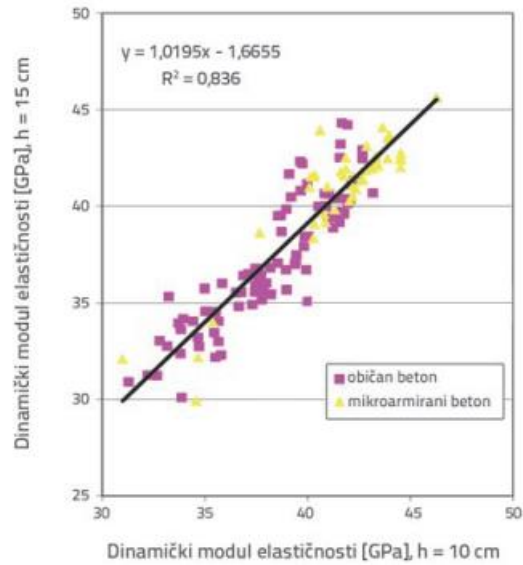
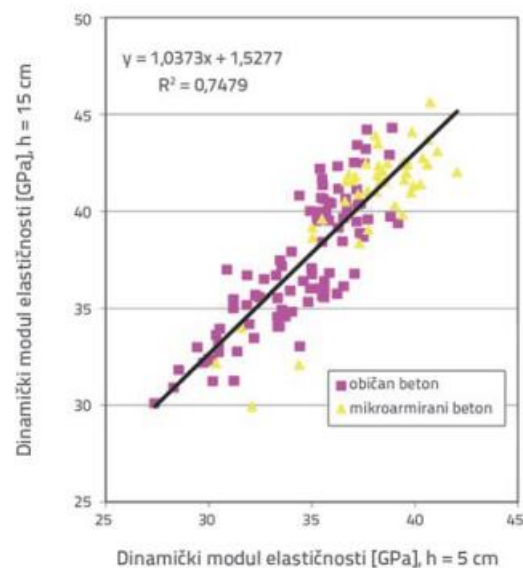
Na slici 4.24. prikazana je korelacijska veza između uzoraka običnog i mikroarmiranog betona. Ona prikazuje stupanj jakosti stohastičkih veza s koeficijentima korelacije, te sadrži grafički prikaz i intezitet te smjer povezanosti uzoraka. Prema rezultatima F i t-testa za uzorke običnog i mikroarmiranog betona visine 5 i 10 cm ne postoji značajna statistička razlika između samih uzoraka, tj. oni se mogu promatrati zajedno (tablica 4.10.).

Što se tiče odnosa elastičnog modula elastičnosti između uzoraka, najveću vrijednost imaju 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 i 15 cm je 1,03. zaključeno je da uzorci visine manje od 10 cm imaju veću tlačnu čvrstoću ali i manji dinamički modul 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.

Na slikama 4.25., 4.26. i 4.27. prikazane su korelacijske veze uzoraka s različitim koeficijentima korelacije.

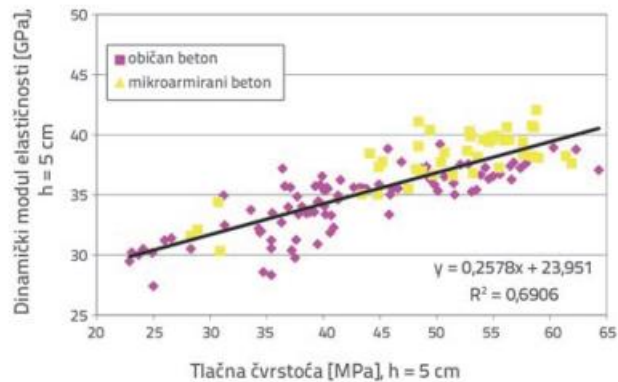


Slika 4.25. Regresijski pravac uzoraka visine 5 i 10cm ( $R = 0,81$ ) [9]

Slika 4.26. Regresijski pravac uzoraka visine 10 i 15cm( $R = 0,91$ ) [9]Slika 4.27. Regresijski pravac uzoraka visine 5 i 15cm( $R = 0,86$ ) [9]

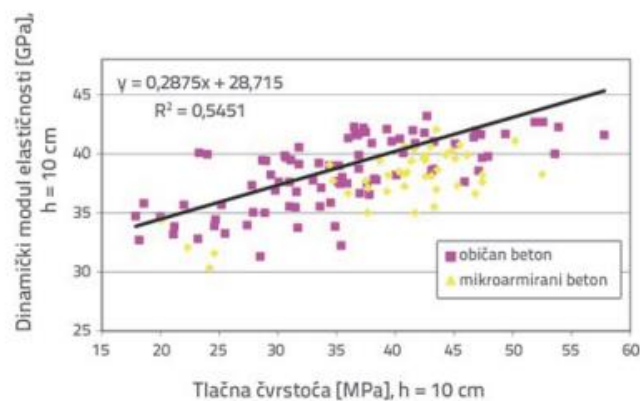
Kod odnosa dinamičkog modula elastičnosti uzoraka visine 5 i 10 cm, visine 10 i 15 cm, te visine 5 i 15 cm za obje vrste ispitanih uzoraka te odnosa dinamičkog modula elastičnosti visine 5 i 10 cm u odnosu na uzorke visine 5 i 15 cm mikroarmiranog betona, rezultati F i t-testa su pokazali da nema značajnih statističkih razlika (tablica 4.10.).

Odnos tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti uzoraka definiran je pravcem regresije (slika 4.28. i slika 4.29.).



Slika 4.28. Pravac regresije dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće uzoraka visine 5cm

(R = 0,83) [9]



Slika 4.29. Pravac regresije dinamičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće uzoraka visine 10cm

(R = 0,74) [9]

Koeficijenti korelacije rezultata ispitivanja (slika 4.28. i slika 4.29.) upućuju na značajnu povezanost tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti. Ipak treba biti oprezan kad se ovaj odnos primjenjuje na ocjenu tlačne čvrstoće budući da pravac regresije ima mali nagib prema osi tlačne čvrstoće. Stoga mala promjena iznosa modula elastičnosti (greška mjerenja) može rezultirati značajnom promjenom tlačne čvrstoće. Sukladno tome, treba biti oprezan pri procjeni tlačne čvrstoće na temelju dinamičkog modula elastičnosti radi nesigurnosti rezultata.

Na osnovu ovog eksperimentalnog dijela rada autori su donijeli slijedeće zaključke:

- 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.
- 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.



- Promjena veličine ispitnog uzorka različito utječe na promjene modula elastičnosti i tlačne čvrstoće uzoraka. Rezultati potvrđuju dosadašnju preporuku za minimalnu visinu uzorka betona od 10cm. Također je utvrđeno da ograničenje visine uzorka vrijedi i za betonske uzorke s manjim maksimalnim zrnom agregata
  
- Potvrđena je povezanost rezultata tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti uzoraka mlaznog betona visine 5 i 10 cm. Izrazi su dobiveni korelacijskom analizom za procjenu tlačne čvrstoće na temelju rezultata dinamičkog modula elastičnosti. Međutim treba biti oprezan pri određivanju tlačne čvrstoće na osnovu modula elastičnosti radi nesigurnosti pri maloj grešci mjerenja modula elastičnosti koja rezultira drastičnom promjenom iznosa tlačne čvrstoće. Dobivena veza može vrijediti za ovu vrstu betona, dok za druge vrste betona može poslužiti samo kao gruba procjena. Također valja napomenuti da primjena veze na suhim uzorcima može dovesti do odstupanja rezultata naspram uzoraka zasićenih vodom kao u ovom eksperimentalnom ispitivanju

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

### 5.1. Uvod u eksperimentalni dio rada

Cilj ovog istraživanja je prikazati i uspostaviti vezu tlačne čvrstoće na polovicama betonskih prizmi i tlačne čvrstoće na kocki odgovarajuće dimenzije. Ta veza će se uspostaviti za tri veličine maksimalnog zrna agregata. Ukoliko se pokaže postojanje veze između tlačne čvrstoće polovice prizme i kocke, time bi se smanjio broj potrebnih uzoraka prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava betona, odnosno ispitivanja čvrstoće na savijanje i tlaka. Za potrebe ovog ispitivanja napravljene su 3 vrste mješavina betona.

Nakon proračuna sastava mješavina, u laboratoriju TPA, Strabag, Svetog Mihovila 1, Dugopolje napravljene su 3 mješavine:

- Mješavina B1 – agregat: frakcije 0 – 4mm, 4 – 8mm, w/c faktor 0,55, količina cementa 350kg
- Mješavina B2 – agregat: frakcije 0 – 4mm, 4 – 8mm, 8 – 16mm, w/c faktor 0,55, količina cementa 350kg
- Mješavina B3 – agregat: frakcije 0 – 4mm, 4 – 8mm, 8 – 16mm, 16 – 31,5mm, w/c faktor 0,55, količina cementa 350kg

Mješavine su ugrađene u kalupe kocki dimenzija 15×15×15 cm, 10×10×10 cm, te u kalupe prizmi dimenzija 10×10×40 cm. Svi kalupi su ovjereni i akreditirani od Hrvatske akreditacijske agencije (HAA). Svi uzorci su vibrirani sa vibro pločom u trenutku ugrađivanja. Nakon 1 dana uzorci su izvađeni iz kalupa, te zatim pohranjeni i njegovani u bazenu s vodom u prostoriji za njegu uzoraka sa sobnom temperaturom od 21°C te vlažnošću zraka od 95%, sve do trenutka ispitivanja (28 dana od pripreme uzorka).

Ukupno je napravljeno 27 uzoraka, od čega je 9 uzoraka po mješavini, tj. po 3 uzorka za svaku dimenziju kalupa.

Za zadane mješavine izvršena su ispitivanja betona u svježem stanju: slump test, te ispitivanje betona u čvrstom stanju: tlačna čvrstoća betona, čvrstoća na savijanje, težina uzoraka, brzina prolaska valova kroz uzorke (dinamički modul elastičnosti). Sva potrebna ispitivanja također su izvršena u ispitnom laboratoriju TPA, Strabag.

## 5.2. Korišteni materijali

Prilikom izrade mješavina betona korišteni su slijedeći materijali:

- Agregat frakcija od 0 do 31,5mm (0/4; 4/8; 8/16; 16/31,5mm)
- Cement CEM II/B-W 42,5N
- Voda

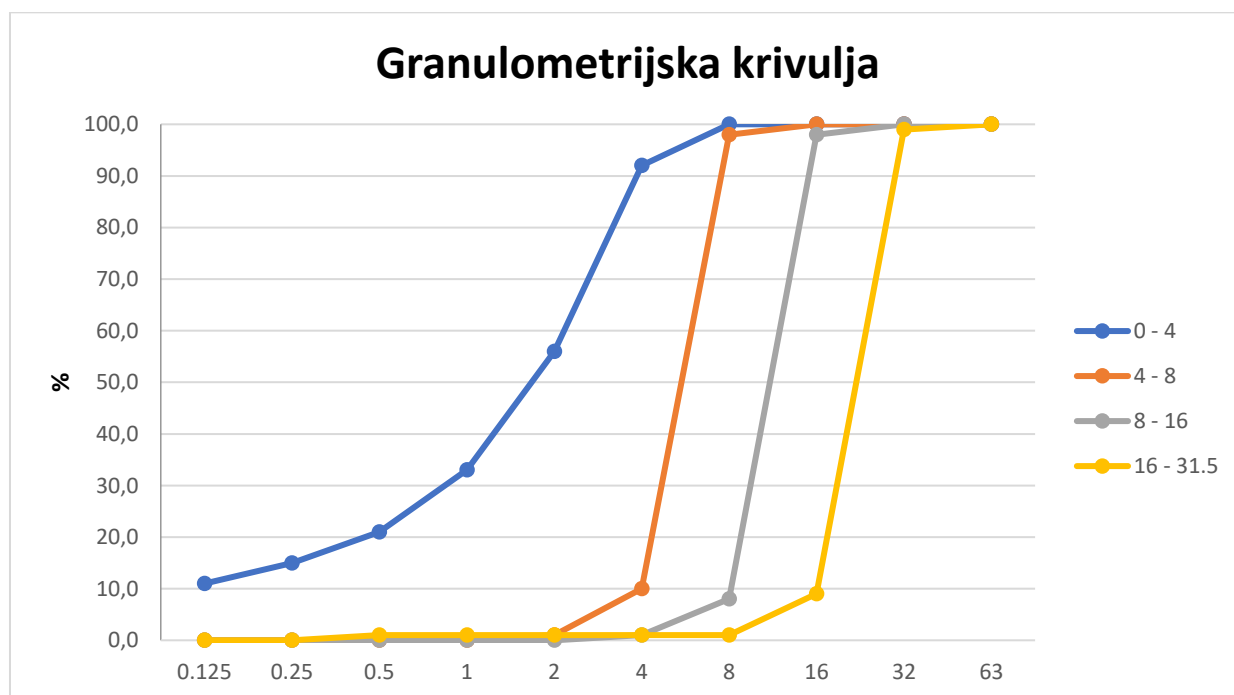
### 5.2.1. Agregat

U ovom eksperimentalnom dijelu rada korišten je drobljeni agregat proizveden u pogonu Križice(PZC). Agregat je certificiran u skladu s normama, te se primjenjuje pri izradi betonskih mješavina, bitumenskih mješavina, površnih obrada cesta i nevezanih i hidrauličkih vezanih materijala. Oznaka certifikata: 2477-CPR-2226.

Tehnička specifikacija: EN 12620;2002 + A1:2008

Veličina frakcije agregata(d/D): 0/4; 4/8; 8/16; 16/31,5mm

Na slici 5.1. prikazana je granulometrijska krivulja agregata



Slika 5.1. Granulometrijska krivulja drobljenog agregata

Svojstva agregata prikazana su u tablicama 5.1., 5.2, 5.3. i 5.4.

BITNA SVOJSTVA PROIZVODA	SVOJSTVO	JEDINICE	ISPITIVANJE PREMA
Granulometrijski sastav	$G_F$ 85	%	HRN EN 933-1
Modul sitnoće	CF	%	-
Sadržaj sitnih čestica	$f_{10}$	%	HRN EN 933-1
Kakvoća sitnih čestica SE(10)	0,5	%	HRN EN 933-8
Oblik zrna-Indeks oblika (SI)	-	%	HRN EN 933-4
Otpornost na drobljenje	-	-	HRN EN 1097-2
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	$AS_{0,2}$	%	HRN EN 1744-1, toč.12.
Sadržaj ukupnog sumpora	0,01	%	HRN EN 1744-1, toč.11.
Sadržaj klorida	0,001	%	HRN EN 1744-1, toč.7.
Nasipna gustoća	1,56	$Mg/m^3$	HRN EN 1097-3
Gustoća zrna	2,67	$Mg/m^3$	HRN EN 1097-6
Upijanje vode	0,6	%	HRN EN 1097-6
Sadržaj humusa	Nema	-	HRN EN 1744-1, toč.15.1
Mineraloško petrografski sastav	Vapnenjački agregat	-	HRN EN 932-3
Trajnost prema smrzavanju- odmrzavanju	-	%	HRN EN 1367-2

Tablica 5.1. Svojstva agregata frakcije 0 – 4mm [14]

BITNA SVOJSTVA PROIZVODA	SVOJSTVO	JEDINICE	ISPITIVANJE PREMA
Granulometrijski sastav	$G_C$ 85/20	%	HRN EN 933-1
Modul sitnoće	-	%	-
Sadržaj sitnih čestica	$f_{1,5}$	%	HRN EN 933-1
Kakvoća sitnih čestica SE(10)	-	%	HRN EN 933-8
Oblik zrna-Indeks oblika (SI)	$SI_{20}$	%	HRN EN 933-4
Otpornost na drobljenje	-	-	HRN EN 1097-2
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	$AS_{0,2}$	%	HRN EN 1744-1, toč.12.
Sadržaj ukupnog sumpora	0,01	%	HRN EN 1744-1, toč.11.
Sadržaj klorida	0,001	%	HRN EN 1744-1, toč.7.
Nasipna gustoća	1,38	$Mg/m^3$	HRN EN 1097-3
Gustoća zrna	2,70	$Mg/m^3$	HRN EN 1097-6
Upijanje vode	0,4	%	HRN EN 1097-6
Sadržaj humusa	-	-	HRN EN 1744-1, toč.15.1
Mineraloško petrografski sastav	Vapnenjački agregat	-	HRN EN 932-3
Trajnost prema smrzavanju- odmrzavanju	-	%	HRN EN 1367-2

Tablica 5.2. Svojstva agregata frakcije 4 – 8mm [14]

BITNA SVOJSTVA PROIZVODA	SVOJSTVO	JEDINICE	ISPITIVANJE PREMA
Granulometrijski sastav	G <sub>C</sub> 85/20	%	HRN EN 933-1
Modul sitnoće	-	%	-
Sadržaj sitnih čestica	f <sub>1,5</sub>	%	HRN EN 933-1
Kakvoća sitnih čestica SE(10)	-	%	HRN EN 933-8
Oblik zrna-Indeks oblika (SI)	SI <sub>20</sub>	%	HRN EN 933-4
Otpornost na drobljenje	LA <sub>30</sub>	-	HRN EN 1097-2
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	AS <sub>0,2</sub>	%	HRN EN 1744-1, toč.12.
Sadržaj ukupnog sumpora	0,01	%	HRN EN 1744-1, toč.11.
Sadržaj klorida	0,001	%	HRN EN 1744-1, toč.7.
Nasipna gustoća	1,37	Mg/m <sup>3</sup>	HRN EN 1097-3
Gustoća zrna	2,70	Mg/m <sup>3</sup>	HRN EN 1097-6
Upijanje vode	0,4	%	HRN EN 1097-6
Sadržaj humusa	-	-	HRN EN 1744-1, toč.15.1
Mineraloško petrografski sastav	Vapnenjački agregat	-	HRN EN 932-3
Trajnost prema smrzavanju- odmrzavanju	MS <sub>18</sub>	%	HRN EN 1367-2

Tablica 5.3. Svojstva agregata frakcije 8 – 16mm [14]

BITNA SVOJSTVA PROIZVODA	SVOJSTVO	JEDINICE	ISPITIVANJE PREMA
Granulometrijski sastav	G <sub>C</sub> 85/20	%	HRN EN 933-1
Modul sitnoće	-	%	-
Sadržaj sitnih čestica	f <sub>1,5</sub>	%	HRN EN 933-1
Kakvoća sitnih čestica SE(10)	-	%	HRN EN 933-8
Oblik zrna-Indeks oblika (SI)	SI <sub>20</sub>	%	HRN EN 933-4
Otpornost na drobljenje	-	-	HRN EN 1097-2
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	AS <sub>0,2</sub>	%	HRN EN 1744-1, toč.12.
Sadržaj ukupnog sumpora	0,01	%	HRN EN 1744-1, toč.11.
Sadržaj klorida	0,001	%	HRN EN 1744-1, toč.7.
Nasipna gustoća	1,36	Mg/m <sup>3</sup>	HRN EN 1097-3
Gustoća zrna	2,71	Mg/m <sup>3</sup>	HRN EN 1097-6
Upijanje vode	0,3	%	HRN EN 1097-6
Sadržaj humusa	-	-	HRN EN 1744-1, toč.15.1
Mineraloško petrografski sastav	Vapnenjački agregat	-	HRN EN 932-3
Trajnost prema smrzavanju- odmrzavanju	-	%	HRN EN 1367-2

Tablica 5.4. Svojstva agregata frakcije 16 – 31,5mm [14]

### 5.2.2. Cement

Cement je hidraulično vezivo, tj. fino mljeveni anorganski materijal koji pomiješan s vodom tvori pastu, koja se hidratacijskim reakcijama i procesima vezuje i očvršćuje i koja nakon očvrstnuća zadržava čvrstoću i stabilnost i pod vodom.

CEM II/B-W 42,5N je portlandski cement s dodatkom letećeg pepela namijenjen pripremi betona i morta za sve građevinske radove koji se izvode u propisanim uvjetima gradnje za armirane i nearmirane betonske elemente viših razreda čvrstoće (mostovi, tuneli, vijadukti, stanogradnja, izrada gotovih betonskih elemenata, pumpani beton). Sadrži 65-79% portland cementnog klinkera i 21-35% dodatka kalcijuskog letećeg pepela i do 5% prirodnog gipsa kao regulatora vezivanja.

Osnovne karakteristike ovog cementa su:

- Usporena reakcija hidratacije
- Niža toplina hidratacije
- Očekivana čvrstoća
- Pri proizvodnji betona daje dobru obradivost
- Lakše ugrađivanje
- Povećana kemijska otpornost u odnosu na čisti portland cement

Transport i skladištenje cementa: Cement se isporučuje u rasutom stanju ili u vrećama mase 25kg ili 50 kg na drvenim paletama. Transportirati u prijevoznim sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage. Sredstva za transport u rasutom stanju prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa. Rasuti cement skladištiti u očišćenim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja. Uvrećani cement skladištiti u suhom, prozračnom i natkrivenom prostoru.

U tablici 5.5. prikazana su svojstva portland cementa sa dodatkom letećeg pepela.

Fizikalna i mehanička svojstva:		
	CEM II/B - W 42,5 N	Zahtjevi norme
Vrijeme početka vezivanja (min)	160	≥ 60
Postojanost volumena (mm)	1,0	≤ 10
Tlačna čvrstoća nakon 2 dana (MPa)	20	≥ 10
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (MPa)	49	≥ 42,5 ≤ 62,5
Kemijska svojstva:		
SO <sub>3</sub> (%)	2,8	≤ 3,5
Cl (%)	0,01	≤ 0,10

Tablica 5.5. Fizikalna, mehanička i kemijska svojstva cementa [16]

U tablici 5.6. prikazane su bitne značajke cementa sa dodatkom letećeg pepela.

Bitne značajke	Svojstva	Usklađena tehnička specifikacija
Cement opće namjene (podobitelj) sastojci i sastav	CEM II	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 3,4,5,6,8,9
Tlačna čvrstoća, rana i normirana	42,5N	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.1, 8 i 9
Vrijeme vezivanja	zadovoljava	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.2 i 9
Postojanost volumena - Le Chatelier	zadovoljava	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.2 i 9
Postojanost volumena - Udio SO <sub>3</sub>	zadovoljava	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.3 i 9
Udio klorida	zadovoljava	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.3 i 9
Netopljivi ostatak	zadovoljava	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.3 i 9
Gubitak žarenjem	zadovoljava	HRN EN 197-1:2012 (EN 197-1:2011) točke 7.3 i 9

Tablica 5.6. Bitne značajke portland cementa s dodatkom letećeg pepela [15]

### 5.2.3. Voda

Za pripremu mješavina betona korištena je pitka voda iz vodovoda čiju kvalitetu prate Laboratorij za pitke vode Vodovoda i kanalizacije i Nastavni Zavod za javno zdravstvo županije Splitsko – dalmatinske pa nisu potrebna dodatna ispitivanja.



### 5.3. Priprema i izrada mješavina i uzoraka

Pri pripremi materijala za izradu betonske mješavine izvršena su vaganja komponenti na vagi nosivosti 20kg. Mješavine su pripravljene te postavljene u miješalicu kapaciteta 120kg, tj. 75 litara (slika 5.2.)



Slika 5.2. Miješalica za beton

Miješalica se navlažila neposredno prije korištenja, isto kao što su i kalupi očišćeni i nauljeni u svrhu ugradnje betona. U daljnjem kontekstu opisana je izrada recepture za svaku pojedinu mješavinu betona. Miješanje suhih komponenata trajalo je 1 min., dok je miješanje komponenti sa vodom trajalo 5 min.



### 5.3.1. Mješavina sa maksimalnim zrnom agregata 8mm; B1

Za mješavinu B1(D = 8 mm), koristila se Fullerova(B krivulja) kao krivulja za proračun sastava betona.

$$B = 100 \sqrt{\frac{d}{d_m}} \%$$

Formula za Fullерову krivulju.

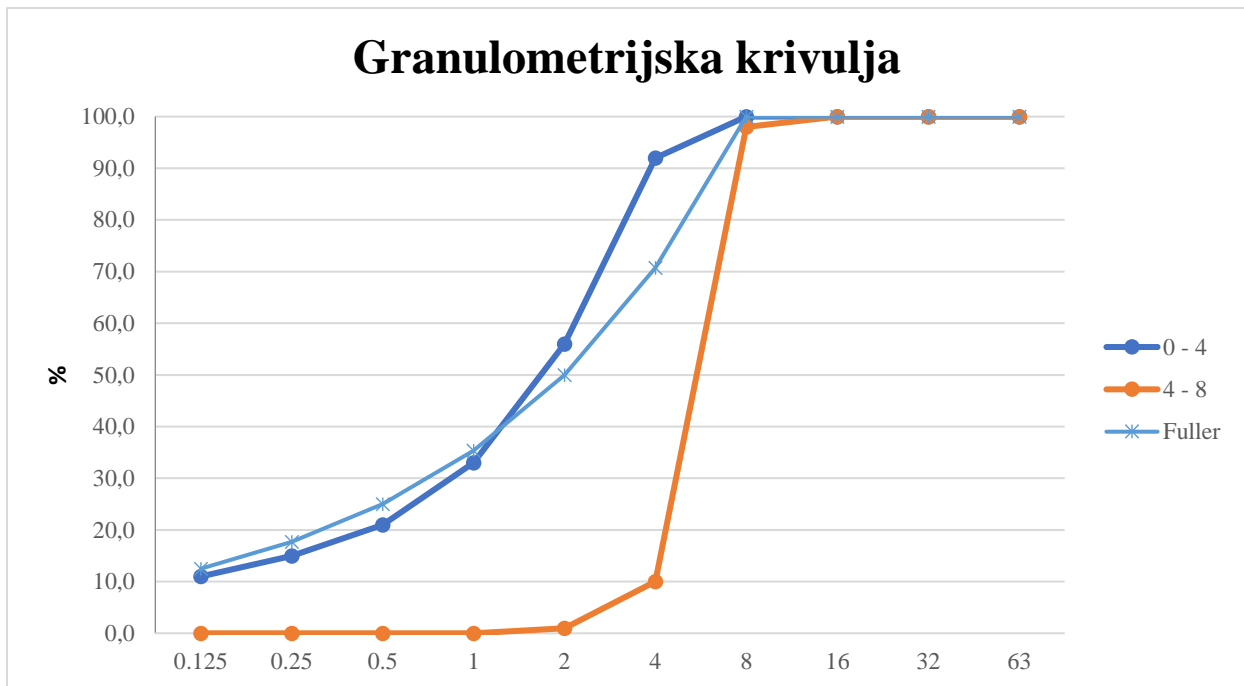
U tablici 5.7. prikazan je granulometrijski sastav agregata.

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	63
1	0 - 4	11,0	15,0	21,0	33,0	56,0	92,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	4 - 8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	10,0	98,0	100,0	100,0	100,0
3	8 - 16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8,0	98,0	100,0	100,0
4	16 - 31.5	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9,0	99,0	100,0

Tablica 5.7. Granulometrijski sastav agregata

FULLEROVA KRIVULJA( MAX ZRNO 8mm)										
ZADANI SASTAV AGREGATA [%]										
Sito	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
Zadano	12,5	17,7	25,0	35,4	50,0	70,7	100,0	100,0	100,0	100,0

Tablica 5.8. Zadani sastav agregata po granulometrijskoj krivulji B8(Fuller)



Slika 5.3. Granulometrijska krivulja B8(Fuller)

Sustav jednađbi:

$$92X_1 + 10X_2 = 70,7$$

$$100X_1 + 98X_2 = 100$$

Rješenja:

$$X_1 = 73 \%$$

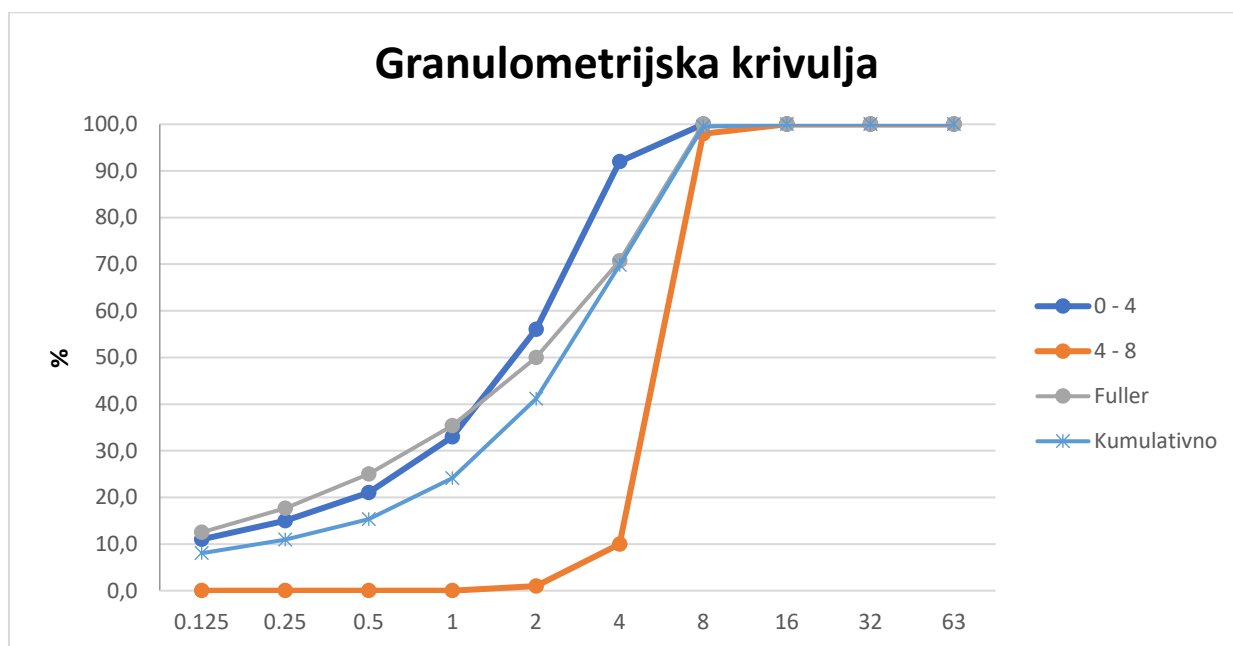
$$X_2 = 27 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

Za izračun postotke napravljen je kumulativni sastav agregata (tablica 5.9.), te kumulativna krivulja agregata (slika 5.4.).

KUMULATIVNI SASTAV												
Frak.br.	Udio(%)	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
			0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	63
1	73	0 - 4	8,0	11,0	15,3	24,1	40,9	67,2	73,0	73,0	73,0	73,0
2	27	4 - 8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,7	26,5	27,0	27,0	27,0
3	0	8 - 16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0	16 - 31.5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
UKUPNO	100		8,0	11,0	15,3	24,1	41,2	69,9	99,5	100,0	100,0	100,0

Tablica 5.9. Kumulativni sastav agregata



Slika 5.4. Kumulativna krivulja agregata

Karakteristike materijala mješavine B1 prikazane su u tablici 5.10.

Vrsta cementa	CEM II/B-W 42.5
Vrsta agregata	Drobljeni agregat
Najveće zrno agregata (mm)	8
Udio zraka u betonu (%)	2,5%
W/C omjer	
Uvjet čvrstoće/obrdivosti	0.55
Uvjet trajnosti	-
Odabrano	0.55
Količina vode za 1m <sup>3</sup> betona ( lit )	192,5
Količina cementa (kg)	
Uvjet čvrstoće/obrdivosti	350
Uvjet trajnosti	-
Odabrano	350

Tablica 5.10. Karakteristike materijala mješavine B1

Sastav i količina materijala za 1m<sup>3</sup> volumena betona mješavine B1 prikazani su u tablici 5.11.

SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/dm <sup>3</sup> )	VOLUMEN (dm <sup>3</sup> )
CEM II/B-W 42.5 N	350	3,2	109,38
VODA	192,5	1	192,5
w/c 0.55			
ZRAK 2.5 %	0	0	25
AGREGAT	1817,42	2,7	673,12
BETON	2359,92		1000

Tablica 5.11. Količina materijala za 1m<sup>3</sup> betona mješavine B1

Nadalje, napravljena je tablica količine agregata po udjelu frakcije, cementa i vode koja je korigirana (apsorpcija vode i vlažnost) za količinu volumena koja je potrebna za izradu uzoraka (tablica 5.12.).

SASTAV	Z.P.S. MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGORANA MASA	KORIGORANA MASA(0,04m <sup>3</sup> )
	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
FRAKCIJA								
0 - 4	73	1326,72	0,9	11,94	0,6	7,96	1322,74	52,91
4 - 8	27	490,70	0,7	3,43	0,2	0,98	488,25	19,53
8 - 16	0	0	0,7	0	0,1	0	0	0,00
16 - 31,5	0	0	0,4	0	0,5	0	0	0,00
VODA		192,5		15,38		8,94	198,93	7,96
CEMENT		350					350	14

Tablica 5.12. Korigirana tablica količine materijala za mješavinu B1

Ukupna masa mješavine iznosila je 94,40kg. Na slici 5.5. prikazani su ugrađeni uzorci mješavine B1.



Slika 5.5. Uzorci mješavine B1(8mm)

### 5.3.2. Mješavina sa maksimalnim zrnom agregata 16mm; B2

Za mješavinu B2(D = 16 mm), koristila se Fullerova(B) krivulja kao krivulja za proračun sastava betona.

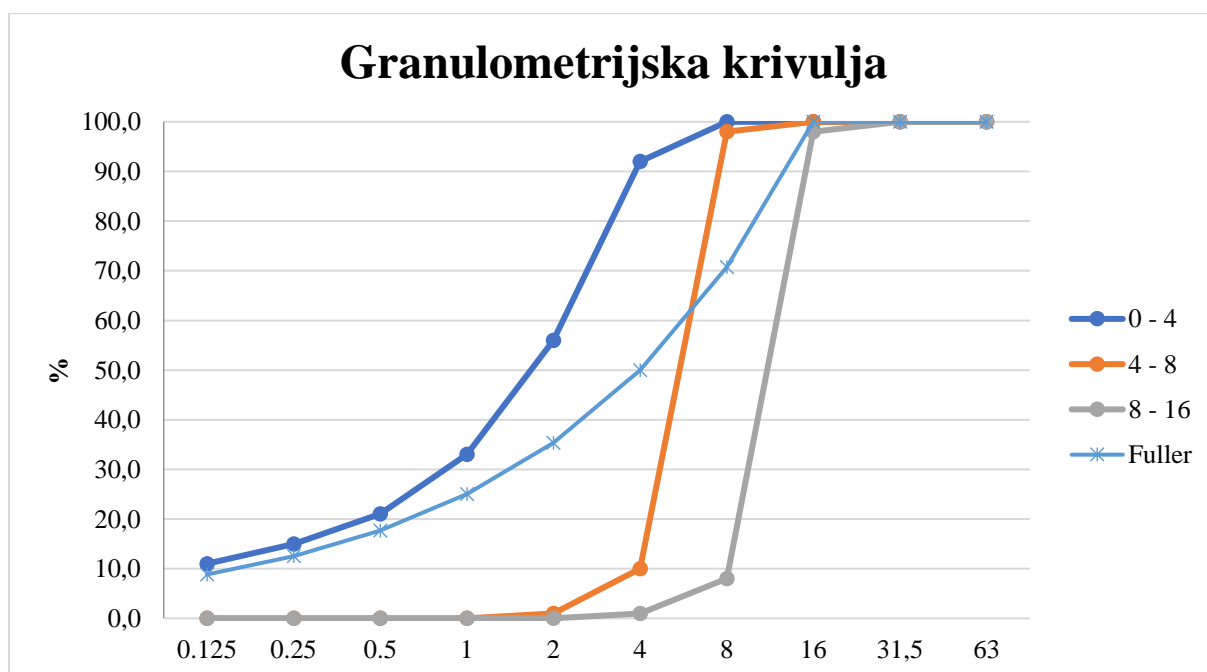
U tablici 5.13. prikazan je granulometrijski sastav agregata.

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	63
1	0 - 4	11,0	15,0	21,0	33,0	56,0	92,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	4 - 8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	10,0	98,0	100,0	100,0	100,0
3	8 - 16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8,0	98,0	100,0	100,0
4	16 - 31.5	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9,0	99,0	100,0

Tablica 5.7. Granulometrijski sastav agregata

FULLEROVA KRIVULJA( MAX ZRNO 16mm)										
ZADANI SASTAV AGREGATA [%]										
Sito	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
Zadano	8,8	12,5	17,7	25,0	35,4	50,0	70,7	100,0	100,0	100,0

Tablica 5.13. Zadani sastav agregata po granulometrijskoj krivulji B16(Fuller)



Slika 5.6. Granulometrijska krivulja B16(Fuller)

Sustav jednadžbi:

$$92X_1 + 10X_2 + 1X_3 = 50$$

$$100X_1 + 98X_2 + 8X_3 = 70,7$$

$$100X_1 + 100X_2 + 98X_3 = 100$$

Rješenja:

$$X_1 = 52 \%$$

$$X_2 = 16 \%$$

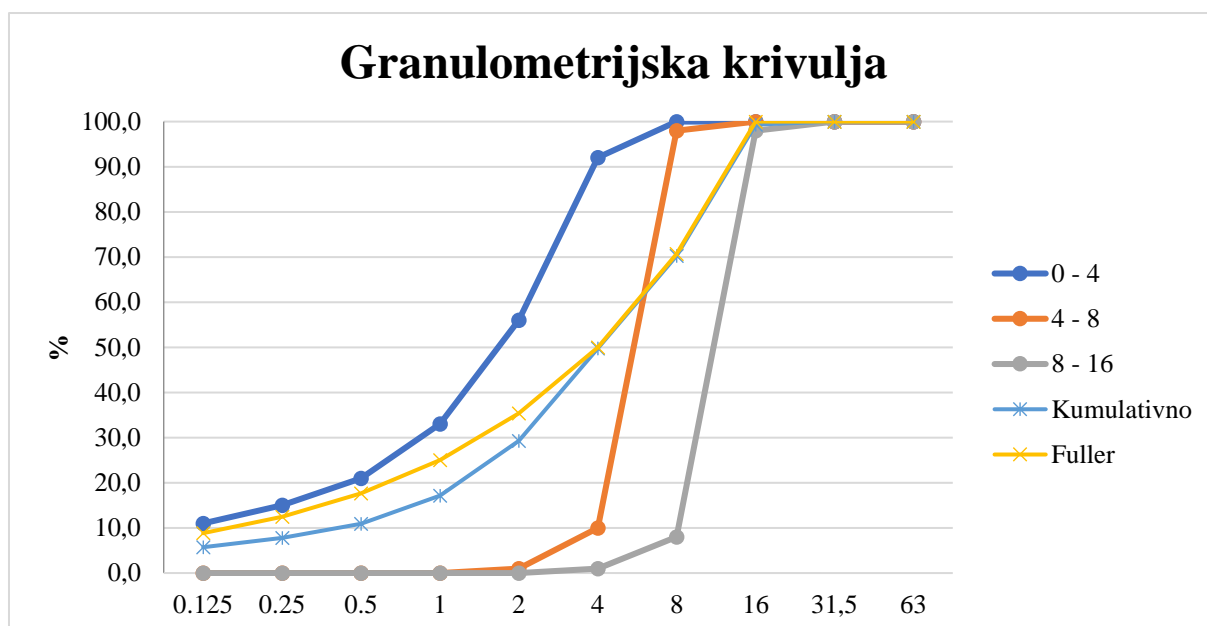
$$X_3 = 32 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

Za izračunate postotke napravljen je kumulativni sastav agregata (tablica 5.14.), te kumulativna krivulja agregata (slika 5.7.).

KUMULATIVNI SASTAV												
Frak. br.	Udio (%)	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
			0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	63
1	52	0 - 4	5,7	7,8	10,9	17,2	29,1	47,8	52,0	52,0	52,0	52,0
2	16	4 - 8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,6	15,7	16,0	16,0	16,0
3	32	8 - 16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	2,6	31,4	32,0	32,0
4	0	16 - 31.5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
UKUPNO	100		5,7	7,8	10,9	17,2	29,3	49,8	70,2	99,4	100,0	100,0

Tablica 5.14. Kumulativni sastav agregata



Slika 5.7. Kumulativna krivulja agregata

Karakteristike materijala mješavine B2 prikazane su u tablici 5.15.

Vrsta cementa	CEM II/B-W 42.5
Vrsta agregata	Drobljeni agregat
Najveće zrno agregata (mm)	16
Udio zraka u betonu (%)	2,0%
W/C omjer	
Uvjet čvrstoće/obrdivosti	0.55
Uvjet trajnosti	-
Odabrano	0.55
Količina vode za 1m <sup>3</sup> betona ( lit )	192,5
Količina cementa (kg)	
Uvjet čvrstoće/obrdivosti	342
Uvjet trajnosti	-
Odabrano	342

Tablica 5.15. Karakteristike materijala mješavine B2

Sastav i količina materijala za 1m<sup>3</sup> volumena betona mješavine B2 prikazani su u tablici 5.16.



SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/dm <sup>3</sup> )	VOLUMEN (dm <sup>3</sup> )
CEMENT CEM II 42.5 N	350	3,2	109,38
VODA	192,5	1	192,5
w/c 0.55			
ZRAK 2.0 %	0	0	20
AGREGAT	1830,92	2,7	678,12
BETON	2373,42		1000,00

Tablica 5.16. Količina materijala za 1m<sup>3</sup> betona mješavine B2

Nadalje, napravljena je tablica količine agregata po udjelu frakcije, cementa i vode koja je korigirana (apsorpcija vode i vlažnost) za količinu volumena koja je potrebna za izradu uzoraka (tablica 5.17.).

SASTAV	Z.P.S. MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGORANA MASA	KORIGORANA MASA(0,04m <sup>3</sup> )
	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 4	52	952,08	0,9	8,57	0,6	5,71	949,22	37,97
4 - 8	16	292,95	0,7	2,05	0,2	0,59	291,48	11,66
8 - 16	32	585,89	0,7	4,10	0,1	0,59	582,38	23,30
16 - 31,5	0	0	0,4	0	0,5	0,00	0	0,00
VODA		192,5		14,72		6,88	200,34	8,01
CEMENT		350					350	14

Tablica 5.17. Korigirana tablica količine materijala za mješavinu B2

Ukupna masa mješavine iznosila je 94,94kg. Na slici 5.8. prikazani su ugrađeni uzorci mješavine B2.



Slika 5.8. Uzorci mješavine B2(16mm)

### 5.3.3. Mješavina sa maksimalnim zrnom agregata 31,5mm; B3

Za mješavinu B3(D = 31,5 mm), koristila se Fullerova(B krivulja) kao i u prethodnim mješavinama.

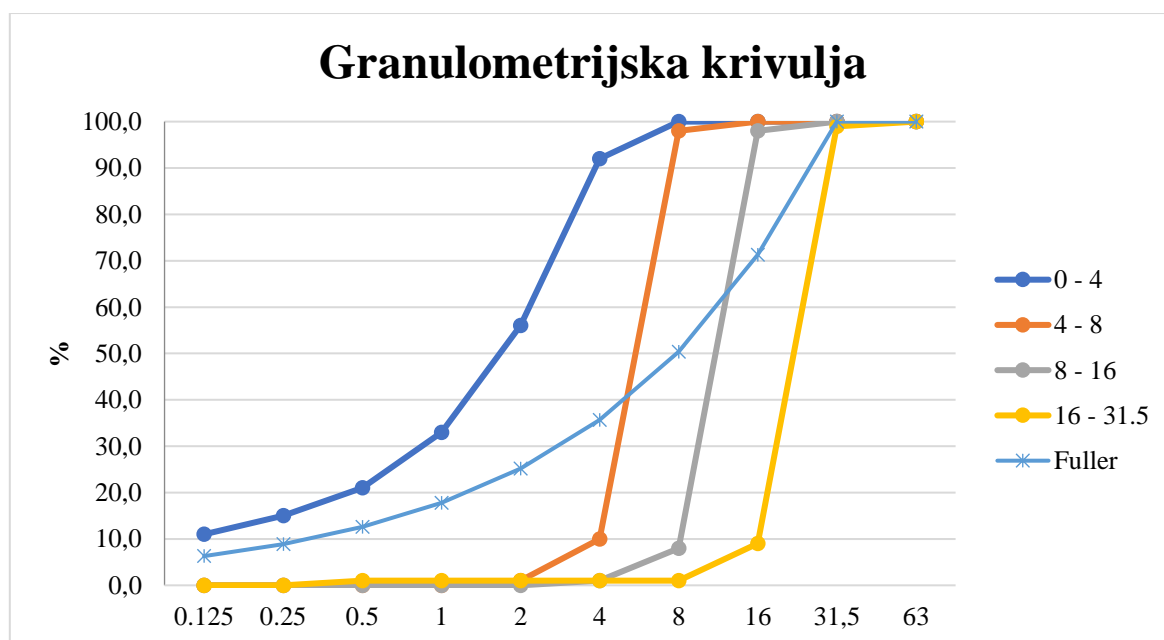
U tablici 5.18. prikazan je granulometrijski sastav agregata.

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	63
1	0 - 4	11,0	15,0	21,0	33,0	56,0	92,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	4 - 8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	10,0	98,0	100,0	100,0	100,0
3	8 - 16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8,0	98,0	100,0	100,0
4	16 - 31,5	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9,0	99,0	100,0

Tablica 5.18. Granulometrijski sastav agregata

FULLEROVA KRIVULJA(MAX ZRNO 31,5mm)										
ZADANI SASTAV AGREGATA [%]										
Sito	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
Zadano	6,3	8,9	12,6	17,8	25,2	35,6	50,4	71,3	100,0	100,0

Tablica 5.19. Zadani sastav agregata po granulometrijskoj krivulji B31,5(Fuller)



Slika 5.9. Granulometrijska krivulja B31,5(Fuller)

Sustav jednadžbi:

$$92X_1 + 10X_2 + 1X_3 + 1X_4 = 35,6$$

$$100X_1 + 98X_2 + 8X_3 + 1X_4 = 50,4$$

$$100X_1 + 100X_2 + 98X_3 + 9X_4 = 71,3$$

$$100X_1 + 100X_2 + 100X_3 + 99X_4 = 100$$

Rješenja:

$$X_1 = 34 \%$$

$$X_2 = 9 \%$$

$$X_3 = 52 \%$$

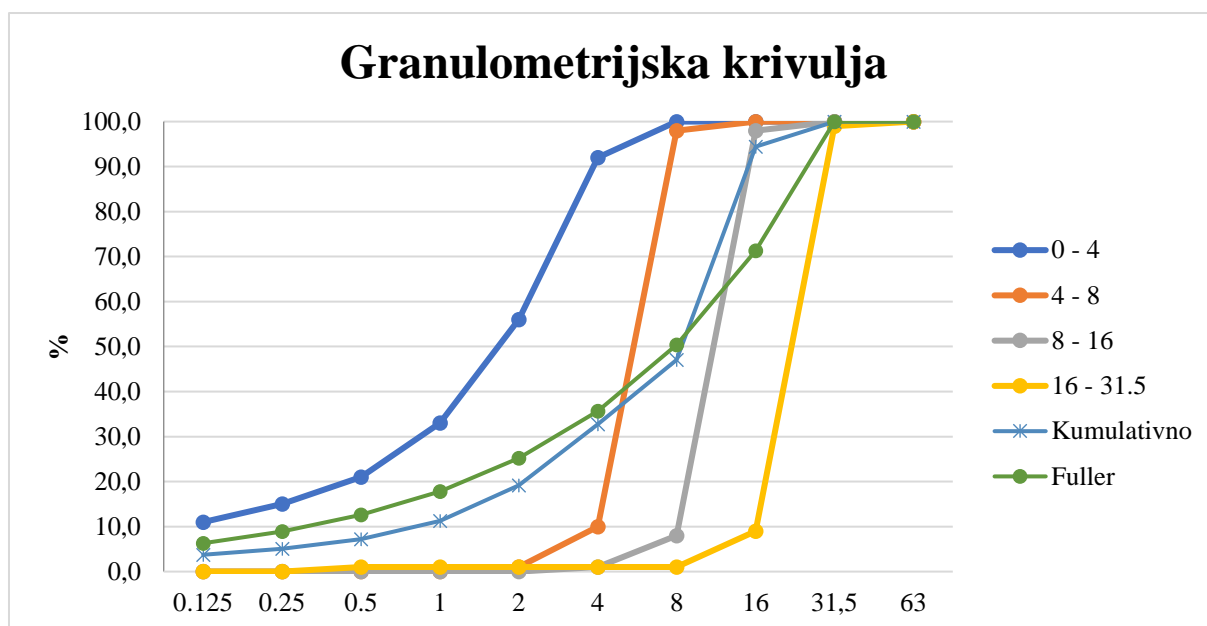
$$X_4 = 5 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

Za izračunate postotke napravljen je kumulativni sastav agregata (tablica 5.20.), te kumulativna krivulja agregata (slika 5.10.).

KUMULATIVNI SASTAV												
Frak.br.	Udio(%)	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
			0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	63
1	34	0 - 4	3,7	5,1	7,1	11,2	19,0	31,3	34,0	34,0	34,0	34,0
2	9	4 - 8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9	8,8	9,0	9,0	9,0
3	52	8 - 16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	4,2	51,0	52,0	52,0
4	5	16 - 31.5	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	5,0	5,0
UKUPNO	100		3,7	5,1	7,2	11,3	19,2	32,8	47,0	94,4	100,0	100,0

Tablica 5.20. Kumulativni sastav agregata



Slika 5.10. Kumulativna krivulja agregata

Karakteristike materijala mješavine B3 prikazane su u tablici 5.21.

Vrsta cementa	CEM II/B-W 42.5
Vrsta agregata	Drobljeni agregat
Najveće zrno agregata (mm)	31,5
Udio zraka u betonu (%)	1,5%
W/C omjer	
Uvjet čvrstoće	0.55
Uvjet trajnosti	-
Odabrano	0.55
Količina vode za 1m <sup>3</sup> betona ( lit )	192,5
Količina cementa (kg)	
Uvjet čvrstoće	350
Uvjet trajnosti	-
Odabrano	350

Tablica 5.21. Karakteristike materijala mješavine B3

Sastav i količina materijala za 1m<sup>3</sup> volumena betona mješavine B3 prikazani su u tablici 5.22.

SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/dm <sup>3</sup> )	VOLUMEN (dm <sup>3</sup> )
CEMENT CEM II 42.5 N	350	3,2	109,38
VODA	192,5	1	192,5
w/c 0.55			
ZRAK 1.5 %	15	0	15
AGREGAT	1844,42	2,7	683,12
BETON	2401,92		1000,00

Tablica 5.22. Količina materijala za 1m<sup>3</sup> betona mješavine B3

Nadalje, napravljena je tablica količine agregata po udjelu frakcije, cementa i vode koja je korigirana (apsorpcija vode i vlažnost) za količinu volumena koja je potrebna za izradu uzoraka (tablica 5.23.).

SASTAV	Z.P.S. MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGORANA MASA	KORIGORANA MASA(0,04m <sup>3</sup> )
	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 4	34	627,10	0,9	5,64	0,6	3,76	625,22	25,01
4 - 8	9	166,00	0,7	1,16	0,2	0,33	165,17	6,61
8 - 16	52	959,10	0,7	6,71	0,1	0,96	953,34	38,13
16 - 31,5	5	92,22	0,4	0,37	0,5	0,46	92,31	3,69
VODA		192,5		13,89		5,51	200,87	8,03
CEMENT		350					350	14

Tablica 5.23. Korigirana tablica količine materijala za mješavinu B3

Ukupna masa mješavine iznosila je 95,48kg. Na slici 5.11. prikazani su ugrađeni uzorci mješavine B3.



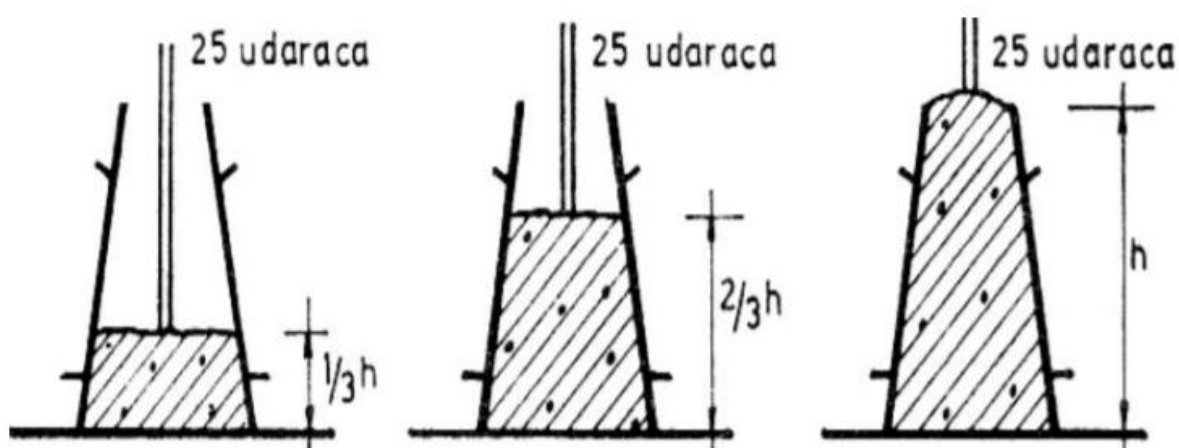
Slika 5.11. Uzorci mješavine B3(31,5mm)

## 5.4. Metode ispitivanja betona

Mješavine betona ispituju se u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju ispitivala se konzistencija betona metodom slijeganja (slump test), dok se u očvrslom stanju ispitivala tlačna čvrstoća betona, čvrstoća na savijanje, težina uzorka betona i vrijeme prolaska UZV kroz uzorak betona za potrebe izračuna dinamičkog modula elastičnosti.

### 5.4.1. Ispitivanje konzistencije metodom slijeganja

Beton se u svježem stanju zbija u limeni kalup oblika krnjeg stošca, koji je napravljen od lakog metala debljine 1,5 mm ili veće. Promjer baze stošca je  $200 \pm 2$  mm, promjer vrha stošca  $100 \pm 2$  mm, a visina iznosi  $300 \pm 2$  mm. Podloga na koju se postavlja kalup mora biti čvrsta, ravna i načinjena od neupijajućeg materijala. Unutrašnjost kalupa i podloga prethodno se navlaže mokrom krpom/spužvom, te se tijekom punjenja kalup drži čvrsto uz podlogu tako da ne dođe do curenja materijala između dviju površina (kalup i podloga). Kalup se puni uzorkom svježeg betona u 3 sloja gdje je svaki otprilike visine jedne trećine kalupa kada je zbijen. Svaki sloj se zbija s 25 udaraca šipke za zbijanje. Udarci trebaju biti ravnomjerno raspoređeni po cijelom poprečnom presjeku sloja. Za zbijanje donjeg sloja nužno je nagnuti šipku te zbijati beton okretima šipke spiralno prema središtu kalupa. Drugi sloj i gornji sloj zbijaju se svojom cijelom visinom tako da nabijanja prodru samo u sloj koji je neposredno ispod. Gornji sloj (zadnji) treba napuniti preko ruba kalupa prije zbijanja šipkom. Ako nakon zbijanja nedostaje betona do gornjeg ruba kalupa, potrebno je dopuniti kalup betonom. Nakon zbijanja gornjeg sloja, potrebno je izravnati površinu betona valjanjem šipke za nabijanje. Višak betona s podloge potrebno je ukloniti. [17]



Slika 5.12. Punjenje slojeva betona u kalup [17]



Kalup se pažljivo ukloni podizanjem prema gore. Podizanje kalupa treba trajati od 2 do 5 sekundi i mora biti mirno pazeći da se ne dotakne formirani stožac betona da ne bi došlo do bočnog ili torzijskog kretanja betona. Cijeli postupak, od punjenja do podizanja kalupa, ne bi trebao trajati dulje od 150 sekundi. Odmah nakon uklanjanja kalupa mjeri se i bilježi slijeganje(h) tako da se odredi razlika između visine kalupa i najviše točke slegnutog ispitnog uzorka. Izmjerene vrijednosti se zaokružuju na bližih 5 do 10mm. Ispitivanje slijeganja vrši se prema normi HRN EN 12350-2.



Slika 5.13. Ispitivanje konzistencije metodom slijeganja

### 5.4.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona detaljno je objašnjeno u poglavlju 2.1.1. u prilogu se nalazi slika hidrauličke preše korištene za ispitivanje tlačne čvrstoće betona (slika 5.13.).



Slika 5.13. Hidraulička preša za ispitivanje uzorka kocke u laboratoriju TPA

Za ispitivanje tlačne čvrstoće polovica prizme koje su prethodno savijane i slomljene koristile su se čelične pločice dimenzija 10×10 cm i debljine 4 mm. Pločice su se postavljale sa obje strane ploča hidrauličke preše da bi dobili imitaciju ispitivanja tlačne čvrstoće kocke duljine brida 10 cm. (slika 5.14.)



Slika 5.14. Ispitivanje tlačne čvrstoće nad polovicama prizme

### 5.4.3. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Ispitivanje čvrstoće na savijanje vrši se nad prizmama betona dimenzija  $10 \times 10 \times 40$  cm prema normi HRN EN 12390-5. Prizme postavljamo tako da im je polovica prislonjena na centralne dijelove gornje ploče (valjka) od hidrauličke preše. Donji dio ploče (2 valjka) razmaknuti su 30 cm, te ostavljaju prostor od 5 cm sa svake strane prizme (slika 5.17.)

Nanošenje opterećenja se odvija 10 puta sporije od nanošenja opterećenja kod ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka. Za izračun čvrstoće na savijanje korištena je formula (11):

$$f_t = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (11)$$

Gdje je:

$F_t$  = čvrstoća na savijanje

P = sila loma uzorka

L = duljina uzorka

b = duljina brida uzorka

h = visina uzorka

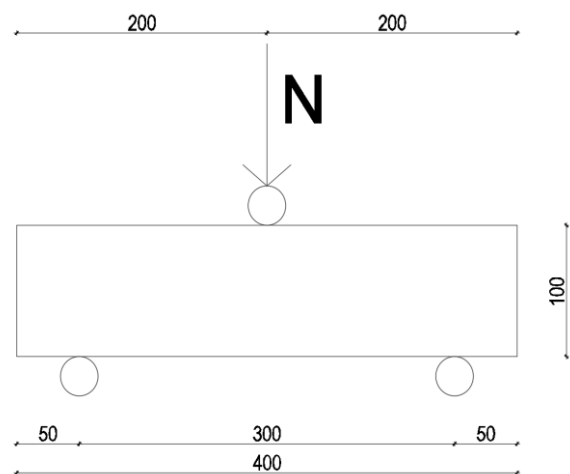
Ispitivanje uzoraka će se vršiti u hidrauličkoj preši prikazanoj na slici 5.15.



Slika 5.15. Hidraulička preša za ispitivanje uzorka prizme u laboratoriju TPA



Slika 5.16. Ispitivanje čvrstoće na savijanje



Slika 5.17. Shema nanošenja opterećenja



#### 5.4.4. Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti

Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti vrši se uz pomoć vage i uređaja za mjerenje brzina prolaska valova kroz uzorke. Uzorci se prvo obrišu, te se izvažu da bi uz pomoć dimenzija uzoraka tj. volumena uzorka i mase uzorka dobili gustoću uzorka.

Nakon toga uzorci se mjere sa uređajem za prolazak valova koji je prikazan na slici 5.18. Na papučice za mjerenje prolaska se lagano namaže vodena otopina za bolje prijanjanje između površine papučice i brida uzorka. Zatim se mjeri prolazak brzine vala kroz uzorak ovisno o njegovim dimenzijama. Dinamički modul elastičnosti se izračunava po formuli prikazanoj u stavci 4.4. Poissonov koeficijent je u rasponu između 0,15 i 0,25. Ispitivanje se izvršilo prema normi HRN EN 12504-4:2004.



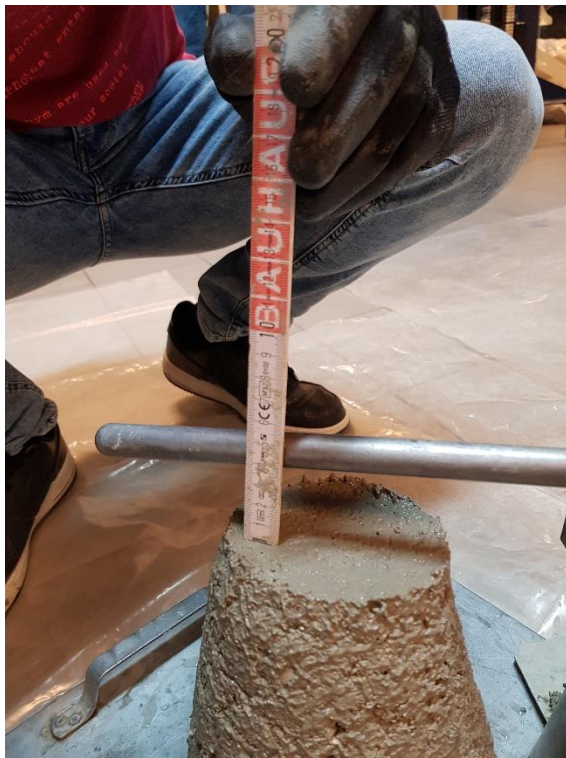
Slika 5.18. Uređaj za mjerenje brzine prolaska UZV kroz uzorak

## 6. REZULTATI ISPITIVANJA EKSPERIMENTALNOG DIJELA RADA

### 6.1. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; metoda slijeganja

#### 6.1.1. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; mješavina B1

Rezultat ispitivanja metode slijeganja mješavine maksimalnog zrna agregata 8mm(B1) iznosio je 40mm(slika 6.1. i slika 6.2.)



Slika 6.1. Rezultat slijeganja mješavine B1



Slika 6.2. Oblik slijeganja mješavine B1

Prema tablici razreda slijeganja mješavina betona B1 spada u razred slijeganja S1(10 – 40mm).

Upravo veliki udio frakcije 0 – 4mm igra veliku ulogu u konzistenciji betona koji nije puno promijenio oblik naspram oblika koji je imao u kalupu.

### 6.1.2. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; mješavina B2

Rezultat ispitivanja metode slijeganja mješavine maksimalnog zrna agregata 16mm(B2) iznosio je 170mm(slika 6.3. i slika 6.4.)



Slika 6.3. Rezultati slijeganja mješavine B2



Slika 6.4. oblik slijeganja mješavine B2

Prema tablici razreda slijeganja mješavina betona B2 spada u razred slijeganja S4(160 – 210mm).

Povećanje frakcije 8 – 16mm uveliko je pridonijelo većem slijeganju betona. Oblik betona se značajnije promijenio nego što je bio slučaj kod mješavine B1.



### 6.1.3. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju; mješavina B3

Rezultat ispitivanja metode slijeganja mješavine maksimalnog zrna agregata 31,5mm(B3) iznosio je 185mm(slika 6.5.)



Slika 6.5. Rezultati slijeganja i oblika mješavine B3

Prema tablici razreda slijeganja mješavina betona B3 spada u razred slijeganja S4(160 – 210mm).

Povećanje maksimalnog zrna agregata opet je pridonijelo povećanju slijeganja betona u odnosu na prethodne mješavine.



## 6.2. Rezultati ispitivanja betona u očvrslom stanju

Svim uzorcima se prije ispitivanja provjeravala ravnost površine prema normi HRN EN 12390-1 (slika 6.6.).



Slika 6.6. Provjera ravnosti uzoraka prema normi HRN EN 12390-1

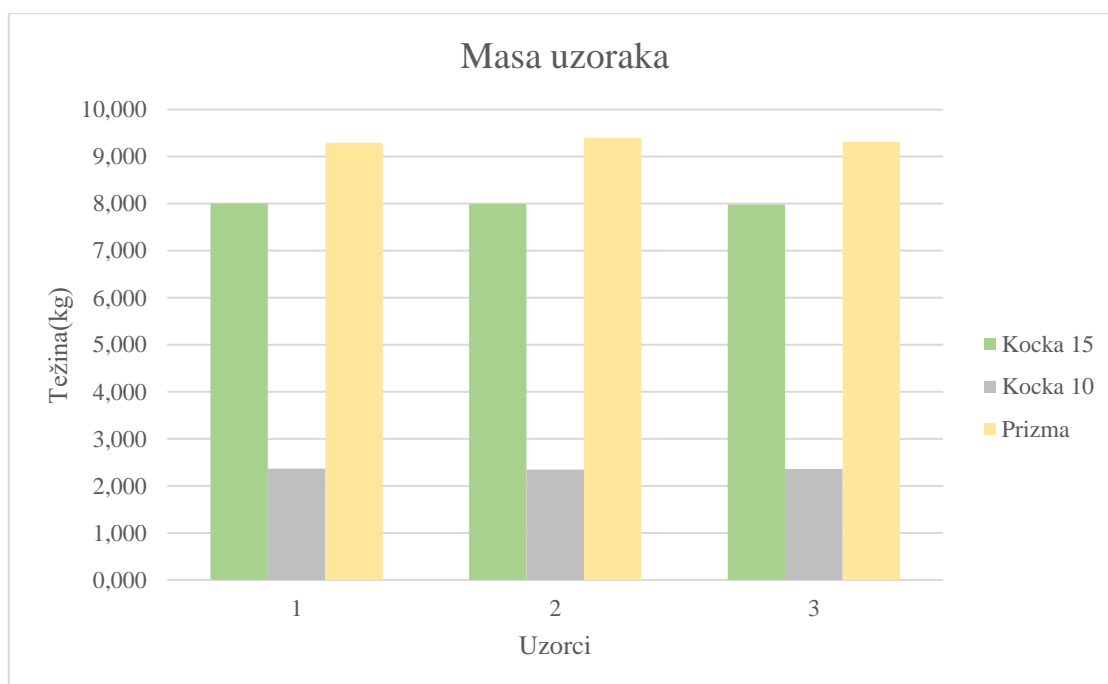
## 6.2.1. Rezultati ispitivanja betona u očvrslom stanju; mješavina B1

### 6.2.1.1. Masa uzoraka

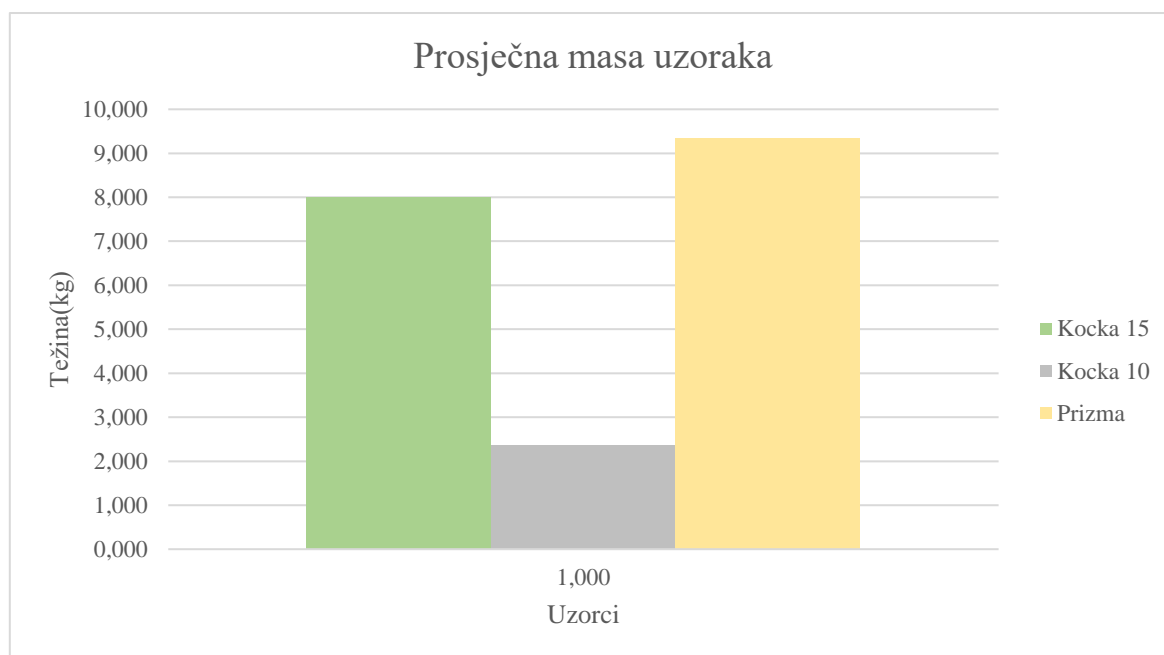
U tablici 6.1. prikazani su iznosi mase uzoraka kocki i prizmi mješavine B1. Također prikazan je odnos masa uzoraka te prosječna vrijednost mase uzoraka po svakom obliku uzorka (slika 6.7., slika 6.8.)

UZORAK(B1)	MASA UZORKA(g)	MASA UZORKA(kg)	PROSJEČNA MASA(kg)
K 15 - 1	8004,7	8,005	7,994
K 15 - 2	7995,4	7,995	
K 15 - 3	7981,2	7,981	
K 10 - 1	2365	2,365	2,356
K 10 - 2	2344,6	2,345	
K 10 - 3	2359	2,359	
P 1	9295,2	9,295	9,337
P 2	9397,1	9,397	
P 3	9318,7	9,319	

Tablica 6.1. Mase uzoraka mješavine B1



Slika 6.7. Graf odnosa mase uzoraka mješavine B1



Slika 6.8. Prosječna masa uzoraka po svakom obliku uzorka mješavine B1

### 6.2.1.2. Dimenzije i gustoće uzoraka

U tablici 6.2. prikazane su dimenzije uzoraka, te njihova gustoća određena prema normi HRN EN 12390-7 .

UZORAK(B1)	DIMENZIJE UZORKA(mm)			VOLUMEN UZORKA(mm <sup>3</sup> )	VOLUMEN UZORKA(m <sup>3</sup> )	GUSTOĆA UZORKA(kg/m <sup>3</sup> )
	DUŽINA	ŠIRINA	VISINA			
K 15 - 1	150,5	151,8	150,9	3447446,31	0,00345	2321,92
K 15 - 2	150,8	150,4	151,1	3426996,352	0,00343	2333,06
K 15 - 3	150,6	150,8	150,3	3413385,144	0,00341	2338,21
K 10 - 1	99,8	99,8	100,8	1003972,032	0,00100	2355,64
K 10 - 2	99,8	99,7	99,7	992020,982	0,00099	2363,46
K 10 - 3	99,8	101,2	100	1009976	0,00101	2335,70
P 1	100,7	98,2	400	3955496	0,00396	2349,95
P 2	100,6	98,8	401	3985651,28	0,00399	2357,73
P 3	100,5	98,4	400	3955680	0,00396	2355,78

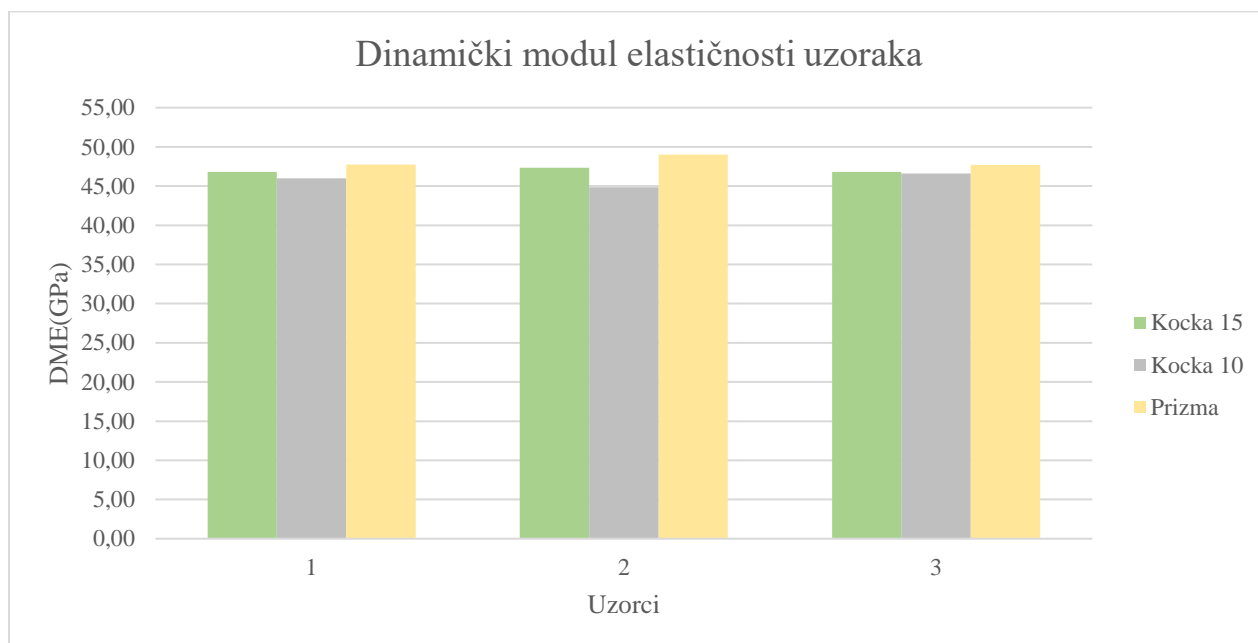
Tablica 6.2. Dimenzije i gustoće uzoraka mješavine B1

### 6.2.1.3. Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka

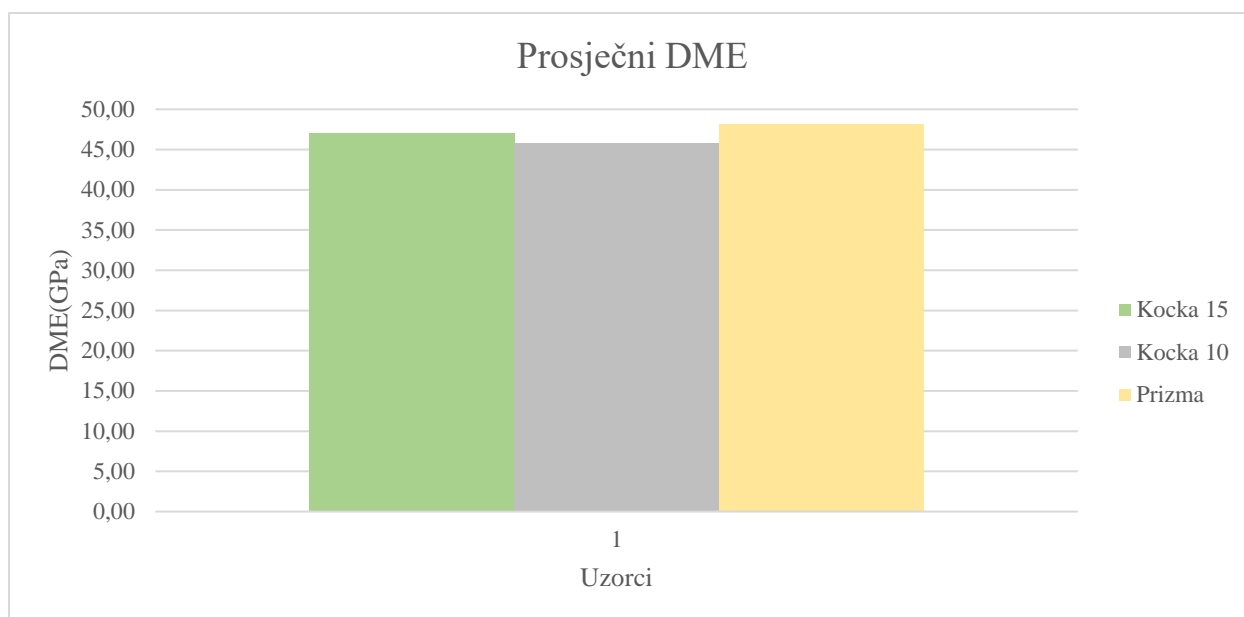
U tablici 6.3. prikazani su rezultati prolaska UZV kroz uzorke te njihov dinamički modul elastičnosti. Također je prikazan i prosječni dinamički modul elastičnosti po svakom obliku uzorka mješavine B1. Na slikama 6.9. i 6.10. prikazani su grafovi dinamičkog modula elastičnosti za svaku seriju uzorka kao i prosječni DME po svakom obliku uzorka.

UZORAK(B1)	VRIJEME PROLASKA VALA( $\mu$ s)			SREDNJA VRIJEDNOST( $\mu$ s)	KALIBRACIJA( $\mu$ s)	BRZINA PROLASKA VALA(m/s)	DME(GPa)	PROSJEČNI DME(Gpa)
K 15 - 1	32,3	33,1	32,1	32,5	31,8	4732,70	46,81	46,98
K 15 - 2	32,2	32,8	32,4	32,5	31,8	4747,11	47,32	
K 15 - 3	32,7	32,8	32,4	32,6	31,9	4716,08	46,80	
K 10 - 1	22,2	22	22,2	22,1	21,4	4656,30	45,97	45,80
K 10 - 2	22,3	22,7	22,3	22,4	21,7	4592,02	44,85	
K 10 - 3	21,8	22	21,9	21,9	21,2	4707,55	46,59	
P 1	85,1	85,4	84,2	84,9	84,2	4750,59	47,73	48,15
P 2	84,3	85	83,1	84,1	83,4	4806,23	49,02	
P 3	85	84,4	85,7	85,0	84,3	4743,08	47,70	

Tablica 6.3. Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B1



Slika 6.9. Dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B1



Slika 6.10. Prosječni dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B1

Kako je vidljivo na slici 6.10. razlika između izmjerenih vrijednosti iznosi 2,43% između prizme i kocke(15 cm), 4,88% između prizme i kocke(10 cm), te 2,51% između kocke(15 cm) i kocke(10 cm).

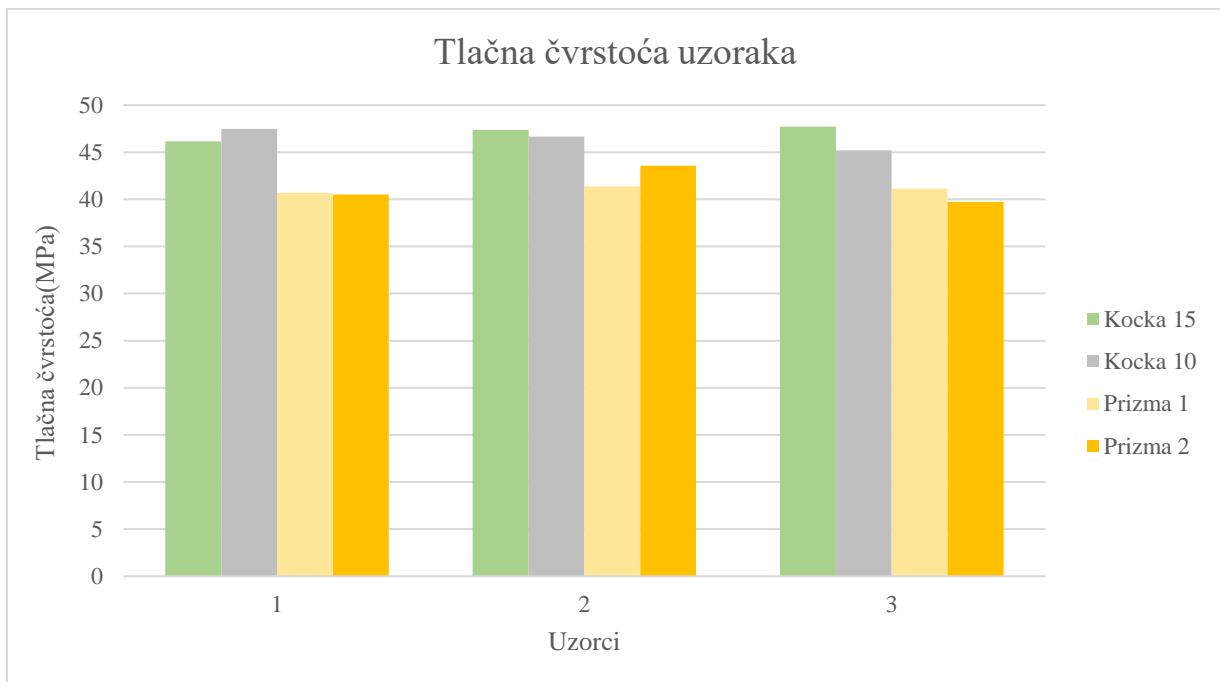
#### 6.2.1.4. Tlačna čvrstoća uzoraka i čvrstoća na savijanje uzoraka prizme

U tablici 6.4. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka kocki, te uzoraka polovice prizme. Također, prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje za uzorke prizmi.

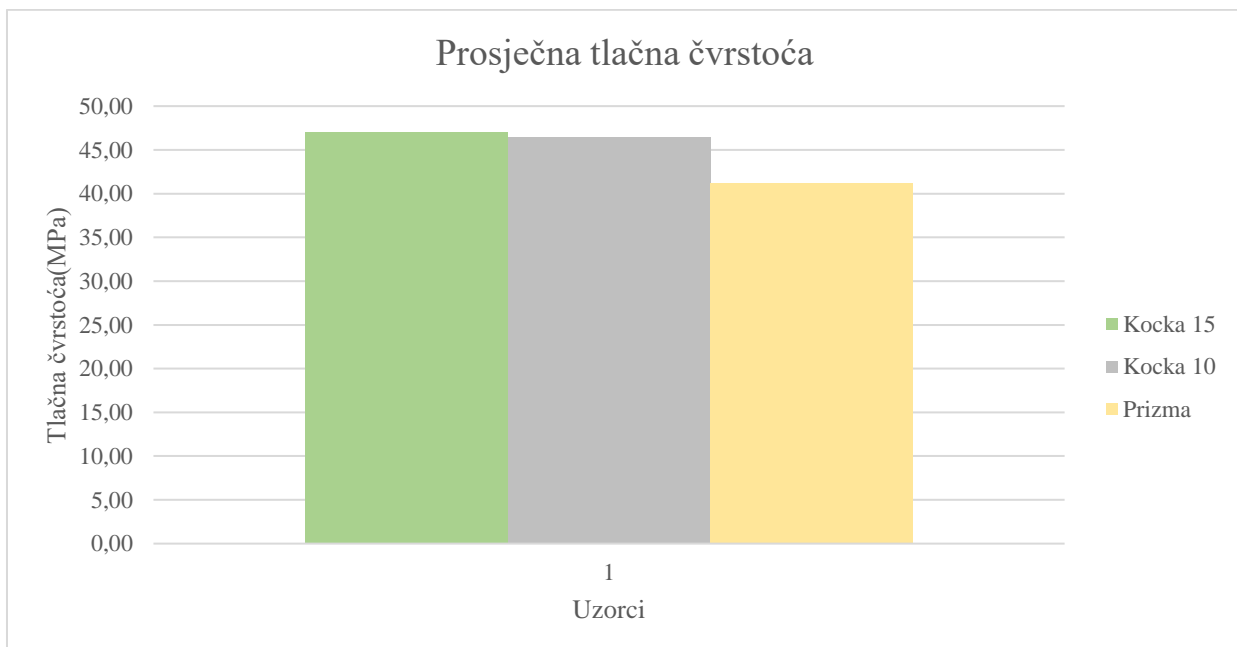
UZORAK(B1)	TLAČNA ČVRSTOĆA(MPa)	PROSJEČNA TLAČNA ČVRSTOĆA(MPa)
K 15 - 1	46,16	47,09
K 15 - 2	47,38	
K 15 - 3	47,72	
K 10 - 1	47,47	46,45
K 10 - 2	46,67	
K 10 - 3	45,21	
P 1 - 1	40,69	41,17
P 2 - 1	41,35	
P 3 - 1	41,12	
P 1 - 2	40,53	
P 2 - 2	43,58	
P 3 - 2	39,73	
UZORAK(B1)	ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(MPa)	PROSJEČNA ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(MPa)
P 1	8,26	8,06
P 2	8,18	
P 3	7,75	

Tablica 6.4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje uzoraka mješavine B1

Na slici 6.11. prikazani su grafovi tlačne čvrstoće uzoraka kocki i prizmi. Slika 6.12. prikazuje prosječnu tlačnu čvrstoću po svakom obliku uzorka mješavine B1.



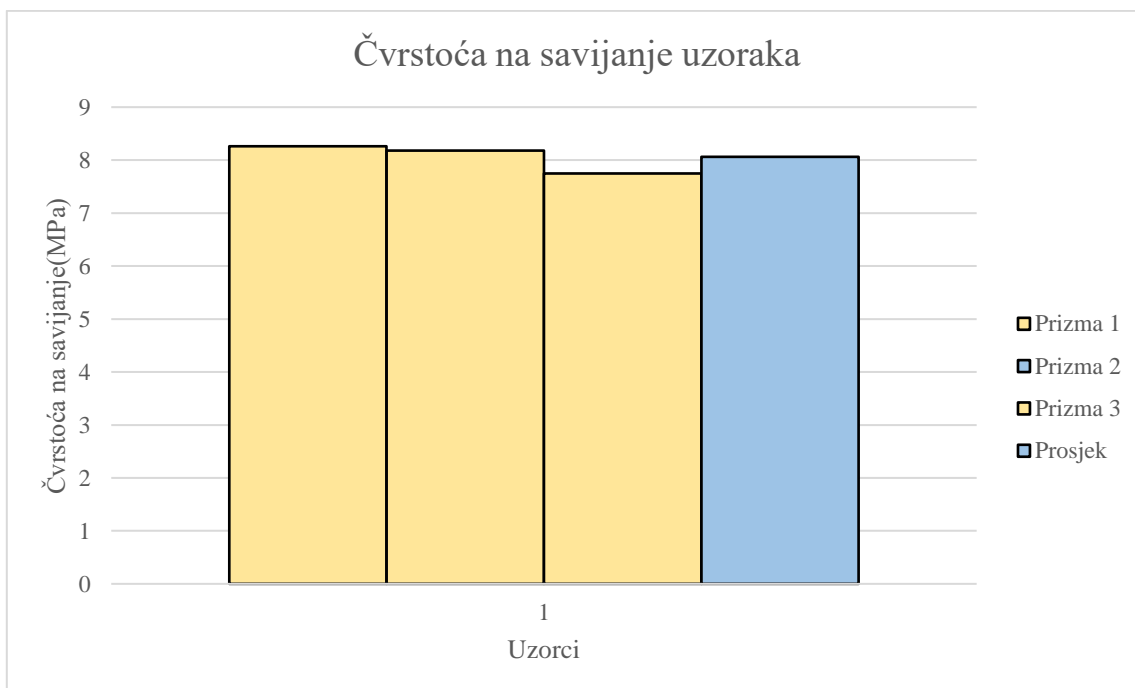
Slika 6.11. Tlačna čvrstoća uzoraka mješavine B1



Slika 6.12. Prosječna tlačna čvrstoća uzoraka mješavine B1

Kako je vidljivo na slici 6.12. razlika između izmjerenih vrijednosti iznosi 12,57% između prizme i kocke(15 cm), 11,37% između prizme i kocke(10 cm), te 1,36% između kocke(15 cm) i kocke(10 cm).

Na slici 6.13. prikazan je graf čvrstoće na savijanje uzoraka prizme te njihova prosječna vrijednost.



Slika 6.13. Čvrstoća na savijanje i prosječna čvrstoća na savijanje uzoraka prizmi mješavine B1 (prizme su žute , vidite legendu)

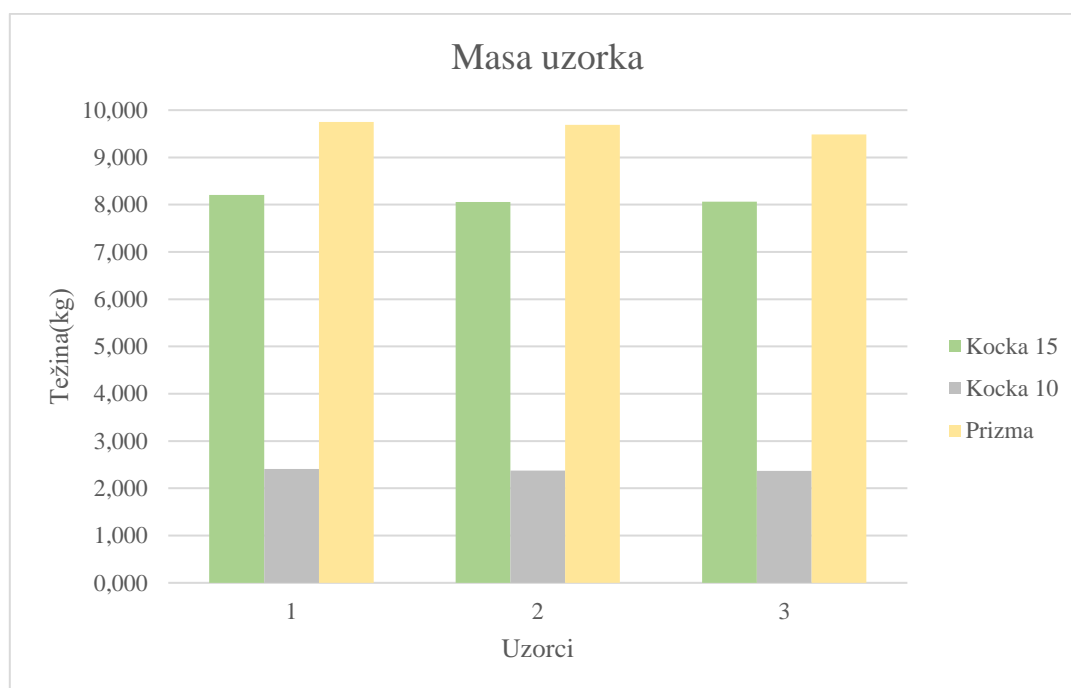
## 6.2.2. Rezultati ispitivanja betona u očvrslom stanju; mješavina B2

### 6.2.2.1. Masa uzoraka

U tablici 6.5. prikazani su iznosi mase uzoraka kocki i prizmi mješavine B2. Također prikazan je odnos masa uzoraka te prosječna vrijednost mase uzoraka po svakom obliku uzorka(slika 6.14., slika 6.15.)

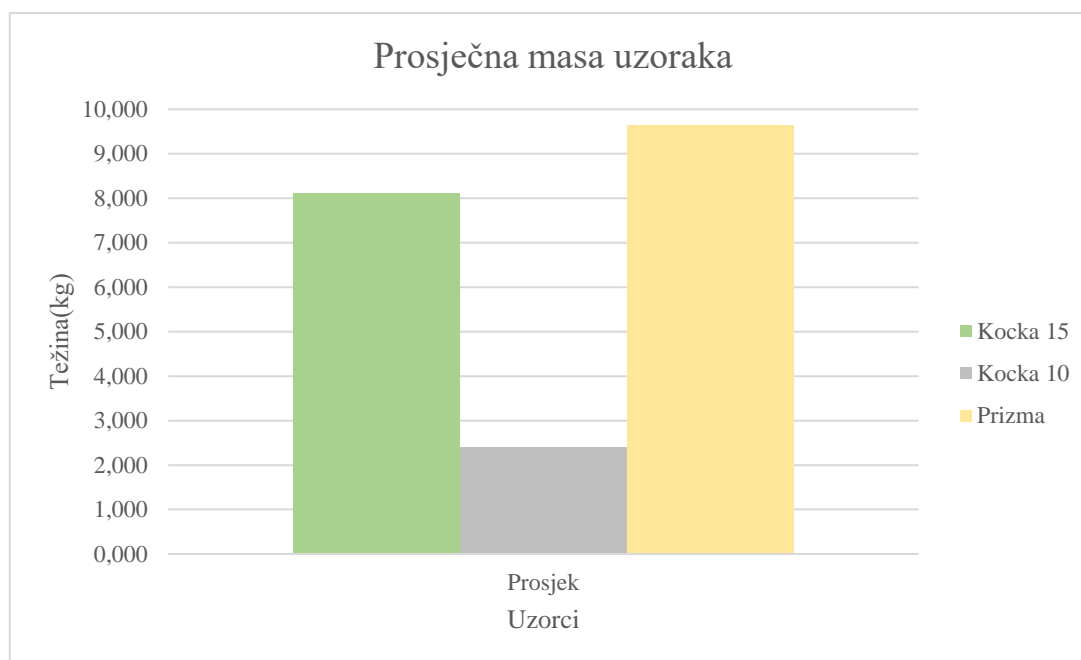
UZORAK(B2)	MASA UZORKA(g)	MASA UZORKA(kg)	PROSJEČNA MASA(kg)
K 15 - 1	8203	8,203	8,108
K 15 - 2	8054,9	8,055	
K 15 - 3	8065,2	8,065	
K 10 - 1	2408,3	2,408	2,385
K 10 - 2	2376,5	2,377	
K 10 - 3	2368,9	2,369	
P 1	9748,1	9,748	9,640
P 2	9686,5	9,687	
P 3	9486,6	9,487	

Tablica 6.5. Dimenzije i gustoće uzoraka mješavine B2



Slika 6.14. Graf odnosa mase uzoraka mješavine B2





Slika 6.15. Prosječna masa uzoraka po svakom obliku uzorka mješavine B2

### 6.2.2.2. Dimenzije i gustoće uzoraka

U tablici 6.6. prikazane su dimenzije uzoraka, te njihova gustoća određena prema normi HRN EN 12390-7.

UZORAK(B2)	DIMENZIJE UZORKA(mm)			VOLUMEN UZORKA(mm <sup>3</sup> )	VOLUMEN UZORKA(m <sup>3</sup> )	GUSTOĆA UZORKA(kg/m <sup>3</sup> )
	DUŽINA	ŠIRINA	VISINA			
K 15 - 1	151,3	152,5	151,5	3495597,38	0,00350	2346,67
K 15 - 2	150,5	149,8	151	3404279,90	0,00340	2366,11
K 15 - 3	150,8	150,2	150,9	3417909,14	0,00342	2359,69
K 10 - 1	100	102,3	100,5	1028115,00	0,00103	2342,44
K 10 - 2	99,9	101,4	99,9	1011973,01	0,00101	2348,38
K 10 - 3	100	99,5	100,5	999975,00	0,00100	2368,96
P 1	101,4	100,1	401	4070206,14	0,00407	2394,99
P 2	100,5	101,5	401	4090500,75	0,00409	2368,05
P 3	101,2	100,2	400	4056096,00	0,00406	2338,85

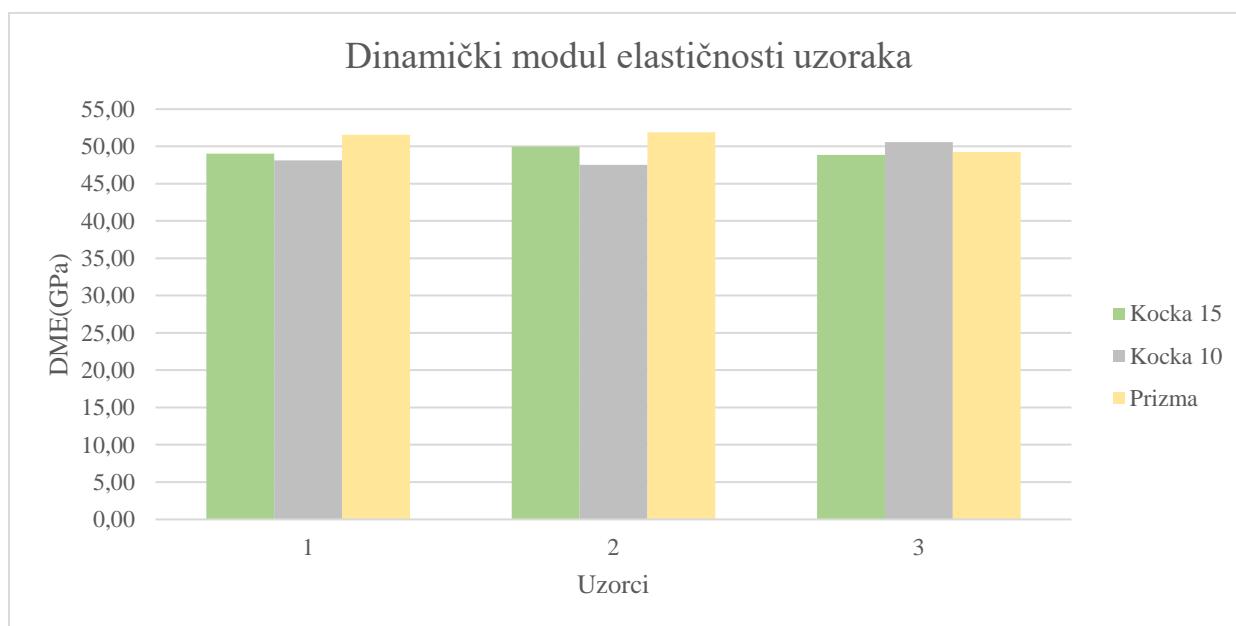
Tablica 6.6. Dimenzije i gustoće uzoraka mješavine B2

### 6.2.2.3. Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka

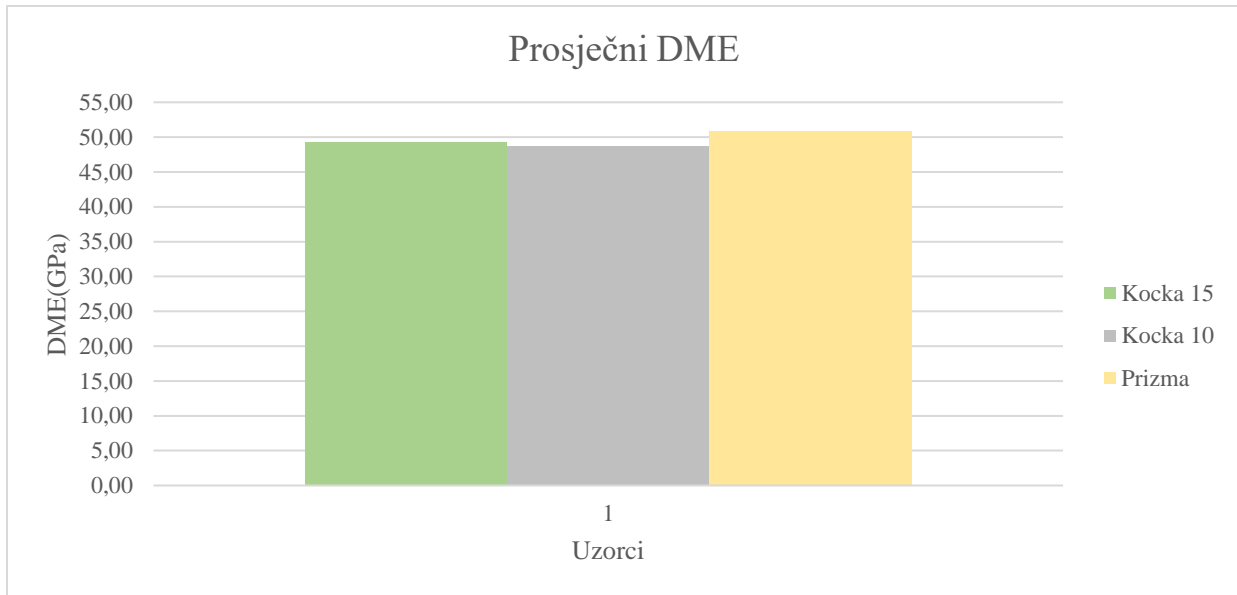
U tablici 6.7. prikazani su rezultati prolaska UZV kroz uzorke te njihov dinamički modul elastičnosti. Također je prikazan i prosječni dinamički modul elastičnosti po svakom obliku uzorka mješavine B2. Na slikama 6.16. i 6.17. prikazani su grafovi dinamičkog modula elastičnosti za svaku seriju uzorka kao i prosječni DME po svakom obliku uzorka.

UZORAK(B2)	VRIJEME PROLASKA VALA( $\mu$ s)			SREDNJA VRIJEDNOST( $\mu$ s)	KALIBRACIJA( $\mu$ s)	BRZINA PROLASKA VALA(m/s)	DME(GPa)	PROSJEČNI DME(Gpa)
K 15 - 1	32,1	32,6	31,6	32,1	31,4	4818,47	49,04	49,30
K 15 - 2	31,2	32,6	31,5	31,8	31,1	4844,42	49,98	
K 15 - 3	31,9	32,5	32	32,1	31,4	4797,45	48,88	
K 10 - 1	22,3	21,8	20,8	21,6	20,9	4777,07	48,11	48,74
K 10 - 2	22,2	21,9	21,2	21,8	21,1	4742,09	47,53	
K 10 - 3	21,3	21,1	21,3	21,2	20,5	4870,13	50,57	
P 1	82,9	82,1	83,1	82,7	82,0	4890,24	51,55	50,89
P 2	82,5	81,6	81,8	82,0	81,3	4934,37	51,89	
P 3	84,2	82,7	83,3	83,4	82,7	4836,76	49,24	

Tablica 6.7. Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B2



Slika 6.16. Dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B2



Slika 6.17. Prosječni dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B2

Kako je vidljivo na slici 6.17. razlika između izmjerenih vrijednosti iznosi 3,12% između prizme i kocke(15 cm), 4,22% između prizme i kocke(10 cm), te 1,14% između kocke(15 cm) i kocke(10 cm).

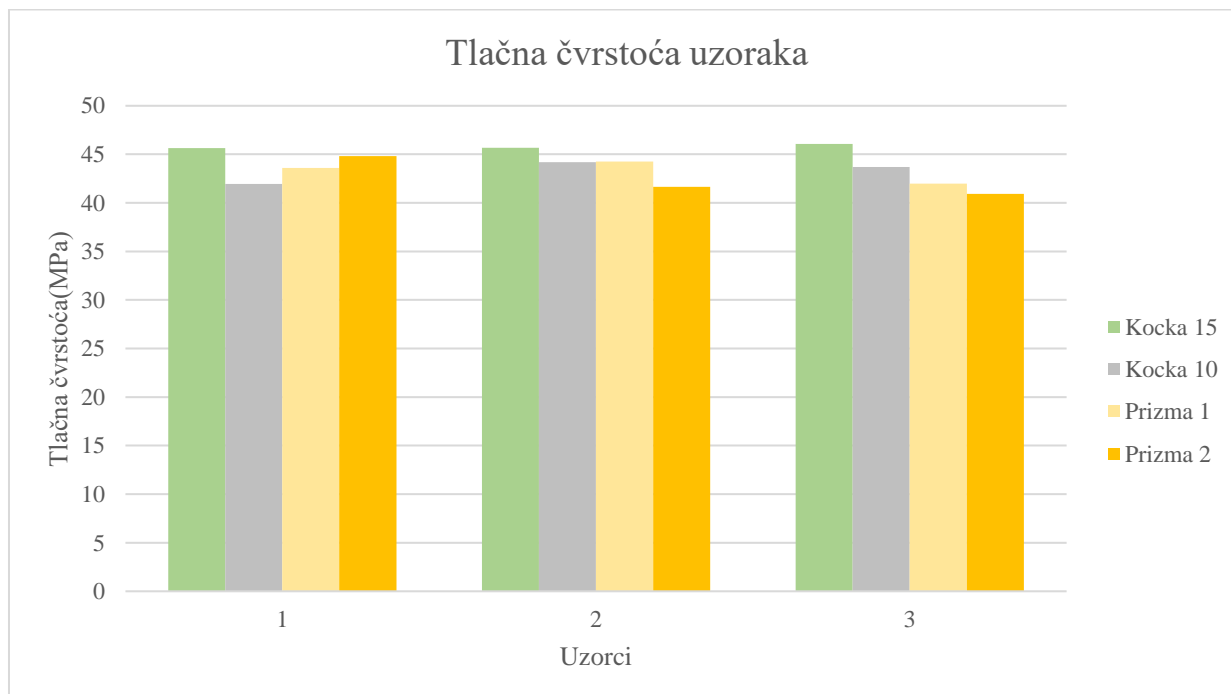
#### 6.2.2.4. Tlačna čvrstoća uzoraka i čvrstoća na savijanje uzoraka prizme

U tablici 6.8. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka kocki, te uzoraka polovice prizme. Također, prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje za uzorke prizmi.

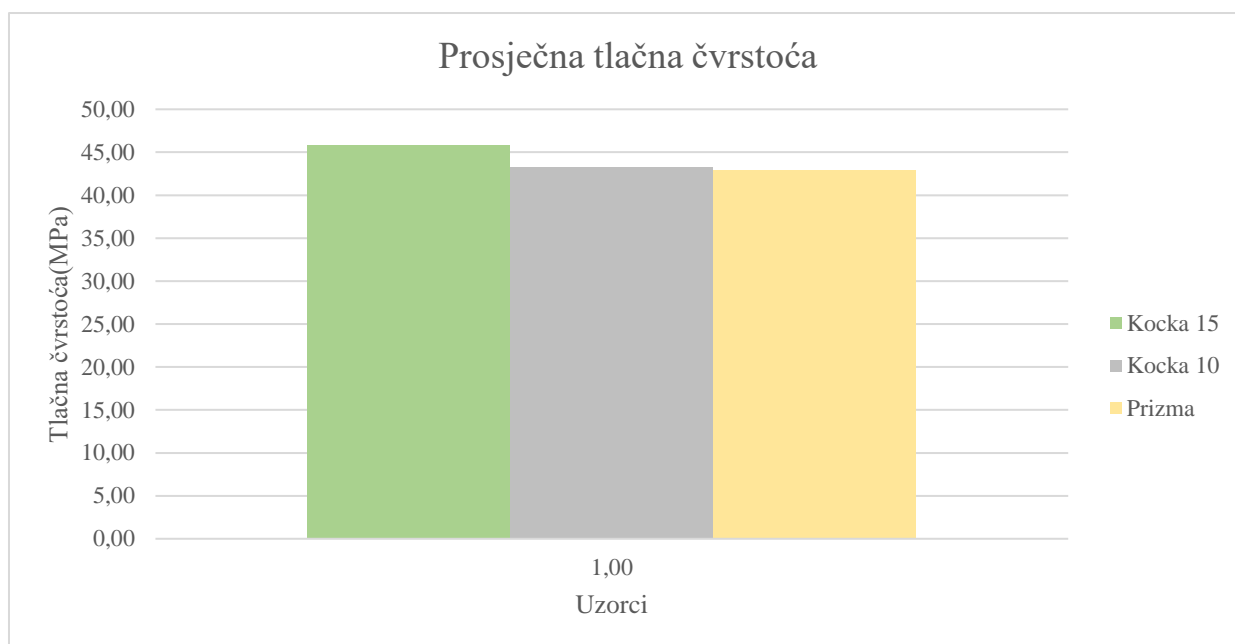
UZORAK(B2)	TLAČNA ČVRSTOĆA(MPa)	PROSJEČNA TLAČNA ČVRSTOĆA(MPa)
K 15 - 1	45,63	45,79
K 15 - 2	45,67	
K 15 - 3	46,08	
K 10 - 1	41,95	43,28
K 10 - 2	44,19	
K 10 - 3	43,7	
P 1 - 1	43,61	42,88
P 2 - 1	44,27	
P 3 - 1	41,98	
P 1 - 2	44,82	
P 2 - 2	41,64	
P 3 - 2	40,93	
UZORAK(B2)	ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(MPa)	PROSJEČNA ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(MPa)
P 1	8,42	7,62
P 2	7,55	
P 3	6,88	

Tablica 6.8. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje uzoraka mješavine B2

Na slici 6.18. prikazani su grafovi tlačne čvrstoće uzoraka kocki i prizmi. Slika 6.19. prikazuje prosječnu tlačnu čvrstoću po svakom obliku uzorka mješavine B2.



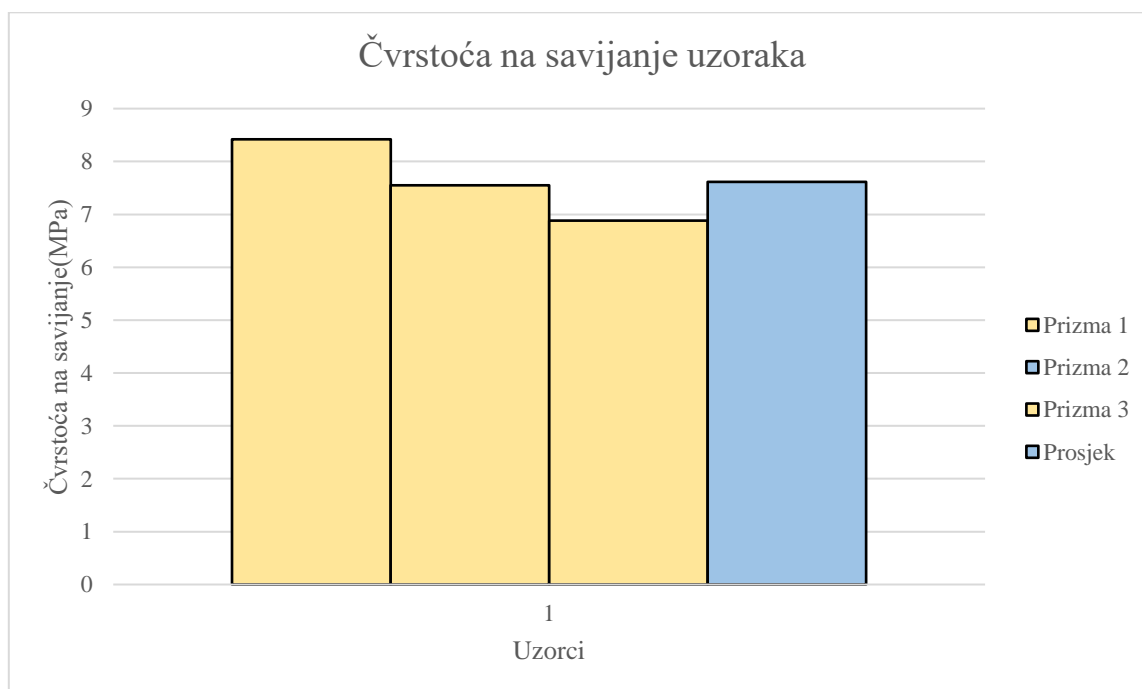
Slika 6.18. Tlačna čvrstoća uzoraka mješavine B2



Slika 6.19. Prosječna tlačna čvrstoća uzoraka mješavine B2

Kako je vidljivo na slici 6.19. razlika između izmjerenih vrijednosti iznosi 6,36% između prizme i kocke(15 cm), 0,92% između prizme i kocke(10 cm), te 5,48% između kocke(15 cm) i kocke(10 cm).

Na slici 6.20. prikazan je graf čvrstoće na savijanje uzoraka prizme te njihova prosječna vrijednost.



Slika 6.20. Čvrstoća na savijanje i prosječna čvrstoća na savijanje uzoraka prizmi mješavine B2

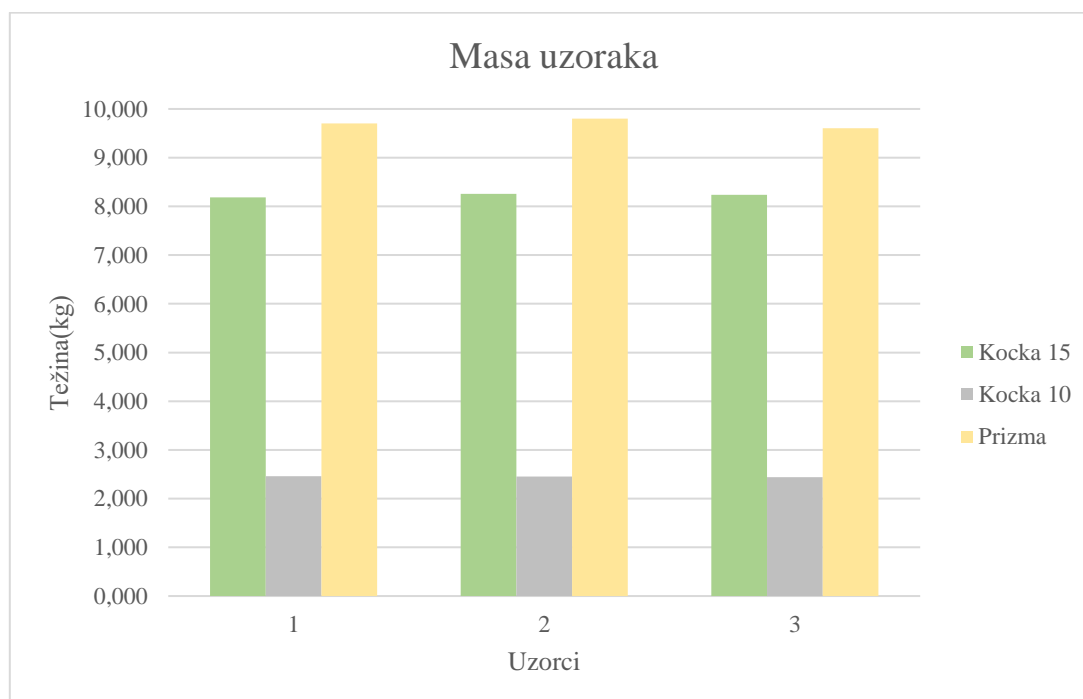
### 6.2.3. Rezultati ispitivanja betona u očvrslom stanju; mješavina B3

#### 6.2.3.1. Masa uzoraka

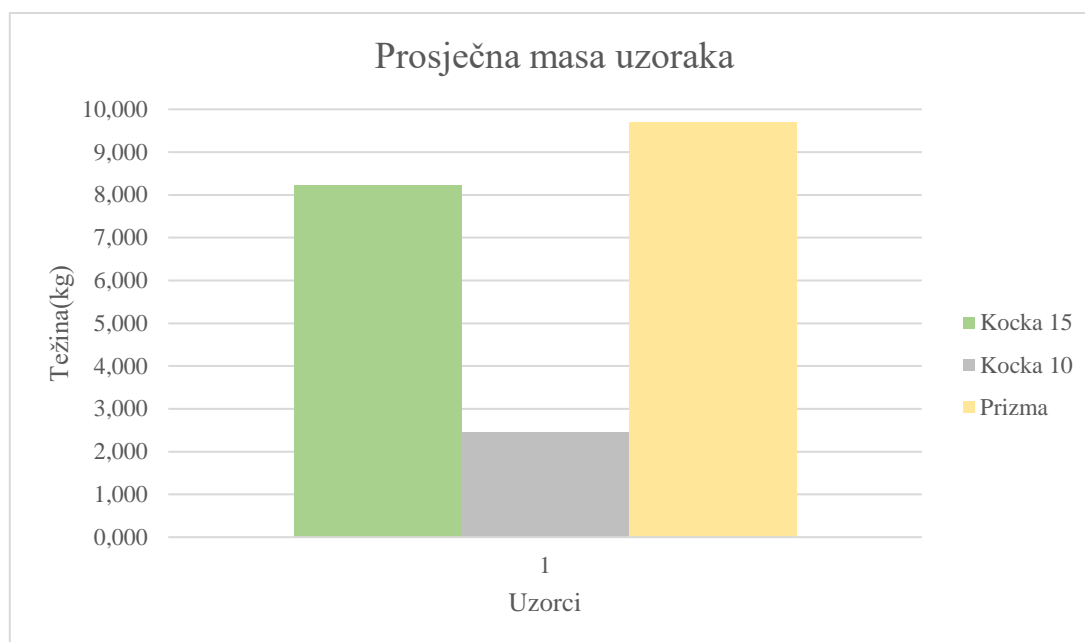
U tablici 6.9. prikazani su iznosi mase uzoraka kocki i prizmi mješavine B3. Također prikazan je odnos masa uzoraka te prosječna vrijednost mase uzoraka po svakom obliku uzorka (slika 6.21., slika 6.22.)

UZORAK(B3)	MASA UZORKA(g)	MASA UZORKA(kg)	PROSJEČNA MASA(kg)
K 15 - 1	8187,2	8,187	8,227
K 15 - 2	8255,1	8,255	
K 15 - 3	8239	8,239	
K 10 - 1	2457,4	2,457	2,451
K 10 - 2	2456,7	2,457	
K 10 - 3	2437,6	2,438	
P 1	9701,2	9,701	9,703
P 2	9800,4	9,800	
P 3	9607,3	9,607	

Tablica 6.9. Dimenzije i gustoće uzoraka mješavine B3



Slika 6.21. Graf odnosa mase uzoraka mješavine B3



Slika 6.22. Prosječna masa uzoraka po svakom obliku uzorka mješavine B3

### 6.2.3.2. Dimenzije i gustoće uzoraka

U tablici 6.10. prikazane su dimenzije uzoraka, te njihova gustoća određena prema normi HRN EN 12390-7.

UZORAK(B3)	DIMENZIJE UZORKA(mm)			VOLUMEN UZORKA(mm <sup>3</sup> )	VOLUMEN UZORKA(m <sup>3</sup> )	GUSTOĆA UZORKA(kg/m <sup>3</sup> )
	DUŽINA	ŠIRINA	VISINA			
K 15 - 1	150,5	150,6	150,7	3415660,71	0,00342	2396,96
K 15 - 2	150,2	151,5	151,2	3440601,36	0,00344	2399,32
K 15 - 3	150,7	151,6	151	3449764,12	0,00345	2388,28
K 10 - 1	100,1	102,7	100,1	1029055,03	0,00103	2388,02
K 10 - 2	99,9	102,4	100,4	1027067,90	0,00103	2391,95
K 10 - 3	100	101,6	99,9	1014984,00	0,00101	2401,61
P 1	100,3	100,1	401	4026052,03	0,00403	2409,61
P 2	100,7	99,2	400	3995776,00	0,00400	2452,69
P 3	100,3	98,7	400	3959844,00	0,00396	2426,18

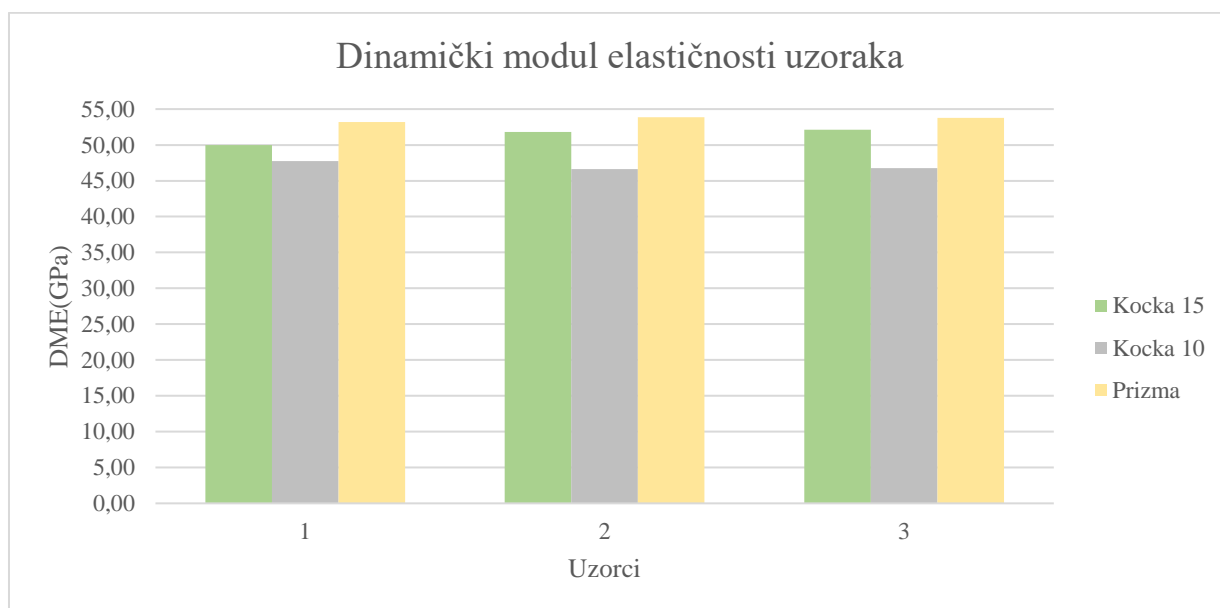
Tablica 6.10. Dimenzije i gustoće uzoraka mješavine B3

### 6.2.3.3. Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka

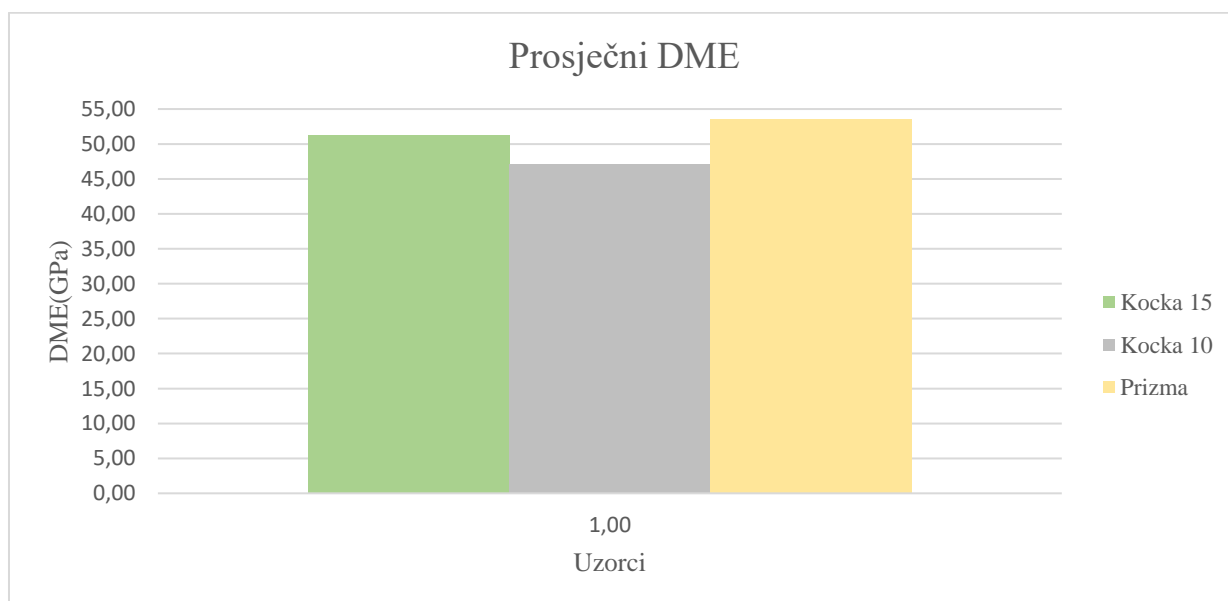
U tablici 6.11. prikazani su rezultati prolaska UZV kroz uzorke te njihov dinamički modul elastičnosti. Također je prikazan i prosječni dinamički modul elastičnosti po svakom obliku uzorka mješavine B3. Na slikama 6.23. i 6.24. prikazani su grafovi dinamičkog modula elastičnosti za svaku seriju uzorka kao i prosječni DME po svakom obliku uzorka.

UZORAK(B3)	VRIJEME PROLASKA VALA( $\mu$ s)			SREDNJA VRIJEDNOST( $\mu$ s)	KALIBRACIJA( $\mu$ s)	BRZINA PROLASKA VALA(m/s)	DME(GPa)	PROSJEČNI DME(Gpa)
K 15 - 1	31,2	32,8	31,9	32,0	31,3	4813,43	49,98	51,31
K 15 - 2	30,7	32,6	30,8	31,4	30,7	4897,83	51,80	
K 15 - 3	30,6	31,9	31,4	31,3	30,6	4924,84	52,13	
K 10 - 1	22,1	22,5	21,2	21,9	21,2	4714,29	47,77	47,05
K 10 - 2	22	22,1	22,4	22,2	21,5	4653,73	46,62	
K 10 - 3	22,2	22,3	22,1	22,2	21,5	4651,16	46,76	
P 1	81,6	81,5	81,9	81,7	81,0	4952,66	53,19	53,62
P 2	80,2	82,8	82	81,7	81,0	4940,30	53,88	
P 3	80,7	81,3	81,9	81,3	80,6	4962,78	53,78	

Tablica 6.11. Rezultati prolaska UZV i dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B3



Slika 6.24. Dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B3



Slika 6.25. Prosječni dinamički modul elastičnosti uzoraka mješavine B3



Kako je vidljivo na slici 6.25. razlika između izmjerenih vrijednosti iznosi 4,31% između prizme i kocke(15 cm), 12,25% između prizme i kocke(10 cm), te 8,30% između kocke(15 cm) i kocke(10 cm).

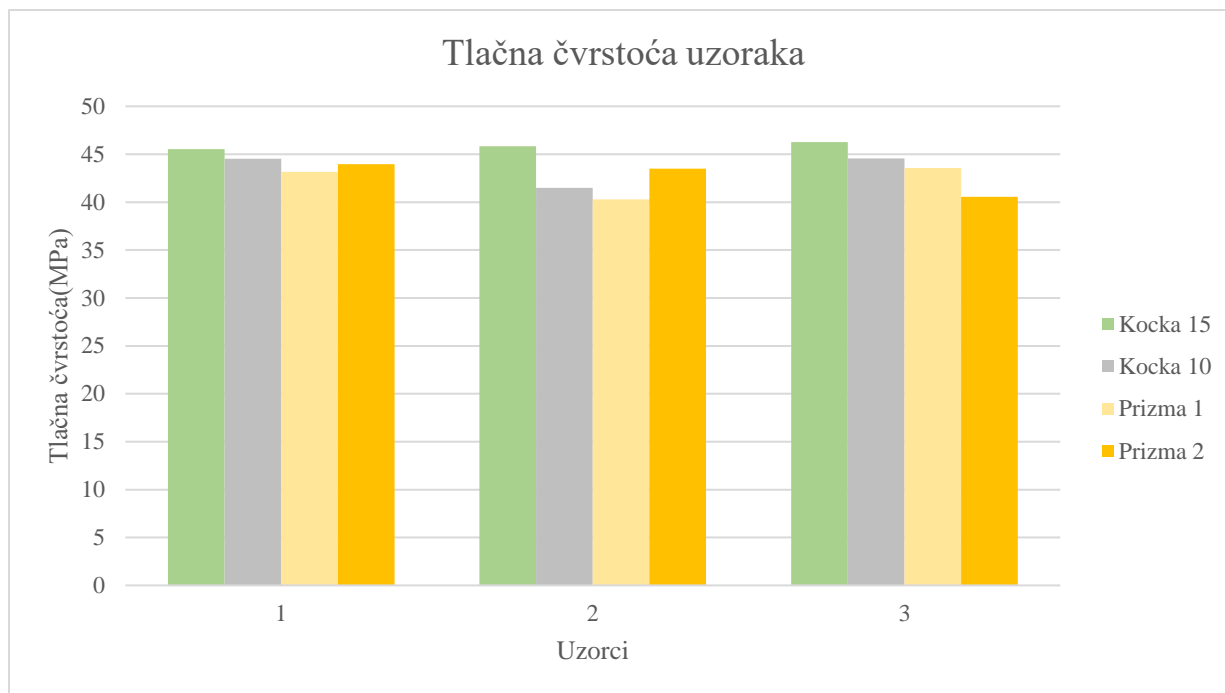
#### 6.2.3.4. Tlačna čvrstoća uzoraka i čvrstoća na savijanje uzoraka prizme

U tablici 6.12. prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka kocki, te uzoraka polovice prizme. Također, prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje za uzorke prizmi.

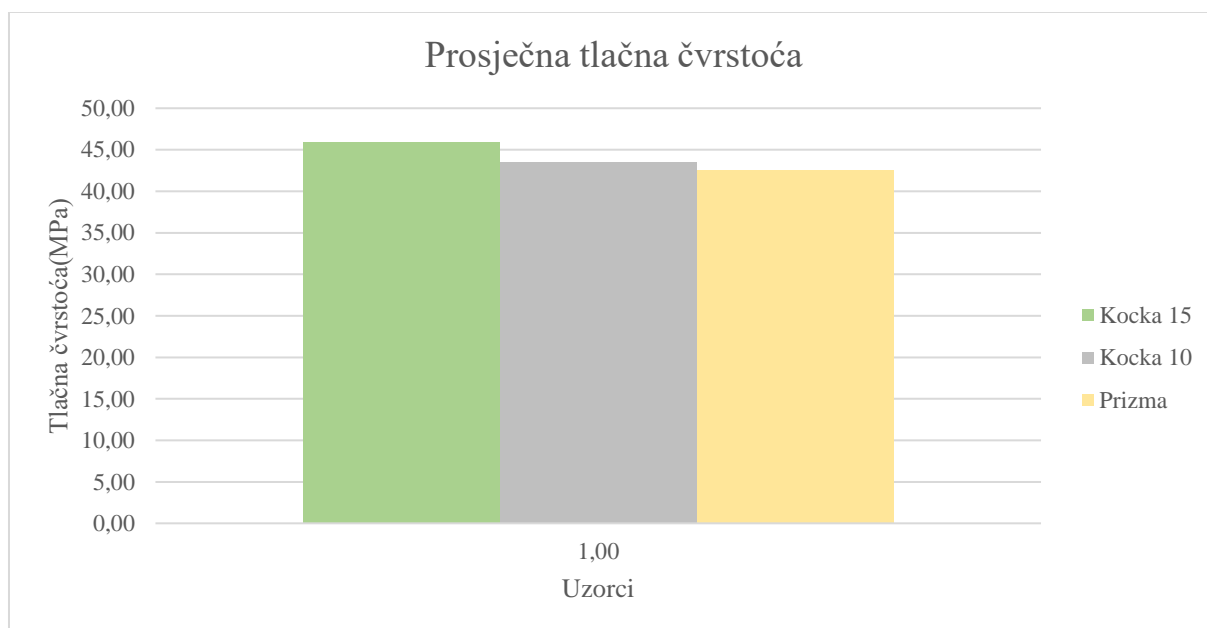
UZORAK(B3)	TLAČNA ČVRSTOĆA(MPa)	PROSJEČNA TLAČNA ČVRSTOĆA(MPa)
K 15 - 1	45,53	45,87
K 15 - 2	45,82	
K 15 - 3	46,27	
K 10 - 1	44,53	43,53
K 10 - 2	41,49	
K 10 - 3	44,57	
P 1 - 1	43,17	42,51
P 2 - 1	40,29	
P 3 - 1	43,57	
P 1 - 2	43,97	
P 2 - 2	43,51	
P 3 - 2	40,56	
UZORAK(B3)	ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(MPa)	PROSJEČNA ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(MPa)
P 1	7,11	7,45
P 2	7,84	
P 3	7,41	

Tablica 6.12. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje uzoraka mješavine B3

Na slici 6.26. prikazani su grafovi tlačne čvrstoće uzoraka kocki i prizmi. Slika 6.27. prikazuje prosječnu tlačnu čvrstoću po svakom obliku uzorka mješavine B3.



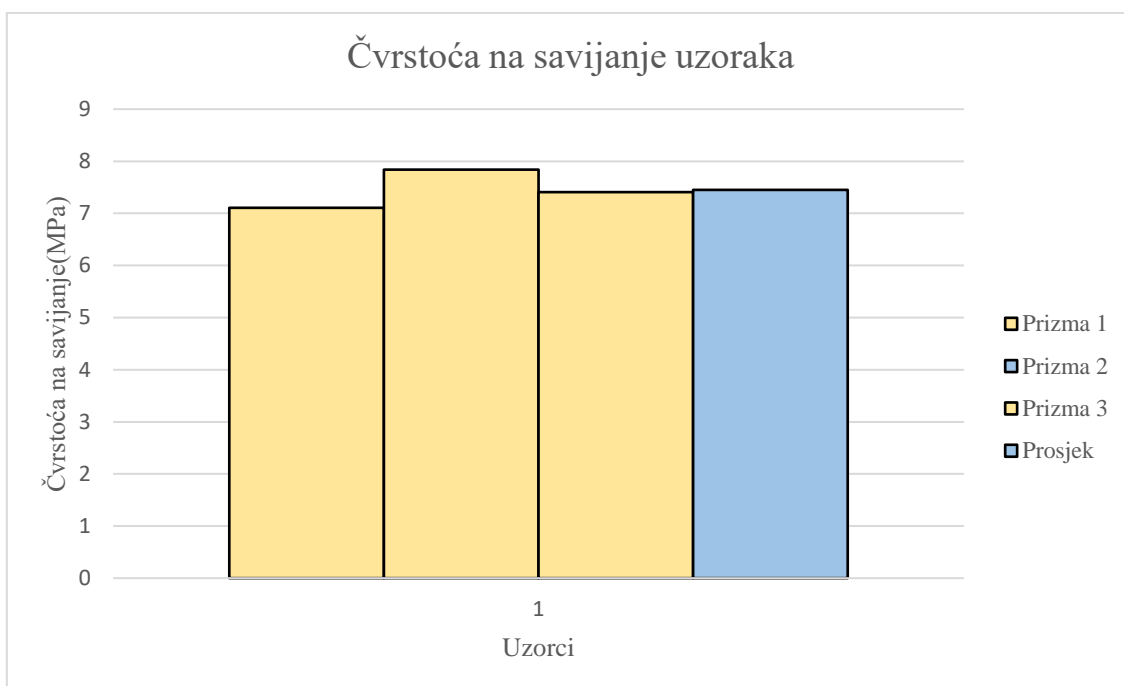
Slika 6.26. Tlačna čvrstoća uzoraka mješavine B3



Slika 6.27. Prosječna tlačna čvrstoća uzoraka mješavine B3

Kako je vidljivo na slici 6.25. razlika između izmjerenih vrijednosti iznosi 7,33% između prizme i kocke(15 cm), 2,34% između prizme i kocke(10 cm), te 5,10% između kocke(15 cm) i kocke(10 cm).

Na slici 6.28. prikazan je graf čvrstoće na savijanje uzoraka prizme te njihova prosječna vrijednost.



Slika 6.28. Čvrstoća na savijanje i prosječna čvrstoća na savijanje uzoraka prizmi mješavine B3

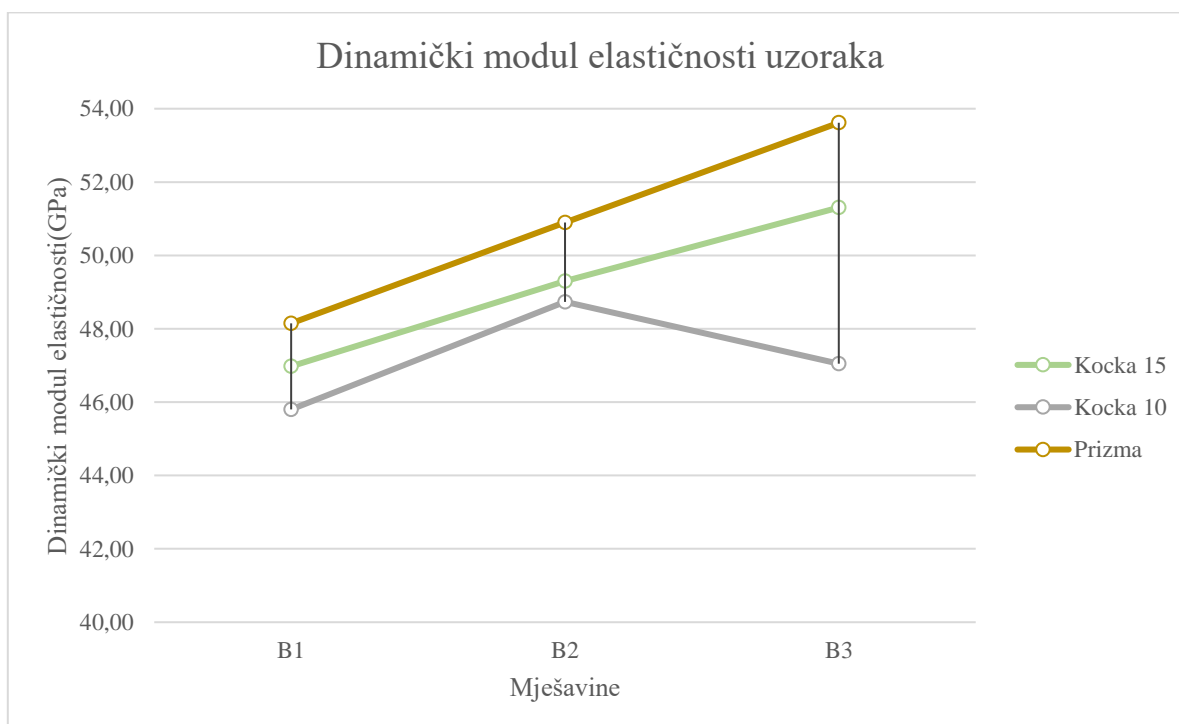
## 6.2.4. Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja u odnosu na mješavine

### 6.2.4.1. Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti

U tablici 6.13. prikazane su srednje vrijednosti rezultata ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti za mješavine B1, B2 i B3. Odnos vrijednosti rezultata ispitivanja također je prikazan u grafu na slici 6.29.

DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI(Gpa)			
MJEŠAVINA/UZORAK	KOCKA 15	KOCKA 10	PRIZMA
B1	46,98	45,80	48,15
B2	49,30	48,74	50,89
B3	51,31	47,05	53,62

Tablica 6.11. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja DME uzoraka



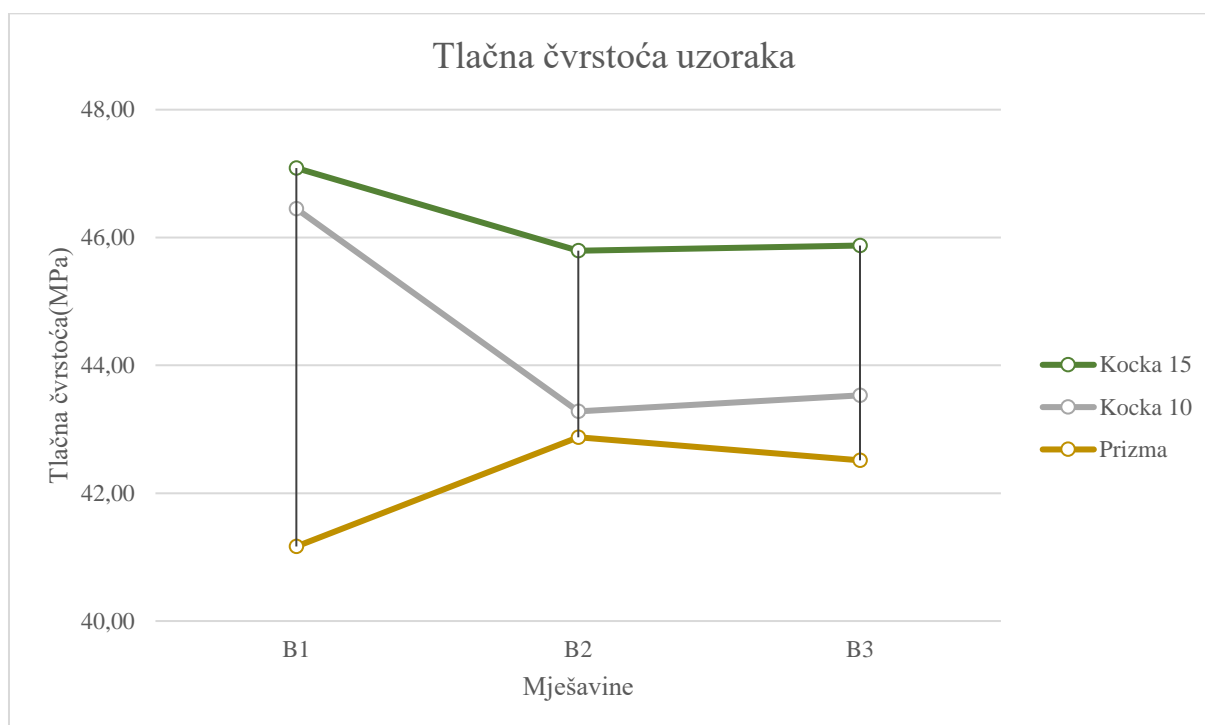
Slika 6.29. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja DME

### 6.2.4.2. Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće

U tablici 6.14. prikazane su srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće za mješavine B1, B2 i B3. Odnos vrijednosti rezultata ispitivanja također je prikazan u grafu na slici 6.30.

TLAČNA ČVRSTOĆA(Mpa)			
MJEŠAVINA/UZORAK	KOCKA 15	KOCKA 10	PRIZMA
B1	47,09	46,45	41,17
B2	45,79	43,28	42,88
B3	45,87	43,53	42,51

Tablica 6.14. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka



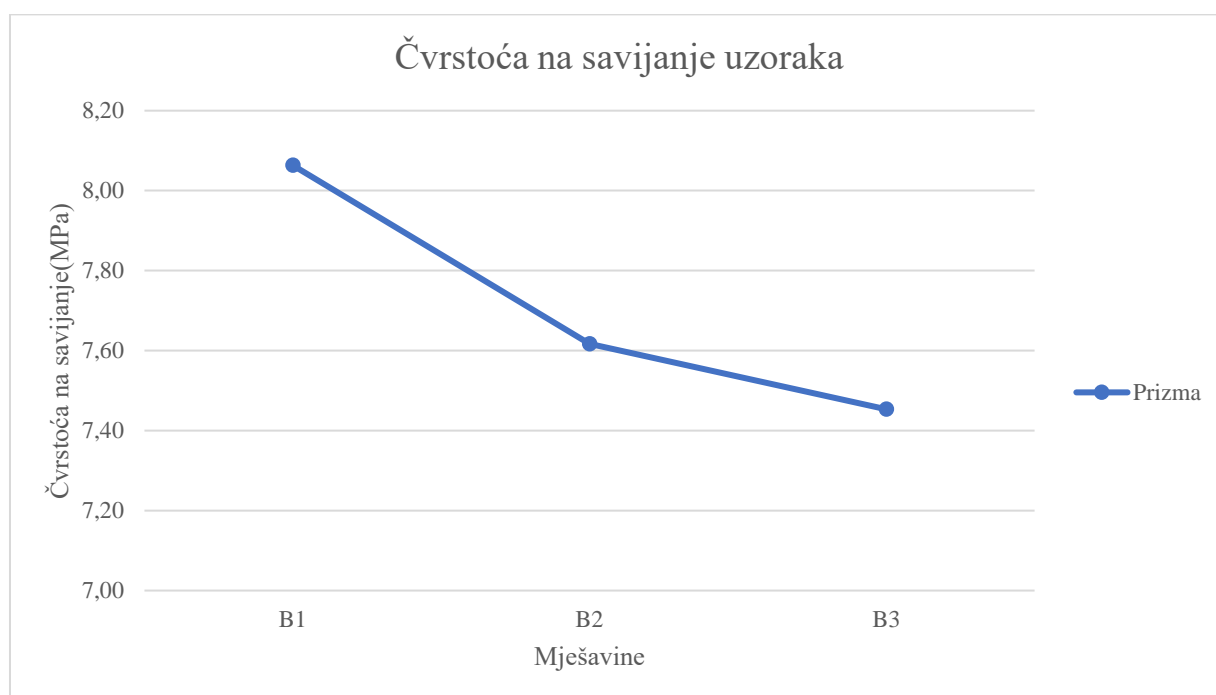
Slika 6.30. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka

### 6.2.4.3. Odnos prosječnih vrijednosti rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje

U tablici 6.15. prikazane su srednje vrijednosti rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje za mješavine B1, B2 i B3. Odnos vrijednosti rezultata ispitivanja također je prikazan u grafu na slici 6.31.

ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE(Mpa)	
MJEŠAVINA/UZORAK	PRIZMA
B1	8,06
B2	7,62
B3	7,45

Tablica 6.15. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka



Slika 6.31. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka

### 6.3. Rasprava o rezultatima

U poglavljima 6.2.1., 6.2.2. i 6.2.3. prikazani su rezultati ispitivanja betona ovisno o svakoj izrađenoj mješavini, dok se u poglavlju 6.2.4. jasno prikazuju odnosi prosječnih vrijednosti svake mješavine ovisno o obliku uzorka i vrsti ispitivanja.

#### 6.3.1. Rezultati dinamičkog modula elastičnosti

Rezultati dinamičkog modula elastičnosti pokazuju da je najveći DME u prosjeku imaju uzorci prizme mješavine sa najvećim zrnom agregata 31,5 mm(B3). Razlika između rezultata DME uzoraka prizmi mješavine maksimalnog zrna agregata 31,5 mm(B3) i mješavine maksimalnog zrna agregata 8 mm(B1) iznosi 10,2%, razlika između rezultata mješavine B3 i mješavine maksimalnog zrna agregata 16 mm(B2) iznosi 5,1%, dok je razlika između mješavina B2 i B1 iznosa 5,4%.

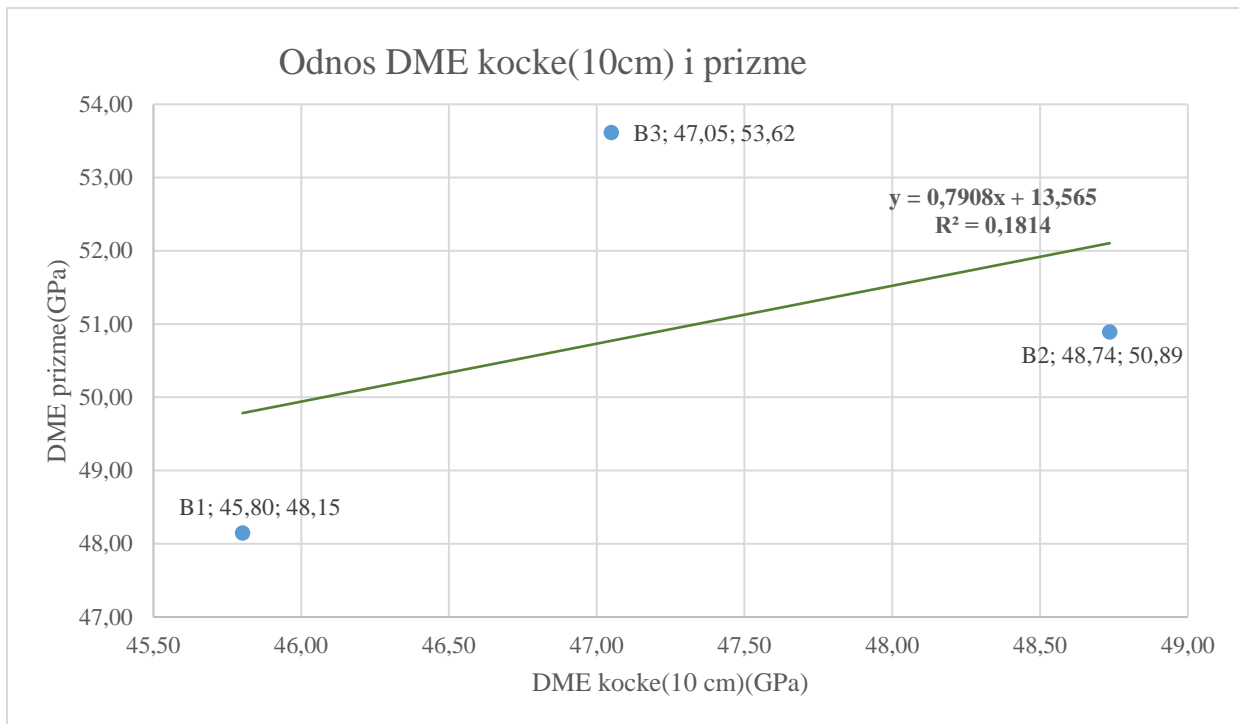
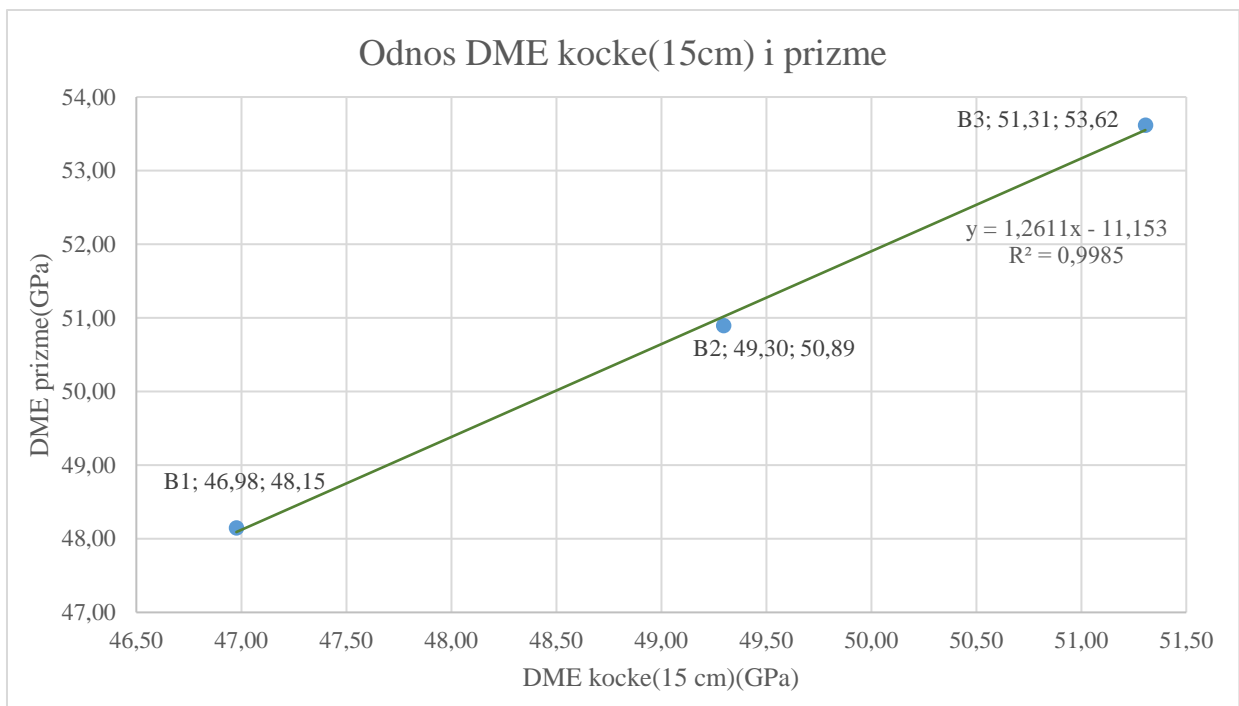
Što se tiče rezultata za uzorke kocke duljine brida 10 cm, najveći prosječni iznos DME ima mješavina B2. Razlika rezultata između uzoraka kocki(a = 10 cm) mješavine B2 i B1 iznosi 6,03%, razlika rezultata između mješavina B2 i B3 iznosi 3,47%, dok je razlika rezultata mješavina B3 i B1 iznosa 2,66%.

Kod uzoraka kocke dimenzije brida 15 cm najveću vrijednost prosječnog DME ima mješavina B3. Razlika rezultata između mješavina B2 i B1 iznosi 4,71%, razlika rezultata između mješavina B3 i B1 iznosi 8,44%, dok je razlika rezultata mješavina B3 i B2 iznosa 3,92%.

Ako se gleda prosječna vrijednost DME uzoraka za sve mješavine, najveću vrijednost imaju uzorci prizme(50,89 GPa), dok uzorci kocke duljine brida 10cm imaju najmanju vrijednost(47,20 GPa). Uzorci kocke duljine brida 15 cm imaju vrijednost 49,19 GPa. Razlika rezultata DME između uzoraka prizmi i kocki(a = 10 cm) iznosi 7,25%, razlike između uzoraka prizmi i kocke(a = 15 cm) iznosi 3,34% dok je razlika uzoraka kocki(a = 15 cm) i kocki(a = 10 cm) iznosa 4,05%.

Odnos rezultata DME među uzorcima kocke duljine brida 10 cm i uzorcima prizme prikazan je grafički na slici 6.32. Za odnose rezultata uspostavljena je i korelacijska veza sa iznosom koeficijenta korelacije  $R = 0,43$ .

Odnos rezultata DME među uzorcima kocke duljine brida 15 cm i uzorcima prizme prikazan je grafički na slici 6.33. Za odnose rezultata uspostavljena je i korelacijska veza sa iznosom koeficijenta korelacije  $R = 0,999$ .

Slika 6.32. Regresijski pravac DME uzoraka kocke(10 cm) i uzoraka prizme ( $R = 0,43$ )Slika 6.33. Regresijski pravac DME uzoraka kocke(15 cm) i uzoraka prizme ( $R = 0,999$ )



### 6.3.2. Rezultati tlačne čvrstoće

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazuju da najveću tlačnu čvrstoću imaju uzorci kocke ( $a = 15$  cm) sa najvećim zrnom agregata 8 mm (B1). Razlika između rezultata tlačne čvrstoće kocki ( $a = 15$  cm) mješavine B1 i B2 iznosi 2,76%, razlika između mješavine B1 i B3 iznosi 2,59%, dok je razlika između uzoraka mješavina B2 i B3 iznosa 0,17%.

Kod uzoraka kocke ( $a = 10$  cm), najveći iznos tlačne čvrstoće ima mješavina B1. Razlika rezultata uzoraka kocke ( $a = 10$  cm) između mješavina B1 i B2 iznosi 6,82%, razlika rezultata između mješavina B1 i B3 iznosi 6,29%, dok je razlika rezultata između mješavina B2 i B3 iznosa 0,57%.

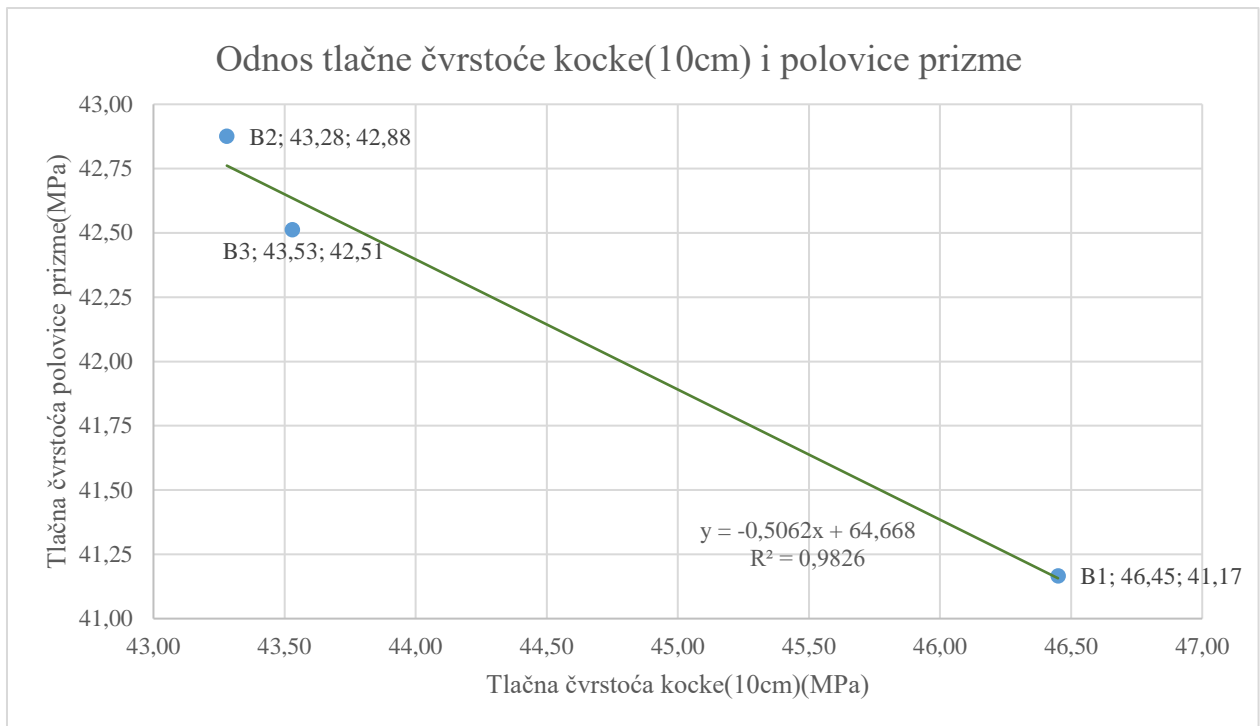
Najveću vrijednost tlačne čvrstoće uzoraka prizmi ima mješavina B2. razlika rezultata uzoraka prizmi između mješavina B2 i B1 iznosi 3,99%, razlika između rezultata mješavina B2 i B3 iznosi 0,86%, dok je razlika rezultata između mješavina B1 i B3 iznosa 3,15%.

Ako se gleda prosječna vrijednost tlačne čvrstoće uzoraka za sve mješavine, najveću vrijednost imaju uzorci kocke duljine brida 15 cm (46,25 MPa), dok uzorci polovica prizmi imaju najmanju vrijednost (42,18 MPa). Uzorci kocke duljine brida 10 cm imaju vrijednost 44,42 MPa. Razlika rezultata tlačne čvrstoće između uzoraka prizmi i kocki ( $a = 10$  cm) iznosi 5,04%, razlike između uzoraka prizmi i kocke ( $a = 15$  cm) iznosi 8,8% dok je razlika uzoraka kocki ( $a = 15$  cm) i kocki ( $a = 10$  cm) iznosa 3,96%.

Posebna pažnja se poklanja razlici između čvrstoća uzoraka kocki ( $a = 10$  cm) i polovica prizmi za svaku mješavinu. Pod stavkama 6.2.1.4., 6.2.2.4. i 6.2.3.4. prikazani su grafovi i tablice s odnosima vrijednosti svih uzoraka za svaku mješavinu, a posebno se gleda odnos uzoraka kocki ( $a = 10$  cm) i polovica prizmi. Za mješavinu B1 razlika rezultata kocke ( $a = 10$  cm) i polovice prizme iznosi 12,57% u korist kocke (10 cm). Za mješavinu B2 razlika rezultata iznosi 0,92% u korist kocke10, dok je razlika rezultata za mješavinu B3 iznosa 2,34%.

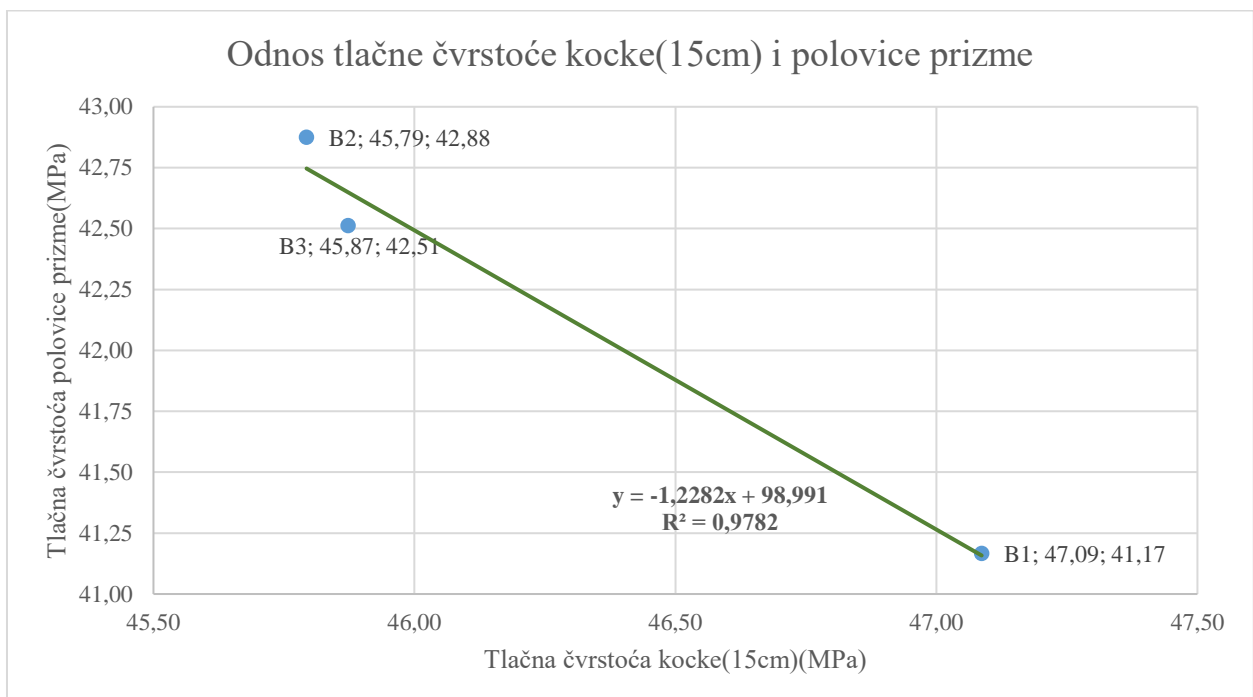
Odnos rezultata tlačne čvrstoće među uzorcima kocke duljine brida 10 cm i uzorcima polovice prizme prikazan je grafički na slici 6.34. Za odnose rezultata uspostavljena je i korelacijska veza sa iznosom koeficijenta korelacije  $R = 0,99$ .

Odnos rezultata tlačne čvrstoće među uzorcima kocke duljine brida 15 cm i uzorcima polovice prizme prikazan je grafički na slici 6.35. Za odnose rezultata uspostavljena je i korelacijska veza sa iznosom koeficijenta korelacije  $R = 0,99$ .



Slika 6.34. Regresijski pravac tlačnih čvrstoća uzoraka kocke(10 cm) i uzoraka polovice prizme

(R = 0,99)



Slika 6.34. Regresijski pravac tlačnih čvrstoća uzoraka kocke(10 cm) i uzoraka polovice prizme

(R = 0,99)

### 6.3.3. Rezultati čvrstoće na savijanje

Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka prizmi pokazuju da najveću vrijednost imaju uzorci prizmi mješavine B1. Razlika između rezultata čvrstoće na savijanje uzoraka prizmi mješavina B1 i B2 iznosi 5,46%, razlika između rezultata za mješavine B1 i B3 iznosi 7,57%, dok je razlika između uzoraka mješavina B2 i B3 iznosa 2,23% u korist mješavine B2.



Slika 6.34. Presjek uzorka polovice prizme

## 7. ZAKLJUČAK

Tlačna čvrstoća betona glavni je pokazatelj karakteristika očvrslog betona. Prema propisanoj normi, beton se ispituje na uzorcima kocke brida 15 cm ili valjka promjera 15 cm i visine 30 cm. Takvi uzorci su standard za ispitivanje tlačne čvrstoće betona, te se po njima radi klasifikacija betona(C) tj. karakteristična tlačna čvrstoća. S obzirom da se beton mora testirati i kada je ugrađen u konstrukciji, dolazi do mogućnosti odstupanja dimenzija uzoraka od svojih standardnih dimenzija. Za potrebe ispitivanja čvrstoće na savijanje betonskih uzoraka, koriste se prizme duljine brida baze od 10 cm, te visine 40 cm. Takve dimenzije prizmi idealno su veće za 2,5 puta od karakterističnih dimenzija cementnih prizmi korištenih u svrhu ispitivanja tlačne čvrstoće nakon prethodnog ispitivanja čvrstoće na savijanje.

Ispitivanje čvrstoće cementa vrši se prema normi HRN EN 196-1:2016. Uzorci prizmica izrađeni su od cementnog morta(cement, voda i standardni kvarcni pijesak). Prvo se ispituje čvrstoća na savijanje nad prizmicama dimenzija 4×4×16cm, te se zatim ispituje tlačna čvrstoća polovice prizmica u preši. Ispitivanje se vrši tako da se osigura djelovanje sile na površinu 4×4 cm po polovici prizmice. Cement se po čvrstoći polovica prizmica svrstava u razrede: 32,5 N ili R, 42,5 N ili R, te 52,5 N ili R gdje je N obična rana čvrstoća, a R visoka rana čvrstoća.

Svrha ovog rada je utvrditi može li se nad prizmama betona dimenzija 10×10×40 cm ispitati tlačna čvrstoća nakon prethodnog ispitivanja čvrstoće na savijanje kao što je slučaj kod ispitivanja čvrstoće cementa. Betonski uzorci prizme su za 2,5 put većih dimenzija nego prizmice cementnih uzoraka, što se može okarakterizirati kao veći udio materijala u mješavini betona, tj. beton kao očvrslu materijal ima veću gustoću nego cementni mort. Uzorcima polovica prizmi je nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje ispitana tlačna čvrstoća uz pomoć metalnih pločica 10×10 cm, koje su se postavile s gornje i donje strane ploče preše.

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti na mješavinama B1, B2 i B3 na uzorcima oblika prizme i kocke dimenzija 10 i 15 cm pokazali su odstupanje od 2,3 GPa, osim uzorka kocke (10 cm) mješavine B3. Mješavina B3 ima maksimalno zrno agregata 31.5 mm, dok je radijus kalupa za kocku od 10 cm,  $R = 16.67$  mm, pa je moguće da efekt stjenke utječe na ujednačenost betona u kalupu ovih dimenzija. Utjecaj efekta stjenke je mogući uzrok što je uspostavljeni odnos dinamičkog modula elastičnosti uzoraka kocke (10 cm) i uzoraka prizmi dan s koeficijentom korelacije  $R = 0,43$  za razliku od veze dinamičkog modula elastičnosti između uzoraka kocke(15 cm) i uzoraka prizmi uz koeficijent korelacije  $R = 0,999$ . Međutim, zbog malog broja uzoraka ne može se donijeti siguran zaključak.

Također su uspostavljeni odnosi tlačne čvrstoće između uzoraka kocke (10 cm) i polovica prizmi s koeficijentom korelacije  $R = 0,99$  kao i tlačne čvrstoće između uzoraka kocke(15 cm) i polovica prizmi s koeficijentom korelacije  $R = 0,99$ .

Dobiveni koeficijenti korelacije ukazuju na eventualnu mogućnost upotrebe polovice prizmi za procjenu tlačne čvrstoće betona ali ne i za dokazivanje razreda tlačne čvrstoće betona. Za ozbiljniju vezu između spomenutih čvrstoća, trebalo bi napraviti opsežnija ispitivanja i utvrditi koeficijent korekcije.

## 8. LITERATURA

- [1] Krstulović, P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut Građevinarstva Hrvatske, Split, 2000
- [2] Juradin, S.: Razred tlačne čvrstoće betona.pdf
- [3] Matulić, P.: *Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona*, 2009., rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split
- [4] Harapin A., Radnić J.: *Osnove betonskih konstrukcija, Interna skripta*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, studeni 2015.
- [5] Ukrainczyk, V.: *Beton, struktura, svojstva, tehnologija*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1994
- [6] [https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/2\\_predavanje\\_1382949693168.pdf](https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/2_predavanje_1382949693168.pdf)
- [7] <https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A60/datastream/PDF/view>
- [8] Gukov, I.: *Betonske konstrukcije I; predavanja*, Zagreb, 2017
- [9] Matulić P., Juradin S., Marušić E., Domazet A.: *Utjecaj veličine ispitnog uzorka na mehanička svojstva mlaznog betona*, Građevinar 4/2016.
- [10] Sabnis, G.M., Mirza, S.M.: *Size Effect in Model Concretes*, Journal of the Structural Division, 105 (1979)
- [11] Zabihi N., Eren O.: *Compressive Strength Conversion Factors of Concrete as Affected by Specimen Shape and Size*, Svibanj 2014
- [12] Kumari R.: *Review Paper Based On the Relation between the Strength of Concrete Cubes and Cylinders*, Kolovoz 2015
- [13] del Viso J.R., Carmona J.R., Ruiz G.: *Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete*, Rujan 2007
- [14] Izjava o svojstvima agregata
- [15] Izjava o svojstvima cementa
- [16] [https://www.dunavdravacement.hr/hr/CEM\\_II\\_Kakanj](https://www.dunavdravacement.hr/hr/CEM_II_Kakanj)
- [17] [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Primjer\\_-\\_uputa\\_zs\\_ispitivanje.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Primjer_-_uputa_zs_ispitivanje.pdf)