

Društvo građevinskih konstruktora Srbije

SIMPOZIJUM 2020

13-15. maj 2021- ARANĐELOVAC

ZBORNIK RADOVA SA NACIONALNOG SIMPOZIJUMA DGKS



U SARADNJI SA



Република Србија
Министарство
просвете, науке и
технолошког развоја

POKROVITELJ



PLATINASTI SPONZORI

Metalinkara

ŠIRBEGOVIĆ®
INŽENJERING

DELTA
REAL ESTATE

baldini
studio

INTERNATIONAL

STRABAG
TEAMS WORK.

PUT INŽENJERING

ZLATNI SPONZORI



PERI®



ProClub

DNEC

CIP - Каталогизacija y publikaciji
Народна библиотека Србије, Београд

624(082)(0.034.2)
69(082)(0.034.2)

ДРУШТВО грађевинских конструктора Србије. Симпозијум 2020 (2021 ; Аранђеловац)
Zbornik radova sa Nacionalnog simpozijuma DGKS [Elektronski izvor] / Društvo
građevinskih konstruktera Srbije, Simpozijum 2020, 13-15. maj 2021, Arandelovac ; [urednici
Zlatko Marković, Ivan Ignjatović, Boško Stevanović]. - Beograd : Univerzitet, Građevinski
fakultet : Društvo građevinskih konstruktera Srbije, 2021 (Arandelovac : Grafopak). - 1 USB
fleš memorija ; 5 x 2 x 1 cm

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i
engl. jeziku. - Tiraž 200. - Bibliografija uz svaki rad. - Summaries.

ISBN 978-86-7518-211-5 (GF)

a) Грађевинарство -- Зборници
COBISS.SR-ID 37696777

Izdavač: Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Suizdvač: Društvo građevinskih konstruktera Srbije
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Urednici: prof. dr Zlatko Marković
v.prof. dr Ivan Ignjatović
prof. dr Boško Stevanović

Tehnički urednik: v.prof. dr Jelena Dobrić

Tehnička priprema: doc. dr Nina Gluhović
doc. dr Marija Todorović
Isidora Jakovljević

Gafički dizajn: Tijana Stevanović

Dizajn korica: Tijana Stevanović

Štampa: Grafopak, Arandelovac

Tiraž: 200 primeraka

Beograd, maj 2021.

Ksenija Tešić¹, Snežana Marinković², Aleksandar Savić³

UTICAJ ZAMENE CEMENTA KREČNJAČKIM FILEROM NA SVOJSTVA BETONA

Rezime:

U radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja jedne vrste zelenih betona kod kojih je Portland cement zamenjen sa dve vrste krečnjačkog filera istog porekla i mineraloškog sastava, a različite finoće mliva. Projektovano je deset mešavina kod kojih je 0%, 15%, 30% i 45% (maseno) cementa zamenjeno filerom. Vodocementni faktor bio je konstantan ($w/c=0.54$), dok je vodopraškasti opadao sa povećanjem procenta zamene. Izbor granulometrijskog sastava čestica izvršen je pomoću Fankovog i Dingerovog, kao i pomoću Fulerovog modela. Rezultati su pokazali da je moguće povećanje čvrstoće betona pri pritisku uz smanjenje 45% cementa, ali da buduća istraživanja treba usmeriti ka poboljšanju obradljivosti.

Ključne reči: beton, cement, krečnjački filer, emisije CO₂

INFLUENCE OF CEMENT REPLACEMENT WITH LIMESTONE FILLER ON THE PROPERTIES OF CONCRETE

Summary:

This paper presents an experimental research of one type of green concrete in which Portland cement was replaced with two types of limestone filler of the same origin and mineralogical composition, but with a different fineness of particles. Ten concrete mixtures were designed in which 0%, 15%, 30% and 45% (by mass) of cement were replaced with filler. The water to cement ratio for each mixture was constant ($w/c=0.54$), and the water to powder ratio was decreasing with increasing cement replacement. Particle size distribution was selected using Funk and Dinger, as well as using Fuller's model. The results showed that it is possible to increase the compressive strength of concrete by reducing 45% of cement, but further research should be focused on improving the workability.

Key words: concrete, cement, limestone filler, CO₂ emission

¹Mast.inž.,građ., asistent, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, ktesic@grad.hr

²Dr, redovni profesor, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, sneska@grf.bg.ac.rs

³Dr, docent, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, savic.alexandar@gmail.com.

1. UVOD

Beton je najzastupljeniji konstruktivni materijal u građevinskoj industriji, sa neprekidnim rastom upotrebe u poslednjih 50 godina, za šta je zaslužna njegova relativno jednostavna proizvodnja i srazmerno niska cena. Tokom proizvodnje cementa, jedne od sastavnih komponenti betona, oslobađa se velika količina ugljen-dioksida (CO₂), gasa koji je najodgovorniji za negativan efekat staklene bašte. Procenjuje se da čak približno 7% ukupne emisije ugljen-dioksida u atmosferu potiče od proizvodnje cementa [1]. Smanjenje njegove količine tokom spravljanja betona ima pozitivne efekte na životnu sredinu. Ova činjenica dovodi do povećanog interesa za razvijanje strategija koje se bave delimičnom zamenu cementa. Cement može biti zamenjen nusproduktima drugih industrija, kao što su leteći pepeo i zgura [2], ili prirodnim sirovinama, kao što su razne vrste filera [3]. Fileri su sitne, inertne čestice, kod kojih svojstvo inertnosti onemogućava jednostavnu zamenu vezivne komponente betona filerom. Zbog toga, kod betona kod kojih je cement zamenjen filerom, neophodno je pravilnim izborom količine materijala i načinom projektovanja mešavina dobiti beton zadovoljavajućih fizičko-mehaničkih svojstava. Kod ovih betona moguće je dodavanjem filera povećati gustinu pakovanja čvrstih čestica (agregat, cement i filer), usled čega će doći do smanjenja šupljina između njih, a time i do smanjenja potrebne vode za popunjavanje preostalog dela šupljina [4,5]. S obzirom na to da je vodocementni faktor pokazatelj kvaliteta betona, na prethodno opisan način moguće je vodocementni faktor održavati konstantnim, i time obezbediti željeni kvalitet betona.

U ovom radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja betona kod kojih je cement zamenjen krečnjačkim filerom (maseno) za 0%, 15%, 30% i 45%. Takođe, razmatran je i uticaj izbora granulometrijskog sastava agregata pomoću različitih metoda na svojstva betona. U svim mešavinama vodocementni faktor je bio konstantan, a vodopraškasti faktor je opadao sa povećanjem procenta zamene cementa.

2. IZBOR GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA AGREGATA

Izbor granulometrijskog sastava agregata za beton predstavlja jedan od ključnih zadataka tehnologije betona. Uočeno je da se zadovoljavajuća svojstva svežeg i očvrslog betona mogu postići ukoliko se granulometrijski sastav agregata bira tako da odgovara određenim referentnim krivama [6]. One su uglavnom predstavljene kao kontinualne krive, a jedna od najzastupljenijih je Fulerova, data funkcijom:

$$Y(d) = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

gde je:

- $Y(d)$ procenat prolaza materijala kroz sito prečnika d ,
- d prečnik otvora sita,
- d_{max} prečnik nominalno najkрупnijeg zrna agregata.

Fankov i Dingerov zakon raspodele predstavljen je modifikovanom Fulerovom krivom. Modifikacija se odnosi na uvođenje uticaja nominalno najsitnijeg zrna na raspodelu veličine čestica. Funkcija raspodele je:

$$Y(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad (2)$$

gde je:

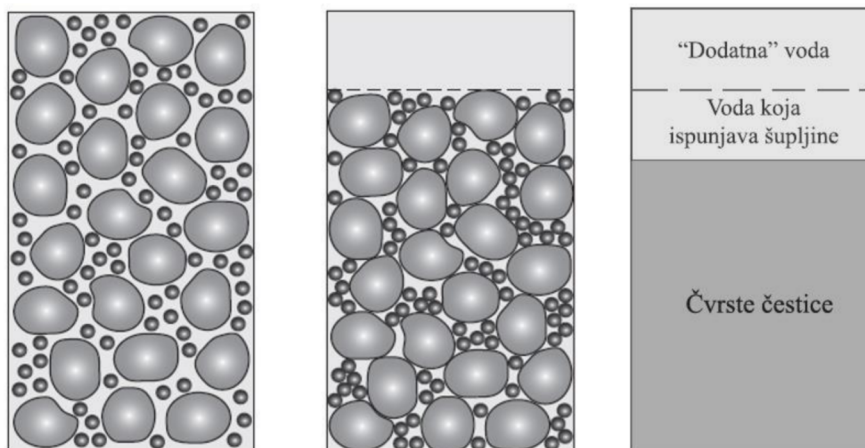
d_{\min} prečnik nominalno najsitnijeg zrna čestice,

q eksponent distribucije.

Vrednost eksponenta q zavisi od željenih performansi betonske mešavine; $q < 0.23$ se preporučuje za betone sa tečnijom konzistencijom (samozbijajući betoni), a vrednost $q > 0.32$ za valjane betone [7]. Vrednost eksponenta $q = 0.37 \div 0.4$ je preporučena vrednost za mešavine koje vode do optimalne vrednosti gustine pakovanja [8,9], gde gustina pakovanja predstavlja zapreminu čvrstih čestica u jedinici zapremine. Fankova i Dingerova kriva uz pomoć eksponenta distribucije q daje mogućnost uvođenja sitnih čestica (cement i filer) u proces optimizacije pakovanja čestica.

3. ZELENI BETONI SA NISKIM SADRŽAJEM CEMENTA I DODATKOM FILERA

Posmatrajući mešavinu sastavljenu od čvrstih čestica (agregat, cement i filer) i vode, Slika 1, uočava se da je u mešavini prvo neophodno popuniti sve šupljine između čestica, a zatim i obezbediti "dodatnu" vodu. "Dodatna" voda obavija čestice slojem vode i na taj način obezbeđuje obradljivost [5].



Slika 1 – Prikaz mešavine i njenih komponenti [4]

Kao što je već rečeno, fileri nemaju vezivna svojstva, i jednostavna zamena cementa filerom bi dovela do proporcionalnog pada čvrstoće betona. Moguć način da se taj pad nadomesti jeste

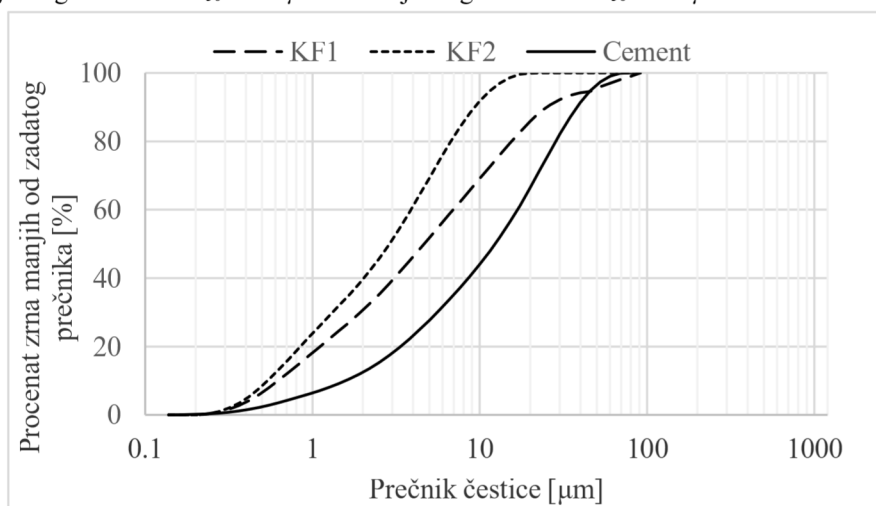
povećanjem gustine pakovanja dodavanjem filera koji je sitniji od čestica cementa uz istovremeno smanjenje vode. Ukoliko se gustina pakovanja poveća, sadržaj šupljina između čvrstih čestica je manji, pa je i voda neophodna za popunjavanje šupljina između čestica manja. Uz smanjenu količinu cementa, i smanjenu količinu vode, moguće je vodocementni faktor održavati konstantnim. Međutim, kod ovih betona, usled prisustva veoma finih čestica, filera, ukupna specifična površina zrna se povećava, i u tom slučaju neophodno je više „dodatne“ vode za obezbeđivanje obradljivosti mešavine [4]. Zato, umesto povećanja količine vode za obezbeđivanje željene obradljivosti, vrši se dodavanje superplastifikatora, hemijskih dodataka koji vrše podmazivanje zrna obavijajući ih tankom opnom [6].

4. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Za potrebe ispitivanja uticaja zamene cementa krečnjačkim filerom na svojstva betona, kao i uticaja izbora krive za odabir granulometrijskog sastava agregata, napravljene su betonske mešavine, nakon čega su sprovedena ispitivanja svežeg i očvrslog betona.

4.1. MATERIJALI

Korišćen je čist Portland cement *CEMI 42.5 R* i dve vrste krečnjačkog filera koje se razlikuju u finoći mliva, krupniji u oznaci *KF1*, i sitniji u oznaci *KF2*. Raspodela veličine čestica data je na Slici 2. Cement je krupniji od čestica filera; srednja veličina čestica cementa je $d_{50}=12.35 \mu\text{m}$, krečnjačkog filera *KF1* $d_{50}=4.66 \mu\text{m}$ i krečnjačkog filera *KF2* $d_{50}=2.89 \mu\text{m}$.

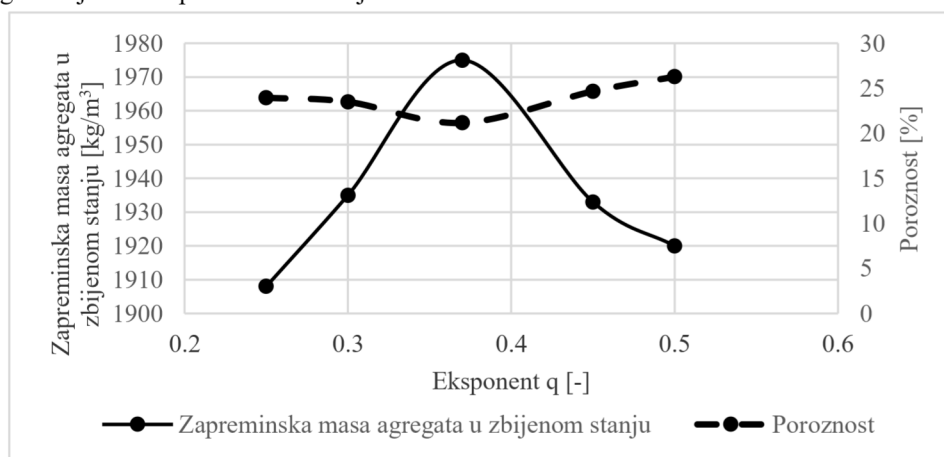


Slika 2 – Raspodela veličine čestica cementa i krečnjačkog filera

Takođe, korišćeni su prirodni rečni agregat, raspoređen u tri frakcije, I (0/4mm), II (4/8mm) i III (8/16mm), superplastifikator – hiperplastifikator najnovije generacije na bazi polikarboksilata (SP), i voda.

4.2. PROJEKTOVANJE SASTAVA MEŠAVINA

Ekperimentalna ispitivanja sprovedena su na ukupno deset mešavina koje su prikazane u Tabeli 1. Mešavine su podeljene u dva dela, prvi u kom je optimizacija granulometrijskog sastava cementa i agregata referentne mešavine izvršena prema Fankovoj i Dingerovoj krivoj, i drugi u kom je optimizacija granulometrijskog sastava agregata izvršena pomoću Fulerove krive. Ova dva dela su uvedena radi posmatranja uticaja optimizacije agregata različitim modelima, a procenti učešća različitih frakcija dati su u Tabeli 2. Za potrebe sagledavanja uticaja eksponenta distribucije q Fankove i Dingerove krive, spovedeno je ispitivanje zapreminske mase agregata u zbijenom stanju za nekoliko mešavina sa različitim učešćima frakcija, gde svakoj mešavini odgovara jedan eksponent distribucije. Rezultati su dati na Slici 3.



Slika 3 – Zapreminska masa agregata u zbijenom stanju i poroznost za različite koeficijente distribucije Fankove i Dingerove krive

Tabela 1 – Sastav mešavina

		CEM I 42.5 [kg/m³]	KF1 [kg/m³]	KF2 [kg/m³]	I (0/4) [kg/m³]	II (4/8) [kg/m³]	III (8/16) [kg/m³]	Voda [kg/m³]	w/p [-]	SP [kg/m³]
Fank i Dinger	B-REF	330	-	-	963	387	500	178	0.54	1.16
	BK-15-1	280	50	-	963	387	500	151	0.46	1.32
	BK-15-2	280	-	50	963	387	500	151	0.46	1.32
	BK-30-1	230	100	-	963	387	500	124	0.38	6.6
	BK-30-2	230	-	100	963	387	500	124	0.38	6.93
	BK-45-1	180	150	-	963	387	500	97	0.29	10.73
	BK-45-2	180	-	150	963	387	500	97	0.29	11.55
Fuler	B-REF-F	330	-	-	738	646	461	178	0.54	1.16
	BK-15-1-F	280	50	-	738	646	461	151	0.46	1.32
	BK-30-1-F	230	100	-	738	646	461	124	0.38	6.6

Tabela 2 – Učešće različitih frakcija agregata u mešavinama

	Učešće frakcije [%]	
	Fank i Dinger	Fuler
I (0/4)	52	40
II (4/8)	21	35
III (8/16)	27	25

Iz priloženog se uočava da je najveća zapreminska masa agregata u zbijenom stanju ona koja odgovara vrednosti eksponenta $q=0.37$, što ukazuje na najbolju „upakovanost“ ove mešavine. Zbog toga, ova vrednost eksponenta je korišćena prilikom optimizacije granulometrijskog sastava čestica koristeći Fankovu i Dingerovu krivu.

U prvom delu je, zatim, cement zamenjen krečnjačkim filerom maseno za 15%, 30% i 45%. Tokom svakog koraka zamene, prvo je korišćen krupniji krečnjački filer, a zatim sitniji. U drugom delu cement je zamenjen samo krupnijim filerom i to maseno za 15% i 30%. Sa smanjenjem cementa smanjena je i količina vode tako da vodocementni faktor (w/c) zadržava konstantnu vrednost od 0.54. Sa povećanjem zamene cementa vodopraškasti faktor (w/p) opada, gde praškastu komponentu mešavine podrazumevaju cement i filer. Količina superplastifikatora u mešavini određena je tako da mešavini bude obezbeđena dovoljna ugradljivost.

4.3. METODE ISPITIVANJA

Nakon spravljanja betonskih mešavina, izvršeno je ispitivanje konzistencije betona metodom sleganja prema standardu [10]. Zatim su napravljeni uzorci kocke dimenzija 10 cm, koji su uklonjeni iz kalupa nakon jednog dana, nakon čega su stavljeni u vodu temperature $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ do ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku. Ovo svojstvo betona ispitano je pri starosti uzoraka od 7 i 28 dana prema standardu [11].

5. REZULTATI

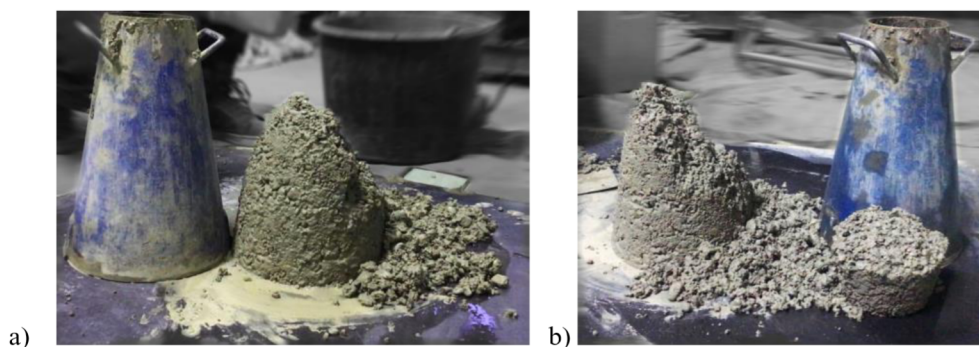
5.1. KONZISTENCIJA BETONA

Rezultati ispitivanja konzistencije betona dati su u Tabeli 3. Uočava se da obradljivost mešavina opada sa povećanjem procenta zamene cementa. Ova pojava je očekivana jer vodopraškasti faktor (koji se može posmatrati kao pokazatelj konzistencije) opada sa povećanjem procenta zamene cementa. Takođe, i ako je maseno količina praškaste komponente svake mešavine konstantna, specifična površina zrna praškaste komponente raste sa povećanjem zamene cementa. U tom slučaju, voda potrebna da obavije sva zrna i na taj način obezbedi „tečenje“ mešavine se povećava, a to dodatno ugrožava obradljivost.

Tabela 3 – Rezultati ispitivanja konzistencije

		Mera konzistencije Δh [mm]
Fank i Dinger	B-REF	60
	BK-15-1	25
	BK-15-2	25
	BK-30-1	-
	BK-30-2	-
	BK-45-1	0
	BK-45-2	-
Fuler	B-REF-F	80
	BK-15-1-F	40
	BK-30-1-F	-

Međutim, kod većih procenata zamene cementa (30% i 45%), usled, pretpostavlja se, nedostatka cementne paste, javio se nepravilan oblik sleganja prilikom ispitivanja konzistencije, standardom okarakterisan kao neprihvatljiv i nemerljiv oblik sleganja. Uzročnik ove pojave najverovatnije je nedostatak vezivne komponente koja obezbeđuje kohezivnost i plastičnost sveže betonske mase. Primer takvog sleganja prikazan je na Slici 4.

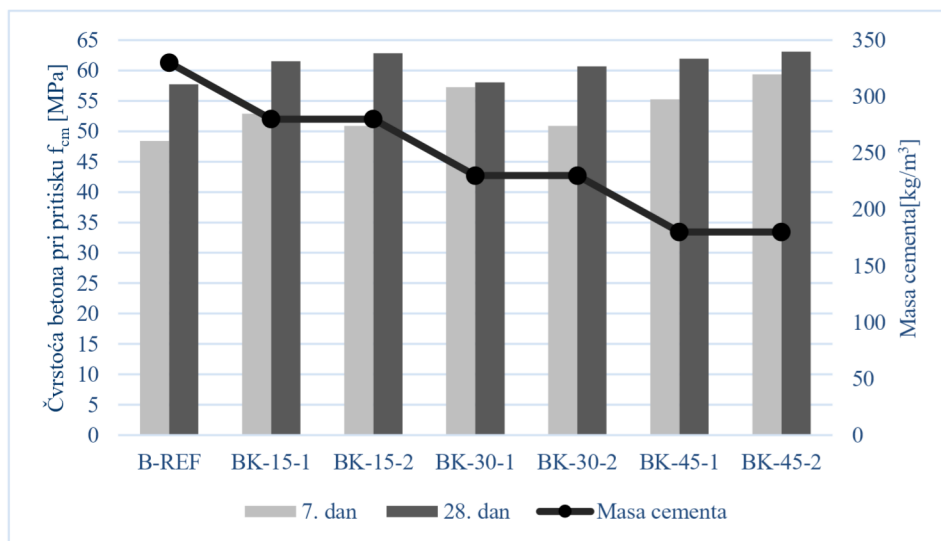


Slika 4 – Ispitivanje konzistencije metodom sleganja a) BK-30-1 i b) BK-45-2

Ukoliko se uporede rezultati dobijeni kod mešavina gde je izbor granulometrijskog sastava odabran prema dve različite krive, uočava se da mešavine kod kojih je primenjen Fulerov model imaju poboljšanu obradljivost. Posmatrajući učešća različitih frakcija agregata koje su date u Tabeli 2, zaključuje se da je usled većeg učešća prve frakcije kod Fankovog i Dingerovog modela neophodna veća količina vode za obezbeđivanje ciljane obradljivosti usled veće specifične površine zrna. Smatra se da je ova činjenica zaslužna za poboljšanu obradljivost kod mešavina koje imaju Fulerov zakon distribucije zrna za odabir granulometrijskog sastava.

5.2. ČVRSTOĆA BETONA PRI PRITISKU

Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku na uzorcima kocke dimenzije 10 cm starosti 7 i 28 dana gde je optimizacija vršena pomoću Fankove i Dingerove krive, data je na Slici 5.

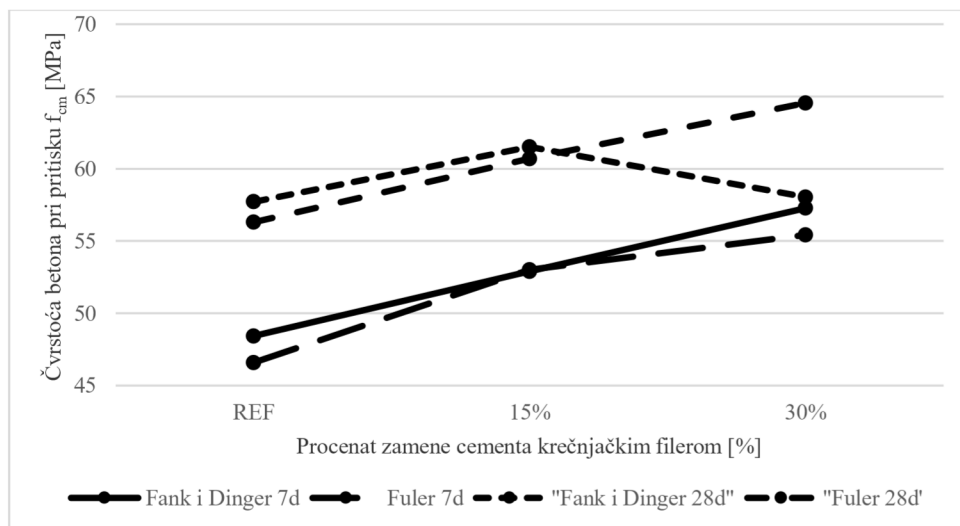


Slika 5 – Čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 7 i 28 dana

Iako su sve mešavine imale isti vodocementi faktor, uočeno je da čvrstoće dostižu veće vrednosti kod betona koje imaju u svom sastavu krečnjački filer. Najveće povećanje čvrstoće je zabeleženo kod najvećeg procenta zamene cementa (45%) sitnijim filerom i ovo povećanje iznosi 22,5% pri starosti od 7 i 9,4% pri starosti od 28 dana. Sve mešavine imale su čvrstoće veće od betonske mešavine bez filera, i posmatrano sa aspekta čvrstoće betona pri pritisku kao osnovnog pokazatelja kvaliteta betona, cement je uspešno zamenjen krečnjačkim filerom.

Uporedni prikaz čvrstoće betona pri pritisku pri starosti od 7 i 28 dana kod mešavina kod kojih je odabir učešća različitih frakcija vršen pomoću dva različita modela, dat je na Slici 6.

Kao što se vidi, izbor granulometrijskog sastava ima uticaja na čvrstoću betona pri pritisku; bolja upakovanost kod mešavina kod kojih je izvršena optimizacija čvrstih čestica prema Fankovom i Dingerovom modelu uglavnom je doprinela povećanju čvrstoće betona. Najveće povećanje je kod referentnih mešavina i iznosi 3,9%. Međutim, sprovedena ispitivanja pokazuju da to povećanje nije značajno, a u nekim slučajevima je čak i izostalo. Ovo dovodi do zaključka da uvođenje sitnih čestica (cement i filer) u kontinualne krive prilikom odabira granulometrijskog sastava (Fankov i Dingerov model) komplikuje postupak odabira uz neznan doprinos u poboljšanju čvrstoće pri pritisku upoređujući sa Fulerovom krivom.



Slika 6 – Uporedni prikaz čvrstoće betona pri pritisku pri starosti od 7 i 28 dana kod mešavina kod kojih je izbor granulometrijskog sastava odabran prema dve različite krive

6. ZAKLJUČCI

Glavni cilj ovog eksperimentalnog istraživanja bilo je ispitivanje mogućnosti zamene cementa finim praškastim materijalom, filerom, uz istovremeno očuvanje osnovnih svojstava betona koja omogućavaju konkurentnost tradicionalnim betonima i na taj način obezbeđuju mogućnost primene ove vrste betona u elementima armiranobetonskih konstrukcija. To bi dovelo do efikasne redukcije količine cementa u odnosu na tradicionalni beton, a time i njegovog štetnog uticaja na životnu sredinu.

Iz sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja zaključeno je da je moguće zameniti i do 45% cementa krečnjačkim filerom velike finoće uz očuvanje, i čak povećanje čvrstoće pri pritisku. Međutim, koncept betona kod kojih je cement zamenjen filerom, zahteva određeno smanjenje količine vode, gde uz smanjene količine cementa, ugrožava konzistenciju, kohezivnost, ugradljivost i obradljivost mešavina. Takođe, zaključeno je da kod ovih betona, superplastifikator doprinosi poboljšanju ovih svojstava, ali nedovoljno da bi ovakvi betoni bili apsolutno konkurentni tradicionalnim betonima. Narušena obradljivost se delimično može nadomestiti boljim izborom granulometrijskog sastava agregata. Zaključeno je da vrednost eksponenta $q=0.37$ distribucije Fankove i Dingerove krive vodi do optimalne upakovanosti, i da to ima doprinosa u povećanju čvrstoće betona pri pritisku, ali ne velikog u poređenju sa lakše primenljivom Fulerovom krivom. S obzirom na to da se izborom Fulerove krive dobija bolja obradljivost betonske mešavine kod manjih procenata zamene cementa, preporuka je korišćenje ove, široko upotrebljive metode za odabir granulometrijskog sastava agregata.

Da bi ova vrsta betona bila konkurentna betonu sa uobičajenim količinama cementa za proizvodnju elemenata u armiranobetonskim konstrukcijama, neophodno je dalja istraživanja usmeriti ka poboljšanju tehnoloških svojstava ovih betona.

LITERATURA

- [1] IPCC Working group III of the International Panel on climate change: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2005
- [2] Dragaš J.: Ultimate capacity of high volume fly ash reinforced concrete beams, PhD Thesis, University of Belgrade, 2018.
- [3] Scrivener K. L., John V. M., Gartner E. M.: Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research*, 114 (2), 2018, 2-26.
- [4] Fennis S. A. A. M.: Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, PhD Thesis, Technical University of Delft, 2010.
- [5] Vogt C.: Ultrafine particles in concrete - Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design, KTH Royal Institute of Technology, 2010.
- [6] Muravljov M.: Građevinski materijali, Građevinska knjiga, Beograd, 2002.
- [7] Kumar S. V., Santhanam M.: Particle packing theories and their application in mixture proportioning: A review, *Indian Concrete Journal*, 77 (9), 2003, 1324-1331.
- [8] Müller H. S., Haist M., Vogel M.: Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime, *Construction and Building Materials*, 67, 2014, 321-337.
- [9] Yousuf S., Sanchez L. F. M., Shammeh S. A.: The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry, *Journal of Building Engineering*, 25, 2019
- [10] SRPS EN 12350-2:2019 Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja, Institut za standardizaciju Srbije, 2019.
- [11] SRPS EN 12390-3:2019 Ispitivanje očvrstlog betona – Deo 3: Čvrstoća betona pri pritisku uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, 2019.