



**SAVEZ GRAĐEVINSKIH
INŽENJERA SRBIJE
- BEOGRAD -**

GRAĐEVINSKI KALENDAR

2017

SAVEZ GRAĐEVINSKIH INŽENJERA SRBIJE

UDK:624(059)

ISSN 0352-2733

COBISS.SR - ID 43031

GRAĐEVINSKI KALENDAR 2017

Građevinski kalendar, Vol. 49
Beograd, mart 2017, p. I-XVI, 1-486

UREDNIŠTVO

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Prof. dr Mihailo Muravljov, dipl. inž. građ.

REDAKCIONI ODBOR:

Prof. dr Radomir Folić, dipl. inž. građ.

Prof. dr Slobodan Ćorić, dipl. inž. građ.

Prof. dr Snežana Marinković, dipl. inž. građ.

Prof. dr Jasna Plavšić, dipl. inž. građ.

Prof. dr Boško Stevanović, dipl. inž. građ.

Prof. dr Đorđe Lađinović, dipl. inž. građ.

Prof. dr Milan Dimkić, dipl. inž. građ.

Prof. dr Branislav Bajat, dipl. inž. geod.

Prof. dr Goran Mladenović, dipl. inž. građ.

Prof. dr Dragoslav Stojić, dipl. inž. građ.

Doc.dr Dragoslav Rakić, dipl. inž. geolog

RECENZENTI:

Prof. dr Mihailo Muravljov, dipl. inž. građ.

Prof.dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehnolog

Dr Aleksandar Đukić, dipl.inž.građ.

Prof.dr Radomir Folić, dipl.inž.građ.

Prof.dr Goran Mladenović, dipl.inž.građ.

Prof. dr Branislav Bajat, dipl. inž.geod.

Prof.dr Jasna Plavšić, dipl.inž.građ.

Prof.dr Dejan Bajić, dipl.inž.građ.

TEHNIČKI UREDNIK

Dr Aleksandar Đukić, dipl.inž.građ.

Priprema:

Dragoslav Ješić, dipl.politolog

IZDAVAČ

Savez građevinskih inženjera Srbije
Beograd, Kneza Miloša 9/I, tel./faks (011) 3241-656
E-mail:sgisrbije@mts.rs

Tiraž:

400 primeraka

Štampa:

Štamparija „ANAGRAM STUDIO“, Zemun

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

624(059)

GRAĐEVINSKI kalendar / glavni i odgovorni urednik
Mihailo Muravljev. - 1970-
Beograd (Kneza Miloša 9/I) : Savez građevinskih inženjera
Srbije, 1970- (Zemun : Anagram studio). - 14 cm

Godišnje

ISSN 0352 - 2733 = Građevinski kalendar

COBISS.SR-ID 43031

Doc. dr Aleksandar Savić, dipl. građ. inž.¹
Prof. dr Snežana Marinković, dipl. građ. inž.¹
Doc. dr Dimitrije Zakić, dipl. građ. inž.¹
Asist. Aleksandar Radević, mast. inž. građ.¹
Asist. Marina Aškrabić, mast. inž. građ.¹

**"EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE
SAMOZBIJAJUĆIH BETONA SA
MINERALNIM DODATKOM
INDUSTRIJSKIH NUSPRODUKATA"**

UDK

Rezime

Ekstrapolacijom koncepta upotrebe superplastifikatora u pravcu dobijanja betona tečnijih konzistencija došlo se do specijalne vrste betona – samozbijajućeg betona (Self-compacting Concrete - skraćeno SCC). Samozbijajući beton se može definisati kao beton, koji će bez primene mehaničkih sredstava za ugrađivanje popunjavati sve uglove oplata i uzane prostore između gusto raspoređenih šipki armature, samo pod dejstvom sopstvene težine, tako da se u završnoj fazi dobije kompaktni beton veće trajnosti. U

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

okviru rada biće prikazani rezultati ispitivanja sedam mešavina SCC sa različitim mineralnim dodacima: referentna SCC mešavina sa krečnjačkim brašnom kao mineralnim dodatkom, tri mešavine sa delimičnom zamenom mase krečnjačkog brašna letećim pepelom i tri mešavine sa delimičnom zamenom mase krečnjačkog brašna spraešenim recikliranim betonom. Ispitivanja predmetnih samozbijajućih betona obuhvatila su relevantna fizičko-mehanička svojstva u svežem i očvrslom stanju. Na osnovu rezultata ispitivanja u radu su izvedeni odgovarajući zaključci u vezi sa promenom razmatranih fizičko-mehaničkih svojstava različitih SCC mešavina u zavisnosti od količine, porekla i vrste upotrebljenog mineralnog dodatka. Primena principa održivog razvoja u graditeljstvu osnovni je motiv za usvojenu koncepciju istraživanja iz ovog rada. Povećanje količine raspoloživih resursa za spravljanje SCC mešavina sa jedne i pozitivan uticaj na životnu sredinu putem smanjenja količine ovih materijala na deponijama, sa druge strane, dva su osnovna pozitivna efekta koja bi trebalo da proizađu iz predmetnog istraživanja.

Ključne reči: Kompozit, samozbijajući beton, mineralni dodaci, fizičko-mehanička svojstva, industrijski nusprodukti, održivo građevinarstvo

„EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SELF-COMPACTING CONCRETES WITH MINERAL ADDITION OF INDUSTRIAL BYPRODUCTS”

Summary

By extrapolating the concept of the use of superplasticizers in terms of flowable concrete production led to the special concrete – self-compacting concrete (SCC). Self-compacting concrete can be defined as concrete that, without the use of mechanical means for compaction, fills all formwork corners and narrow spaces between densely spaced reinforcement bars, just under the influence of its own weight, so that in the final stage, a compact and durable concrete is produced. Investigation on nine SCC mixtures with different mineral additions will be presented here: reference SCC mixture with limestone filler as a mineral addition, five mixtures made with partial replacement of the limestone mass with fly ash and three mixtures made with partial replacement of the limestone mass with ground recycled concrete. Tests conducted on these self-compacting concrete mixtures covered relevant physical and mechanical properties of fresh and hardened concrete. Based on the results obtained in this paper, appropriate conclusions regarding the change of

the considered physical and mechanical properties of different SCC mixtures were derived, depending on the amount, origin and type of the mineral addition. Application of the principle of sustainable development in construction was the main motive for the adopted concept of research in this paper. Increasing the amount of resources available for the preparation of SCC mixtures, with a positive environmental impact by reducing the quantity of these materials in landfills, can be considered as two main positive effects that should arise from the presented research.

Key words: Composite, self-compacting concrete, mineral addition, physical and mechanical properties, industrial by-products, sustainable construction

1. UVOD

Graditeljstvo se, kao privredna grana sa značajnim uticajem na životnu sredinu, menja između ostalog i u skladu sa stavovima koji definišu pojam "održivi razvoj". U tom smislu, svi aspekti graditeljstva (planiranje, projektovanje, realizacija, funkcionisanje, trajanje odnosno životni vek, itd.) se kritički sagledavaju, preispituju i, u slučaju da je to moguće i svrsishodno, osavremenjuju implementacijom filozofije održivog razvoja. Održivo korišćenje resursa,

energetska efikasnost i trajnost građevinskih objekata, sa osvrtom na mogućnost recikliranja materijala i minimizaciju otpadnog materijala i uticaja na životnu sredinu predstavljaju osnovne aspekte evidentnog opredeljenja za održivi razvoj u građevinarstvu danas.

U opštem slučaju, može se reći da je beton jedan od najčešće upotrebljivanih materijala u građevinskoj industriji i prethodno pomenuti aspekti imali su značajan uticaj na njegovu evoluciju, od početaka primene do današnjih dana. Konvencionalni beton se ugrađuje pomoću vibrirajuće opreme kako bi se u njemu redukovao sadržaj zaostalog vazduha, eliminisala mogućnost pojave kaverni i drugih šupljina na kontaktima sa armaturom i oplatom (takozvani normalno vibrirani beton, Normal Vibrated Concrete – NVC). Na taj način beton postaje kompaktniji, gušći i homogeniji, što je osnov za njegovo prihvatljivo ponašanje u konstrukciji. Ova tehnološka operacija (kompaktiranje) tradicionalno igra ključnu ulogu u proizvodnji kvalitetnog betona sa optimalnom čvrstoćom i trajnošću [27].

Sinergija hemijske industrije i industrije građevinskih materijala je jedan od izraženih trendova savremenog graditeljstva. Na primer, razvoj hemijskih dodataka, u prvom redu plastifikatora, odnosno superplastifikatora, omogućio je lakše ugrađivanje betona krućih konzistencija [8]. Malim doziranjem

hemijskog dodatka tipa plastifikatora (najčešće do 2% u odnosu na masu cementa u betonu) deluje se na strukturu svežeg betona tako što se smanjuju sile trenja između čestica, što za rezultat daje pokretljivije i obradljivije betone (betone tečnijih konzistencija) koje je lakše ugraditi, uz zadržavanje iste količine vode.

Ekstrapolacija koncepta upotrebe superplastifikatora u pravcu dobijanja betona tečnijih konzistencija dovela je do koncepta samozbijajućeg betona (Self-Compacting Concrete - skraćeno SCC) kao i njegove primene [17]. Razvoj novih materijala, superplastifikatora najnovije generacije na bazi polikarboksilata, koji su ušli u široku primenu tek 90-tih godina prošlog veka, omogućio je uspešnu primenu SCC betona. Ovi betoni se u literaturi, naročito anglosaksonskog porekla, ponekad nazivaju i Self-Consolidating Concrete, ali i Self-Leveling Concrete. Sa tog stanovišta, može se uvesti i definicija samozbijajućeg betona, kao betona, koji će bez primene mehaničkih sredstava za ugrađivanje (potpuno nezavisno od stručnosti angažovanih radnika) popunjavati sve uglove oplata i uzane prostore između šipki gusto raspoređene amature (samo pod dejstvom sopstvene težine) tako da se u završnoj fazi dobije kompaktni beton veće trajnosti.

Na osnovu istraživanja obavljenog u SAD, može se reći da je SCC našao svoje mesto u industriji betona, obzirom da se približno 40% prefabrikovanih proizvoda

u SAD dobija upotrebom SCC, dok je u segmentu proizvodnje betona izlivenog na licu mesta taj procenat 2-4% [1]. Može se reći da je, po pitanju primene SCC, i u drugim razvijenim zemljama u svetu situacija slična navedenoj.

2. KOMPONENTNI MATERIJALI

Većina materijala pogodnih za primenu kod NVC može se primeniti i kod SCC. Lokalni materijali se kod nas uspešno upotrebljavaju za spravljanje SCC već dugi niz godina[28],[9],[5].

2.1 Odnosi komponenata

Postoji karakteristična razlika u odnosima osnovnih komponenata kod NVC i SCC. Ta razlika može se sagledati iz generalizovanih relativnih odnosa komponenata datih šematski, na slici 1. Prva razlika koja se uočava u ovom smislu je činjenica da se, osim cementa, u sastavu samozbijajućeg betona uvek nalaze i drugi praškasti materijali, u koje spadaju filer i eventualni sadržaj sitnih čestica u pesku i krupnom agregatu. Takođe, za razliku od normalno vibriranog betona, samozbijajući beton ima manji sadržaj vode, zahvaljujući upotrebi superplastifikatora. Nešto veći sadržaj vazduha, kao posledica nepostojanja sredstava

za ugrađivanje se uspešno kompenzuje upravo smanjenjem sadržaja vode (a time niskim vodocementnim faktorom), tako da je konačan efekat, ipak, po pravilu čvršća i na hemijske uticaje otpornija struktura samozbijajućeg betona. U odnosu na NVC, SCC sadrži manje krupnog agregata, a osim toga je najkrupnije zrno agregata najčešće ograničeno na 16 mm ili 22,5 mm. Sve mešavine sadrže superplastifikator, jer omogućava karakteristična svojstva svežeg SCC.

VAZDUH cca 1.5%		VAZDUH cca 2%
VODA 10-25%		VODA 15-20%
CEMENT 15-25%		FINE ČESTICE 20-30%
PESAK 25-35%		PESAK 30-35%
KRUPAN AGREGAT 30-40%		KRUPAN AGREGAT 30-35%

Slika 1. Uporedni prikaz sastava NVC i SCC (%vol)

2.2 Tipovi (kategorije) SCC

SCC se veoma često klasifikuje u tri kategorije, odnosno tipa; to su praškasta, viskozna i kombinovana kategorija, u zavisnosti od metode kojom se omogućava tražena viskoznost [2],[6],[13].

- Praškasti tip SCC karakteriše nizak vodopraškasti faktor (W/P), kao i visok sadržaj praškastih (finih) čestica, tj. filera (najčešće od 550 kg/m³ do 650 kg/m³). Vodopraškasti faktor (W/P) se definiše kao odnos mase vode i mase praškaste komponente u betonu (cement, mineralni dodatak i druge praškaste komponente, generalno sitnije od 0,125mm). Ovaj faktor se češće koristi kod SCC betona nego vodocementni faktor (W/C), koji predstavlja odnos mase vode i mase cementa. Konačno, ukoliko se uvede pojam tečne (fluidne komponente) u koju osim vode spadaju i superplastifikator i ostale tečne komponente, mogu se po istom principu definisati i fluidopraškasti (F/P) i fluidocementni (F/C) faktor. Zbog visokog sadržaja filera, praškasti tip SCC je osetljiv na promene komponentnih materijala. Obično se povećava sadržaj filera na račun količine cementa, da bi se postigla kontrola čvrstoće i toplote hidratacije. Zbog niskog W/P faktora ovakvi betoni po pravilu imaju visoke čvrstoće i skupljanje, a nisku permeabilnost. Pri tome je neophodno obratiti posebnu pažnju na mogućnost

interakcije superplastifikatora i filera. Ovaj tip SCC mešavine je bio prvi napravljen prototip.

- Viskozni tip SCC se karakteriše visokim sadržajem hemijskog dodatka modifikatora viskoziteta (VMA), koji se dozira da bi se povećala plastična viskoznost. U poređenju sa praškastim tipom, viskozni ili VMA tip SCC sadrži veće količine superplastifikatora, kao i veće vrednosti W/P faktora. Sa druge strane, sadržaj filera može da bude manji (najčešće 350-450 kg/m³), obzirom da se viskoznost kontroliše dodavanjem VMA. Posebna pažnja treba da bude posvećena mogućoj nekompatibilnosti između superplastifikatora i VMA [3].

- Kombinovani SCC se projektuje u cilju poboljšanja robusnosti praškastog tipa SCC, dodavanjem male količine VMA. U ovim mešavinama je sadržaj VMA niži nego kod viskoznog tipa betona, a sadržaj praškastih čestica niži, odnosno W/P faktor je viši nego kod praškastog tipa SCC. Viskozitet se omogućava istovremenom upotrebom VMA i praškastih čestica. Kod ovog tipa SCC primećena je veća sposobnost popunjavanja, visoka otpornost prema segregaciji i poboljšana robusnost [11]. Poseban problem kod ovog, kombinovanog, tipa SCC predstavlja usložnjavanje odnosa komponenata i poskupljenje prouzrokovano upotrebom dva tipa hemijskih dodataka.

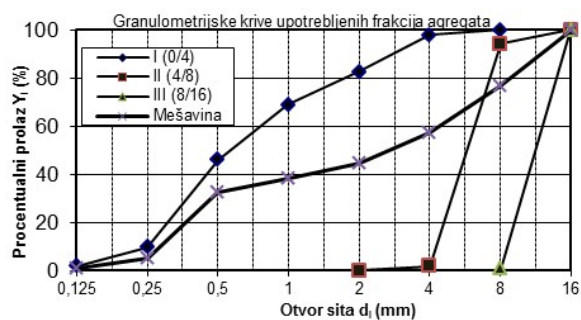
3. SOPSTVENA EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Za ispitivanja prikazana u ovom radu su izabrani sledeći industrijski nusprodukti: leteći pepeo i sprášeni reciklirani beton. Pri tome je variran sadržaj i poreklo letećeg pepela, odnosno sadržaj sprášenog recikliranog betona, pri konstantnim ostalim količinama materijala: cementa, vode, sitnog (rećnog peska) i krupnog agregata (druge i treće frakcije agregata). Najveći broj rezultata ispitivanja u svetu zasniva se na zameni jednog dela cementa letećim pepelom, dok radova u kojima je zamenjivana količina mineralnog dodatka i praćeni efekti te zamene ima malo u svetu, što je predstavljalo dodatnu motivaciju za ispitivanja.

3.1 Karakterizacija upotrebljenih komponentnih materijala

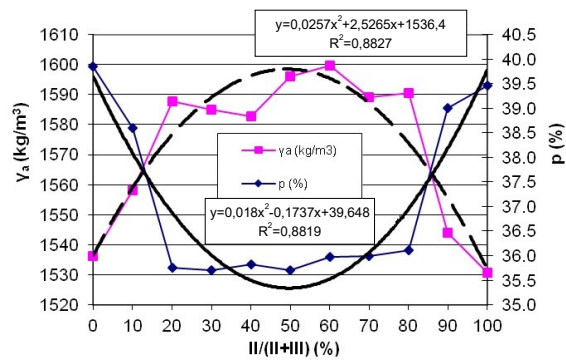
Frakcionisani prirodni agregat (rećni agregat, podeljen u tri standardne frakcije) vodi poreklo iz reke Dunav, separacija "Sava" u Beogradu. Granulometrijski sastav upotrebljenog agregata ispitan je prema [24] i

prikazan grafički, na slici 2. Modul finoće (modul zrnivosti) frakcije I (0/4) iznosio je 2,92, i nalazio se u granicama 2,30-3,60, definisanim važećim standardom [20]. Izračunati moduli finoće (moduli zrnivosti) frakcija II (4/8) i III (8/16) iznosili su 6,04 i 6,99, respektivno. Sadržaj sitnih čestica u agregatu ispitivan je u Laboratoriji za materijale IMK, Građevinski fakultet, saglasno [21] i kod frakcije I (0/4) iznosio je 0,59% za zrna sitnija od 0,063 mm, odnosno 1,68% za zrna sitnija od 0,09 mm. U krupnom agregatu (krupniji od 4 mm) ovaj sadržaj je bio blizak nuli.



Slika 2. Granulometrijske krive upotrebljenih frakcija agregata (zajedno sa krivom mešavine)

Odnos frakcija krupnog agregata, frakcije II (4/8) i frakcije III (8/16) utvrđen je na osnovu ispitivanja najveće vrednosti zapreminske mase mešavine ove dve frakcije agregata u suvom zbijenom stanju (rezultati su prikazani na slici 3). Pokazalo se da se visoke vrednosti zapreminske mase mešavine agregata mogu postići u širokom rasponu odnosa frakcija II (4/8) i III (8/16). Nadalje je usvojen i fiksiran maseni odnos frakcije II (4/8) i frakcije III (8/16) u odnosu 1:1. U istraživanju je na osnovu prethodnih proba betona usvojena količina sitnog agregata u iznosu od 31,8%, a krupnog (u odnosu frakcija II : III = 1 : 1) u iznosu od 32,5% u odnosu na ukupnu jediničnu zapreminu SCC.



Slika 3. Promena zapreminske mase i poroznosti mešavine frakcija II (4/8) i III (8/16) za razne odnose II/(II+III)

U ispitivanjima sprovedenim tokom eksperimentalnog dela predmetne disertacije upotrebljen je "čist" cement tipa CEM I, deklarisan kao PC 42,5R, proizvođača Lafarge Beočinska fabrika cementa d.o.o., Beočin. Specifična površina po metodi Blaine-a iznosila je 4240 cm²/g, a specifična masa 3040 kg/m³.

U svojstvu filera za sve mešavine je upotrebljeno krečnjačko brašno proizvođača "Granit Peščar" Ljig, srednje krupnoće zrna od 250 μm. Specifična masa ovog materijala iznosila je 2720 kg/m³, a zapreminska masa 1105 kg/m³. Rezultati ispitivanja hemijskog sastava krečnjačkog brašna prikazani su u okviru tabele 1, zajedno sa rezultatima ispitivanja hemijskog sastava spraćenog recikliranog betona i letećeg pepela.

Leteći pepeo, poreklom iz TE "Kolubara" upotrebljen je u dopremljenom stanju. Zapreminska masa letećeg pepela u rastresitom i zbijenom stanju iznosila je 690 kg/m³ i 910 kg/m³. Specifična masa, određena na osnovu tri ispitivanja metodom piknometra, iznosila je 2190 kg/m³.

Sušćina primene spraćenog betona u ovom slućaju ogledala se u upotrebi praškastog materijala dobijenog finim spraćivanjem tri različite vrste peska pomoću ultracentrifugalnog mlina. Ova tri peska dobijena su drobljenjem tri različite vrste betona kontrolisanog porekla [7] u Institutu za Puteve, Beograd. U pogledu granulometrijskog sastava može se reći da su ova tri

betona bila veoma slična, sa specifičnom površinom od 4400 cm²/g. Polazni betoni bili su:

- Normalno vibrirani beton (NVC) spravljen sa prirodnim agregatom, koji je nakon drobljenja prosejan i čija je najsitnija frakcija I (0/4 mm) dalje sprášena – sprášivanjem ovog peska dobijen je reciklirani praškasti mineralni dodatak A;
- Normalno vibrirani reciklirani beton (RAC50), spravljen sa rečnim peskom i sa krupnim agregatom, koji se sastojao iz 50% rečnog krupnog agregata i 50% recikliranog krupnog agregata – dobijenog drobljenjem demoliranog betona. I ovaj beton je nakon drobljenja prosejan i njegova najsitnija frakcija I (0/4 mm) je dalje sprášena – sprášivanjem ovog peska dobijen je reciklirani praškasti mineralni dodatak B;
- Normalno vibrirani reciklirani beton (RAC100) spravljen sa rečnim peskom i sa recikliranim krupnim agregatom. Celokupna količina krupnog agregata za ovaj beton dobijena je drobljenjem demoliranog betona. I beton RAC100 je takođe nakon drobljenja prosejan i njegova najsitnija frakcija I (0/4 mm) je dalje sprášena – sprášivanjem ovog

peska dobijen je reciklirani praškasti mineralni dodatak C.

Tabela 1. *Hemijski sastav upotrebljenih mineralnih dodataka (%)*

Parametar	Krečnjačko brašno	Leteći pepeo	Mineralni dodatak A	Mineralni dodatak B	Mineralni dodatak C
SiO ₂	0,21	58,60	67,13	60,55	61,31
Al ₂ O ₃	0,5	21,92	6,58	6,84	6,65
CaO	54,86	6,12	12,94	17,77	16,06
Fe ₂ O ₃	0,09	5,97	1,33	1,32	1,32
MgO	1,10	1,77	0,76	0,94	0,86
K ₂ O	0,05	1,50	0,86	0,83	0,79
Na ₂ O	<0,005	0,37	1,27	1,13	1,05
TiO ₂	<0,005	0,49	<0,17	<0,17	<0,17
Gubitak žarenjem	43,64	3,09	9,11	10,59	11,93

Obična voda iz gradskog vodovoda upotrebljena je prilikom spravljanja betona. Temperatura vode je merena prilikom svakog ispitivanja i kretala se u uskim granicama od 19-22°C.

U svim ispitivanjima koja su predmet ovog rada upotrebljena je samo jedna vrsta superplastifikatora, Glenium Sky 690, proizvođača BASF (BASF Contruction Chemicals Spa Italia).

3.2 Projektovanje sastava SCC betona

Kod SCC betona postoji veliki broj zahteva u vezi sa ponašanjem u svežem stanju, što nije slučaj kod NVC. Ne postoje standardne metode za projektovanje sastava SCC. Najčešće se pomenute metode zasnivaju na grubom postizanju potrebnih svojstava svežeg SCC, a zatim i na njihovom finom podešavanju na osnovu metoda ispitivanja u svežem stanju, što se postiže preciznijim definisanjem količina komponentnih materijala. Zbog različitih koncepata i širokog raspona mogućih komponentnih materijala, za projektovanje SCC je do sada predlagan i razvijan veliki broj metoda.

U radu je primenjena korigovana opšta metoda, zasnovana na principu "korak po korak", gde se parametri definišu za svaku fazu posebno. Ova metoda razvijena je na Univerzitetu u Tokiju [14],[15],[16]. U metodi se SCC posmatra kao dvokomponentni materijal koji se sastoji od maltera i krupnog agregata. Malter se sastoji od praškastih čestica (cement i fine čestice krupnoće ispod 0,09 mm), zatim sitnog agregata (čestice krupnije od 0,09 mm), vode i hemijskog dodatka. Prema predmetnoj proceduri, potrebno je utvrditi pet karakterističnih parametara: sadržaj vazduha, zapreminu krupnog agregata u mešavini, zapreminu sitnog agregata u malteru, W/P faktor i procenat doziranja superplastifikatora u odnosu na masu praškastih čestica.

Procedura prema ovoj metodi sastoji se iz sledećih koraka:

1. Uvodi se pretpostavka da je zapremina vazduha u betonu 4-7% u slučaju upotrebe aeranta, odnosno 1% u slučaju kada nema aeranta.

2. Zapremina krupnog agregata iznosi 50% u odnosu na ukupnu zapreminu agregata u suvom zbijenom stanju.

3. Sadržaj sitnog agregata (čestice krupnije od 0,09 mm) u odnosu na zapreminu maltera iznosi 40%.

4. Vodopraškasti (W/P) faktor i količina superplastifikatora se procenjuju na bazi ispitivanja na nivou maltera. Rasprostiranje sleganjem maltera od 250 mm (relativno rasprostiranje maltera u iznosu od 5) i vreme mereno na V-levku od 9-11 s (relativna brzina rasprostiranja od 0,9-1,1) smatraju se odgovarajućim za proizvodnju SCC.

5. Nakon toga se W/P odnos i doziranje superplastifikatora koriste u probama na betonu i dodatno koriguju, ukoliko to bude neophodno, dok se ne postigne ciljano rasprostiranje sleganjem (npr. 650 mm) i ciljano vreme mereno pomoću V-levka (npr. 10-20 s).

Statistički posmatrano, u opštoj metodi zapremina krupnog agregata (oko 32%) nalazi se na sredini raspona koji važi za većinu SCC mešavina (28%-39%); zapreminski odnos pesak/malter od 40% je niži od proseka raspona od 38-52%. Zbog toga je sadržaj paste i

praškaste komponente viši nego što je to obično potrebno. Takođe, ovakvi zahtevi u najvećem broju slučajeva dovode do usvajanja recepture za SCC sa visokom viskoznošću [12].

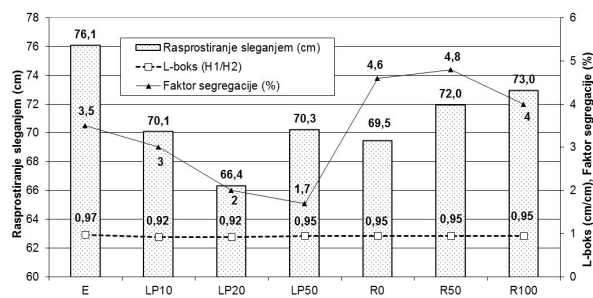
Nakon analize rezultata prethodnih ispitivanja, prilikom kojih su vršene varijacije količine komponentata i praćenje promene svojstava u svežem i očvrsлом stanju, usvojene su konačne recepture SCC sa letećim pepelom i sa sprasnim recikliranim betonom koje su u daljem toku eksperimentalnog rada detaljno istraživane. Sastavi betona sa letećim pepelom i sa sprasnim recikliranim betonom prikazani su u tabeli 2, zajedno sa referentnom mešavinom.

Tabela 2. Sastav ispitivanih SCC mešavina (kg/m³)

Mešavina	E	LP10	LP20	LP50	R0	R50	R100
Voda W	183	183	183	183	183	183	183
Cement C	380	380	380	380	380	380	380
Krečnjačko brašno KB	220	198	176	110	110	110	110
Leteći pepeo LP	0	22	44	110	0	0	0
Praškasti mineralni dodatak A	0	0	0	0	110	0	0
Praškasti mineralni dodatak B	0	0	0	0	0	110	0
Praškasti mineralni dodatak C	0	0	0	0	0	0	110
Pesak (0/4mm)	840	840	840	840	840	840	840
Krupan agregat (4/8mm)	430	430	430	430	430	430	430
Krupan agregat (8/16mm)	430	430	430	430	430	430	430
Superplastifikator	7,6	7,6	7,6	11,4	7,6	7,6	7,6

4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA SCC MEŠAVINA U SVEŽEM STANJU

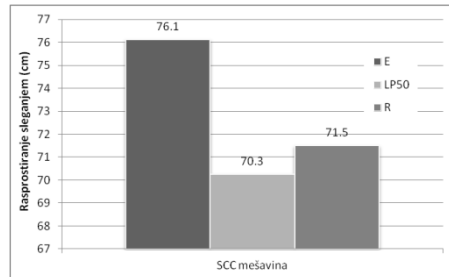
Rezultati ispitivanja rasprostiranja sleganjem, odnosa visina kod L-boksa i faktora segregacije kod svih ispitivanih SCC mešavina prikazani su na slici 4. Ambijentalna temperatura prilikom spravljanja svih predmetnih betona kretala se u granicama od 20,6 °C do 23,9 °C.



Slika 4. Rezultati ispitivanja rasprostiranja sleganjem, odnosa visina kod L-boksa i faktora segregacije kod svih ispitivanih SCC mešavina

Generalno posmatrano, sa rasprostiranjem sleganjem u rasponu od 66,4 cm do 76,1 cm svi spravljeni SCC spadaju u kategoriju SF2 prema evropskim preporukama [4], sa izuzetkom betona E koji je nešto iznad gornje granice za datu kategoriju (75 cm). Što se tiče promene sposobnosti tečenja merenom testom rasprostiranja sleganjem, može se primetiti da je došlo do pada ovog svojstva usled promene količine letećeg pepela (10%, 20%, 50%), odnosno usled promene vrste spraćenog recikliranog betona. Na osnovu prikazanih vrednosti može se primetiti da je pad vrednosti rasprostiranja sleganjem manji za slučaj zamene veće količine krupnog agregata recikliranim betonom u spraćenom betonu. Usporedni prikaz vrednosti

rasprostiranja sleganjem SCC mešavine sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera – LP50 i prosečne vrednosti rasprostiranja sleganjem mešavina sa 50% sprášenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera – označena kao R) dat je na slici 5. Oba mineralna dodatka na bazi industrijskih nusprodukata (leteći pepeo i sprášeni reciklirani beton) dovode do pada sposobnosti tečenja SCC mešavine merenog metodom rasprostiranja sleganjem.



Slika 5. Uporedni prikaz vrednosti rasprostiranja sleganjem SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim recikliranim betonom

Kod SCC mešavine spravljene sa letećim pepelom zabeležen je veći pad (7,7%), dok je kod SCC mešavine sa sprášenim recikliranim betonom ovaj pad iznosio

6,1%. Rasprostiranje sleganjem SCC mešavine sa letećim pepelom niže je od rasprostiranja sleganjem SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom u iznosu od 1,8% u odnosu na rasprostiranje sleganjem SCC mešavine sa letećim pepelom.

Što se tiče promene sposobnosti prolaska merenog testom L-boksa, primećuje se da su, generalno, izmerene vrednosti za sve mešavine bile relativno bliske, u granicama od 0,92 do 0,97. Takođe, može se primetiti da je došlo do pada izmerenih vrednosti kod ovog svojstva usled promene količine letećeg pepela (10%, 20%, 50%), odnosno, u SCC mešavinama sa spraešenim recikliranim betonom, došlo je do pada usled doziranja spraešenog recikliranog betona u iznosu od 50%, nezavisno od porekla spraešenog recikliranog betona.

Prema kriterijumu sa tri šipke armature na L-boksu, svi betoni su postigli klasu PA2 (odnos visina na početku i kraju horizontalnog dela L-boksa: $H2/H1 > 0,8$) [25]. Povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" na 50% u odnosu na ukupnu količinu filera, uz istovremeno povećanje količine superplastifikatora za 1% u odnosu na masu cementa rezultiralo je mešavinom sa vrednošću odnosa visina $H2/H1$ na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa od 0,95. Ova vrednost navedenog odnosa visina predstavlja pad sposobnosti prolaska merenog ovom metodom od

2,06%. U proseku, zamena 50% krečnjačkog brašna prašenim recikliranim betonom (nezavisno od vrste ovog dodatka) dovela je do pada razmatranog svojstva pad od 2,1%, ali bez povećanja količine superplastifikatora.

Povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" na 50% u odnosu na ukupnu masu filera, uz istovremeno povećanje količine superplastifikatora za 1% u odnosu na masu cementa rezultiralo je porastom otpornosti prema segregaciji (u odnosu na vrednosti za 10% i 20% zamene) merene ovom metodom. U slučaju zamene 50% krečnjačkog brašna prašenim recikliranim betonom, došlo do pada ovog svojstva u funkciji od vrste prašenog recikliranog betona (kada je prašeni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnim recikliranim agregatom, respektivno). Izmerene vrednosti faktora segregacije predstavljaju porast količine segregiranog materijala (pad otpornosti prema segregaciji) od 31,4% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna prašenim recikliranim betonom poreklom od običnog betona), 37,1% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna prašenim recikliranim betonom poreklom od betona sa 50% krupnog recikliranog agregata) i 14,3% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna prašenim recikliranim betonom poreklom od betona sa krupnim recikliranim agregatom) u odnosu na početnu

vrednost izmerenu kod referentne mešavine E (spravljene bez spraćenog recikliranog betona). Napominje se da su izmerene vrednosti za sve mešavine u granicama dozvoljenih (vrednosti faktora segregacije niže od 20%). U slučaju upotrebe spraćenog recikliranog betona nije došlo do porasta otpornosti prema segregaciji (kao što je to, na primer, bio slučaj kod SCC sa letećim pepelom), najverovatnije zbog činjenice da je u spraćenom betonu bila prisutna veća količina sitnih čestica (spraćenog, samlevenog betona) veće specifične mase i manje poroznosti.

Na osnovu poređenja faktora segregacije SCC mešavina kod kojih je izvršena zamena 50% krečnjačkog brašna istom masom letećeg pepela, ili pak spraćenog recikliranog betona, može se reći da je efekat upotrebe ovih dodataka u odnosu na referentnu SCC mešavinu različit: kod SCC mešavine sa letećim pepelom došlo je do povećanja otpornosti prema segregaciji u odnosu na referentnu SCC mešavinu u iznosu od 51,4%, a kod SCC mešavine sa spraćenim recikliranim betonom došlo je do smanjenja otpornosti na segregaciju u iznosu od 27,6% u odnosu na referentnu SCC mešavinu. Međutim, konkretne vrednosti su u odnosu na graničnu vrednost faktora segregacije od 20% mnogo niže.

Što se tiče promene sposobnosti tečenja na osnovu merenja vremena t_{500} potrebnog za rasprostiranje i

vremena t_v izmerenog kod metode V-levka, može se primetiti da je došlo do pada ovog svojstva (sposobnosti tečenja) usled promene količine letećeg pepela (10%, 20%, 50%). Vrednosti vremena t_{500} i vremena t_v date su za sve serije u vidu uređenih parova na slici 6. Generalno posmatrano, prema evropskim preporukama [4] svi betoni spadaju u kategoriju VS2/VF2 sa >2 sec izmerenim vremenom t_{500} , odnosno sa >9 sec izmerenim vremenom t_v . Pri tome, SCC mešavina oznake E je bila najbliža datoj granici dok je mešavina LP50 (sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara") pokazala visoku viskoznost (vreme od 27,2 sekundi). Kod ispitivanih mešavina SCC sa spraešenim recikliranim betonom došlo je do porasta vremena potrebnog za rasprostiranje betona u metodi rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu, spravljenju bez spraešenog recikliranog betona, kao i vremena V-levka. Vrednosti rasprostiranja sleganjem SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom bile su niže nego kod referentne mešavine.

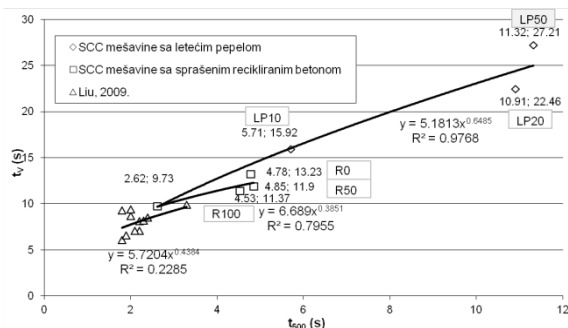
Što se tiče smanjenja sposobnosti tečenja na osnovu merenja vremena t_{500} potrebnog za rasprostiranje i vremena V-levka t_v , može se primetiti da je došlo do promene (pada) ovog svojstva (sposobnosti tečenja) u funkciji od porekla spraešenog recikliranog betona. Betoni sa spraešenim recikliranim betonom imali su slične vrednosti oba izmerena vremena (vremena t_{500}

potrebnog za rasprostiranje i vremena potrebnog za isticanje betona iz V-levka t_v).

Na osnovu prikazanih vrednosti može se primetiti da zamena krečnjačkog brašna spraešenim recikliranim betonom (u iznosu od 50%) rezultira porastom vrednosti t_{500} u iznosu od 72,9-82,4%. Sa druge strane, porast vrednosti vremena t_v (potrebnog da beton isteče iz V-levka) u odnosu na referentnu mešavinu E, opada sa povećanjem količine krupnog recikliranog agregata u spraešenom betonu.

Na slici 6 prikazane su zavisnosti između vremena t_v isticanja merenog metodom V-levka i vremena t_{500} merenog u metodi rasprostiranja sleganjem kod ispitivanih SCC mešavina (tri SCC mešavine sa letećim pepelom i tri mešavine sa spraešenim recikliranim betonom) dobijena na osnovu prosečnih vrednosti ispitivanja na SCC betonima sa letećim pepelom, sa dobrom korelacijom ($R^2=0,92$), zajedno sa rezultatima ispitivanja SCC mešavina sa letećim pepelom autora Liu [12] ($R^2=0,23$) i sa rezultatima ispitivanja SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom ($R^2=0,80$). Zavisnost dobijena na osnovu podataka iz navedene literature važi za mali raspon vrednosti t_{500} i t_v i iz tog razloga ima nizak stepen korelacije, ali kao što se vidi sa dijagrama, dobijena funkcionalna veza je slična onoj dobijenoj na osnovu istraživanja za SCC mešavine sa letećim pepelom. Što se SCC mešavina sa spraešenim

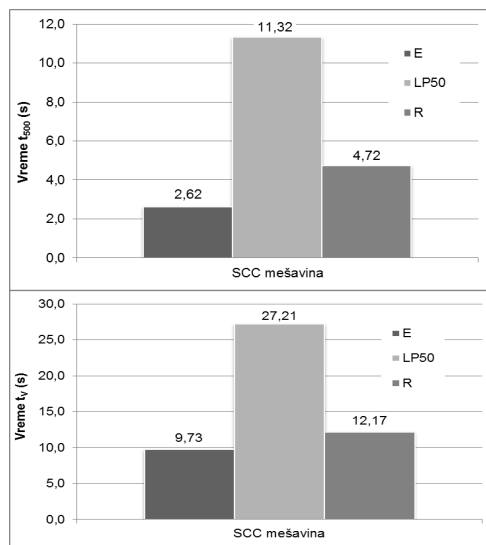
recikliranim betonom tiče, sa dijagrama se vidi da između tri SCC sa sprasjenim recikliranim betonom nema velikih razlika u ponašanju, pošto su sve tri tačke na dijagramu grupisane i pomerene u odnosu na referentni SCC. Takođe, kod SCC mešavina sa sprasjenim recikliranim betonom, promena vremena t_{500} je veća u odnosu na promenu vremena V-levka.



Slika 6. Zavisnost između vremena merenog metodom V-levka u funkciji od vremena t_{500} kod ispitivanih SCC mešavina

Uporedni prikazi vrednosti vremena t_{500} i vremena t_v , dobijenih kod svežih SCC mešavina sa letječim pepelom (LP50) i sa sprasjenim recikliranim betonom (R, kao osrednjena vrednost za R0, R50 i R100) prikazani su na slici 7. zajedno sa referentnom SCC

mešavinom spravljenom sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (E).



Slika 7. Uporedni prikaz vrednosti vremena t_{500} i t_v svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom

Kao što se to sa slike može videti, upotreba svakog od dva mineralna dodatka (letećeg pepela i spraešenog recikliranog betona), dovodi do porasta izmerene

vrednosti t_{500} kod metode rasprostiranja sleganjem i vrednosti t_v kod metode V-levka, u odnosu na referentnu mešavinu oznake E. Ova povećanja iznose 332,1% i 80,2% za upotrebu letećeg pepela i spraćenog recikliranog betona, respektivno, u slučaju vrednosti t_{500} kod metode rasprostiranja. Kod metode V-levka, povećanja iznose 179,7% i 25,0% za upotrebu letećeg pepela i spraćenog recikliranog betona, respektivno. Povećanje viskoznosti, odnosno smanjenje pokretljivosti SCC mešavine usled upotrebe ovih mineralnih dodataka, iako slabije izraženo kod primene spraćenog recikliranog betona, može se objasniti njihovom strukturom. Oba mineralna dodatka imaju generalno porozniju strukturu i lakše čestice nego krečnjačko brašno. Vrednosti izmerenih vremena t_{500} i t_v su više kod SCC mešavine sa letećim pepelom u odnosu na SCC mešavine sa spraćenim recikliranim betonom u iznosu od 58,3% i 55,3%, respektivno.

Poređenjem vrednosti rezultata ispitivanja metodom rasprostiranja sleganjem i metodom V-levka, može se uočiti da za sličnu sposobnost tečenja (merenu metodom rasprostiranja) ova dva mineralna dodatka prouzrokuju u odgovarajućim betonima veoma različite sposobnosti prolaska. Naime, dok je sposobnost prolaska SCC mešavina sa spraćenim recikliranim betonom približna sposobnosti prolaska referentne SCC mešavine, može se primetiti da je sposobnost prolaska SCC mešavine sa

letećim pepelom u iznosu od 50% u odnosu na ukupnu masu filera mnogo manja. Ako se tome doda i činjenica da je kod poslednje pomenute mešavine upotrebljena veća količina superplastifikatora (3% u odnosu na masu cementa u mešavini, dok je kod referentne mešavine i mešavina sa sprasanim recikliranim betonom ovaj procenat iznosio 2%), pomenuti efekat može predstavljati problem prilikom realne upotrebe ovakve SCC mešavine. Takođe, treba napomenuti da je poređenje mešavina samo na osnovu izmerene vrednosti rasprostiranja sleganjem neprihvatljivo, jer se tako ne bi uzeo u obzir efekat sposobnosti tečenja koji, kao što je to ovde evidentno, može da značajno varira, čak i za slične vrednosti rasprostiranja sleganjem.

Vrednosti zapreminske mase svežeg betona kod SCC mešavina E, LP10, LP20, LP50 iznosile su, respektivno, 2397, 2391, 2370, 2347 kg/m³. Pad vrednosti zapreminske mase svežeg betona, u funkciji povećanja sadržaja letećeg pepela, može se predstaviti u obliku:

$$\gamma = -1.31 \cdot p + 2399.2 \quad (r^2 = 0.895),$$

gde je: γ (kg/m³) zapreminska masa svežeg betona, a p (%) procenat zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom. Primećeni pad vrednosti zapreminske mase može se objasniti superponiranim dejstvom dva faktora: povećanjem sadržaja uvučenog vazduha, koje je

posledica pada konzistencije SCC, kao i povećanjem količine dodatog letećeg pepela. Naime, kod betona kruće konzistencije (betoni sa većim sadržajem letećeg pepela) sadržaj uvučenog vazduha je veći, jer nije primenjivano vibriranje pri ugradnji. Osim toga, leteći pepeo ima manju zapreminsku masu od krečnjačkog brašna koje zamenjuje, pa povećanjem količine letećeg pepela u SCC dolazi do neminovnog pada vrednosti zapreminske mase SCC.

U odnosu na referentni SCC spravljen bez sprášenog recikliranog betona (mešavina oznake E), kod koje je zapreminska masa svežeg SCC iznosila 2397 kg/m^3 , zapreminska masa kod svežih SCC sa zamenom 50% krečnjačkog brašna sprášenim recikliranim betonom iznosila je 2387 kg/m^3 , 2389 kg/m^3 i 2391 kg/m^3 za slučajeve kada je sprášeni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnim recikliranim agregatom, respektivno (SCC mešavine oznake R0, R50 i R100). Može se primetiti da je došlo do zanemarljivog pada vrednosti zapreminske mase svežeg SCC sa dodatkom sprášenog recikliranog betona. Ovaj pad se može objasniti (izmerenim) porastom sadržaja uvučenog vazduha, kao i prisustvom donekle lakših zrna malterske komponente u okviru sprášenog recikliranog betona.

Dok zapreminska masa sveže SCC mešavine može neznatno da opadne upotrebom spraćenog recikliranog betona u količini od 50% u odnosu na ukupnu količinu filera u SCC mešavini (0,3%), upotreba letećeg pepela ima za efekat značajniji pad vrednosti zapreminske mase sveže SCC mešavine (2,1%). Osim efekta granulometrijskog sastava filera, ovo je posledica karakteristika samih upotrebljenih filera. Leteći pepeo ima manju zapreminsku masu i po prirodi može imati veoma poroznu strukturu, pa se njegovim doziranjem može očekivati značajniji pad vrednosti zapreminske mase nego u slučaju da se dozira spraćeni reciklirani beton, koji osim malterske komponente (manje poroznosti nego leteći pepeo) sadrži i čestice spraćenog agregata (izuzetno male poroznosti i velike specifične mase). Zapreminska masa u svežem stanju SCC mešavine sa letećim pepelom niža je od zapreminske mase u svežem stanju SCC mešavine sa spraćenim recikliranim betonom u iznosu od 1,8% u odnosu na odgovarajuću vrednost kod SCC mešavine sa letećim pepelom.

Kada je reč o izmerenim vrednostima sadržaja uvučenog vazduha kod ispitivanih SCC mešavina, generalno posmatrano, ovaj sadržaj je rastao sa povećanjem količine dodatog letećeg pepela, kao i sa dodatkom spraćenog recikliranog betona, tabela 3. Ovo se može objasniti oblikom i strukturom zrna letećeg

pepela i izvesnim negativnim efektom na granulometriju čvrste faze u SCC. Generalno, sve vrednosti sadržaja uvučenog vazduha u SCC sa letećim pepelom kretale su se oko uobičajene vrednosti od 2%, što je postignuto bez ikakvog dodatnog kompaktiranja.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja sadržaja uvučenog vazduha kod SCC mešavina (%)

	E	LP10	LP20	LP50	R0	R50	R100
Sadržaj uvučenog vazduha	1,9	1,5	2,0	2,8	2,3	2,2	2,4

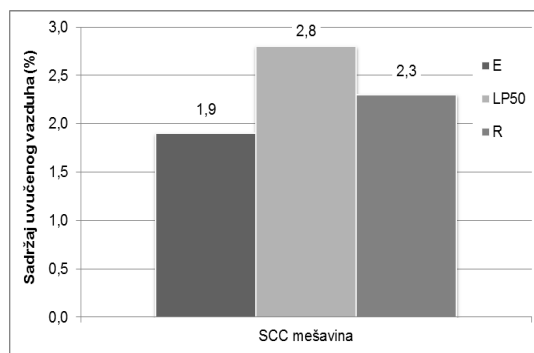
Na osnovu istraživanja u konkretnoj oblasti, veličina čestica letećeg pepela, zatim njihova glatka struktura i sferični oblik osnovni su razlozi koji idu u prilog tvrdnje da se upotrebom letećeg pepela može poboljšati ugradljivost pri određenom sadržaju vode (kada se leteći pepeo koristi u svojstvu delimične zamene cementa ili sitnog agregata [19]). Naime, istraživanje [12] je pokazalo da je moguće povećati sadržaj letećeg pepela do iznosa od 80% u SCC, uz neophodno povećanje vodopraškastog faktora i dozvoljeno smanjenje količine superplastifikatora. Međutim, u slučaju ovde prikazanih istraživanja pomenuta tvrdnja nije mogla biti potvrđena. U mešavini sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", zabeležen je suprotan efekat, tj. da bi se

dobila zadovoljavajuća SCC mešavina bilo je potrebno povećati doziranje superplastifikatora sa 2% na 3%. Ovaj efekat se može objasniti sastavom upotrebljenog letećeg pepela. Naime, upotrebljen je leteći pepeo u primljenom (dopremljenom) stanju, i kao takav sadržao je izvesnu količinu čestica veće krupnoće. Takođe, određen procenat čestica u sastavu upotrebljenih pepela sastojao se i od nesagorelih čestica, što je imalo dodatne negativne efekte na svojstva SCC mešavina u svežem i očvrslom stanju (smanjenje ugradljivosti, odnosno sposobnosti tečenja i sposobnosti prolaska između šipki armature).

Stav iz literature, da se dodavanjem letećeg pepela smanjuje opasnost od segregacije i izdvajanja vode na površini (pojava poznata i kao "bliding") [12], vizuelnom analizom svežih SCC je potvrđen, ali je takođe bio i u skladu sa prethodno diskutovanim kvantitativnim pokazateljima (rezultatima ispitivanja segregacije pomoću sita).

U odnosu na referentnu mešavinu E (spravljenu bez sprasenog recikliranog betona) u pitanju je prosečno procentualno povećanje sadržaja uvučenog vazduha od 20,1% (procentualna povećanja sadržaja vazduha od 15,8%, 21,1% i 26,3% za slučajeve kada je spraseni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnog recikliranog agregata, respektivno).

Uporedni prikaz vrednosti sadržaja uvučenog vazduha izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom prikazan je na slici 8. Na slici su: referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (E), SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera (LP50) i SCC mešavina sa 50% spraešenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera (osrednjena vrednost za sve SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom). Kada se porede vrednosti sadržaja uvučenog vazduha izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom, može se uočiti da SCC mešavine spravljene sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", kao i SCC mešavine spravljene sa 50% spraešenog recikliranog betona imaju veći sadržaj uvučenog vazduha nego referentna SCC mešavina. Povećanje iznosi 47,4% i 27,1% za upotrebu letećeg pepela i spraešenog recikliranog betona, respektivno.

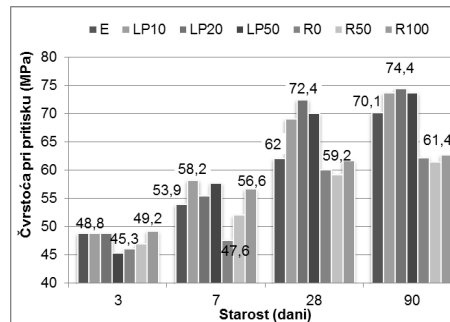


Slika 8. Uporedni prikaz sadržaja uvučenog vazduha izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom

5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA SCC MEŠAVINA U OČVRSLOM STANJU

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku (kocke ivice 10 cm) ispitivanih SCC mešavina pri starosti od 3, 7, 28 i 90 dana su prikazani na slici 9. Zbog bolje preglednosti na slici su, za sve starosti, prikazane tačne vrednosti samo za rezultate koji odgovaraju etalonskoj mešavini E, kao i najmanja i najveća dostignuta vrednost čvrstoće pri pritisku. Kod SCC sa letećim pepelom vrednosti čvrstoće pri pritisku su bile više u odnosu na SCC mešavinu E (mešavinu spravljenju bez

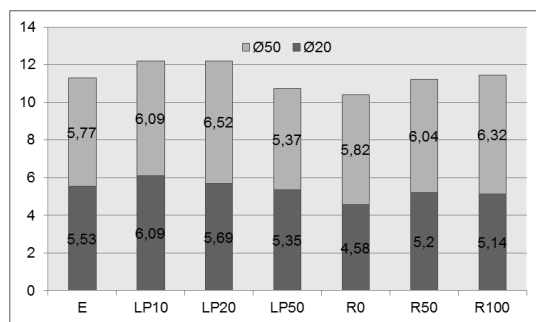
letećeg pepela) pri svim starostima, osim pri starosti od 3 dana, što se slaže sa rezultatima istraživanja koje je sproveo Siddique 2003. [18] za starosti od 7 do 180 dana, u istraživanju efekta delimične zamene peska letećim pepelom. Rezultati za starost od 3 dana pokazuju višu vrednost čvrstoće pri pritisku kod referentne mešavine, što se može objasniti kasnijim efektom pucolanske reakcije. Treba istaći da je pri svim starostima, osim pri starosti od 3 dana, SCC mešavina oznake LP50 pokazala 4,3-16,5% višu čvrstoću pri pritisku nego referentna mešavina spravljena bez letećeg pepela, oznake E. U tom smislu može se opaziti da je evidentan pozitivan efekat upotrebe letećeg pepela u odnosu na SCC mešavinu bez letećeg pepela.



Slika 9. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC mešavina

U proseku, ukoliko se zanemari poreklo sprasenog recikliranog betona, vrednosti čvrstoće pri pritisku kod SCC sa sprasenim recikliranim betonom u odnosu na referentnu SCC mešavinu su pri svim starostima bile niže, i to odstupanje iznosilo je 2,9-5,0% pri različitim starostima.

Osim pri starosti od 3 dana, pri svim starostima generalni odnos vrednosti rezultata ispitivanja referentne SCC mešavine, SCC mešavine sa letećim pepelom i SCC mešavine sa sprasenim recikliranim betonom je isti: mešavina sa letećim pepelom uvek ima višu čvrstoću pri pritisku u odnosu na referentnu SCC mešavinu (u granicama od 6,3% do 12,9%), a mešavina sa sprasenim recikliranim betonom uvek ima nižu čvrstoću pri pritisku u odnosu na referentnu SCC mešavinu (u granicama od 2,8% do 4,9%). Ovaj efekat kod SCC mešavine sa letećim pepelom je najverovatnije posledica činjenice da pucolanska reakcija (zaslužna za generalno poboljšanje strukture kod SCC sa letećim pepelom) pri malim starostima još nije dala rezultate u smislu povećanja čvrstoće pri pritisku, već je do izražaja došao isključivo fizičko-mehanički efekat prisustva zrna letećeg pepela (slabijih fizičko-mehaničkih karakteristika u odnosu na krečnjačko brašno).



Slika 10. Vrednosti athezije (MPa) svih SCC mešavina

Dijagram koji prikazuje vrednosti athezije svih SCC mešavina (ispitivanje obavljeno "pull-off" metodom [23]) prikazan je na slici 10. Pri ispitivanju athezije "pull-off" metodom, upotrebljeni su pečati sa dva različita prečnika (Ø20 mm i Ø50 mm), a ispitivanje je obavljeno pri starosti od 180 dana.

U slučaju upotrebe pečata prečnika Ø20 mm, može se reći da je došlo do pada vrednosti athezije pečata u odnosu na referentnu SCC mešavinu pri zameni 50% krečnjačkog brašna letećim pepelom (3,3%) ili sprasanim recikliranim betonom (11,2%) iste mase. U slučaju upotrebe pečata prečnika Ø50 mm, može se reći da je došlo do pada vrednosti athezije pečata u odnosu na referentnu SCC mešavinu pri zameni 50% krečnjačkog brašna letećim pepelom (6,9%) iste mase,

odnosno do porasta (8,8%) vrednosti athezije pečata u odnosu na referentnu SCC mešavinu pri zameni 50% krečnjačkog brašna sprasenim recikliranim betonom iste mase.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem prema [22] i čvrstoće pri zatezanju savijanjem prema [26] na predmetnim SCC mešavinama dati su u tabeli 4.

Tabela 4. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem savijanjem SCC mešavina (MPa)

	E	LP10	LP20	LP50	R0	R50	R100
$f_{z,c,63}$	3,9	4,2	4,8	4,1	3,37	3,58	3,51
$f_{z,s,180}$	10,5	8,0	8,6	10,4	9,4	9,2	8,9

Generalno, došlo je do porasta čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod mešavina sa letećim pepelom i do njenog pada kod mešavina sa sprasenim recikliranim betonom. U slučaju mešavina sa letećim pepelom, ovaj porast nije pratio povećanje količine letećeg pepela. Procentualna razlika vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem u odnosu na referentnu SCC mešavinu (spravljenu sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera) predstavlja povećanje od 3,5% u slučaju SCC mešavine sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera i pad vrednosti od 10,1% u slučaju

prosečne vrednosti SCC mešavina sa 50% sprášenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera.

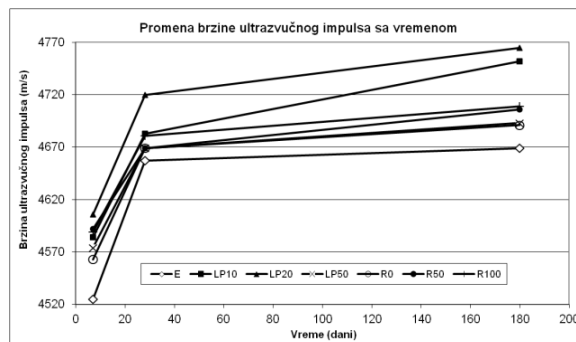
Kod SCC mešavina sa letećim pepelom i kod SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom došlo je do pada čvrstoće pri zatezanju savijanjem u odnosu na referentnu mešavinu E. U slučaju mešavina sa letećim pepelom, ovaj pad bio je izraženiji sa smanjenjem količine letećeg pepela u mešavini (i iznosio je 23,8%, 18,1% i 1,0% kod SCC mešavina oznake LP10, LP20 i LP50, respektivno). Navodi iz literature (Siddique 2003. [18]) prema kojima se za delimičnu zamenu sitnog agregata letećim pepelom (10%, 20%, 30%, 40% i 50%) postiže viša vrednost čvrstoće pri zatezanju cepanjem i pri zatezanju savijanjem, nisu mogli biti potvrđeni.

Sa povećanjem recikliranog krupnog agregata u betonu koji je sprášen i upotrebljen kao filer u odgovarajuće tri SCC mešavine došlo je do smanjenja čvrstoće pri zatezanju cepanjem u iznosu od 10,5%, 12,4% i 15,2% kod SCC mešavina oznake R0, R50 i R100, respektivno. Ispitivanje je obavljeno pri starosti od 180 dana.

U poređnom analizom čvrstoće pri savijanju kod SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim recikliranim betonom može se primetiti da je kod primene letećeg pepela došlo do neznatnog pada (1%) čvrstoće pri savijanju u odnosu na referentnu vrednost (dobijenu za SCC mešavinu spravljenju sa krečnjačkim

brašnom u svojstvu filera), a da je pad u slučaju upotrebe prašenog recikliranog betona (u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera) iznosio 15,2%.

Promena vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa praćena je na uzorcima izrađenim od svih ispitivanih SCC mešavina, do starosti od 180 dana. Na slici 11 su prikazane vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa za sve ispitivane betone u funkciji od starosti betona.

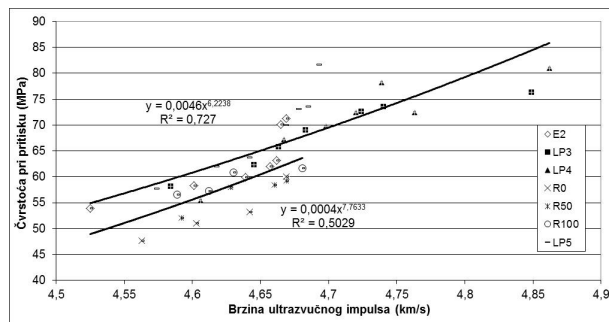


Slika 11. Izmerene vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa za ispitivane betone pri starostima od 7, 28 i 180 dana

Kao što se vidi, najniže vrednosti ultrazvučnog impulsa pri svim starostima je imao referentni beton oznake E, a najviše SCC mešavina sa 20% zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom (mešavina oznake

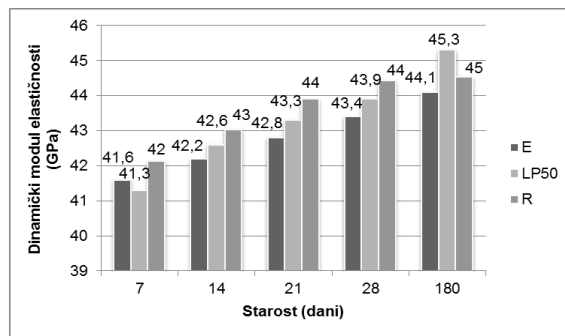
LP20). Vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa za ostale mešavine pozicionirane su između dve pomenute zavisnosti i mogu se smatrati bliskim, naročito kada se posmatraju R0, R50 i R100.

Zavisnost između vrednosti čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa za sve ispitivane betone prikazana je na slici 12. Radi jednostavnije analize dobijenih rezultata, formirane su samo dve regresione funkcionalne zavisnosti, jedna za betone sa različitim sadržajima letećeg pepela, a druga za betone sa spršenim betonom različitog porekla. Kao što se vidi iz priloženog grafičkog prikaza, regresiona funkcionalna zavisnost formirana za betone sa spršenim recikliranim betonom je niža od zavisnosti formirane za betone sa letećim pepelom, što znači da za iste izmerene vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa betoni sa spršenim recikliranim betonom u svojstvu zamene dela filera imaju generalno niže (cca 5 MPa) vrednosti čvrstoće pri pritisku.



Slika 12. Zavisnost između vrednosti čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa za sve ispitivane betone

Vrednosti dinamičkog modula elastičnosti zabeležene pri starosti od 7, 14, 21, 28 i 180 dana kod svih SCC mešavina prikazane su na slici 13. Na slici su referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera, SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera i SCC mešavina sa 50% spraćenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera označene oznakama E, LP50 i R (osrednjena vrednost za SCC mešavine sa spraćenim recikliranim betonom), respektivno.



Slika 13. Uporedni prikaz dinamičkog modula elastičnosti kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim recikliranim betonom

Na osnovu prikazane grafičke predstave može se primetiti da su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod mešavine LP50 (sa letećim pepelom u svojstvu 50% mase filera) uvek više (od 0,7% do 2,7%) od odgovarajućih vrednosti kod referentne mešavine E. Sličan je efekat i u slučaju upotrebe spršenog recikliranog agregata, gde se porasti kreću u granicama od 1,0% do 2,6%. Takođe, osim pri starosti od 180 dana, može se reći da su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa spršenim recikliranim agregatom po pravilu bile 1-2% više od

odgovarajućih vrednosti kod SCC sa letećim pepelom doziranim u istoj količini.

6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Kao što je već napomenuto, u skladu sa opredeljenjem za implementaciju i promociju održivog razvoja u oblasti graditeljstva, sa jedne, kao i potrebom za boljim sagledavanjem fenomenologije upotrebe različitih mineralnih dodataka na bazi industrijskih nusprodukata kao komponentnog materijala u samozbijajućim betonima (Self-Compacting Concrete, kraće SCC), obavljena su opsežna ispitivanja SCC mešavina u svežem i očvrslom stanju, radi detaljnog istraživanja svojstava ovih betona. Ispitivanja u okviru ovog rada obuhvatila su praćenje uticaja zamene dela filera na sva tri svojstva svežeg SCC: sposobnost tečenja, sposobnost prolaska i otpornost prema segregaciji, dok je u očvrslom stanju istraživao uticaj zamene dela filera na čvrstoću pri pritisku, čvrstoću pri zatezanju cepanjem, čvrstoću pri zatezanju savijanjem, ateziju, brzinu ultrazvučnog impulsa i dinamički modul elastičnosti. Za primenu u svojstvu mineralnog dodatka u sklopu sprovedenih ispitivanja su izabrani sledeći industrijski nusprodukti: leteći pepeo i sprášeni reciklirani beton. Pri tome je variran sadržaj i poreklo letećeg pepela u SCC mešavinama sa letećim pepelom,

odnosno sadržaj spraćenog recikliranog betona u SCC mešavinama sa spraćenim recikliranim betonom, pri konstantnim ostalim kolićinama materijala: cementa, vode, sitnog (rećnog peska) i krupnog agregata (druge i treće frakcije prirodnog rećnog agregata). U mešavinama je upotrebljen čist cement PC 42,5R i voda iz vodovoda, u konstantnim kolićinama.

Kod svih ispitivanih mešavina SCC sa letećim pepelom (10%, 20% i 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara") sa povećanjem kolićine doziranog letećeg pepela došlo je do pada obradljivosti u odnosu na referentnu mešavinu, spravljenju sa istom kolićinom vode, što je u saglasnosti sa stavovima drugih autora [19]. Ovaj pad obradljivosti ogledao se u: smanjenju sposobnosti tećenja, smanjenju sposobnosti prolaska i povećanju otpornosti prema segregaciji. Kod svih ispitivanih mešavina SCC sa spraćenim recikliranim betonom došlo je do pada obradljivosti u odnosu na referentnu mešavinu, spravljenju sa istom kolićinom vode, nezavisno od tipa primenjenog spraćenog recikliranog betona. Uopšteno posmatrano, svi SCC spravljeni sa recikliranim spraćenim betonom pokazali su veoma slično ponašanje i opažanja u vezi sa njihovim ponašanjem u najvećem broju slučajeva se mogu svesti na efekat doziranja spraćenog recikliranog betona, nezavisno od vrste ("A", "B" ili "C").

Na osnovu poređenja svojstava SCC mešavina u svežem stanju može se reći da bolju sposobnost tečenja (mereno pomoću metode rasprostiranja sleganjem – 1,8% u odnosu na referentnu mešavinu E, kao i pomoću vremena t_{500} i t_v , koje su oko 55% više kod SCC sa letećim pepelom) ima mešavina sa spršenim recikliranim betonom, za sličnu sposobnost prolaska (mereno pomoću L-boksa), dok bolju otpornost prema segregaciji (162% viša vrednost faktora segregacije u odnosu na referentnu mešavinu E) ima SCC mešavina sa letećim pepelom. Pri tome je zapreminska masa 1,8% niža, a komplementno, sadržaj uvučenog vazduha 17,9% viši, kod SCC mešavine sa letećim pepelom.

Što se tiče zapreminske mase svežeg betona, došlo je do pada njene vrednosti sa dodatkom letećeg pepela, u funkciji od povećanja sadržaja letećeg pepela (cca 0,5% na svakih 10% zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom). Kada je u pitanju zapreminska masa svežeg SCC sa spršenim recikliranim betonom, može se zaključiti da je došlo do manjeg ukupnog pada (0,8%) njene vrednosti usled zamene 50% krečnjačkog brašna spršenim recikliranim betonom, nezavisno od porekla spršenog recikliranog betona. Ovaj pad može se objasniti (izmerenim) porastom sadržaja uvučenog vazduha, kao i prisustvom donekle lakših zrna malterske komponente u okviru spršenog recikliranog betona. Generalno, sve vrednosti sadržaja uvučenog vazduha u

SCC sa letećim pepelom i spraešenim recikliranim betonom kretale su se oko uobičajene vrednosti od 2%, što je postignuto bez ikakvog dodatnog kompaktiranja i rastao je neznatno sa povećanjem količine dodatog letećeg pepela, odnosno spraešenog recikliranog betona.

Na osnovu ispitivanja čvrstoće pri pritisku može se zaključiti da je zamena određenog masenog procenta krečnjačkog brašna letećim pepelom imala pozitivan efekat na čvrstoću pri pritisku SCC mešavina, naročito pri većim starostima. Na ispitivanim SCC mešavinama su izmerene do 16,8% više vrednosti čvrstoće pri pritisku (pri starosti od 28 dana) u odnosu na referentnu mešavinu oznake E (bez letećeg pepela). Ovaj efekat se može pripisati pucolanskom efektu letećeg pepela. Sa aspekta količine doziranog letećeg pepela, može se izvesti konačan zaključak da je povećanje količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera imalo pozitivne efekte u pogledu čvrstoće pri pritisku, naročito pri količinama do 20% u odnosu na ukupnu masu filera. Kada je reč o SCC mešavinama sa spraešenim recikliranim betonom, može se reći da je u najvećem broju slučajeva došlo do pada vrednosti čvrstoće pri pritisku (do 11,2% pri starosti od 28 dana) u odnosu na referentnu mešavinu. Sa vremenom, zabeležen je sličan porast čvrstoće za sve mešavine. Može se izvesti generalni zaključak da je upotreba spraešenog recikliranog betona u istoj količini kao i letećeg pepela

suprotnog efekta u smislu čvrstoće pri pritisku, jer rezultira padom vrednosti čvrstoće pri pritisku od 7,7% u odnosu na SCC mešavinu sa letećim pepelom.

Vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem, pri zatezanju cepanjem i athezije SCC sa letećim pepelom nisu značajnije odstupale od odgovarajućih vrednosti zabeleženih kod referentne mešavine E. Mešavina oznake LP20 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) imala je najviše vrednosti u odnosu na sve ispitivane SCC mešavine (u proseku do 10% pri starosti od 28 dana). Može se izvesti generalni zaključak da vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem, pri zatezanju cepanjem i athezije načelno opadaju (cca 8-12%) sa promenom vrste spršenog betona u SCC.

Porast količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera kod SCC mešavina rezultira padom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa SCC mešavine (u iznosu do 1%), nezavisno od vrste upotrebljenog letećeg pepela i nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju. Upotreba spršenog recikliranog betona u svojstvu filera kod SCC mešavina rezultira porastom (najviše 1,5% pri starosti od 7 dana) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa SCC mešavine.

Povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" sa 10% na 20% i 50% u odnosu na ukupnu

masu filera rezultiralo je padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d u iznosu od 0,2% (za povećanje sa 10% na 20%) i 3,7-4,9% (za povećanje sa 10% na 50%) pri svim starostima. U zavisnosti od porekla upotrebljenog spraćenog recikliranog betona, najveći pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti (1,8-3,7%) uvek je bio kod SCC mešavine spravljen sa spraćenim recikliranim betonom poreklom od NVC sa 50% recikliranog betona u svojstvu krupnog agregata, a najmanji (0,5-1,9%) kod SCC mešavine spravljen sa spraćenim recikliranim betonom poreklom od NVC.

Prosečna vrednost čvrstoće pri zatezanju cepanjem SCC mešavina sa spraćenim recikliranim betonom niža je 14,6% nego odgovarajuća vrednost kod mešavine sa letećim pepelom, pri starosti od 63 dana. Čvrstoća pri savijanju je niža kod SCC mešavina sa spraćenim recikliranim betonom u iznosu od 11,9% u odnosu na vrednost čvrstoće pri savijanju SCC mešavine sa letećim pepelom, pri starosti od 180 dana. Kada su ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem, savijanjem i athezije u pitanju, može se izvesti generalna konstatacija da se ove veličine ne menjaju značajno sa promenom vrste spraćenog betona u SCC. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem kod ova tri betona ostaje približno nezavisna od sadržaja krupnog agregata u spraćenom betonu. U slučaju da se zanemari vrsta upotrebljenog spraćenog recikliranog betona, primećuje se da zamena

krečnjačkog brašna sprasnim betonom u iznosu od 50% rezultira padom vrednosti posmatranih svojstava. Ovaj pad je najuočljiviji u slučaju čvrstoće pri zatezanju savijanjem (13%), ali je značajan i kod čvrstoće pri zatezanju cepanjem (11%).

Pri starostima do 28 dana SCC mešavina sa letećim pepelom ima 1,0-2,0% nižu vrednost dinamičkog modula elastičnosti, a pri starosti od 180 dana 1,7% višu vrednost u odnosu na prosečnu vrednost za SCC mešavine sa sprasnim recikliranim betonom. Kada je u pitanju brzina ultrazvučnog impulsa, može se izvesti zaključak da su sve izmerene vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa relativno bliske, odnosno da se kreću u relativno uskim granicama od najviše 0,7% (za starost od 180 dana) i da su u svim slučajevima brzine ultrazvučnog impulsa izmerene kod SCC mešavine sa 50% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera niže nego brzine ultrazvučnog impulsa izmerene kod proseka za SCC mešavine sa 50% sprasnog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera.

Međusobnim poređenjem sračunatih funkcionalnih zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprasnim recikliranim betonom može se zaključiti da je za SCC mešavine sa sprasnim recikliranim betonom dobijena funkcionalna

zavisnost ispod zavisnosti formirane za mešavine sa letećim pepelom.

Ispitivanja prikazana u ovom radu imaju veliki značaj za praktičnu primenu u graditeljstvu. Treba pomenuti i to da je u svetskim okvirima upotreba letećeg pepela (bila ona stimulisana regulativama ili ne) značajno veća nego u Srbiji i iznosi oko 90% proizvedenog letećeg pepela. U tom smislu, povećanje količine raspoloživih resursa za spravljanje SCC mešavina sa jedne i pozitivan uticaj na životnu sredinu kroz smanjenje količine ovih industrijskih nusprodukata na deponijama, sa druge strane, dva su osnovna pozitivna efekta koja bi trebalo da proizađu iz ovog i sličnih istraživanja.

7. ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR 36017 pod nazivom: "Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji".

8. LITERATURA

- [1] DACZKO J.A.: *Self-Consolidating Concrete: Applying what we know*, Spon Press, UK, (2012)
- [2] DEHN F, HOLSCHEMACHER K, WEIBE D.: *Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour*, LACER 5, 115-124, (2000)
- [3] ESPING O.: *Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research 38, 938–944, (2008)
- [4] EUROPEAN GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE: *Specification, Production and Use*, European Project Group, (2005)
- [5] GRDIĆ Z.J., TOPLIČIĆ-ČURČIĆ G.A., DESPOTOVIĆ I.M., RISTIĆ N.S.: *Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate*, Construction and Building Materials 24 (7), 1129-1133, (2010)
- [6] HOLSCHEMACHER K, KLUG Y.: *A database for the evaluation of hardened properties of SCC*, LACER 7, 124-134, (2002)
- [7] IGNJATOVIĆ I., MARINKOVIĆ S., MIŠKOVIĆ Z., SAVIĆ A.: *Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading*, Materials and Structures 46(6), 1045-1059, (2013)

- [8] JEVTIĆ, D.: *Monografija - Svojstva svežeg i očvrsllog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, (1996)
- [9] JEVTIĆ D., ZAKIĆ D., SAVIĆ A., RADEVIĆ A.: *Properties of self compacting concrete reinforced with steel and synthetic fibers*, International Symposium about research and application of modern achievements in civil engineering in the field of materials and structures, Society for materials and structures testing of Serbia, DIMK, Tara, Proceedings, 115-124., (2011)
- [10] JEVTIĆ D., ZAKIĆ D., SAVIĆ A.: *Specifičnosti tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata*, Materijali i konstrukcije 1, LII, 52-62., (2009)
- [11] KHAYAT K.H., GUIZANI Z.: *Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete*, ACI Materials 94(4), 332-341, (1997)
- [12] LIU, M.: *Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete*, PhD thesis, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, (2009)
- [13] NAWA T, IZUMI T, EDAMATSU Y.: *State-of-the-art report on materials and design of self-compacting concrete*, International Workshop on Self-Compacting Concrete, 160-190, (1998)

- [14] OKAMURA H., MAEKAWA K., OZAWA K.: *High performance concrete*, Giho-do Press, Tokyo, (1993)
- [15] OKAMURA, H., OUCHI, M.: *Self-Compacting Concrete, Development, Present Use and Future*, Proceedings of the First International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications S.A.R.L, France 3-14, (1999)
- [16] OKAMURA H., OZAWA K.: *Self-compactable high-performance concrete in Japan*, International Workshop on High-performance Concrete, 1-16, (1994)
- [17] RIXOM, M. R.: *Development of an admixture to produce flowing or self-compacting concrete*, Precast concrete, Vol. 5, No. 11, 633-637, (1974)
- [18] SIDDIQUE R.: *Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete*, Cement and Concrete Research 33 (4), 539-547, (2003)
- [19] SIDDIQUE R.: *Waste Materials and By-Products in Concrete*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008)
- [20] SRPS B.B2.010:1986 *Separisani agregat (granulat) za beton - Tehnički uslovi*, Institut za standardizaciju Srbije, (1986)
- [21] SRPS B.B8.036:1982 *Kameni agregat - Određivanje količine sitnih čestica metodom mokrog sejanja*, Institut za standardizaciju Srbije, (1982)

- [22] SRPS EN 12390-6:2010 *Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 6: Čvrstoća pri zatezanju cepanjem uzoraka za ispitivanje*, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)
- [23] SRPS EN 1542:2010 *Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Metode ispitivanja - Merenje prionljivosti "pull-off" metodom*, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)
- [24] SRPS EN 933-1:2009 *Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava - Metoda prosejavanja*, Institut za standardizaciju Srbije, (2009)
- [25] SRPS EN 12350-10:2010 *Deo 10: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću L-kutije*, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)
- [26] SRPS ISO 4013:2000 *Beton. Određivanje čvrstoće epruveta pri savijanju*, Institut za standardizaciju Srbije, (2000)
- [27] TECHNICAL REPORT NO.62 - *Self-compacting concrete: a review*. Day RTU, Holton IX, editors, Camberley, UK, Concrete Society, Surrey GU17 9AB, UK, The Concrete Society, BRE, (2005)
- [28] ŽIVKOVIĆ S.: *Samougradljivi betoni trajnije armiranobetonske konstrukcije*, Građevinski materijali i konstrukcije, vol. 46(3-4), 14-23, (2003)