

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Aleksandar R. Savić

**ISTRAŽIVANJE SVOJSTAVA SVEŽEG I
OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG
BETONA SA MINERALNIM DODACIMA
NA BAZI INDUSTRIJSKIH
NUSPRODUKATA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Aleksandar R. Savić

**INVESTIGATION OF THE PROPERTIES
OF FRESH AND HARDENED SELF-
COMPACTING CONCRETE WITH
MINERAL ADDITIONS BASED ON
INDUSTRIAL BY-PRODUCTS**

doctoral thesis

Beograd, 2015.

Komentori: Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.
Redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Prof. dr Tatjana Volkov-Husović, dipl.inž.tehn.
Redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Članovi komisije: Prof. dr Snežana Marinković, dipl.građ.inž.
Redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Datum odbrane:

Vuku

Zahvalnost

Posebnu zahvalnost upućujem članovima komisije: mentorima Prof. dr Dragici Jevtić i Prof. dr Tatjani Volkov-Husović, kao i Prof. dr Snežani Marinković na podršci, korisnim sugestijama i profesionalnim savetima koje su mi pružali tokom celokupnog procesa izrade ovog rada. Zahvaljujem se i svojim profesorima, kolegama, porodici i prijateljima na podršci koju su mi, svako na svoj način, pružili tokom rada.

Eksperimentalno istraživanje su svojim donacijama komponentnih materijala pomogli: GP Zlatibor-gradnja Beograd d.o.o., BASF Srbija i LAFARGE Srbija, i ovom prilikom želim da im se zahvalim na ovom velikom gestu i uloženom trudu. Bez pomenute pomoći istraživanje predstavljeno u ovom radu ne bi moglo biti obavljeno.

Takođe, veliku zahvalnost želim da izrazim kolegama iz firmi GP "Mostogradnja" d.o.o., Institut IMS a.d., Institut za Puteve a.d., "MC Bauchemie" koje su ustupile kalupe na upotrebu prilikom izrade uzoraka, obzirom da veliki broj uzoraka, definisan obimom i dinamikom ispitivanja u ovom radu, nije mogao biti izrađen samo upotrebom kalupa kojima raspolaže Laboratorija za materijale Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Uređaj za ispitivanje prema metodi V-levka pozajmljen je iz Laboratorije za beton firme "Energoprojekt Visokogradnja" a.d. Pomoć u vidu stručnih konsultacija sa kolegama iz svih pomenutih firmi bila je uvek dobrodošla i izuzetno korisna.

Zahvaljujem se kolegama iz Instituta za materijale i konstrukcije, naročito kolegama iz Laboratorije za materijale na pomoći i podršci, kao i studentima-demonstratorima i svim studentima koji su mi pomogli prilikom spravljanja betonskih mešavina, pokazujući pritom veoma visoki stepen odgovornosti i zalaganja.

Beograd, januar 2015.

Autor

Podaci o doktorskoj disertaciji:

Naslov
doktorske
disertacije:

Istraživanje svojstava svežeg i očvrsllog samozbijajućeg betona sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata

Rezime:

Beton, kao jedan od najčešće upotrebljivanih materijala u građevinskoj industriji evoluirao je sa razvojem građevinarstva, 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. Tehnološka operacija kompaktiranja tradicionalno igra ključnu ulogu u proizvodnji kvalitetnog betona sa optimalnom čvrstoćom i trajnošću.

Razvoj hemijskih dodataka tipa superplastifikatora omogućio je lakše ugrađivanje betona, pošto se malim doziranjem ovakvog hemijskog dodatka mogu smanjiti sile trenja između čvrstih čestica, što za rezultat daje pokretljivije i obradljivije betone (betone tečnijih konzistencija) koje je lakše ugraditi, uz zadržavanje iste količine vode. Ekstrapolacijom koncepta upotrebe superplastifikatora u pravcu dobijanja betona tečnijih konzistencija došlo se do koncepta 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 sastav samozbijajućeg betona, po pravilu, ulaze veoma fini mineralni dodaci, od kojih su najčešće primenjivani krečnjačko i dolomitno brašno, kao i leteći pepeo. U okviru eksperimentalnog rada u ovoj disertaciji je, osim letećeg pepela (poreklom iz dve termoelektre, TE "Kolubara" i TE "Kostolac") upotrebljen i sprášeni reciklirani beton (dobijen rušenjem dotrajalih armiranobetonskih konstrukcija, odnosno drobljenjem kontrolnih laboratorijskih kocki) i sprášeni elementarni sumpor (koji se dobija kao nusprodukt u naftnoj industriji, u Rafineriji nafte Pančevo).

U okviru eksperimentalnog rada spravljeno je i detaljno ispitivano 11 mešavina SCC: dve referentne SCC mešavine sa krečnjačkim brašnom kao mineralnim dodatkom, pet mešavina sa letećim pepelom, tri mešavine sa sprášenim recikliranim betonom i četiri mešavine sa sprášenim sumporom. Prethodno je prilikom definisanja recepture za SCC mešavine spravljeno i ispitano 12 probnih (pilot) mešavina. Sve navedene mešavine, osim dve probne (pilot) mešavine, imale su svojstva koja karakterišu samozbijajuće betone.

Primenjena opsežna ispitivanja svežeg i očvrslog SCC su (u skladu sa projektovanim svojstvima u svežem stanju, istraživanim svojstvima u aktuelnim studijama iz konkretne oblasti, kao i raspoloživim količinama komponentnih materijala) uključila veliki broj metoda, sa ciljem detaljnog utvrđivanja svojstava predmetnih SCC. U svežem stanju ispitivani su zapreminska masa, rasprostiranje sleganjem, vremena t_{500} (kod metode rasprostiranja) i t_v (kod metode V-levka), vrednosti merene na L-boksu, U-boksu, sadržaj uvučenog vazduha, a merena je i ambijentalna temperatura kao važan parametar za analizu svojstava svežeg betona. U očvrslom stanju ispitivani su: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju savijanjem, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, athezija čeličnih pečata za betonsku podlogu ("pull-off" metoda), statički modul elastičnosti, otpornost prema dejstvu mraza, vodonepropustljivost, otpornost prema dejstvu mraza i soli, nedestruktivna ispitivanja (dinamički modul elastičnosti, rezonantna frekvencija, brzina ultrazvučnog impulsa) sa praćenjem odgovarajućih svojstava do starosti od 180 dana. U cilju bolje karakterizacije strukture betona vršena je i analiza pomoću SEM (*Scanning Electron Microscope*) metode, praćena odgovarajućim EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometer*) analizama komponentnih materijala i betona sa različitim dodacima.

Kada je reč o rezultatima ispitivanja sprovedenih u okviru ovog rada, kod razmatranih SCC mešavina sa letećim pepelom je rasprostiranje sleganjem iznosilo 66.4 cm do 73.8 cm, a vremena merena metodom V-levka bila su u granicama od 15.9 s do 27.2 s. Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana kod ovih SCC mešavina kretala se u granicama od 68.8 MPa do 72.4 MPa, a pri istoj starosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem i pri savijanju u granicama 4.2-4.4 MPa i 10.1-11.5 MPa, respektivno. Statički modul elastičnosti pri starosti od 28 dana kretao se u granicama 35.1-37.3 GPa, a dinamički 43.9-45.6 GPa, dok je brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton pri istoj starosti bila u granicama od 4668-4720 m/s. Sve SCC mešavine sa letećim pepelom bile su otporne na dejstvo vode pod pritiskom, na simultano dejstvo mraza i soli, a postigle su marku otpornosti na dejstvo mraza M200. Do starosti od 180 dana deformacija skupljanja ovih betona dostigla je vrednosti u granicama 0.487-0.513‰.

Što se tiče rezultata ispitivanja SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom, rasprostiranje sleganjem kod ovih mešavina kretalo se u granicama od 69.5 cm do 73.0 cm, a vremena merena metodom V-levka bila su u granicama od 11.4 s do 13.2 s. Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana kod ovih SCC mešavina kretala se u granicama od 59.2 MPa do 61.6 MPa. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem i pri savijanju kod ovih serija kretala se u granicama 3.4-3.6 MPa (pri starosti od 63 dana) i 8.9-9.4 MPa (pri starosti od 180 dana), respektivno. Pri starosti od 28 dana dinamički modul elastičnosti SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom kretao se u granicama 44.2-44.9 GPa, dok je brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton pri istoj starosti bila u granicama od 4669-4681 m/s. Sve SCC

mešavine sa spraešenim recikliranim betonom bile su otporne na dejstvo vode pod pritiskom.

Kada je reč o SCC mešavinama sa spraešenim sumporom, rasprostiranje sleganjem kod ovih mešavina iznosilo je 77.5 cm do 82.0 cm, a vremena merena metodom V-levka bila su u granicama od 8.2 s do 10.5 s. Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana kod ovih SCC mešavina kretala se u granicama od 54.6 MPa do 62.2 MPa. Čvrstoća pri savijanju kod ovih serija kretala se u granicama 6.9-8.6 MPa (pri starosti od 180 dana). Pri starosti od 28 dana dinamički modul elastičnosti SCC mešavina sa spraešenim sumporom kretao se u granicama 41.5-43.4 GPa, dok je brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton pri istoj starosti bila u granicama od 4589-4636 m/s.

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. Izvršeno je i poređenje razmatranih fizičko-mehaničkih svojstava SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima i izvedeni su odgovarajući zaključci. Rezultati ispitivanja obavljenih u okviru ove disertacije upoređeni su sa rezultatima dostupnim iz literature, te je data odgovarajuća diskusija u vezi sa time. U slučajevima kada je to bilo moguće, metodom regresione analize izvedeni su i izrazi za analitičke zavisnosti razmatranih svojstava SCC mešavina, sa odgovarajućim koeficijentima korelacije.

Primena principa održivog razvoja u graditeljstvu osnovni je motiv za usvojenu koncepciju istraživanja iz ovog rada. Upotreba industrijskih nusprodukata u svojstvu mineralnog dodatka (filera) kritički je procenjena sa aspekta njihovog uticaja na svojstva SCC betona u svežem i očvrslom stanju. 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, cement, mineralni dodaci, industrijski nusprodukti, eksperimentalna ispitivanja, fizičko-mehanička svojstva

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Građevinski materijali, tehnologija betona i ispitivanje konstrukcija

UDK broj:

Data on doctoral dissertation:

Title of
doctoral
dissertation:

Investigation of the properties of fresh and hardened self-compacting concrete with mineral additions based on industrial by-products

Abstract:

Concrete, as one of the most commonly used materials in the construction industry, has evolved with the development of construction, from the beginning to the present day. Placing of conventional concrete is usually done with the use of vibrating equipment to help in reduction of entrained air content, eliminating the possibility of cavities occurrence in contact with reinforcement and formwork (the so-called *Normal Vibrated Concrete*, NVC). Concrete becomes more compact, denser and more homogeneous, which are the basic aspects for an acceptable behavior in the structure. This operation, compaction, traditionally plays a key role in the production of high quality concrete, with optimum strength and durability.

Development of superplasticizers (chemical admixtures for concrete) allowed easier placing of concrete with stiffer consistency; a small dosage of this type of chemical admixtures can reduce the friction between the particles, which results in more mobile and workable concrete (concrete with fluid consistency) that is easier to place in formwork, while maintaining the same amount of water. Extrapolation of the concept of the superplasticizers use towards obtaining concrete with fluid consistency led to the concept of *Self-compacting Concrete* - SCC for short. Self-compacting concrete, is defined as a concrete mix that can be placed purely by means of its own weight, with little or no vibration and is a highly flowable concrete that spreads into place, fills formwork, and wraps even the most congested reinforcement, and showing no signs of segregation.

Typically, SCC contains certain quantities of very fine mineral additions; the most commonly applied are limestone and dolomite powder and fly ash. Within the experimental work in this thesis, besides fly ash (originating from two power plants, "Kolubara" and "Kostolac"), recycled pulverized concrete (obtained by demolition of old concrete structures) and powdered elemental sulfur (which is obtained as a by-product of the petrol industry, in Pancevo Oil Refinery).

Within this experimental work, 11 mixtures of SCC were prepared, two reference SCC mixtures with limestone powder as mineral addition, five mixtures with fly ash, three mixtures with ground recycled concrete and four mixtures with ground elemental sulfur. Also, during the proces of defining the composition of SCC mixtures, 12 test (pilot) mixtures were made and investigated. All mixtures, except two test mixtures, could be characterized as self-compacting concrete, based on their fresh properties.

The applied extensive testing of fresh and hardened SCC (with respect to the designed properties of fresh SCC, the research findings of the recent

studies in the world, and also with respect to the available quantities of component materials) included a number of methods, with the aim of determining the detailed properties of these SCC mixtures. Fresh SCC investigations included: density, slump flow, t_{500} and V-funnel (t_v) times, the values measured in the L-box, U-box, entrained air content, and also measuring the ambient temperature, as an important parameter for the analysis of the properties of fresh concrete. Hardened SCC properties testing included: compressive strength, tensile flexural strength, tensile splitting strength, adhesion of the steel seals to the concrete surface ("pull-off" method), static modulus of elasticity, water tightness, resistance to the effects of freeze and thaw, resistance to the combined effects of frost and salt, non-destructive testing (dynamic elastic modulus, the resonance frequency, the ultrasonic pulse velocity), with the properties monitoring during period of 180 days. In order to better characterize the structure of concrete, the analysis using the SEM microscope was performed, with the corresponding EDS (*Eneergy Dispersive X-ray Spectrometer*) analysis of the component materials of concrete with different mineral additions.

As for the results of experimental investigations, slump flow for all SCC mixtures with fly ash was 66.4-73.8 cm, while V-funnel measured times were 15.9-27.2 s. Compressive strength of 28 days old samples was in a range of 68.8-72.4 MPa for all SCC mixtures, while, at the same age of samples, splitting tensile strength and flexural strength ranged 4.2-4.4 MPa and 10.1-11.5 MPa, respectively. Modulus of elasticity (static) was 35.1-37.3 GPa and dynamic modulus of elasticity was 43.9-45.6 GPa, while ultrasonic pulse velocity through investigated SCC mixtures amounted to 4668-4720 m/s, all at 28 days. The investigated SCC mixtures proved to be watertight, resistant to combined effects of frost and salt, freeze and thaw, and reached freeze and thaw grade of M200 (200 cycles of freeze and thaw). Shrinkage deformations reached values in a range of 0.487-0.513‰, through the period of 180 days.

Regarding SCC mixtures with ground recycled concrete, slump flow for all SCC mixtures was 69.5-73.0 cm, while V-funnel measured times were 11.4-13.2 s. Compressive strength at the age of 28 days ranged from 59.2 MPa to 61.6 MPa. Splitting tensile strength and flexural strength ranged 3.4-3.6 MPa (at 63 days) and 8.9-9.4 MPa (at 180 days), respectively. At the age of 28 days, dynamic modulus of elasticity of SCC mixtures with ground recycled concrete ranged 44.2-44.9 GPa, while ultrasonic pulse velocity through concrete at the same age reached 4669-4681 m/s. Investigation showed that these SCC mixtures proved to be water resistant.

As for the SCC mixtures with ground sulfur, slump flow of these mixtures was 77.5-82.0 cm, and V-funnel times were measured within 8.2 s and 10.5 s interval. Compressive strength at 28 days was 54.6-62.2 MPa. Flexural strength at the age of 180 days was in the range of 6.9-8.6 MPa. At the age of 28 days, dynamic modulus of elasticity of SCC mixtures with ground sulfur was 41.5-43.4 GPa and ultrasonic pulse velocity through concrete at the same age was 4589-4636 m/s.

Based on the results presented in this work, conclusions have been drawn regarding the change of monitored physical and mechanical properties of different SCC mixtures, as a function of quantities, origin and type of used mineral additions. Comparison of monitored physical and mechanical properties of different SCC mixtures with different mineral additions was also performed, leading to adequate conclusions. Results of investigations performed in this work have been compared with the results of other researchers, with related discussion. Whenever it was possible, analytical correlations were calculated with suitable correlation coefficients, using method of regression analysis.

Application of the principles of sustainable development in building industry was the motive for the adopted concept of research in this paper. The use of industrial by-products as a mineral supplement (filler) was critically evaluated in terms of their influence on the properties of SCC in the fresh and hardened state. Increase of the amount of available resources for making SCC mixtures, with a positive impact on the environment by reducing the amount of these materials in landfills, on the other hand, present two main positive effects that should arise from this research.

Key words: Composite, self-compacting concrete, cement, mineral additions, industrial by-products, experimental research, physical and mechanical properties

Science field: Civil Engineering

Narrow science field: Building materials, concrete technology and testing of structures

UDK number:

Sadržaj

1.	Pojava i istorijat samozbijajućeg betona (SCC).....	1
1.1	Samozbijajući beton sa stanovišta održivog razvoja.....	1
1.2	Istorijat SCC.....	5
1.3	Aktivnosti u vezi sa SCC na međunarodnom nivou i formiranje tehničke regulative.....	7
1.4	Primeri primene SCC.....	14
2.	Aspekti primene, kategorije i komponente SCC.....	16
2.1	Definicija i svojstva samozbijajućih betona.....	16
2.2	Kategorije.....	16
2.3	Prednosti primene SCC.....	18
2.4	Ekonomski aspekti primene SCC.....	19
2.5	Uobičajeni odnosi komponentata kod samozbijajućih betona.....	21
2.6	Aspekti u vezi sa procedurom mešanja.....	21
2.7	Komponentni materijali.....	22
2.7.1	Cement.....	23
2.7.1.1	Hidratacija silikatnog ili portland cementa.....	24
2.7.1.2	Toplota hidratacije cementa.....	27
2.7.1.3	Produkti hidratacije cementa.....	29
2.7.1.4	Primena cementa kod SCC.....	30
2.7.2	Hemijski dodaci	31
2.7.2.1	Superplastifikatori.....	34
2.7.2.2	Hemijski dodaci tipa modifikatora viskoziteta (VMA).....	36
2.7.2.3	Simultana upotreba hemijskih dodataka.....	37
2.7.3	Agregat.....	37
2.7.3.1	Sitan agregat.....	39
2.7.3.2	Krupan agregat.....	39
2.7.4	Fine (praškaste) čestice.....	41
2.7.4.1	Mineralni dodaci.....	43
2.7.4.2	Krečnjačko brašno.....	44
2.7.4.3	Leteći pepeo.....	45
2.7.4.3.1	Svojstva svežeg betona koji sadrži leteći pepeo.....	49
2.7.4.3.2	Svojstva očvrslog betona koji sadrži leteći pepeo.....	51
2.7.4.3.3	Trajnost betona sa letećim pepelom.....	53
2.7.4.4	Sprašena zgura visokih peći.....	55
2.7.4.5	Silikatna prašina.....	56
2.7.4.6	Metakaolin.....	56
2.7.4.7	Alternativni mineralni dodaci.....	57
2.7.5	Voda.....	58
2.7.6	Vlakna u SCC.....	60
2.7.7	Ostale komponente.....	61
3.	Svojstva SCC u svežem stanju.....	63
3.1	Sposobnost tečenja.....	64
3.2	Sposobnost prolaska.....	64
3.3	Otpornost prema segregaciji.....	65
3.4	Robusnost.....	67
3.5	Zadržavanje konzistencije.....	68

3.6	Ponašanje svežeg SCC sa aspekta reologije.....	68
3.7	Pritisak SCC na oplatu.....	72
3.8	Uticaj pojedinih komponenata na svojstva SCC.....	73
3.9	Ispitivanja na SCC u svežem stanju.....	73
3.10	Testovi na svežoj pasti/malteru.....	75
3.10.1	Testovi rasprostiranja i V-levka za malter.....	75
3.11	Testovi na svežem SCC u vezi sa sposobnošću punjenja.....	76
3.11.1	Test rasprostiranja sleganjem i test - t_{500} (<i>Slump-Flow Test i t_{500}</i>).....	77
3.11.2	Test pomoću V-levka.....	77
3.11.3	Orimet test.....	78
3.12	Testovi u vezi sa sposobnošću prolaska.....	79
3.12.1	Test L-boks (L-Box Test)	79
3.12.2	Test J-prsten (J-Ring Test).....	80
3.12.3	Test popunjavanja kutije ili "Kajima" test.....	81
3.12.4	Test U-boks (U-Box Test).....	82
3.13	Testovi u vezi sa otpornošću prema segregaciji (stabilnosti).....	83
3.13.1	Test otpornosti prema segregaciji sitom ili "GTM" test.....	83
3.13.2	Test segregacije u stubu (Column Segregation Test).....	85
3.13.3	Test sa penetrometrom.....	85
3.13.4	Vizuelni indeks stabilnosti – VSI.....	86
3.13.5	Izdvajanje vode na površini.....	87
3.14	Testovi sa reometrom.....	87
3.15	Testovi SCC na gradilištu.....	87
3.16	Međusobna veza svojstava svežeg SCC i testova za ispitivanje.....	88
3.17	Preciznost testova ispitivanja i preporuke.....	89
4.	Svojstva SCC u očvrslog stanju.....	93
4.1	Struktura očvrslog betona.....	93
4.2	Čvrstoća pri pritisku SCC.....	100
4.3	Čvrstoća pri zatezanju SCC.....	101
4.4	Modul elastičnosti SCC.....	102
4.5	Atezija između betona i armature kod SCC.....	103
4.6	Skupljanje SCC.....	104
4.7	Tečenje SCC.....	105
4.8	Trajnost SCC.....	105
4.9	Metode ispitivanja očvrslog SCC primenjene u okviru istraživanja.....	108
4.9.1	Ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava SCC.....	109
4.9.1.1	Zapreminska masa u očvrslog stanju.....	109
4.9.1.2	Ispitivanje čvrstoće pri pritisku.....	109
4.9.1.3	Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem usled linijskog pritiska, čvrstoće pri zatezanju savijanjem i ispitivanje metodom "pull-off".....	110
4.9.1.4	Ispitivanje statičkog modula elastičnosti.....	111
4.9.1.5	Dijagram napon-dilatacija (σ - ϵ).....	112
4.9.1.6	Dinamički modul elastičnosti, brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa i dinamički Poasonov koeficijent.....	112
4.9.2	Ispitivanje trajnosti.....	114
4.9.2.1	Ispitivanje vodonepropustljivosti betona.....	114
4.9.2.2	Ispitivanje otpornosti prema dejstvu mraza.....	114

4.9.2.3	Ispitivanje otpornosti na istovremeno dejstvo mraza i soli.....	115
4.9.3	Ispitivanje skupljanja.....	116
4.9.4	SEM analiza poprečnog preseka uzoraka betona.....	117
5.	Metode projektovanja sastava SCC.....	119
5.1	Opšta metoda (General purpose mix design method).....	120
5.1.1	Modifikacije opšte metode.....	121
5.2.	Metoda UCL (University Colledge of London).....	122
5.3	Metoda CBI i njene modifikacije.....	125
5.4	Metoda bazirana na upotrebi superplastifikatora.....	129
5.5	JSCE metoda.....	132
5.6	Model pakovanja agregata.....	132
5.7	LCPC metoda.....	133
5.8	Modeli na bazi reološkog ponašanja SCC.....	133
5.9	Projektovanje na bazi uticaja komponenata.....	134
6.	Sopstvena eksperimentalna istraživanja.....	137
6.1	Ciljevi i obim istraživanja.....	137
6.2	Karakterizacija komponentnih materijala.....	141
6.2.1	Svojstva upotrebljenog agregata.....	142
6.2.1.1	Petrografski sastav agregata.....	142
6.2.1.2	Sadržaj štetnih i potencijalno opasnih materijala.....	143
6.2.1.3	Fizička, mehanička, hemijska i geometrijska svojstva agregata.....	143
6.2.1.4	Granulometrijski sastav upotrebljenog agregata.....	144
6.2.1.5	Sadržaj sitnih čestica u upotrebljenom agregatu.....	145
6.2.1.6	Zapreminska masa mešavine frakcija.....	145
6.2.1.7	Uticaj količine agregata na sposobnost punjenja.....	146
6.2.2	Svojstva upotrebljenog cementa.....	146
6.2.3	Svojstva upotrebljenog krečnjačkog brašna.....	148
6.2.4	Svojstva upotrebljenog letećeg pepela.....	150
6.2.5	Svojstva upotrebljenog sprášenog recikliranog betona.....	152
6.2.6	Svojstva upotrebljenog sprášenog sumpora.....	154
6.2.7	Upotrebljena voda.....	154
6.2.8	Svojstva upotrebljenog superplastifikatora.....	155
6.3	Prethodna ispitivanja paste i maltera.....	155
6.4	Spravljanje i ispitivanje probnih SCC mešavina.....	156
6.5	Usvojen postupak spravljanja SCC mešavina.....	162
7.	Ispitivanje SCC mešavina sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata.....	163
7.1	Ciljevi ispitivanja SCC mešavina sa letećim pepelom.....	163
7.2	Ispitivanja SCC sa letećim pepelom.....	164
7.2.1	Ispitivanja SCC sa letećim pepelom u svežem stanju.....	165
7.2.2	Ispitivanja SCC sa letećim pepelom u očvrslom stanju.....	166
7.2.2.1	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa letećim pepelom.....	166
7.2.2.2	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, čvrstoće pri zatezanju savijanjem i "pull-off" SCC sa letećim pepelom.....	167
7.2.2.3	Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti SCC sa letećim pepelom.....	168
7.2.2.4	Grafički prikaz odnosa napon-dilatacija kod betona – dijagram σ - ϵ	

	SCC sa letećim pepelom.....	168
7.2.2.5	Rezultati ispitivanja nedestruktivnim metodama (dinamički modul elastičnosti, brzina ultrazvuka i Poasonov koeficijent) SCC sa letećim pepelom.....	169
7.2.2.6	Ispitivanje vodonepropustljivosti SCC sa letećim pepelom.....	169
7.2.2.7	Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza SCC sa letećim pepelom.....	170
7.2.2.8	Rezultati ispitivanja otpornosti na simultano dejstvo mraza i soli SCC sa letećim pepelom.....	171
7.2.2.9	Rezultati ispitivanja skupljanja SCC sa letećim pepelom.....	172
7.2.2.10	SEM analiza SCC sa letećim pepelom.....	173
7.3	Ispitivanja SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom.....	174
7.3.1	Usvojene recepture SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	175
7.3.2	Ispitivanja SCC sa spršenim recikliranim betonom u svežem stanju....	176
7.3.3	Ispitivanja SCC sa spršenim recikliranim betonom u očvrslom stanju.....	177
7.3.3.1	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	177
7.3.3.2	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, čvrstoće pri zatezanju savijanjem i ispitivanja "pull-off" SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	178
7.3.3.3	Rezultati ispitivanja nedestruktivnim metodama (dinamički modul elastičnosti, brzina ultrazvuka i Poasonov koeficijent) SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	179
7.3.3.4	Ispitivanje vodonepropustljivosti SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	180
7.3.3.5	SEM analiza SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	180
7.4	Ispitivanja SCC mešavina sa spršenim sumporom.....	181
7.4.1	Usvojene recepture SCC sa spršenim sumporom.....	181
7.4.2	Ispitivanja SCC sa spršenim sumporom u svežem stanju.....	182
7.4.3	Ispitivanja SCC sa spršenim sumporom u očvrslom stanju.....	183
7.4.3.1	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa spršenim sumporom.....	183
7.4.3.2	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem SCC sa spršenim sumporom.....	184
7.4.3.3	Rezultati ispitivanja nedestruktivnim metodama (dinamički modul elastičnosti, brzina ultrazvuka i Poasonov koeficijent) SCC sa spršenim sumporom.....	184
7.4.3.4	SEM analiza SCC sa spršenim sumporom.....	185
8.	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja SCC mešavina u svežem stanju.....	187
8.1	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u svežem stanju SCC mešavina sa letećim pepelom.....	187
8.2	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u svežem stanju SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom.....	194
8.3	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u svežem stanju SCC mešavina sa spršenim sumporom.....	200
8.4	Uporedni prikaz SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima na	

	bazi industrijskih nusprodukata.....	205
8.4.1	Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprašenim recikliranim betonom.....	205
8.4.2	Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprašenim sumporom.....	211
9.	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja SCC mešavina u očvrslom stanju.....	219
9.1	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u očvrslom stanju SCC sa letećim pepelom.....	219
9.2	Međusobne zavisnosti ispitivanih svojstava očvrslilih SCC sa letećim pepelom.....	239
9.3	Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava očvrslilih SCC sa sprašenim recikliranim betonom.....	244
9.4	Međusobne zavisnosti ispitivanih svojstava očvrslilih SCC sa sprasenim recikliranim betonom.....	252
9.5	Diskusija rezultata ispitivanja svojstava očvrslilih SCC sa sprasenim sumporom.....	254
9.6	Međusobne zavisnosti ispitivanih svojstava očvrslilih SCC sa sprasenim sumporom.....	260
9.7	Uporedni prikaz SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata.....	262
9.7.1	Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprašenim recikliranim betonom.....	263
9.7.2	Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprašenim sumporom.....	268
9.7.3	Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom, SCC mešavina sa sprašenim recikliranim betonom i SCC mešavina sa sprasenim sumporom.....	274
10.	Zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja.....	279
10.1	Zaključci na osnovu rezultata ispitivanja SCC sa letećim pepelom u svežem i očvrslom stanju.....	279
10.2	Zaključci na osnovu rezultata ispitivanja SCC sa sprasenim recikliranim betonom u svežem i očvrslom stanju.....	286
10.3	Zaključci na osnovu rezultata ispitivanja SCC sa sprasenim sumporom u svežem i očvrslom stanju.....	289
10.4	Zaključci na osnovu uporednog prikaza svojstava SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprasenim recikliranim betonom u svežem i očvrslom stanju.....	292
10.5	Zaključci na osnovu uporednog prikaza svojstava SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprasenim sumporom u svežem i očvrslom stanju.....	293
10.6	Zaključci na osnovu uporednog prikaza svojstava SCC mešavina sa letećim pepelom, SCC mešavina sa sprasenim recikliranim betonom i SCC mešavina sa sprasenim sumporom.....	295
10.7	Pravci daljih istraživanja SCC mešavina sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata.....	296
11	Literatura	301
Prilog:	Rezultati SEM analize reprezentativnih uzoraka SCC mešavina	

Spisak slika

Slika 1.1	Rasprostranjenost primene SCC u svetu [74].....	8
Slika 1.2	Trend objavljivanja publikacija u vezi sa SCC u svetu.....	12
Slika 1.3	Porast broja publikacija u vezi sa SCC po kontinentima (Google scholar).....	12
Slika 1.4	Tematska analiza radova u vezi sa SCC u periodu 1995-2013.....	13
Slika 1.5	Ankerni blok (u izgradnji) mosta "Akashi-Kaikyo".....	14
Slika 1.6	"European Business Center" u Beogradu.....	15
Slika 2.1	Upporedni prikaz sastava NVC i SCC (% vol).....	21
Slika 2.2	Razvoj toplote hidratacije cementa u funkciji vremena [285].....	28
Slika 2.3	Oblast sa formiranim etringitom (igličasta struktura).....	30
Slika 2.4	Osnovna podela na familije plastifikatora.....	34
Slika 2.5	Mehanizam dejstva superplastifikatora (levo) i efekat padobrana (desno) [59].....	35
Slika 2.6	Dijagram koji se izrađuje sa ciljem karakterizacije praškastih materijala za primenu u SCC.....	42
Slika 3.1	Međusobni odnosi svojstava SCC u svežem stanju [161].....	67
Slika 3.2	Najčešće primenjivani reološki modeli za svež beton (η – plastični viskozitet).....	69
Slika 3.3	Efekti variranja komponentnih materijala na parametre Bingamovog modela kod svežeg betona [182].....	71
Slika 3.4	Mali konus (levo) i V-levak (desno) za sveže paste/maltere [229].....	76
Slika 3.5	Osnovna aparatura za test rasprostiranja sleganjem [68].....	77
Slika 3.6	Dimenzije i izgled V-levka [82].....	78
Slika 3.7	Dimenzije "Orimet" aparature [39],[253].....	78
Slika 3.8	Izgled L-boksa [82].....	79
Slika 3.9	Samozbijajući beton bez efekta blokiranja pri testiranju L-boksom.....	80
Slika 3.10	Samozbijajući beton sa izraženim blokiranjem pri testiranju L-boksom.....	80
Slika 3.11	Osnovna aparatura za test J-prstenom i pozicije merenja [253].....	81
Slika 3.12	Dimenzije "Kajima"-boksa [39],[253].....	82
Slika 3.13	Izgled U-boksa [39].....	83
Slika 3.14	Izgled "oblikovanog boksa".....	83
Slika 3.15	Izgled aparature za test otpornosti prema segregaciji sitom [39],[64].....	84
Slika 3.16	Segregacija u stubu [64].....	85
Slika 3.17	Aparat za ispitivanje penetracije kod SCC [64].....	85
Slika 3.18	Četiri karakteristična nivoa VSI.....	86
Slika 4.1	Funkcionalna zavisnost "svojstava betona – sastav – struktura" [118].....	93
Slika 4.2	Tipovi makrostrukture betona [176].....	94
Slika 4.3	BS/SEM slika očvrste cementne paste sa osnovnim fazama mikrostrukture [285].....	96
Slika 4.4	Šematski prikaz zrna agregata sa prelaznom zonom.....	98
Slika 4.5	Dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona [118]..	99
Slika 4.6	Upporedni prikaz strukture SCC i NVC [287].....	100
Slika 4.7	Presna Amsler za ispitivanje čvrstoće pri pritisku.....	110
Slika 4.8	Izgled uzorka neposredno nakon ispitivanja čvrstoće betona pri zatezanju cepanjem putem linijskog opterećenja.....	110

Slika 4.9	Zalepljeni pečati u testu "pull-off" (levo) i dispozicija ispitivanja sa "iščupanim" pečatima sa uzorka (desno).....	111
Slika 4.10	Ispitivanje statičkog modula elastičnosti.....	112
Slika 4.11	Upotrebljen ugibomer sa podatkom 0.001 mm.....	112
Slika 4.12	Aparatura za određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona.....	113
Slika 4.13	Aparatura za određivanje brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz beton.....	113
Slika 4.14	Aparatura za ispitivanje vodonepropustljivosti.....	114
Slika 4.15	Dijagrami promene temperature i vlažnosti u prostoriji sa kontrolisanim uslovima.....	117
Slika 5.1	Relacije između veličina R_a i R_v a) za maltere sa umerenom toplotom hidratacije, pesak/malter=0.4 b) za maltere u metodi UCL, pesak/malter=0.45 [161].....	122
Slika 5.2	Veza rasprostiranja maltera i SCC (a) i veza vremena izmerenog u testu V-levka za maltere i SCC (b) kod SCC sa različitim sadržajem krupnog agregata [67].....	124
Slika 5.3	Model projektovanja sastava SCC razvijen u CBI, Švedska [54].....	128
Slika 5.4	Model pristupa na bazi superplastifikatora [224].....	130
Slika 5.5	Primeri stanja paste u karakterističnim tačkama na krivoj [224].....	131
Slika 5.6	Opšti odnosi između dominantnih uslova i gustine pakovanja [224].....	131
Slika 5.7	Šema procedure TOPSIS pristupa Tagučići metode optimizaciji HSSCC [247].....	136
Slika 6.1	Granulometrijske krive upotrebljenih frakcija agregata (zajedno sa krivom mešavine).....	145
Slika 6.2	Promena zapreminske mase i poroznosti mešavine frakcija II (4/8) i III (8/16) pri različitim odnosima II/(II+III).....	146
Slika 6.3	Izgled zrna cementa CEM I PC 42.5R dobijen pomoću SEM uređaja.....	147
Slika 6.4	Granulometrijski sastav upotrebljenog cementa.....	148
Slika 6.5	Izgled zrna krečnjačkog brašna dobijen pomoću SEM uređaja.....	148
Slika 6.6	Granulometrijski sastav upotrebljenog krečnjačkog brašna.....	149
Slika 6.7	Izgled zrna letećeg pepela dobijen pomoću SEM uređaja.....	150
Slika 6.8	Granulometrijska kriva LP "Kostolac".....	151
Slika 6.9	Granulometrijska kriva LP "Kolubara".....	152
Slika 6.10	Izgled zrna mineralnog dodatka A (sprašenog betona) dobijen pomoću SEM uređaja.....	153
Slika 6.11	Granulometrijska kriva spraćenog sumpora.....	154
Slika 6.12	Izgled zrna sumpora dobijen pomoću SEM uređaja.....	154
Slika 6.13	Test malog konusa za definisanje ponašanja paste sa letećim pepelom.....	155
Slika 6.14	Relacija između vodopraškastog faktora i relativnog rasprostiranja paste R_a	156
Slika 6.15	Pojava segregacije kod mešavine P7 sa 10% letećeg pepela.....	160
Slika 6.16	Grafički prikaz rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona P1-P12.....	160
Slika 6.17	Grafički prikaz rezultata ispitivanja zapreminske mase betona P1-P12.....	161
Slika 6.18	Laboratorijska mešalica kapaciteta 60 litara.....	162
Slika 7.1	Izgled poprečnog preseka uzorka nakon loma po izvodnici u cilju ispitivanja vodonepropustljivosti sa vidljivim tragom prodora vode.....	170
Slika 7.2	Izgled uzoraka za ispitivanje otpornosti na dejstvo mraza.....	171
Slika 7.3	Uzorci pre (levo) i posle (desno) izlaganja dejstvu mraza i soli.....	172

Slika 7.4	Uzorak E1-2 na kome su golim okom primetna neznatna oštećenja površine.....	172
Slika 7.5	Izgled uzoraka pripremljenih za SEM analizu.....	174
Slika 7.6	Poprečni presek uzorka sa tragom prodora vode (SCC sa sprášenim recikliranim betonom).....	180
Slika 7.7	Izgled poliranog uzorka dobijenog od samozbijajućeg betona oznake R100.....	181
Slika 7.8	Izgled uzoraka dobijenih od SCC sa sprášenim sumporom.....	186
Slika 8.1	Pad vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela (mešavina oznake E2).....	188
Slika 8.2	Porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela.....	189
Slika 8.3	Zavisnost između vremena t_v merenog metodom V-levka u funkciji od vremena t_{500} kod SCC sa LP.....	190
Slika 8.4	Pad vrednosti odnosa visina H_2/H_1 u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela.....	191
Slika 8.5	Porast otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita (faktor segregacije) u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela.....	192
Slika 8.6	Pad zapreminske mase u svežem stanju SCC mešavina u funkciji procenta zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom.....	193
Slika 8.7	Pad vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog recikliranog betona (mešavina oznake E2).....	195
Slika 8.8	Porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog recikliranog betona.....	196
Slika 8.9	Zavisnost između vremena merenog metodom V-levka u funkciji od vremena t_{500} kod SCC sa R.....	197
Slika 8.10	Pad otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita (faktor segregacije) u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog recikliranog betona.....	198
Slika 8.11	Povećanje vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog sumpora (mešavina oznake E2).....	201
Slika 8.12	Porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog sumpora.....	202
Slika 8.13	Pad vrednosti odnosa visina H_2/H_1 u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog sumpora.....	202
Slika 8.14	Smanjenje otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita (faktor segregacije) u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog sumpora.....	203
Slika 8.15	Pad zapreminske mase u funkciji procenta zamene krečnjačkog brašna sprášenim sumporom.....	204
Slika 8.16	Korelacija između rasprostiranja sleganjem i sadržaja uvućenog vazduha u SCC sa S.....	205
Slika 8.17	Uporedni prikaz vrednosti zapreminske mase svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim recikliranim betonom.....	207
Slika 8.18	Uporedni prikaz vrednosti rasprostiranja sleganjem svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim recikliranim betonom.....	208
Slika 8.19	Uporedni prikaz vrednosti vremena t_{500} i t_v svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim recikliranim betonom.....	208

Slika 8.20	Uporedni prikaz vrednosti H2/H1 u metodi L-boksa kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim recikliranim betonom.....	210
Slika 8.21	Uporedni prikaz vrednosti faktora segregacije svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim recikliranim betonom.....	210
Slika 8.22	Uporedni prikaz sadržaja uvučenog vazduha izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim recikliranim betonom.....	211
Slika 8.23	Uporedni prikaz vrednosti zapreminske mase svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim sumporom.....	213
Slika 8.24	Uporedni prikaz vrednosti rasprostiranja sleganjem svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim sumporom.....	214
Slika 8.25	Uporedni prikaz vrednosti vremena t_{500} i t_v kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim sumporom.....	215
Slika 8.26	Uporedni prikaz vrednosti odnosa visina H2/H1 kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim sumporom.....	216
Slika 8.27	Uporedni prikaz vrednosti faktora segregacije kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim sumporom.....	217
Slika 8.28	Uporedni prikaz vrednosti sadržaja uvučenog vazduha kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprasnim sumporom.....	218
Slika 9.1	Procentualni porast čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2, bez letećeg pepela.....	220
Slika 9.2	Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa LP.....	223
Slika 9.3	Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa LP u prvih 28 dana.....	223
Slika 9.4	Procentualni porast vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljen bez letećeg pepela.....	224
Slika 9.5	Procentualni porast vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljen bez letećeg pepela.....	225
Slika 9.6	Procentualni porast vrednosti athezije ("pull-off" metoda) u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljen bez letećeg pepela, pri starosti od 28 dana.....	226
Slika 9.7	Procentualni porast vrednosti statičkog modula elastičnosti u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljen bez letećeg pepela.....	228
Slika 9.8	Procentualna odstupanja (porast) vrednosti dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih serija SCC mešavina sa letećim pepelom.....	229
Slika 9.9	Procentualna odstupanja (porast) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa letećim pepelom.....	231
Slika 9.10	Pad čvrstoće pri pritisku kod SCC mešavina sa LP, nakon 150 i 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, u odnosu na referentne uzorke.....	235
Slika 9.11	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i statičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP.....	240
Slika 9.12	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP.....	241
Slika 9.13	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC sa LP.....	243
Slika 9.14	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju cepanjem kod SCC sa LP.....	243
Slika 9.15	Zavisnost statičkog i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP.....	244
Slika 9.16	Procentualni pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2.....	246

Slika 9.17	Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa R.....	247
Slika 9.18	Procentualni pad vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod SCC sa R	247
Slika 9.19	Procentualni pad vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem kod SCC sa R.....	248
Slika 9.20	Procentualni pad vrednosti atezije kod SCC sa R.....	248
Slika 9.21	Pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d ispitivanih serija SCC sa R.....	249
Slika 9.22	Procentualna odstupanja (porast) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa R.....	250
Slika 9.23	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa R.....	253
Slika 9.24	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC sa R.....	254
Slika 9.25	Procentualni pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu bez sprašenog sumpora.....	255
Slika 9.26	Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa S.....	255
Slika 9.27	Procentualni pad vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenju bez sprašenog sumpora.....	256
Slika 9.28	Procentualni pad vrednosti atezije u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenju bez sprašenog sumpora.....	257
Slika 9.29	Pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d ispitivanih serija SCC mešavina sa sprašenim sumporom.....	258
Slika 9.30	Procentualna odstupanja (porast) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa sprašenim sumporom.....	259
Slika 9.31	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa S.....	261
Slika 9.32	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvuka kod SCC sa S.....	261
Slika 9.33	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri zatezanju savijanjem kod SCC sa S.....	262
Slika 9.34	Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri pritisku izmerenih kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom.....	264
Slika 9.35	Uporedni prikaz čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom.....	265
Slika 9.36	Uporedni prikaz čvrstoće pri savijanju kod SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom.....	265
Slika 9.37	Uporedni prikaz atezije kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom.....	266
Slika 9.38	Uporedni prikaz dinamičkog modula elastičnosti kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom.....	267
Slika 9.39	Uporedni prikaz vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom.....	267
Slika 9.40	Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri pritisku kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim sumporom.....	270
Slika 9.41	Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri savijanju kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim sumporom.....	270

Slika 9.42	Uporedni prikaz vrednosti athezije ispitivane pomoću "pull-off" metode kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim sumporom.	271
Slika 9.43	Uporedni prikaz vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim sumporom.....	272
Slika 9.44	Uporedni prikaz vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim sumporom.....	273
Slika 9.45	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti za sve tri vrste upotrebljenih mineralnih dodataka.....	275
Slika 9.46	Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa za sve tri vrste upotrebljenih mineralnih dodataka.....	277

Spisak tabela

Tabela 1.1	Prašaste komponente upotrebljavane prilikom spravljanja SCC [74].....	8
Tabela 1.2	Broj radova prema tematici na Prvom međunarodnom simpozijumu o SCC [64]....	9
Tabela 1.3	Broj radova prema tematici na Šestom međunarodnom simpozijumu o SCC [64]....	9
Tabela 1.4	Hronologija aktivnosti u vezi sa SCC na međunarodnom nivou.....	10
Tabela 1.5	Dokumenti u vezi sa SCC [39],[64].....	11
Tabela 1.6	Broj publikacija po državama u periodu 2011-2013. godina.....	13
Tabela 2.1	Uporedni prikaz cena tradicionalnog betona i samozbijajućeg betona [66].....	19
Tabela 2.2	Primer optimizacije SCC srednjeg nivoa čvrstoće [92].....	20
Tabela 2.3	Potrošnja cementa u svetu u 2013. godini [292]	23
Tabela 2.4	Toplota hidratacije portland cementnih sastojaka [180]	28
Tabela 2.5	Kratka istorija upotrebe hemijskih dodataka [182]	33
Tabela 2.6	Odnos zadržane vode β_p i koeficijenta deformacije E_p za različite praškaste materijale [71].....	42
Tabela 2.7	Termoelektre u sistemu EP Srbije (izvor EPS)	47
Tabela 2.8	Zahtevi za leteći pepeo i prirodne pucolane za upotrebu u svojstvu mineralnih dodataka u Portland cementnim betonima [246]	48
Tabela 3.1	Uticaj karakteristika i količina komponenata na svojstva svežeg SCC [64].....	74
Tabela 3.2	Granične vrednosti merenja, ponovljivosti i reproduktivnosti za SCC [68].....	90
Tabela 4.1	Kriterijumi degradacije betona izloženog istovremenom delovanju mraza i soli za odmrzavanje prema [273]	116
Tabela 5.1	JSCE preporuke [161],[226]	132
Tabela 6.1	Petrografski sastav agregata.....	142
Tabela 6.2	Fizička, mehanička, hemijska i geometrijska svojstva agregata.....	143
Tabela 6.3	Rezultati suvog prosejavanja upotrebljenog agregata.....	144
Tabela 6.4	Hemijski sastav upotrebljenog cementa (%).....	147
Tabela 6.5	Rezultati fizičko-mehaničkih ispitivanja cementa.....	147
Tabela 6.6	Fizičko-mehanička svojstva ispitivanog krečnjačkog brašna.....	149
Tabela 6.7	Hemijska svojstva ispitivanog krečnjačkog brašna.....	149
Tabela 6.8	Hemijski sastav upotrebljenih LP.....	150
Tabela 6.9	Granulometrijski sastav upotrebljenih letećih pepela.....	151
Tabela 6.10	Hemijski sastav spraćenih betona.....	153
Tabela 6.11	Granulometrijski sastav upotrebljenih spraćenih betona.....	153
Tabela 6.12	Fizičko-hemijska svojstva upotrebljenog superplastifikatora.....	155
Tabela 6.13	Sastav betona spravljenih prilikom prethodnih proba.....	157
Tabela 7.1	Sastav SCC sa letećim pepelom.....	165
Tabela 7.2	Rezultati ispitivanja svojstava u svežem stanju na serijama SCC sa LP.....	166
Tabela 7.3	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku f_p [MPa].....	167
Tabela 7.4	Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku f_p	167
Tabela 7.5	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem, savijanjem i atezije.....	168
Tabela 7.6	Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti E_s [GPa].....	168
Tabela 7.7	Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d (GPa), brzine ultrazvuka v (m/s) i dinamičkog Poasonovog koeficijenta μ_d (-) kod SCC sa LP.....	169
Tabela 7.8	Dubine h [mm] prodora vode u ispitivane uzorke.....	170
Tabela 7.9	Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza nakon 150 ciklusa.....	171
Tabela 7.10	Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza nakon 200 ciklusa.....	171

Tabela 7.11	Gubitak mase na površini izloženoj dejstvu mraza i soli za odmrzavanje.....	172
Tabela 7.12	Sastav SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	176
Tabela 7.13	Rezultati ispitivanja svojstava u svežem stanju na serijama SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	177
Tabela 7.14	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku f_p [MPa] SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	178
Tabela 7.15	Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku f_p SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	178
Tabela 7.16	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem, savijanjem i athezije.....	179
Tabela 7.17	Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d (GPa), brzine ultrazvuka v (m/s) i dinamičkog Poasonovog koeficijenta μ_d (-) kod SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	179
Tabela 7.18	Dubine h [mm] prodora vode u ispitivane uzorke SCC sa spršenim recikliranim betonom.....	180
Tabela 7.19	Sastav SCC sa spršenim sumporom.....	182
Tabela 7.20	Rezultati ispitivanja svojstava u svežem stanju na SCC sa spršenim sumporom....	183
Tabela 7.21	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku f_p [MPa] SCC sa spršenim sumporom....	183
Tabela 7.22	Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku f_p SCC sa spršenim sumporom.....	184
Tabela 7.23	Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem i athezije.....	184
Tabela 7.24	Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d [GPa] SCC sa spršenim sumporom.....	185
Tabela 9.1	Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih SCC sa LP dobijene na osnovu regresione analize.....	240
Tabela 9.2	Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa ispitivanih SCC sa LP dobijene na osnovu regresione analize.....	242
Tabela 9.3	Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih serija SCC sa R dobijene na osnovu regresione analize.....	252
Tabela 9.4	Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa ispitivanih serija SCC sa R dobijene na osnovu regresione analize.....	253
Tabela 9.5	Funkcionalne zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti.....	275
Tabela 9.6	Funkcionalne zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa.....	277

1. Pojava i istorijat samozbijajućeg betona (SCC)

1.1 Samozbijajući beton sa stanovišta održivog razvoja

Prvi stav Nacionalne strategije održivog razvoja (Sl. Glasnik RS 57/08) glasi [177]:

"Savremeni svet je već uveliko suočen sa zajedničkom odgovornošću i nužnošću da svoj razvoj uskladi s potrebama ljudi i prirode i sa svešću da se Zemlja mora sačuvati kako za sadašnju generaciju tako i za buduće generacije ljudi. Obaveza današnje generacije da ostavi potomstvu bar onoliko šansi za razvoj koliko ih ona ima proistiće iz fundamentalnog principa moralne pravde, a to je da svi ljudi imaju podjednaka prava na najšire osnovne slobode koje ne ugrožavaju slobodu drugih.

Sadašnja generacija ima pravo na resurse i zdravu životnu sredinu, ali ne sme ugroziti isto takvo pravo narednim generacijama. Nacionalna strategija održivog razvoja (u daljem tekstu: Strategija) definiše održivi razvoj kao ciljno orijentisan, dugoročan, neprekidan, sveobuhvatan i sinergetski proces koji utiče na sve aspekte života (ekonomski, socijalni, ekološki i institucionalni) na svim nivoima. Održivi razvoj podrazumeva izradu modela koji na kvalitetan način zadovoljavaju društveno-ekonomske potrebe i interese građana, a istovremeno uklanjaju ili znatno smanjuju uticaje koji prete ili štete životnoj sredini i prirodnim resursima.

Dugoročni koncept održivog razvoja podrazumeva stalni ekonomski rast koji osim ekonomske efikasnosti, tehnološkog napretka, više čistijih tehnologija, inovativnosti celog društva i društveno odgovornog poslovanja obezbeđuje smanjenje siromaštva, dugoročno bolje korišćenje resursa, unapređenje zdravstvenih uslova i kvaliteta života i smanjenje zagađenja na nivo koji mogu da izdrže činioci životne sredine, sprečavanje novih zagađenja i očuvanje biodiverziteta. Jedan od najvažnijih ciljeva održivog razvoja jeste otvaranje novih radnih mesta i smanjenje stope nezaposlenosti, kao i smanjenje rodne i društvene nejednakosti marginalizovanih grupa, podsticanje zapošljavanja mladih i lica sa invaliditetom, kao i drugih rizičnih grupa. "

Održivi razvoj podrazumeva takav razvoj društva koji raspoloživim resursima zadovoljava ljudske potrebe, ne ugrožavajući prirodne sisteme i životnu sredinu, čime se osigurava dugoročno postojanje ljudskog društva i njegovog okruženja. Koncept održivog razvoja predstavlja novu strategiju i filozofiju društvenog razvoja. Održivi razvoj takođe podrazumeva ravnotežu između potrošnje resursa i sposobnosti obnavljanja prirodnih sistema.

Najčešće se navodi definicija održivog razvoja koju je 1987. godine dala Svetska komisija za okruženje i razvoj pri Ujedinjenim nacijama (tzv. Bruntland komisija) u svom izveštaju pod nazivom „Naša zajednička budućnost“ [199]:

"Održivi razvoj je razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjice, ne dovodeći u pitanje sposobnost budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe".

Konceptualno, održivi razvoj se u okviru upravljanja otpadnim materijalima često asocira sa tzv. "3R" principom (*Reduce, Reuse, Recycle*), koji se odnosi na smanjenje količine otpada, mogućnost ponovne upotrebe materijala i recikliranje. Ovaj koncept je dodavanjem aspekta "*Reclaim*" (korišćenje određenih svojstava jednog otpadnog materijala putem konverzije ili transformacije) prerastao u tzv. "4R" princip. Ovi principi su primenljivi u graditeljstvu.

Graditeljstvo se, kao privredna grana sa značajnim uticajem na životnu sredinu, menja između ostalog i u skladu sa pomenutim stavovima koji definišu 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 graditeljstvu danas.

U okviru graditeljstva, jedan od najvažnijih izazova u smislu održivog razvoja jeste proizvodnja i upotreba cementa. Naime, industrija cementa utiče na životnu sredinu u

sklopu svake od faza procesa proizvodnje cementa, od kamenoloma do konačne upotrebe. Postoje načini da se ovaj uticaj neutrališe ili bar smanji, a izvesna istraživanja se na tom polju obavljaju u svetskim razmerama.

Oslobađanje štetnih materija u atmosferu je jedna od najvažnijih tema u savremenom svetu, zbog efekta globalnog zagrevanja i promena u klimi poslednjih nekoliko decenija. Na osnovu Kjoto protokola iz 1997. oslobađanje ugljen-dioksida (CO₂) predstavlja glavni problem uticaja na spoljašnju sredinu [133]. Glavni sastojci gasova emitovanih u postrojenjima za proizvodnju cementa su azot, ugljen-dioksid, voda i kiseonik. Ovi gasovi sadrže i male količine prašine, hlorida, fluorida, sumpor-dioksid, azotove okside, ugljen-monoksid, organska jedinjenja i teške metale. Smatra se da proizvodnja cementa na godišnjem nivou prouzrokuje emisiju od više od 500 000 tona sumpor-dioksida, azotovih oksida i ugljen-monoksida [9].

Savremeni konceptualni pristup u graditeljstvu podrazumeva višeparametarsku optimizaciju u svakom smislu. Na primer, sa aspekta primene materijala u graditeljstvu, pristup po kome neki materijal ima povoljne ili prihvatljive fizičko-mehaničke karakteristike u tom svetlu mora se smatrati nedovoljnim, jer postoji veliki broj parametara u vezi sa njegovom primenom, koje je neophodno sagledati pre eventualne primene. U pitanju su ekonomski parametri, zatim parametri primene u konkretnoj konstrukciji, odnosno na konkretnom mestu u konstrukciji, kao i parametri u vezi sa trajnošću materijala i njegovog životnog veka [168],[169]. U takvoj analizi nekog građevinskog materijala je neophodno sagledati i ekološke efekte njegove primene, u smislu dejstva na čoveka i životnu sredinu.

U opštem slučaju, može se reći da je beton jedan od najčešće upotrebljivanih materijala u graditeljstvu 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 [282].

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 [118]. 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 [230]. 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.

Zbog svojih svojstava u svežem stanju, SCC je od strane velikog broja predstavnika svetske stručne i naučne javnosti koja se bavi predmetnom tematikom okarakterisan kao jedan od najznačajnijih proboja na polju tehnologije betona [64]. Izvesni istraživači čak promovišu stav da je SCC pravi odgovor na najveći broj problema koji se javljaju prilikom ugrađivanja betona u konstruktivne elemente [153]. Sa time u vezi, pojava SCC je okarakterisana i kao važan korak u industrijalizaciji proizvodnje betona, odnosno u proizvodnji prefabrikovanih betonskih elemenata [249]. 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% [64]. Može se reći da je, po pitanju primene SCC, i u drugim razvijenim zemljama u svetu situacija slična navedenoj.

1.2 Istorijat SCC

Jedna od aktuelnih tema u svetskoj stručnoj javnosti početkom osamdesetih godina prošlog veka bio je problem ugrožene trajnosti betonskih konstrukcija [319]. Značajan broj nacionalnih i međunarodnih strukovnih skupova održan je na ovu temu sa osnovnim zaključcima koji su se mogli svesti na dva osnovna aspekta ubrzanog propadanja betonskih konstrukcija: neadekvatan sastav betonske mešavine i nestručno ugrađivanje betona. U vezi sa drugim aspektom, u Japanu je u to vreme primećen nezanimljiv trend smanjenja broja stručnih radnika angažovanih na poziciji ugrađivanja betona. Ovo je vodilo negativnim efektima u smislu kvaliteta izvedenih radova, a time i u smislu trajnosti betonskih konstrukcija. Beton okarakterisan kao samozbijajući je, kako je to definisano u prethodnom delu, u naučnoj i stručnoj javnosti u Japanu prvi uveo 1986. godine Hajime Okamura, profesor Tehnološkog Univerziteta u Kočiju (Kochi University of Technology, Japan) [191].

Ubrzo su usledila prva istraživanja u cilju razvijanja ovakvog cementnog kompozita, uključujući osnovnu studiju o obradljivosti sveže mešavine, koje su sprovedi Kazumasa Ozawa i Koichi Maekawa, profesori sa Univerziteta u Tokiju. Prototip samozbijajućeg betona napravljen je 1988. godine sa komponentnim materijalima koji su tada bili dostupni na tržištu. Ovaj beton je označen kao beton visokih performansi (*High Performance Concrete*), a njegova osnovna svojstva opisana kroz tri karakteristične faze, u periodu od spravljanja do očvršćavanja podrazumevala su sledeće postavke [197]:

- 1) u svežem stanju - samozbijajući,
- 2) u ranoj starosti - bez inicijalnih defekata,
- 3) u očvrslom stanju - otporan na spoljašnje uticaje.

U međuvremenu je beton visoke trajnosti, dobijen zahvaljujući postignutom niskom vodocementnom faktoru nazvan "betonom visokih performansi", usled čega je Okamura prvobitni naziv dopunio u skladu sa svojstvima u svežem stanju i nazvao ga "samozbijajućim betonom visokih performansi" (*Self-Compacting High Performance Concrete*) [191],[197].

Prvi rad o samozbijajućem betonu pod nazivom: "Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures", čiji su autori Ozawa, Maekawa, Kunishima i Okamura, objavljen je na drugoj konferenciji "EASEC"-a (East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction), januara 1989. godine [196].

Prilikom intenzivnih istraživanja na polju razvoja SCC prednjačile su laboratorije velikih japanskih građevinskih kompanija (Kajima, Maeda, Taisei itd.), koje su, zahvaljujući svojim razvojnim i finansijskim kapacitetima, kreirale sopstvene recepture SCC mešavina i obučile sopstvene stručnjake za primenu ovog betona na gradilištu. Ova posebna vrsta betona je prvi put na gradilištima komercijalnih zgrada primenjivana već u prvoj polovini 1990. godine, pod različitim nazivima (*Non-vibrated concrete* - Kajima Co., *Super quality concrete* - Maeda Co., *Biocrete* - Taisei Co.), a njegov sastav je bio strogo čuvana tajna, kako bi se zadržala tržišna prednost u odnosu na konkurenciju. Prva ozbiljnija primena SCC betona bila je za izradu pilona od prednapregnutog betona mosta sa kosim zategama "Shin-kiba Ohashi bridge" izvedenog 1991. godine. Najpoznatija primena ove vrste betona, koja se vezuje za početke SCC, bila je 1998, prilikom izvođenja anker-blokova na mostu Akashi-Kaikyo, o čemu će kasnije biti više reči.

Nakon što je počela uspešna primena SCC, interesovanje svetske javnosti za SCC je raslo i ogledalo se u istraživanjima sprovedenim već početkom 90-tih godina prošlog veka u istraživačkim centrima univerziteta, velikih svetskih građevinskih kompanija, proizvođača građevinskog materijala, kao i fabrika betona. Od sredine 90-tih godina održano je više od 10 tehničkih tematskih konferencija, objavljeno više od 1500 naučnih

i stručnih radova na temu SCC, kao i veliki broj završnih studentskih, master i doktorskih radova.

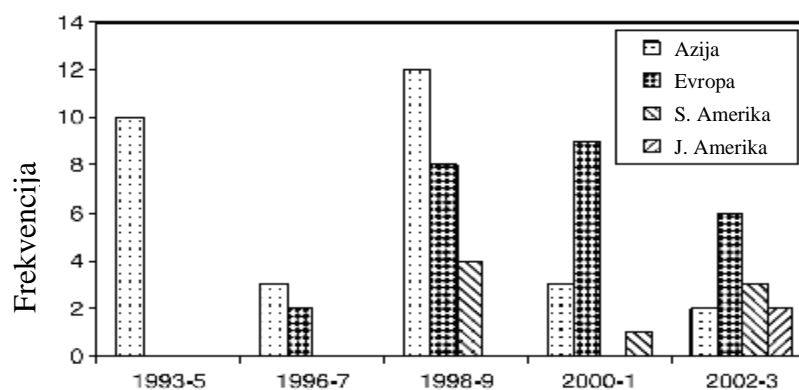
1.3 Aktivnosti u vezi sa SCC na međunarodnom nivou i formiranje tehničke regulative

Analiza 68 studija slučaja u periodu od 1993 do 2003 (čiji su rezultati objavljeni u okviru 43 rada) pokazuje rast primene SCC u svetu koji je karakterisao taj period [74]. U predmetnom radu data je rasprostranjenost primene SCC u svetu; na početku je u realnoj primeni SCC prednjačila Azija (zbog primene u Japanu), dok su potencijal i praktične prednosti SCC prvo prepoznale zemlje Evrope, a zatim vrlo brzo i Severne Amerike (SAD i Kanada), slika 1.1.

Interesantna je analiza u pogledu upotrebljenog mineralnog dodatka SCC. Mineralni dodatak se (u skladu sa definicijom datom u važećem standardu SRPS EN 206-1 Beton – Deo 1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost) definiše kao fino usitnjen materijal mineralnog porekla, koji se dodaje betonu radi poboljšanja određenih svojstava ili radi dobijanja specijalnih svojstava (postoje dva tipa mineralnih dodataka: tip I – inertni ili poluinertni i tip II – pucolanski ili latentno hidraulični). Prema ovoj analizi, među najčešće upotrebljavane vrste mineralnih dodataka ubrajaju se krečnjačko brašno, zgura visokih peći, leteći pepeo i silikatna prašina (videti tabelu 1.1.) U poređenju sa tradicionalnim betonima visoke obradljivosti, analizirane SCC mešavine sadržale su: niži sadržaj krupnog agregata, povećani sadržaj paste, visok sadržaj praškaste komponente (materijal <0.125 mm), niže vodocementne faktore, veće vrednosti doziranja superplastifikatora, primenu hemijskog dodatka tipa modifikatora viskoziteta, u izvesnom broju slučajeva.

U odnosu na tematiku u oblasti SCC, treba pomenuti i analizu [64] prikazanu u tabelarnom obliku, a dobijenu na bazi teme radova objavljenih na Prvom međunarodnom simpozijumu o SCC (First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999) i Šestom međunarodnom simpozijumu o SCC (6th International RILEM symposium on Self-Compacting

Concrete and 4th North American conference on the Design and Use of SCC: Design, production and placement of self-consolidating concrete, Montreal, Canada, 2010), tabele 1.2. i 1.3.



Slika 1.1 Rasprostranjenost primene SCC u svetu [74]

Tabela 1.1 Praškaste komponente upotrebljavane prilikom spravljanja SCC [74]

Praškasta komponenta	Broj slučajeva
Portland cement (PC)	2
PC + krečnjački filer (KF)	19
Sulfatno otporni PC + KF	1
PC sa dodatkom krečnjaka + KF	3
PC + zgura (Z)	8
PC sa dodatkom Z	2
PC + silikatna prašina (SP)	5
PC sa dodatkom Z + leteći pepeo (LP)	9
PC sa dodatkom Z + KF	1
PC + LP	4
PC + LP + SP	3
PC + LP + Z	1
PC sa dodatkom krečnjaka + LP	3
PC sa dodatkom krečnjaka + KF + LP	1
PC + Z + SP	1
PC sa dodatkom LP + KF + SP	1
PC sa dodatkom Z + LP + KF	2
Nema informacije	2

Na osnovu analize tema na ove dve konferencije, može se izvesti zaključak da je (iako se očekuje dalji porast broja aktivnosti na nivou ispitivanja i poboljšanja metoda za ispitivanje i tehničke regulative) evidentan razvoj praktične primene SCC i pratećih tehnologija [64].

Tabela 1.2 Broj radova prema tematici na Prvom međunarodnom simpozijumu o SCC[64]

Tema	Broj radova
Reologija/obradljivost	7
Svojstva u svežem i očvrslom stanju	16
Metode projektovanja sastava	8
Komponentni materijali	16
Primena	18

Tabela 1.3 Broj radova prema tematici na Šestom međunarodnom simpozijumu o SCC[64]

Tema	Broj radova
Reologija/obradljivost	18
Metode projektovanja sastava	10
Mehanička svojstva	9
Fizička svojstva	5
Hemijski dodaci	9
Modelovanje tečenja	5
Studije slučaja	12
Čvrstoća veze	5
Proizvodnja i ugrađivanje	10
Mikroarmirani SCC	10
Pritisak na oplatu	9
Svojstva u očvrslom stanju	4
Suplementarni vezivni materijali	5
Trajnost	5
Agregati	5
Ponašanje u konstrukciji	5

Od prihvatanja SCC u svetskoj javnosti do danas, održan je izvestan broj značajnih skupova na temu SCC, koji se mogu hronološki prikazati [64],[39], kako je to dato u tabeli 1.4.

Od kada je SCC proizveden, veliki naponi se ulažu da bi se uspostavile preporuke i standardne metode ispitivanja i definisanja svojstava samozbijajućih betona. Od početka primene SCC do danas na svetskom nivou objavljen je nezanemarljiv broj preporuka i izvestan broj metoda ispitivanja, uključujući nacionalne dokumente objavljene u Evropskoj Uniji i SAD. U tabeli 1.5. navedeni su nazivi tih dokumenata, kao i institucije zaslužne za njihovo objavljivanje.

Osim dokumenata prikazanih u tabeli 1.5. objavljen je veliki broj drugih dokumenata u vezi sa SCC.

1. Pojava i istorijat samozbijajućeg betona (SCC)

Tabela 1.4 Hronologija aktivnosti u vezi sa SCC na međunarodnom nivou

Godina	Aktivnosti u vezi sa SCC na međunarodnom nivou
1997	-Formiran je tehnički komitet RILEM TC 174-SCC na temu SCC -Evropska komisija ("European Commission") kroz "IMT/SMT" (Industrial and Materials Technology/Standards, Measurement & Testing) pokrenula je projekat Brite EuRam BE96-3801 - Rational Production and Improved Working Environment through Using Self-Compacting Concrete
1998	Međunarodna konferencija na temu SCC je održana u gradu Koči, Japan
1999	-Prvi međunarodni RILEM simpozijum na temu SCC održan je u Stokholmu, Švedska -EFNARC (European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures) osniva tehnički komitet za izradu preporuka i specifikacija o specijalnim komponentama koje ulaze u sastav SCC
2000	Formiran je tehnički komitet RILEM TC 188-CSC – Casting of Self Compacting Concrete
2001	-Druga međunarodna konferencija na temu SCC je održana u Tokiju, Japan -Evropska komisija je kroz program FP5 pokrenula razvojni projekat EU Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete skraćeno Testing SCC -Formiran je ASTM međunarodni podkomitet C 09.47 na temu samozbijajućeg betona
2002	Prva severnoamerička konferencija na temu SCC održana je u Čikagu, Illinois, SAD
2003	-Treći međunarodni RILEM simpozijum na temu SCC održan je u Rejkjaviku, Island -Formiran je ACI Tehnički komitet 237—Self-Consolidating Concrete
2004	Formiran je tehnički komitet RILEM TC 205-DSC – Durability of Self Compacting Concrete
2005	-Četvrti međunarodni RILEM simpozijum i Druga severnoamerička konferencija na temu SCC održane su istovremeno u Čikagu -Prvi međunarodni simpozijum SCC2005-China u vezi sa projektovanjem, performansama i upotrebom SCC održan je u Changsha, Hunan, Kina u organizaciji "Hunan University"
2007	-Peti međunarodni RILEM simpozijum na temu SCC održan je u Gentu, Belgija -Formiran je tehnički komitet RILEM TC 222-SCF – Simulation of Fresh Concrete Flow -Formiran je tehnički komitet RILEM Technical Committee MPS - Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete
2008	Treća severnoamerička konferencija na temu SCC održana je u Čikagu, SAD
2009	Drugi međunarodni simpozijum SCC2009-China u vezi sa projektovanjem, performansama i upotrebom SCC održan je u Pekingu, Kina, u organizaciji "Hunan University", "Central South University" i "Tsinghua University"
2010	Šesti međunarodni RILEM simpozijum i četvrta severnoamerička konferencija na temu SCC održana je u Montrealu, Kvebek, Kanada
2013	Peta severnoamerička konferencija na temu SCC održana je u Čikagu, SAD
2013	Sedmi RILEM simpozijum na temu SCC i Prva međunarodna konferencija na temu reologije i procesiranja konstruktivnih materijala održana je u Parizu, Francuska
2014	Treći međunarodni simpozijum u vezi sa projektovanjem, performansama i upotrebom SCC je održan u Xiamen, China

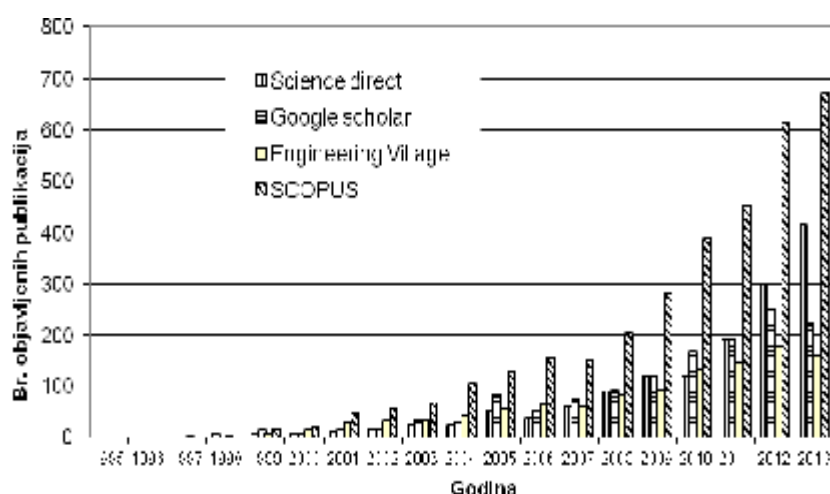
Tabela 1.5 Dokumenti u vezi sa SCC [39],[64]

Godina	Dokument u vezi sa SCC i institucija koja ga je objavila
1997	"AIJ Recommended Practice for High Fluidity Concrete for Building Construction", Architectural Institute of Japan
1998	"Recommendation for Construction of Self-Compacting Concrete", Japan Society of Civil Engineers Priručnik za spravljanje samozbijajućih betona, Nacionalne Asocijacije za beton ugrađen na gradilištu (<i>National Ready Mixed Concrete Association</i>), USA, 1998.
2000	"Report rep023: Self-Compacting Concrete—State-of-the-Art Report", RILEM TC 174-SCC
2005	"The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use", Self-Compacting Concrete European Project Group
2006	"Report rep035: Casting of Self-Compacting Concrete—Final Report", RILEM TC 188-CSC ASTM usvaja metode za ispitivanje fluidnosti, sposobnosti prolaska i otpornosti na segregaciju
2007	"Report rep038: Durability of Self-Compacting Concrete—State-of-the-Art Report", RILEM Technical Committee 205-DSC "ACI 237R-07, Self-Consolidating Concrete" American Concrete Institute
2010	Objavljeni su standardi u vezi sa SCC u okviru Evropske Unije, koji su u primeni u Srbiji od 2012. (grupa standarda u okviru SRPS EN 12350) Objavljen deo EN 206-9:2010 (Concrete. Additional rules for self-compacting concrete) koji se odnosi na dodatna pravila za SCC

Navedeni dokumenti su proizveli sledeće efekte [161]:

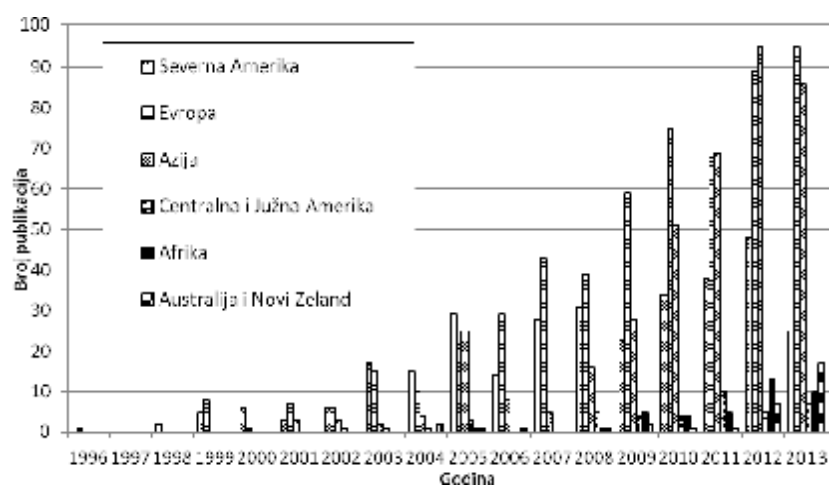
- Definisani su karakteristike i tehnički termini u primeni SCC
- Navedeni su materijali koji se mogu upotrebiti
- Razvijene su tipične metode za projektovanje i procenu prihvatljivih performansi
- Pokriveni su zahtevi u vezi sa proizvodnjom i kontrolom kvaliteta na gradilištu
- SCC je klasifikovan u tri tipa (praškasti, viskozan i kombinovan),
- Ocenjene su karakteristike SCC prema uslovima armiranja
- Povezano je ponašanje SCC u svežem stanju sa Bingamovim parametrima i sagledana važnost poznavanja površinske vlage agregata u proizvodnji
- Uspostavljena je kvalitetna osnova za dalja istraživanja i razvoj

Sa dijagrama prikazanog na slici 1.2. se vidi da broj publikacija iz oblasti SCC raste gotovo eksponencijalno, što se može delimično pripisati i rastu aktivnosti u smislu istraživanja na globalnom nivou.



Slika 1.2 Trend objavljivanja publikacija u vezi sa SCC u svetu

Iako je SCC potekao iz Azije (Japan), može se reći da je potencijal ovog materijala veoma brzo registrovan i u drugim razvijenim zemljama, te je najveći obim istraživanja na polju SCC obavljen u Severnoj Americi i Evropi (slika 1.3.). Istraživači iz Evrope su se takođe veoma brzo zainteresovali za predmetnu tematiku, o čemu svedoči gotovo isti broj objavljenih radova kao i u Severnoj Americi, pri čemu se intenzitet istraživanja na ovom polju tokom godina iz razvijenijih zemalja (Velika Britanija, Nemačka, Belgija itd.) premešta u manje razvijene zemlje (Poljska, Turska itd.). Slična je situacija i u Aziji, gde se značajan intenzitet istraživanja osim u Japanu, Kini i Indiji može primetiti i u Iranu, Iraku, Tajlandu itd. Ovaj trend se može smatrati globalnim, iz razloga što se broj objavljenih rezultata istraživanja u Južnoj Americi, Centralnoj Aziji i Africi povećava tokom godina.



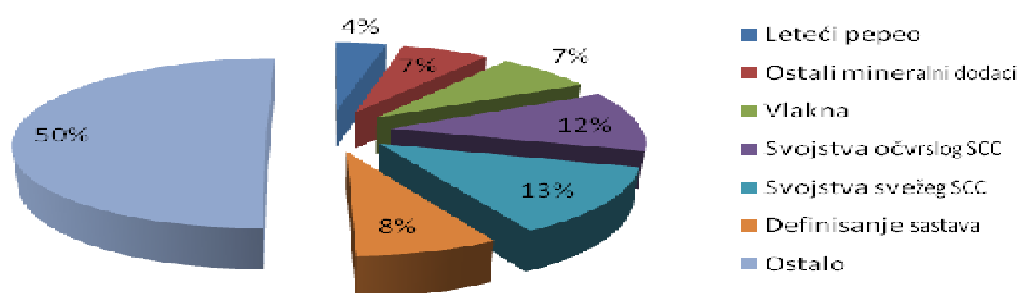
Slika 1.3 Porast broja publikacija u vezi sa SCC po kontinentima (Google scholar)

Ako se posmatraju tri karakteristične godine, u periodu 2011-2013. na osnovu objavljenih radova može se zaključiti da su u istraživanjima prednjačili SAD, Indija, Kina, Iran i Turska (videti tabelu 1.6.).

Tabela 1.6 Broj publikacija po državama u periodu 2011-2013. godine

Godina	2011	2012	2013	UKUPNO
SAD	28	37	19	84
Indija	11	31	31	73
Kina	19	21	10	50
Iran	19	14	13	46
Turska	14	19	12	45
Kanada	10	11	6	27
Poljska	6	6	15	27
Francuska	6	7	11	24
Egipat	0	8	9	17
Grčka	4	4	9	17
Alžir	4	4	3	11
Belgija	4	2	5	11
Brazil	5	2	4	11
Australija	1	4	2	7

Tematski posmatrano, istraživanja u oblasti SCC bazirala su se pre svega na pojmovima prikazanim na slici 1.4.



Slika 1.4 Tematska analiza radova u vezi sa SCC u periodu 1995-2013.

U Srbiji je SCC bio poznat već od samih početaka njegove primene u svetskim okvirima, a prva istraživanja iz ove oblasti su na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu vršena od 2000. godine [6],[235],[236],[315],[316],[317],[318],[319],[320].

1.4 Primeri primene SCC

Kao što je to već navedeno, prve primene samozbijajućeg betona datiraju iz početka devedesetih godina prošlog veka, kada su velike građevinske kompanije u Japanu ovaj beton koristile prilikom izgradnje raznih stambenih i komercijalnih objekata. Uporedo sa razvojem tehnologije proizvodnje samozbijajućeg betona u različitim zemljama u svetu, rastao je na svetskom nivou i broj objekata izgrađenih njegovom primenom, a pre svega u razvijenijim zemljama [64],[39]. Prva ozbiljnija primena SCC betona bila je za izradu pilona od prednapregnutog betona mosta sa kosim zategama "Shin-kiba Ohashi bridge" izvedenog 1991. godine. Smatra se da je najznačajnija dotadašnja primena ove vrste betona bila prilikom izvođenja anker-blokova na mostu Akashi-Kaikyo (slika 1.5), pa se ovaj poduhvat vezuje za svetske početke primene SCC [197].



Slika 1.5 Ankerni blok (u izgradnji) mosta "Akashi-Kaikyo" [197]

Drugi veliki projekat u Japanu u kome je primenjen samozbijajući beton bilo je izvođenje zidova rezervoara za skladištenje tečnog gasa, kapaciteta 180 000 m³, kompanije "Liquid Natural Gas". Zahvaljujući primeni samozbijajućeg betona projektovane čvrstoće pri pritisku od 60 MPa, debljina zida rezervoara je redukovana sa 110 cm na 80 cm (čime je zapremina betona redukovana za oko 30 %), a vreme izgradnje objekta sa 22 na 18 meseci. Glavni nosači vijadukta "Higashi-Oozu", izvedenog od SCC u Japanu, izrađeni su kao prefabrikovani prednapregnuti "T" nosači [198]. Tržni centar pod nazivom "Midsummer Place", izveden 2001. godine u Londonu, bio je prvi veliki projekat (okvirne vrednosti od oko 65 miliona funti) u Velikoj Britaniji u kojem je uspešno upotrebljen samozbijajući beton. Samozbijajući beton je primenjen i pri izgradnji telekomunikacionog tornja "Macao Tower" u Makau u Kini. Naučni centar

"Phaeno" u Wolfsburg–u, Nemačka, je po svojoj konstrukciji i izgledu veoma neobičan objekat, građen u periodu od 2002. do 2005. godine. Primena samozbijajućeg betona u velikoj meri je doprinela korektnom odgovoru na visoke projektne zahteve koji karakterišu ovu konstrukciju u geometrijskom smislu, kao što su, na primer, nepravilni uglovi, nekarakteristične linije i površine [39]. Zidovi najveće svetske komore za ekološke simulacije u cilju testiranja hardvera za dva nacionalna svemirska programa (Orion and Constellation space programs) u SAD su izgrađeni upotrebom SCC, 2010. godine [64].

Poslovni objekat pod nazivom "European Business Center", (slika 1.6) izveden je tokom 2005. i 2006. godine u Novom Beogradu. SCC je primenjen u izgradnji temeljne ploče i pratećih elemenata konstrukcije [39].



Slika 1.6 "European Business Center" u Beogradu [39]

Most na Zapadnoj Moravi u Ovčar Banji izvela je građevinska firma "Putevi" AD iz Užica tokom 2005. i 2006. godine. Samozbijajući beton primenjen je pri izradi prednapregnutih glavnih nosača [75].

Izradnja nove konstrukcije Avalskog tornja počela je 6. februara 2007. godine. Pored savremenih principa konstruisanja i moderne tehnologije izvođenja, zabeležena je i upotreba najsavremenijih materijala, među kojima je bio i samozbijajući beton [107], [76].

2. Aspekti primene, kategorije i komponente SCC

2.1 Definicija i svojstva samozbijajućih betona

Svojstva samozbijajućih betona (SCC) u svežem stanju osnovna su odrednica prilikom definisanja pojma SCC [161]. Definicije SCC u literaturi variraju [4],[82],[190], pri čemu je najčešća ona da je to "beton koji može da teče usled sopstvene težine, i u potpunosti popunjava oplatu, u isto vreme zadržavajući homogenost, čak i uz prisustvo guste armature i kompaktira se i ugrađuje bez potrebe za vibriranjem".

Najvažnija svojstva SCC su: sposobnost popunjavanja oplata, sposobnost prolaska između šipki armature i otpornost na segregaciju. SCC mora biti sposoban da teče pod dejstvom sopstvene težine i da u potpunosti popunjava oplatu, ne ostavljajući prazne prostore na kontaktu sa oplatom. Sposobnost prolaska između šipki armature podrazumeva da SCC može proći i između veoma gusto postavljenih šipki, ali i uzanih delova oplata, bez blokiranja i u potpunosti obmotavajući šipke armature i ostvarujući kvalitetnu adheziju sa njima. Otpornost na segregaciju ogleda se u sposobnosti betona da zadrži svoju homogenost prilikom transportovanja, kao i za vreme i posle ugrađivanja u oplatu na gradilištu.

Ostala svojstva, kao što su robusnost i održavanje konzistencije, takođe su važna u primeni SCC. Robusnost se odnosi na sposobnost SCC da zadrži svoja svojstva u svežem stanju, pri promeni kvaliteta i količina komponentnih materijala, kao i pri promeni uslova spoljašnje sredine (temperatura, vlažnost). Zadržavanje konzistencije odnosi se na zadržavanje svojstava pokretljivosti, ugradljivosti i obradljivosti kod SCC u svežem stanju.

2.2 Kategorije

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 [69],[97],[178].

- Praškasti tip SCC karakteriše nizak vodopraškasti faktor (W/P), kao i visok sadržaj praškastih (finih) čestica, tj. filera (najčešće od 550 kg/m^3 do 650 kg/m^3). 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 plastifikator 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 $350\text{--}450 \text{ kg/m}^3$), obzirom da se viskoznost kontroliše dodavanjem VMA. Posebna pažnja treba da bude posvećena mogućoj nekompatibilnosti između superplastifikatora i VMA [81].

- 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 [147]. Poseban problem kod ovog, kombinovanog, tipa SCC predstavlja usložnjavanje odnosa komponenata i poskupljenje prouzrokovano upotrebom dva tipa hemijskih dodataka.

2.3 Prednosti primene SCC

U poređenju sa NVC, SCC poseduje bolja svojstva, pa prema tome njegova upotreba rezultira poboljšanom produktivnošću i uslovima rada [67]. Eliminacijom faze vibriranja, unutrašnja segregacija između čvrstih čestica i tečne faze koja ih okružuje je izbegnuta, što rezultira manje poroznom prelaznom zonom između paste i agregata, kao i ravnomernijom bojom betona [229]. Zato se, u odnosu na NVC, kod SCC mogu očekivati poboljšana čvrstoća i trajnost. Takođe, za većinu betonskih konstrukcija, upotreba SCC može imati još pozitivnih efekata, kao što su mogućnost povećanja količine armature, smanjenja prslina upotrebom manjih prečnika armature sa složenijim sklopovima i oplatom, što bi sve kod NVC dovelo do povećanja problema u vezi sa ugrađivanjem [187],[229]. Osim ovih prednosti upotrebe SCC, mogu se navesti i veća homogenost betona u gusto armiranim elementima konstrukcije, kao i poboljšanje efikasnosti i efektivnosti aktivnosti na gradilištu, obezbeđenog smanjenjem potrebnog vremena za ugrađivanje i smanjenjem troškova upotrebe radne snage.

Upotrebom SCC poboljšava se i radno okruženje time što se smanjuje zagađenje bukom, a eliminišu se i zdravstveni problemi u vezi sa upotrebom sredstava za vibriranje, poznati kao "mrtvi prsti", kao i oštećenje sluha [229]. Ovo je rezultiralo time da je industrija za proizvodnju prefabrikovanih montažnih betonskih elemenata počela da mnogo više upotrebljava ovaj beton u Severnoj Americi i u Evropi [64],[248]. Mogućnost upotrebe SCC bez završne obrade (tzv. "vidni beton") jedna je od očiglednih prednosti ovog betona, što ga u arhitektonskom smislu čini naročito pogodnim [194]. Po svojoj prirodi, a i na osnovu načina projektovanja, SCC je generalno veće čvrstoće nego NVC i zato se često on svrstava u betone visokih performansi. Stoga se može postići ušteda na bazi manje ukupne količine ugrađenog betona, ali se i cena upotrebe tipske oplata može smatrati redukovanom [234]. Naravno, veća čvrstoća najčešće vodi povećanoj trajnosti, tj. dužem životnom veku konstrukcije. Tome se može dodati procena da će takva konstrukcija verovatno zahtevati manje potrebe za popravkama u odnosu na konstrukcije od NVC.

2.4 Ekonomski aspekti primene SCC

Za primenu SCC je karakteristična upotreba većih količina praškastih čestica (čestica sitnijih od 0.125mm) kao i hemijskih dodataka (u prvom redu superplastifikatora), što rezultira većom cenom materijala. U najvećem broju slučajeva cena SCC se povećava 20% do 60% u odnosu na NVC sličnih fizičko-mehaničkih svojstava [179],[202].

Povećani sadržaj praškastih čestica i hemijskih dodataka takođe vodi većoj osetljivosti SCC u odnosu na variranje komponenata u odnosu na NVC (smanjena robusnost), što dovodi do većih zahteva kada je u pitanju kontrola kvaliteta [302].

Izvesna istraživanja su obavljena sa ciljem optimizacije odnosa cene i performansi kod SCC. U prvom redu težilo se smanjenju količine cementa i povećanju količine mineralnog dodatka - filera, uz zadržavanje konstantnog sadržaja sitnih čestica u jedinici zapremine betona. Pri tome, postizanje visokih čvrstoća betona nije bilo prioritet, već postizanje čvrstoća reda veličine od 20 do 30 MPa, a koje svakako mogu naći svoju opravdanost i oblast primene u izvesnim konstrukcijskim elementima [66]. Ova analiza se iz razloga lakšeg sagledavanja i preglednosti prikazuje u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Uporedni prikaz cena tradicionalnog betona i samozbijajućeg betona [66]

Komponente	Uobičajeni beton		Uobičajeni SCC ³		Testirani SCC		
	Jed. cena	Količina za 1 m ³	Cena €/m ³	Količina za 1 m ³	Cena €/m ³	Količina za 1 m ³	Cena €/m ³
CEM 32,5	8 €/100kg	300 kg	24,00	350 kg	28,00	260 kg	20,80
Agregat	15 €/ m ³	1,20 m ³	18,00	1,20 m ³	18,00	1,20 m ³	18,00
Superplastifikator	0,50 €/l	3,00 l	1,50				
Superplastifikator+VMA ¹	1,00 €/l			10,00 l	10,00	10,00 l	10,00
PFA ²	1,5€/100kg			130 kg	1,95	140 kg	2,10
Ukupno			43,50		58,00		51,00

¹ – VMA - modifikator viskoziteta (*viscosity modifying agent*)

² – PFA - leteći pepeo (*pulverized fuel ash*)

³ – SCC - samozbijajući beton (*self compacting concrete*)

Optimizacijom komponenata sa ciljem smanjenja jedinične cene po kubnom metru betona dobija se samozbijajući beton skromnijih mehaničkih karakteristika (testirani SCC) koji košta 17.24% više nego običan beton [66].

Prilikom istraživanja koje je bilo fokusirano na razvoj ekonomski efikasnog betona, zasnovanog na najčešće upotrebljavanom betonu prihvatljivog nivoa čvrstoće u najvećem broju konstrukcija [92] razvijeni su SCC sa zamenom od 35% cementa letećim pepelom klase F. Istraživanje je takođe pokazalo da je sa umerenom količinom sitnih čestica moguće postići željena svojstva u svežem stanju, dok dalje smanjenje količine sitnih čestica umanjuje kvalitet betona. Analiza je sprovedena poređenjem optimizovanih mešavina SCC sa NVC mešavinama, videti tabelu 2.2.

Tabela 2.2 Primer optimizacije SCC srednjeg nivoa čvrstoće [92]

Komponenta	J. cena	Kontrolni NVC		Optimizovani SCC	
		Količina	Cena	Količina	Cena
Cement	59 €/t	0.332	19.558	0.288	16.992
Leteći pepeo	0.77 €/m ³	0	0	0.16	0.1232
Krupan agregat do 20 mm	12.71 €/m ³	0.5	6.355	0.32	4.0672
Krupan agregat do 10 mm	9.31 €/m ³	0.33	3.0723	0.21	1.9551
Pesak	4.43 €/m ³	0.46	2.0378	0.63	2.7909
Superplastifikator	1.42 €/l	0	0	4.46	6.3332
VMA	1.42 €/l	0	0	0.99	1.4058
Ukupno			31.02		33.67
Razlika u ceni (%):					8.46

Mnogo realnije ekonomsko poređenje samozbijajućeg i običnog betona moralo bi da uzme u obzir veliki broj drugih faktora koji upravo i čine samozbijajući beton atraktivnim. U te faktore, pre svega, spada očigledna ušteda u mehanizaciji, energiji i ljudskim resursima, koja se ostvaruje prilikom ugrađivanja betona.

Generalno je prihvaćen zaključak da je kod veoma velikih konstrukcija povećanje cene u materijalu upotrebom SCC kompenzovano uštedom u ceni radne snage, vremena građenja i pomenutih ostalih pozitivnih efekata [33]. Prednosti upotrebe SCC u potpunosti su se pokazale kod kompozitnih sendvič sistema, kod kojih su SCC i NVC ugrađivani u slojevima unutar istih konstruktivnih elemenata [161],[187],[202].

2.5 Uobičajeni odnosi komponenata kod samozbijajućih betona

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 2.1. 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 2.1 Uporedni prikaz sastava NVC i SCC (% vol)

2.6 Aspekti u vezi sa procedurom mešanja

Pravilan izbor procedure mešanja i metoda ispitivanja rezultira kvalitetnim SCC sa svim prednostima koje izabrana procedura može da ponudi, sa jedne, odnosno relevantne i verodostojne podatke kao rezultate ispitivanja upotrebom izabranih metoda ispitivanja sa

druge strane. Procedura mešanja SCC odnosi se na sve parametre karakteristične za tok mešanja [161], a to su: tip mešalice, temperatura prilikom mešanja, trajanje mešanja, redosled doziranja komponenata i način doziranja superplastifikatora.

Generalno, prednost imaju mešalice sa lopaticama u odnosu na gravitacione mešalice. Moćnija mešalica povećaće pozitivne efekte mešavine kvalitetnijom homogenizacijom komponenata i time omogućiti bolje performanse betona u svežem i očvrslom stanju. U slučaju SCC, efekat mešalice je izraženiji, jer je neophodno kvalitetno dispergovati komponente, među kojima i mineralni dodatak i hemijski dodatak (po pravilu količina hemijskog dodatka je jako mala), što omogućava da se dejstvo hemijskog dodatka u potpunosti ispolji. Što se temperature tiče, očekuje se da će temperatura spoljašnje sredine uticati na svojstva SCC u svežem stanju. Više temperature rezultiraju bržom hidratacijom cementa i samim tim krućom konzistencijom i obrnuto.

Dužine mešanja zavise najviše od upotrebljenog superplastifikatora, vrste mešalice i količine materijala koji se meša; uopšteno posmatrano, dužina mešanja SCC je veća zbog njegovog karakterističnog sastava [52],[79], i preporučuje se da iznosi više od 5 minuta [207]. Redosled doziranja komponenata u najvećem broju slučajeva počinje doziranjem čvrstih, suvih komponenata. Nakon mešanja suvih komponenata, u cilju homogenizacije čvrstih čestica (agregata, cementa i mineralnih dodataka) vrši se doziranje vode i plastifikatora. Doziranje plastifikatora se, najčešće u zavisnosti od preporuka proizvođača, može obaviti direktno u vlažnu mešavinu nakon dodavanja ukupne količine vode. Češći slučaj je doziranje vode u dve faze, pri čemu se u drugoj fazi dozira superplastifikator, rastvoren u vodi. Ostale komponente, kao što su hemijski dodaci, doziraju se na sličan način. Vlakna se, u svojstvu mikroarmature, doziraju ili u suhu mešavinu, pre doziranja vode, ili kao poslednja komponenta, nakon što je SCC postigao potreban nivo konzistencije.

2.7 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. Vrsta i uloga komponentnih materijala biće dalje diskutovana u ovom poglavlju.

2.7.1 Cement

Reč cement potiče iz antičkog perioda, mada su njegovu preteču (smesu krečnjaka, gline i vode) koristili još Stari Egipćani. Termin "opus caementicium" je u Rimskom Carstvu upotrebljavan da bi se opisao građevinski materijal sličan savremenom betonu, spravljan od drobljene stenske mase ili opeke i pečenog kreča ili gipsa kao veziva. Vulkanska prašina, nazivana "pozzolana" je upotrebljavana takođe, u svim situacijama kada je moglo da se do nje dođe. Ona je činila antički beton otpornijim na slanu vodu, nego što je to savremeni beton. Pucolanski malter imao je visok sadržaj aluminata i silikata [180].

Prema poslednjim statističkim podacima, 2013. godine Kina je bila najveći proizvođač betona i cementa u svetu. Godišnja proizvodnja je oko 2 milijarde tona cementa tako da godišnja potrošnja po stanovniku iznosi preko 1600 kg. U Kini postoji preko 5000 fabrika cementa od kojih većina ima zastarelu tehnologiju što im ne smeta da postanu najveći izvoznici cementa pri gradnji infrastrukturnih objekata. U tabeli 2.3 dat je pregled ispitivanja iz 2013. godine, koja se odnose na potrošnju cementa u svetu.

Tabela 2.3 Potrošnja cementa u svetu u 2013. godini [292]

Zemlja	Miliona tona	(%)
Kina	2210	57.9
Indija	270	7.1
SAD	75	2.0
Iran	70	1.8
Brazil	69	1.8
Turska	64	1.7
Rusija	61.5	1.6
Vijetnam	60	1.6
Japan	51	1.3
Saudijska Arabija	50	1.3
Južna Koreja	48	1.3
Egipat	46	1.2
Tajland	37	1.0
Meksiko	35	0.9
Italija	33	0.9
Nemačka	32	0.8
Pakistan	32	0.8
Indonezija	32	0.8
Španija	21	0.5
Ostali	524	13.7
Ukupno (2013)	3820	100.0

U Srbiji postoje tri fabrike cementa, Lafarge Beočin, Holcim Novi Popovac (spajaju se 2015.) i Titan Kosjerić. Godišnja proizvodnja cementa u fabrikama cementa Lafarge Beočin i Holcim Novi Popovac iznosi preko 1 500 000 tona i 1 350 000 tona, respektivno. Sa današnjim kapacitetom, od oko 750 000 tona cementa godišnje, Titan Cementara Kosjerić pokriva značajne delove tržišta Srbije i Crne Gore [102],[103],[104],[105].

Osim cemenata proizvedenih u okviru pomenutih fabrika cementa, u izvesnoj meri je na tržištu prisutan i cement drugih proizvođača, poreklom iz okolnih zemalja (npr. Nexxe, Dalmacija cement i sl.).

Sve vrste cementa u upotrebi u Srbiji moraju zadovoljavati tehničke uslove (u smislu kvaliteta, usaglašenosti, postupka označavanja) propisane u Pravilniku o kvalitetu cementa [219] iz 2013. Osnov za donošenje ovog propisa čine dva zakona i to: Zakon o planiranju i izgradnji (član 201. tačka 3), odnosno Zakon o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti (član 6. stav 1).

2.7.1.1 Hidratacija silikatnog ili portland cementa

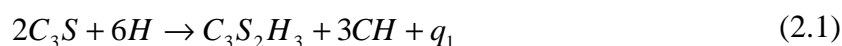
Kada se cement kao vezivo pomeša sa vodom dolazi do procesa koji se naziva hidratacija. U okviru pomenutog procesa odvija se niz hemijskih reakcija između sastojaka ili konstituenata cementnog klinkera, dodatih sulfata (sadra ili gips) i vode, a koje se u odvijanju međusobno preklapaju i čije su brzine različite. U velikom broju istraživanja u svetu primenjene su različite tehnike (elektronska mikroskopija, transmisija, skeniranje, fotoelektronska spektrometrija, difrakcija x-zraka itd.) da bi se bolje sagledao i objasnio mehanizam hidratacije i formiranje hidratizane strukture. I pored svih napora u pomenutim istraživanjima, još ne postoji opšte prihvaćena teorija hidratacije [118].

Zbog složenosti cementa kao kompozitnog sistema, kao i zbog složenosti procesa njegove hidratacije, taj proces hidratacije se pojednostavljeno interpretira razlaganjem hidratacije pojedinačnih sastojaka cementnog klinkera, obzirom da oni čine osnovni deo mase samog cementa. Tako se, na osnovu hidratacije glavnih minerala cementnog

klinkera, izvode zaključci o procesima i mehanizmima hidratacije sistema, kao i o kinetici reakcija koje za posledicu imaju fenomen vezivanja i očvršćavanja cementa kao mineralnog veziva.

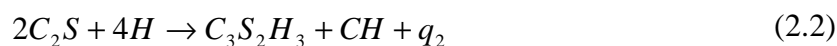
Svaki od četiri osnovna minerala u cementu (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) reaguje drugačijom brzinom i teži stvaranju različitih čvrstih faza nakon hidratacije. Ponašanje svakog od ovih minerala je istraživano njegovom sintezacijom u čistom obliku i hidratacijom u kontrolisanim uslovima. Klinker minerali od kojih se sastoji običan (silikatni) cement su bezvodna jedinjenja ili anhidridi. U dodiru sa vodom prvo dolazi do njihove hidrolize, pri čemu se razara njihova kristalna rešetka, a joni prelaze u rastvor, nakon čega slede procesi zasićenja i prezasićenja uz stvaranje novih jedinjenja, hidrata i hidroksida. Treba imati u vidu da se za vreme stvarnog procesa hidratacije cementa rastvaranje svih minerala vrši u istom rastvoru, pa su zato produkti hidratacije povezani sa rastvorom u celini više nego sa pojedinačnim cementnim mineralima. Ipak, pojedinačne reakcije omogućuju dobru aproksimaciju globalnog ponašanja cementa pri hidrataciji.

Trikalcijum-silikat (C_3S) je preovlađujući i najvažniji mineral cementa u portland-cementima, koji doprinosi najviše ranom razvoju čvrstoće. Hidratacija C_3S se može predstaviti jednačinom:



gde je $C_3S_2H_3$ kalcijum-silikat-hidrat (C-S-H) u obliku gela, a CH je kalcijum-hidroksid, koji se zove i portlandit. Kinetika hidratacije kod C_3S je suštinski slična onoj kod portland-cementa u globalu (videti sliku 2.2). Veliki deo reakcije se dogodi tokom prvih nekoliko dana, vodeći značajnom priraštaju čvrstoće i smanjenju kapilarne poroznosti.

Dikalcijum-silikatna faza (C_2S) reaguje u skladu sa sledećom jednačinom:



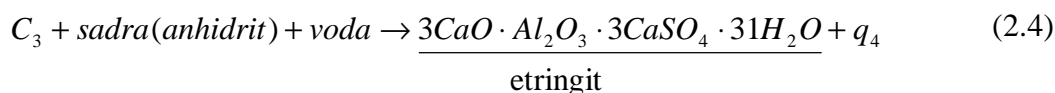
Produkti hidratacije su isti kao kod C_3S , ali relativni iznos CH koji se formira je manji. Naime, količina CH proizvedena pri hidrataciji C_3S iznosi oko 40%, što je preko dva puta više od količine proizvedene pri hidrataciji C_2S . C_2S je mnogo manje rastvorljiv nego C_3S , pa je zato i brzina njegove hidratacije mnogo sporija. Doprinos hidratacije

C₂S ranim čvrstoćama je mali, ali kasnije, kod cementne paste i betona veće starosti, on postaje značajan.

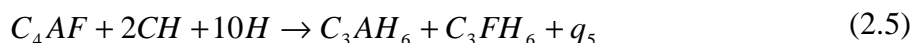
Hidratacija aluminatnih i feritnih minerala je kompleksnija nego kod kalcijum-silikata, a reakcije koje se odvijaju zavise od toga da li su u pornom rastvoru prisutni sulfatni joni. Mineral C₃A je visoko rastvorljiv, više čak i od C₃S. Hidratacijom C₃A u čistoj vodi formira se kalcijum-aluminat, prema sledećem reaktivnom procesu:



Konačni proizvod reakcije, C₃AH₆ se naziva hidrogarnet. Svrha dodavanja gipsa C₂H₂ portland-cementu je da se spreči brzo vezivanje. Gips je takođe veoma rastvorljiv, on brzo oslobađa jone kalcijuma i sulfatne jone u porni rastvor. Prisustvo sulfatnih jona prouzrokuje da kod C₃A dođe do drugačije reakcije hidratacije. Ova reakcija uključuje jone kalcijuma i gips (anhidrit):



Feritna faza (C₄AF) reaguje slično kao C₃A (jednačine 2.3-2.4), ali mnogo sporije. Važna razlika je u tome da izvesna količina aluminijuma u produktima hidratacije biva zamenjena gvožđem. Stepem zamene zavisi od velikog broja faktora u koje se ubrajaju sastav C₄AF i lokalni uslovi u pasti. Pogodan način da se predstavje ove reakcije je [285]:



Kao što je već pomenuto, većina portland-cemenata ne sadrži dovoljno dodatog gipsa da bi se u potpunosti obavila hidratacija C₃A i C₄AF pomoću reakcija 2.4 i 2.6, i da bi se formirao etringit. Nakon što se sav gips utroši, etringit reaguje sa preostalim C₃A i C₄AF i formira novu fazu sa manje sulfata, koja se naziva monosulfat. Stoga je u portland-cementnoj pasti veće starosti normalno naći monosulfat i malo ili nimalo etringita. Međutim, ako se novi izvor sulfatnih jona pojavi u pornom rastvoru, onda će

biti termodinamički prihvatljivije da se ponovo formira etringit, kao i na početku. Ovo će se desiti na račun postojećeg monosulfata:



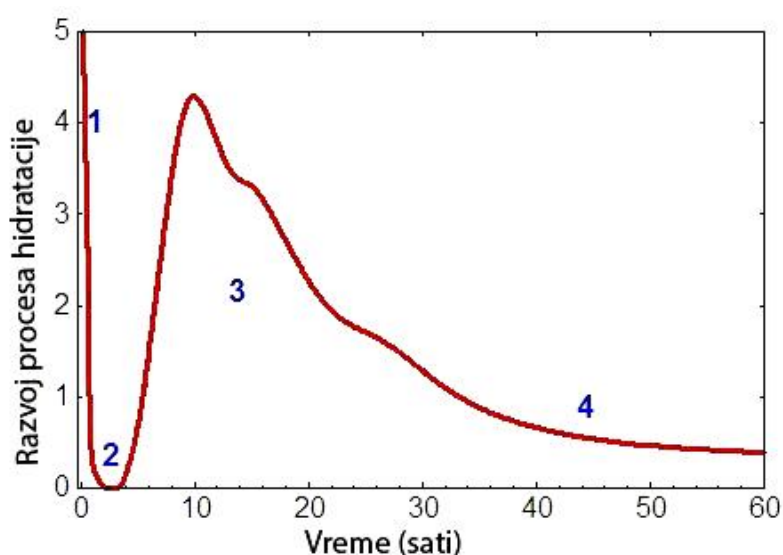
Naravno, na mestima A biće izvesna količina F. Gips sa leve strane jednačine 2.6 predstavlja ekvivalentni sadržaj rastvorenih jona, pošto se očvrslu gips neće naći u pasti.

Reakcija 2.6 ne predstavlja samo teorijsku osnovu, veoma je čest slučaj da sulfatni joni prisutni u podzemnim vodama, morskoj vodi i tlu prodiru u beton, omogućavajući ponovno formiranje etringita (sulfatna korozija). Ovo se pre svega dešava u betonu ispod nivoa površine tla, kao što su temelji zgrada, ali nije ograničeno na ova mesta. Problem kod ovog fenomena je činjenica da je jednačina 2.6 ekspanzivna, odnosno da etringit zauzima veću zapreminu u odnosu na monosulfat koji zamenjuje. Usled ove reakcije se, iz tog razloga, javljaju naprezanja u masi betona koja mogu voditi do pojave prslina i drugih deteriorativnih procesa. Nažalost, ovo je u stvari samo prvi korak procesa sulfatne korozije, pošto nakon što je sav monosulfat potrošen druge hemijske reakcije mogu da se odigraju, koje dovode do daljeg slabljenja cementne paste, pod uslovom stalnog unosa sulfatnih jona.

2.7.1.2 Toplota hidratacije cementa

Toplota hidratacije je toplota koja se oslobađa reakcijom cementa i vode. Karakteristični dijagram promene toplote sa vremenom prikazan je na slici 2.2. Rana hidratacija C_3A prilikom formiranja etringita je veoma brza, i njegov doprinos kinetici u fazi 1 je najveći, kao što se to može videti sa slike 2.2. Uopšteno posmatrano, nakon što se cement i voda pomešaju, dolazi do brzog razvoja toplote, koji se obavi u prvih nekoliko minuta, i rezultira prvim vrhom toplote hidratacije (tačka 1). Taj prirast toplote hidratacije se povezuje sa brzim rastvaranjem kristala kalcijumovih soli u vodi i migracijom aluminatnih i sulfatnih jona u pornom rastvoru (reakcije 2.4 i 2.5). Nakon ovog brzog razvoja, sledi brzi pad toplote hidratacije, usled smanjenja rastvorljivosti aluminata prouzrokovanog prisustvom sulfata u rastvoru. Sledeći pik se pojavljuje nakon 4 do 8 sati nakon početka hidratacije za većinu portland-cemenata i u skladu je sa toplotom hidratacije etringita. Većina istraživača smatra da je ova etapa razvoja toplote

hidratacije uključila i toplotu usled rastvaranja C_3S i formiranja C-S-H. Paste cemenata kod kojih je na ispravan način usporen proces hidratacije zadržaće veći deo svoje plastičnosti pre početka ove etape razvoja toplote i doći će do njihovog početnog prelaza u čvrstu fazu i početnog vezivanja pre nego što se dostigne tačka 3 na dijagramu, koja obično odgovara kraju vezivanja i početku očvršćavanja. Kada dolazi do hidratacije C_3A u okviru cementne paste, ovaj drugi period reakcije često formira sekundarni pik na silaznom delu dijagrama (etapa 4) odmah nakon glavnog vrha (nije prikazano na slici 2.2).



Slika 2.2 Razvoj toplote hidratacije cementa u funkciji vremena [285]

Na osnovu sprovedenih analiza toplote hidratacije velikog broja cemenata, izračunati su relativni doprinosi toploti hidratacije svakog od četiri glavna sastojka portland-cemenata (Verbeck i Foster, tabela 2.4).

Tabela 2.4 Toplota hidratacije portland cementnih sastojaka [9]

Sastojak	Toplota hidratacije pri datoj starosti (cal/g)		
	3 dana	90 dana	13 godina
C_3S	58	104	122
C_2S	12	42	59
C_3A	212	311	324
C_4AF	69	98	102

Pošto toplota hidratacije ima aditivan karakter, može se predvideti na osnovu izraza:

$$H=aA+bB+cC+dD, \quad (2.7)$$

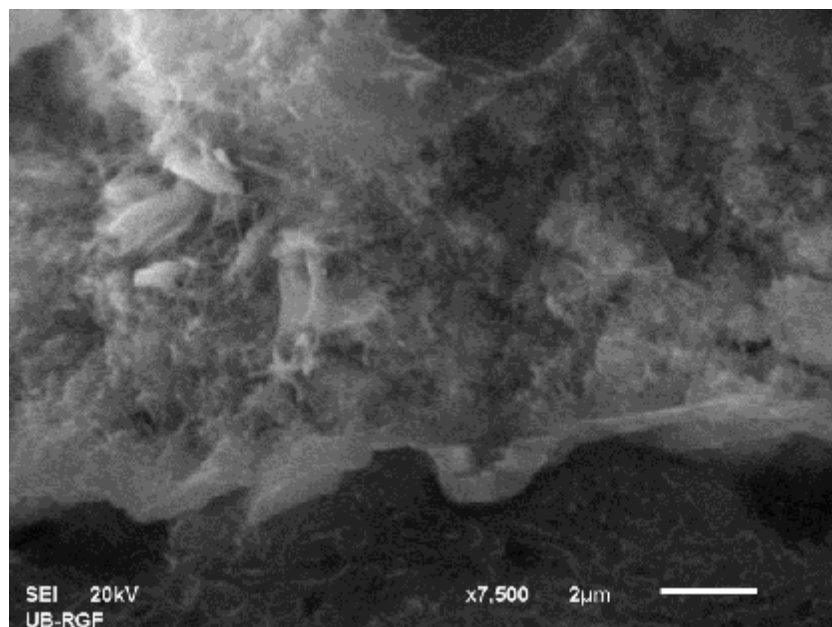
gde H predstavlja toplotu hidratacije u datom trenutku i pri datim uslovima, A,B,C,D su procenti sadržaja C_3S , C_2S , C_3A i C_4AF koji su prisutni u cementu, dok a, b, c i d predstavljaju doprinos 1% odgovarajućeg sastojka u razvoju toplote hidratacije. Vrednosti koeficijenata se razlikuju u zavisnosti od vremena proteklog od početka procesa hidratacije.

2.7.1.3 Produkti hidratacije cementa

C-S-H (Tobermorit) gel ne samo da je najvažniji produkt hidratacije, koji zauzima oko 50% zapremine paste, nego je i nosilac većine inženjerskih svojstava cementne paste. Za razliku od ostalih produkata hidratacije, koji takođe formiraju čvrste kristalne faze, C-S-H gel formira kontinualni sloj koji povezuje sve čvrste čestice u kohezivnu celinu. Ova sposobnost formiranja vezivne faze je posledica njegove strukture na nanometarskom nivou.

Kalcijum-hidroksid (C-H), takođe poznat pod nazivom portlandit, formira se od C_3S i u manjoj meri od C_2S kroz reakcije 2.1. i 2.2. Zauzima oko 15% zapremine normalne portland-cementne paste. Kalcijum-hidroksid formira kristale različitih oblika i veličina, u zavisnosti od raspoloživog prostora za rast. C-H ne doprinosi mnogo čvrstoći i nepropustljivosti paste, jer smanjuje potpunu zapreminu pora, konvertujući deo vode u očvrslе produkte hidratacije. U ovom smislu, on je mnogo manje važan produkt u odnosu na C-S-H. C-H je od svih produkata hidratacije cementa najrastvorljiviji, i zato predstavlja najslabiju komponentu u cementu i betonu iz ugla trajnosti.

Produkti hidratacije koji se formiraju od C_3A i C_4AF minerala zauzimaju oko 15-25% zapremine očvrslе cementne paste. Kao i u slučaju CH, oni ne doprinose mnogo inženjerskim svojstvima betona, osim u negativnom smislu, kada dođe do sulfatne korozije u cementnoj pasti. Osnovne kalcijum-sulfoaluminante faze imaju veoma različite strukture, morfološki posmatrano. Etringit formira jasne skupine prizmatičnih igala (slika 2.3), dok monosulfat formira heksagonalne pločaste kristale, slične CH, ali manje. U većini slučajeva, pojedinačni kristali obe faze su previše mali da bi se videli pomoću optičkog mikroskopa.



Slika 2.3 Oblast sa formiranim etringitom (igličasta struktura)

Najvažnija faza posle navedenih je kapilarna poroznost, koja može da zauzme deo zapremine paste veličine 3-20%, u zavisnosti od stepena hidratacije i početnog W/C faktora. U većini slučajeva, taj porni sistem betona će biti delimično ispunjen vodenim pornim rastvorom.

U većini pasti naći će se i cement koji nije reagovao, u obliku jezgara najvećih čestica cementa. Ova faza ne doprinosi inženjerskim svojstvima, ali ne dovodi ni do njihovog gubitka, osim u slučaju potencijalnog gubitka produkata hidratacije. Kod betona visokih čvrstoća, usled niskih W/C faktora i malog prostora, značajan deo cementa ostaje nehidratisan. Ostale čvrste faze koje se mogu naći u normalnim cementnim pastama uključuju hidrogarnet, koji je kalcijum-aluminatna faza sa kubnom strukturom, brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) koji ima istu strukturu i morfologiju kao CH, i singenit (KCS_2H), koji se formira samo u veoma alkalnim pastama.

2.7.1.4 Primena cementa kod SCC

Na osnovu rezultata iz literature, sve vrste cementa (čist, sulfatno otporni, na bazi pucolana) uspešno su upotrebljavane za spravljanje SCC. Odgovarajući izbor tipa cementa je više posledica specifičnih zahteva primene u pojedinim uslovima agresivnosti sredine i raspoloživosti na tržištu, nego posebnih zahteva samozbijajućeg

betona [82]. U svetlu upotrebe različitih vrsta cementa, od izuzetne je važnosti prethodno utvrditi kompatibilnost cementa sa hemijskim dodatkom ili hemijskim dodacima u konkretnom slučaju.

U suštini, sastav cementa utiče na ponašanje SCC. Pre svega, važan je sadržaj minerala C_3A i C_4AF , obzirom da oni prvi adsorbuju superplastifikatore [178]. Primenom cementa, koji u sklopu svog mineraloškog sastava sadrži više od 10% trikalcijum-aluminata ($3CaO \cdot Al_2O_3$), mogući su problemi u pogledu ugradljivosti betona [253]. Takođe, C_3A je često uzročnik sulfatne korozije cementa, pa se stoga u cementima koji treba da budu otporni prema delovanju sulfata, sadržaj ovog minerala dodatno ograničava. Osim pomenutog efekta, zbog ubrzane početne hidratacije [55] dolazi do smanjenja zadržavanja konzistencije, pa su, prema tome, za spravljanje SCC pogodniji cementi niskih toplota hidratacije, i cementi sa većom količinom belita (C_2S). U skladu sa evropskim preporukama za SCC, sve vrste cementa koje zadovoljavaju EN 197-1 mogu se upotrebljavati [82].

2.7.2 Hemijski dodaci

Hemijski dodaci su supstance koje svojim fizičkim, hemijskim ili kombinovanim delovanjem utiču na određena svojstva svežeg i/ili očvrslog betona [176]. Hemijski dodaci za beton, malter i injekcione mase su (u skladu sa standardom SRPS EN 934-2:2010 Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi – Deo 2: Dodaci betonu: definicije, zahtevi, usaglašenost, označavanje i obeležavanje, [266]) materije koje se dodaju za vreme procesa mešanja (spravljanja) betona u količini ne većoj od 5% u odnosu na masu cementa, da bi promenili svojstva betonske mešavine u svežem ili očvrsлом stanju [108].

Prema [265] hemijski dodaci se dele na sledeće grupe:

1. Hemijski dodaci reduktori vode – plastifikatori (water reducing/plasticizing admixture) koji omogućavaju smanjenje vode bez uticaja na konzistenciju betonske mešavine, ili koji ne utičući na sadržaj vode povećavaju sleganje/rasprostiranje betonske mešavine, ili proizvode simultano oba efekta,

2. Hemijski dodaci visokog stepena redukcije vode - superplastifikatori (high range water reducing/superplasticizing admixtures, HRWR) koji omogućavaju smanjenje vode u visokom stepenu bez uticaja na konzistenciju betonske mešavine, ili koji ne utičući na sadržaj vode povećavaju u značajnoj meri sleganje/rasprostiranje betonske mešavine, ili proizvode simultano oba efekta,
3. Dodaci zadrživači vode (water retaining admixture) koji smanjuju gubitak vode putem smanjenja izdvajanja vode na površini betona (bleeding),
4. Hemijski dodaci aeranti - uvlačivači vazduha (air entraining admixture) - putem ovih hemijskih dodataka se u strukturi betona formiraju mehurići (globule) vazduha reda veličine 0,01-0,3mm. Ovi mehurići su ravnomerno raspoređeni unutar mase betona, i takva struktura uslovljava povećanje otpornosti na dejstvo mraza.
5. Hemijski dodaci ubrzivači vezivanja (set accelerating admixture) skraćuju vreme početka vezivanja (transformacija mešavine iz plastičnog u očvršlo stanje),
6. Hemijski dodaci ubrzivači procesa očvršćavanja (hardening accelerating admixture) koji utiču na razvoj ranih čvrstoća betona, sa ili bez uticaja na vreme vezivanja,
7. Hemijski dodaci usporivači vezivanja (set retarding admixture) produžavaju vreme transformacije mešavine iz plastičnog u očvršlo stanje,
8. Hemijski dodaci zaptivači (water resisting admixture) kao i aeranti, mogu se smatrati za regulatore strukture betona; nakon njihove reakcije sa klinker mineralima dobijaju se proizvodi koji zaptivaju kapilarne pore u cementnom kamenu, na taj način povećava se stepen vodonepropustljivosti očvršlog betona,
9. Hemijski dodaci reduktori vode/plastifikatori sa efektom usporavanja vezivanja (set retarding/water reducing/ plasticizing admixture) po definiciji predstavljaju hemijske dodatke koji proizvode kombinovane efekte smanjenja sadržaja vode/efekat plastificiranja (primarni efekat) i efekat usporavanja vezivanja (sekundarni efekat),
10. Hemijski dodaci visokog stepena redukcije vode/superplastifikatori sa efektom usporavanja vezivanja (set retarding/high range water reducing/superplasticizing admixture) koji proizvode kombinovane efekte visokog stepena smanjenja sadržaja vode/efekat superplastificiranja (primarni efekat) i efekat usporavanja vezivanja (sekundarni efekat),

11. Hemijski dodaci reduktori vode/plastifikatori sa efektom ubrzavanja vezivanja (set accelerating/water reducing/plasticizing admixture) koji proizvode kombinovane efekte smanjenja sadržaja vode/efekat plastificiranja (primarni efekat) i efekat ubrzavanja vezivanja (kao sekundarni efekat).

Ovim standardom nisu obuhvaćeni aditivi antifrizi — sredstva koja sprečavaju smrzavanje svežeg betona, a koji deluju tako što snižavaju tačku smrzavanja vode. Njihovom upotrebom omogućava se izvođenje betoniranja i na temperaturama nižim od 0°C.

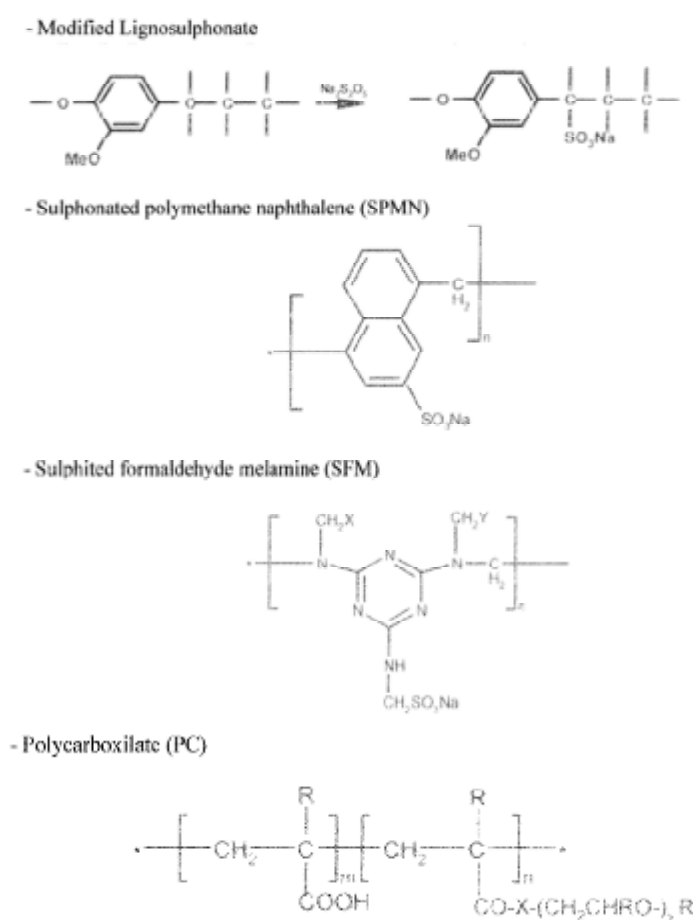
Praktično, 30-tih godina prošlog veka počeo je ubrzan razvoj hemijskih dodataka i njihova primena u građevinarstvu. U tabeli 2.5 data je kratka istorija upotrebe hemijskih dodataka. Hemijski dodaci se obično doziraju u količinama manjim od 5% u odnosu na masu cementa u mešavini, ali većina hemijskih dodataka se koristi u količini manjoj od 2%. Uobičajen opseg doziranja je 0.3-1.5%.

Tabela 2.5 Kratka istorija upotrebe hemijskih dodataka [182]

U antičko vreme (vreme Rimskog carstva)	Retarderi	Urin
	Uvlačivači vazduha	Krv
	Vlakna	Slama
	Plastifikatori	Mleko, krv, mast, melasa, belance jajeta
Prvi patent	1873. god.	U Nemačkoj je patentiran kalcijum-hlorid za upotrebu u betonu u svojstvu ubrzivača
Plastifikatori	1932. god.	Patent za sulfonat-naftalin-formaldehid (nije bio na raspolaganju u komercijalnim količinama)
	1930-1940. god.	Počela je upotreba lignosulfonata kao superplastifikatora Soli hidroksi-karboksilnih kiselina upotrebljavane su kao plastifikatori i retarderi
Zaptivači	1930-1940.	Masne kiseline, stearati i oleati
Aeranti	1941. god.	Sapuni lojanih i masnih kiselina za otpornost prema mrazu
Superplastifikatori	1963. god.	Sulfonatni naftalin formaldehidi u komercijalnoj upotrebi
	1963. god.	Sulfonatni melamin formaldehidi patentirani i dostupni
	1990-1999.	Razvoj polikarboksilat-etara i njihova upotreba, što je omogućilo i pouzdanu primenu SCC mešavina

2.7.2.1 Superplastifikatori

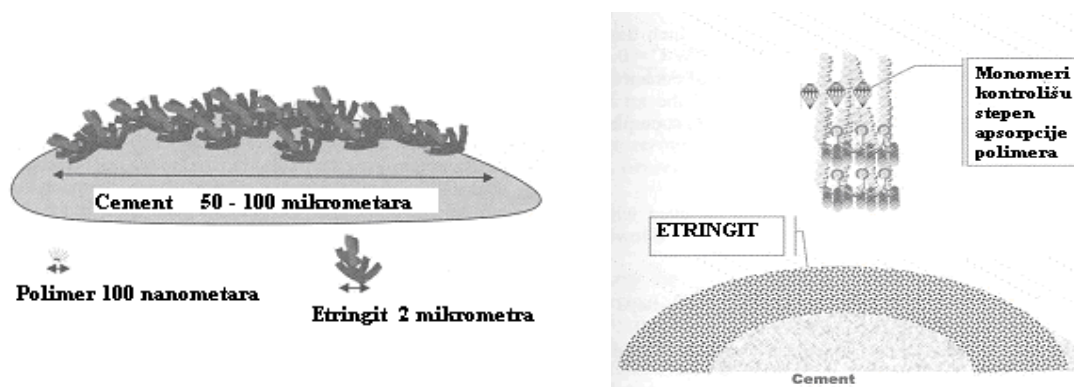
Superplastifikatori ili hemijski dodaci sa velikim rasponom redukcije vode (HRWR - high range water reducing admixtures), u skladu sa standardom SRPS EN 934-2:2010 se mogu koristiti u većim količinama u odnosu na obične plastifikatore, bez negativnog efekta kao što je značajno usporavanje vezivanja. Značajno veća redukcija količine vode može se postići u slučaju betona normalne ugradljivosti oko 30% ili kod tekućeg betona bez velikog dodavanja vode mešavini. Generalno, kada je reč o plastifikatorima i superplastifikatorima, oni se mogu podeliti u četiri familije, slika 2.4.



Slika 2.4 Osnovna podela na familije plastifikatora [182]

Intenzivniji razvoj polikarboksilata, koji je počeo u Japanu krajem 80-tih i tokom 90-tih godina, doveo je do šire upotrebe hemijskih dodataka u betonu na svetskom nivou. Takođe, ovo je bio snažan impuls industriji prefabrikovanih betonskih elemenata, a omogućio je i upotrebu SCC mešavina u pravom smislu.

Smatra se da superplastifikatori svoj efekat duguju sposobnosti da budu adsorbovani na površini čestica cementa (slika 2.5), nakon čega počinje dejstvo odbijanja i dispergovanja u mešavini, što izaziva pozitivne efekte u poboljšanju konzistencije. Iz tog razloga je važno proučiti ponašanje u smislu adsorpcije superplastifikatora od strane površine čestica cementa.



Slika 2.5. Mehanizam dejstva superplastifikatora (levo) i efekat padobrana (desno) [59]

Osnovni faktori uticaja na stepen adsorpcije superplastifikatora su [161]:

1. Temperatura – na višim temperaturama je brža adsorpcija [188],
2. Trajanje – postoji izražena tendencija pogoršanja konzistencije sa vremenom,
3. Izbor mineralnog dodatka (praškaste komponente),
4. Izbor metode mešanja.

Bez obzira na vrstu plastifikatora, njegovo prisustvo dovodi do produženja vremena vezivanja [289], jer predstavlja smetnju odvijanju hidratacije time što biva adsorbovan na površinu zrna cementa [147]. Rezultat je činjenica da sa povećanjem količine ili stepena adsorpcije superplastifikatora dolazi do dužeg trajanja reakcije hidratacije. Ovo omogućava i održavanje konzistencije sveže betonske mase u dužim vremenskim intervalima.

Postoje zaključci istraživanja [134],[307] koji ukazuju na povećanje vremena početka i kraja vezivanja cementa u slučaju da se poveća broj sulfoničnih i karboksilnih grupa u vodenim rastvorima superplastifikatora na bazi polikarboksilatnih kiselina.

U skorije vreme je istraživana efekat četiri tipa polikarboksilatnih superplastifikatora sa istim glavnim lancem i istom polimer-strukturom, ali sa različitom gustinom bočnih grupa karboksilnih kiselina na svojstva betona u svežem stanju i na reološka svojstva, kao i na čvrstoću pri pritisku SCC [167]. Sa povećanjem gustine bočnih lanaca superplastifikatora dolazilo je do smanjenja viskoznosti i povećanja pokretljivosti SCC mešavina. Sa povećanjem broja bočnih lanaca došlo je do bržeg gubitka obradljivosti svežih mešavina ("interlocking" efekat). Kada su cement i hemijski dodatak bili kompatibilni, vrsta hemijskog dodatka je uticala na rane čvrstoće betona, ali taj efekat se gubio posle 7 dana. Hemijski dodatak koji je doveo do najbržeg pada obradljivosti je povezan sa najvišim ranim čvrstoćama betona.

2.7.2.2 Hemijski dodaci tipa modifikatora viskoziteta

Hemijski dodaci tipa modifikatora viskoziteta (*Viscosity modifying agent – VMA*) se mogu podeliti u dve grupe u zavisnosti od načina dejstva: adsorptivni i neadsorptivni [178],[308]. Adsorptivni VMA deluju na cement. Nakon doziranja, oni bivaju adsorbovani na površinu cementa i međusobno se povezuju, povećavajući viskoznost betona na taj način. U ove VMA spadaju VMA rastvorljivi u vodi na bazi celuloze ili akrilni. Sa druge strane, neadsorptivni VMA deluju na vodu, bilo inhibirajući deo slobodne vode, bilo povezujući svoje molekule. Rezultat je delimično zadržavanje konzistencije. U ovaj tip VMA spadaju polimeri rastvorljivi u vodi na bazi glikola, biopolimeri, polisaharidi (welan i diutan guma), neki mikroorganizmi i neorganske materije sa visokom vrednošću specifične površine (npr. silikatna prašina).

Dodavanje VMA samozbijajućim betonima utiče na povećanje robusnosti i smanjenje opasnosti od segregacije. Istraživanja su pokazala da dodavanjem VMA čak i uz varijaciju količine vode od $\pm 10 \text{ l/m}^3$ ciljana pokretljivost svežeg betona ostaje u prihvatljivim granicama [192].

U opštem slučaju, dodavanje VMA će rezultirati povećanjem vremena vezivanja, jer se u izvesnoj meri VMA uvek vezuju za zrna cementa i u izvesnoj meri izazivaju smetnje reakciji hidratacije [147]. Na taj način upotreba VMA rezultira smanjenjem rane čvrstoće kod betona, bez negativnih efekata na kasnije čvrstoće pri pritisku [179]. Ovaj

efekat zavisi od tipa i sadržaja VMA, kao i od superplastifikatora, cementa i sastava mineralnog dodatka, ali i od W/C odnosa.

Osim navedenih zapažanja, treba napomenuti i da ponašanje SCC u svežem stanju može u velikoj meri zavisiti od međusobne interakcije između VMA i superplastifikatora. Ovo nalaže ozbiljne prethodne probe u laboratorijskim uslovima, kako bi se predmetni negativni efekat predupredio.

U skorije vreme su poređene serije SCC spravljene bez krečnjačkog brašna sa SCC i NVC, spravljanim uz prisustvo VMA [294]. Istraživana su svojstva različitih betona, ali sa konstantnom vrednošću vodocementnog faktora. Upotreba VMA u svojstvu zamene za mineralni dodatak rezultirala je krupnijim pornim sistemom. Na osnovu živine porozimetrije, utvrđeno je da je propustljivost kod SCC sa krečnjačkim brašnom (praškasti tip) niža nego kod SCC sa VMA.

2.7.2.3 Simultana upotreba hemijskih dodataka

Veći broj hemijskih dodataka usložnjava situaciju problemom njihove međusobne kompatibilnosti i zato je neophodno obaviti veći broj prethodnih proba da bi se postigla željena svojstva u svežem stanju.

2.7.3 Agregat

Smatra se da u slučaju primene kod SCC agregat sa kontinualnim granulometrijskim krivama daje bolje rezultate, pre svega u smislu pokretljivosti sveže betonske mešavine [161]. Na osnovu analize većeg broja radova izvedena je pretpostavka da se SCC prihvatljivih svojstava može dobiti i sa različitim veličinama, tipovima, oblicima i granulometrijskim krivama agregata koji zadovoljavaju određene granice.

U zavisnosti od prakse i dostupnosti na lokalnom nivou, postoji razlika u granici koja razdvaja agregat na sitan i krupan, pa je tako, na primer u većini evropskih zemalja ta granica 4 mm [253], u Japanu 5 mm [178] i 8 mm u Švedskoj [33].

Iako način pakovanja zrna agregata nema velikog uticaja na konačne čvrstoće, njegov uticaj na svež beton je značajan [162]. U stvari, ponašanje SCC u svežem stanju direktno zavisi od načina pakovanja zrna agregata. Kombinacija sitnog i krupnog agregata može povećati gustinu pakovanja zrna, što vodi smanjenju doziranja superplastifikatora i smanjenju zapremine paste [144]. Ovaj princip dovodi i do smanjenja opasnosti od segregacije, jer se sitnija zrna agregata suprotstavljaju migraciji krupnijih zrna u mešavini i na taj način sprečavaju segregaciju [35]. Bolji princip pakovanja poboljšava čvrstoće i trajnost zbog minimiziranja šupljina i zbog kompaktnije strukture. Što je beton kompaktniji, pasta je efektivnija u podmazivanju zrna i ispunjavanju šupljina u betonu u cilju postizanja bolje konzistencije i veće čvrstoće.

Za stepen interakcije između zrna agregata od velike važnosti je i oblik čestica. Prilikom primene u SCC, prirodni rečni šljunak zbog svoje zaobljenosti ima prednost u odnosu na drobljeni agregat, koji po pravilu ima nepravilniji oblik. Zbog manjeg trenja između čestica, prirodni rečni krupan agregat daje bolju mogućnost punjenja, ali drobljeni agregat ima bolji efekat na čvrstoću betona [29]. Prema CBI modelu (detaljnije opisanom u poglavlju 6), upotreba drobljenog agregata rezultira potrebom za većim količinama paste i manjom količinom agregata, da bi se izbegao efekat blokiranja, koji je izraženiji u slučaju upotrebe agregata nepravilnijeg oblika zrna. Takođe, SCC spravljani sa drobljenim agregatom zahtevaju veće količine superplastifikatora [215]. Prema tome, može se reći da su aspekti karakterizacije agregata, kao što su modul finoće, oblik zrna agregata, granulometrijska raspodela, gustina pakovanja i odnos sitan/krupan agregat faktori uticaja agregata na svojstva SCC u svežem stanju.

2.7.3.1 Sitan agregat

Pesak sa dobro graduisanom granulometrijskom krivom, sferičnim oblikom i niskom vrednošću upijanja ima prednost kod SCC. U zavisnosti od dostupnosti agregata koja je osnovni faktor izbora [248], iako prednost ima prirodni zaobljeni čistiji pesak, u SCC se može upotrebiti i lošije graduisan pesak, kao i pesak lošijeg oblika, uz neophodno povećanje zapremine paste ili viskoziteta [304].

Uticao vrste agregata, njegovog modula finoće i vlažnosti je veliki, naročito kod sitnog agregata, tj. peska [33],[79]. Promena površinske vlažnosti peska od 0.5% može rezultirati povećanjem količine vode u betonu u iznosu od 8 kg/m³, a samim tim i povećanjem rasprostiranja za oko 45 mm [24], pa je čest slučaj da se prilikom projektovanja minimalni sadržaj vode u agregatu definiše na nivou zasićenog, površinski suvog agregata. Sadržaj sitnih čestica (čestica sitnijih od 0.125 mm) ima kod SCC veći uticaj nego kod NVC [248]. Ukoliko postoje u agregatu, ove čestice mogu dovesti do povećanja viskoznosti [83],[132], povećanja W/P faktora za iste ciljne performanse, odlaganja hidratacije cementa, negativnog efekta na stabilnost zapremine betona [286], i dovesti do povećanja doziranja superplastifikatora, kao i smanjenja čvrstoće pri pritisku [83].

2.7.3.2 Krupan agregat

Sadržaj krupnog agregata u SCC ima veliki uticaj na njegovo ponašanje u svežem stanju, naročito kada se uzme u obzir činjenica da se u velikom broju istraživanja projektovanje mešavine za SCC baziralo na principu da je SCC materijal koji se sastoji iz dve faze, tj maltera i krupnog agregata. Analiza koja je uzela u obzir veliki broj istraživanja otkrila je da, pre svega, izbor krupnog agregata zavisi od dostupnosti na lokalnom nivou [74]. Obzirom da do negativnog efekta blokiranja lakše dolazi u slučaju upotrebe krupnijih zrna agregata, maksimalno zrno agregata kod SCC se uglavnom kreće u granicama od 16-20 mm. Na samom početku upotrebe SCC betona u konstrukciji ankernog bloka mosta Akashi Kaikyo (koji povezuje ostrva Honshu i Shikoku) maksimalno zrno agregata iznosilo je 40 mm [188].

Bez obzira na oblik zrna agregata, povećanje sadržaja krupnog agregata dovodi do smanjenja sposobnosti punjenja [187]. Poznato je da je efekat blokiranja zanemarljiv kada se koristi krupan agregat čija je količina ispod 50% zapreminske mase u suvom zbijenom stanju (tipičan zapreminski odnos od 32%); za dobro graduisan agregat sa dobrim oblikom zrna ova vrednost može se povećati na 60% [188].

Od posebnih vrsta agregata, laki agregati [174],[291] i reciklirani beton [58],[98],[100],[112],[123],[131],[288] upotrebljavani su u svojstvu agregata kako u NVC, tako i u SCC. Zbog svoje tendencije da isplivava, upotrebom lakog agregata povećavala se potreba za povišenom viskoznošću u cilju smanjenja rizika od segregacije [242]. Upijanje vode kod agregata na bazi recikliranog betona ima potencijalno značajan uticaj na mogućnost popunjavanja oplata zbog rapidnog gubitka konzistencije. Sa aspekta očuvanja životne sredine, upotreba recikliranog agregata je opravdana, a može da rezultira dobrim fizičko-mehaničkim karakteristikama kod betona, što je dokazano i ispitivanjima na konstruktivnim elementima (gredama) izrađenim od NVC sa 50% i 100% zamene krupnog agregata recikliranim agregatom [99].

Istraživanja koje su sprovedi Kou i saradnici, 2009. [152] na SCC sa 100% krupnog recikliranog agregata, i sa različitim nivoima sitnog recikliranog agregata u svojstvu zamene rečnog peska dala su ohrabrujuće rezultate. Mešavine su spravljane sa 0, 20, 50, 75 i 100% sitnog recikliranog agregata (zapreminski procenat zamene rečnog agregata), sa vodocementnim faktorima od 0.53 i 0.44. Spravljena je i serija sa recikliranim agregatom (i krupan i sitan agregat), sa tri različita vodocementna faktora od 0.44, 0.40 i 0.35. U svojstvu mineralnog dodatka upotrebljene su dve frakcije letećeg pepela, sitnija i krupnija od 0.045mm. Na osnovu istraživanja izveden je zaključak da sa povećanjem sadržaja sitnog recikliranog agregata može doći do povećanja rasprostiranja sleganjem i blokiranja, što je dovedeno u vezu sa pojavom većeg upijanja vode od strane recikliranog agregata u odnosu na rečni pesak; naime, bilo je potrebno dozirati veću količinu vode u mešavinu sa većim količinama recikliranog peska, da bi se kompenzovao uticaj tog upijanja. Kao ilustracija ovog upijanja, daje se primer da je posle 10 minuta postignuto samo 51% vrednosti upijanja na 24 sata. Sa druge strane, sa povećanjem količine sitnog recikliranog agregata, gubitak konzistencije posle 1 sata bio

je veći, zbog bržeg upijanja vode od strane sitnog recikliranog agregata. Najveće vrednosti čvrstoće pri pritisku i zatezanju cepanjem postignute su sa nivoom zamene od 25-50% sitnog agregata recikliranim agregatom. Otpornost na penetraciju hloridnih jona i skupljanje su se povećali, sa povećanjem sadržaja sitnog recikliranog agregata.

Uticaj različitih količina recikliranog krupnog agregata na različita svojstva SCC poređena su sa NVC, koji je sadržao 100% prirodnog krupnog agregata [205]. Spravljeni su betoni sa vrednostima čvrstoće pri pritisku uobičajene za upotrebu u većini konstrukcija. Na osnovu rezultata ispitivanja, zaključeno je da su vrednosti čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri savijanju i pri zatezanju cepanjem niže kod SCC nego kod NVC. Čvrstoća pri pritisku, pri savijanju i zatezanju cepanjem opadale su sa povećanjem sadržaja krupnog recikliranog agregata. Slične vrednosti čvrstoće pri pritisku su se, ipak, mogle postići do stepena zamene od oko 30%.

Istraživanja ponašanja SCC sa recikliranim agregatom [91] na bazi materijala dostupnih u Srbiji pokazala su slične rezultate, u poređenju sa prethodno pomenutim. U smislu poroznosti, zamena prirodnog agregata recikliranim agregatom u iznosu od 50% (cela frakcija 8/16) dovela je do smanjenja zapreminske mase betona od 2.12%, dok je zamena od 100% krupnog agregata (frakcija 4/8 i 8/16) dovela do pada zapreminske mase u iznosu od 3.40%. Ovaj efekat pratilo je povećanje upijanja vode u iznosu od 0.15-0.37%. Pomenute vrednosti zamene frakcija krupnog agregata dovele su i do pada čvrstoće pri pritisku, i to u iznosu od 3.88% (50% zamene) i 8.55% (100% zamene krupnog agregata recikliranim). Čvrstoća pri zatezanju savijanjem opala je 2.49–13.95% zamenom 50–100% krupnog agregata u ovoj studiji.

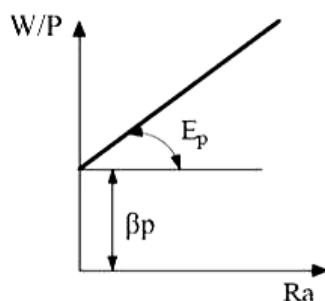
2.7.4 Fine (praškaste) čestice

Fine (praškaste) čestice predstavljaju najsitniju čvrstu komponentu kod SCC i sadrže cement i mineralne dodatke. U izvesnim istraživanjima ovde se ubrajaju i sitne čestice sadržane u sitnom i krupnom agregatu. Praškaste čestice imaju naglašeniji efekat na SCC nego na NVC, zbog većeg sadržaja. Njihov sadržaj direktno je povezan sa ponašanjem betona u svežem i očvrsлом stanju. Veličina sitnih čestica obuhvaćenih ovom definicijom varira, u Evropi gornja granica veličine ovih čestica iznosi u proseku

125-250 μm [33],[82], a u Japanu 75-90 μm [161],[188]. Istraživanja su pokazala da su paste sa finijim praškastim česticama (preko 3200 cm^2/g po Blenu) pokazale veću otpornost na segregaciju [200], zbog povećanja količine vode koju su upile te čestice.

Kada se govori o praškastim česticama, najvažnije karakteristike za njihovu primenu dobijaju se na pasti (mešavina vode i praškastih čestica, sa ili bez superplastifikatora) i to su [71],[83]: količina "zadržane" vode, koju praškaste čestice mogu da prime u odnosu na masu praškaste komponente (β_p) pre nego što pasta postane dovoljno pokretljiva i koeficijent deformacije (E_p) kao pokazatelj brzine promene pokretljivosti paste sa povećanjem količine dozirane vode.

Kao što je to prikazano na slici 2.6, postoji linearna veza između relativne površine rasprostiranja R_a (relativno odstupanje površine rasprostrte paste nakon i pre rasprostiranja) i vodopraškastog (W/P) faktora [161]. Na ovom dijagramu vrednost preseka sa W/P osom je β_p , dok je nagib linije zavisnosti jednak E_p .



Slika 2.6 Dijagram koji se izrađuje sa ciljem karakterizacije praškastih materijala za primenu u SCC [161]

Na osnovu ovih ispitivanja zaključeno je da za veće vrednosti veličine β_p raste količina vode potrebne da se pokrene rasprostiranje, a da veće vrednosti veličine E_p pokazuju veću robusnost paste. Veličine β_p i E_p zavise direktno od svojstava praškaste komponente. Karakteristične vrednosti pomenutih faktora za neke najčešće korišćene vrste mineralnih dodataka prikazane su u tabeli 2.6. [71],[161].

Tabela 2.6 Odnos zadržane vode β_p i koeficijenta deformacije E_p za različite praškaste materijale [71]

	Portland cement	Sprašena zgura	Krečnjačko brašno	Leteći pepeo
β_p	1.08	1.10	0.77	0.59
E_p	0.061	0.046	0.037	0.024

Prema ovim podacima, leteći pepeo počinje da teče sa najnižim vrednostima β_p i E_p , tj. sa najmanjom količinom vode, ali je najosetljiviji na promenu W/P faktora. Ovo se objašnjava njegovim sferičnim oblikom. Sa druge strane, vrednosti β_p i E_p kod cementa su visoke. Zamena cementa sprašenom zgurom visokih peći, krečnjačkim brašnom i letećim (elektrofilterskim) pepelom može smanjiti potrebnu količinu vode i povećati osetljivost na promenu W/P faktora.

2.7.4.1 Mineralni dodaci

Obično su za spravljanje SCC potrebne velike količine praškaste komponente. Ukoliko se za tu svrhu koristi samo cement, SCC će imati visoku cenu i biti podložan hemijskim procesima i termičkim prslinama. Zato je neophodno zameniti jedan deo cementa dodacima (puniocem, filerom) kao što su, na primer: leteći (elektrofilterski) pepeo, zgura visokih peći ili krečnjačko brašno.

Zbog uobičajenih većih količina filera u SCC, efekti koje ima na upijanje vode, sposobnost popunjavanja, hidrataciju cementa i svojstva u očvrslom stanju moraju se posebno istražiti, pošto mogu dovesti do poboljšanja ili pogoršanja svojstava SCC. Pri tome je kompatibilnost između mineralnih dodataka i superplastifikatora (i drugih prisutnih hemijskih dodataka) izuzetno važna stavka.

Mineralni dodaci se, prema standardu SRPS EN 206-1 [263], [264], definišu kao fini odnosno fino samleveni materijali mineralnog (neorganskog) porekla, koji se koriste u betonu da bi se postigla pojedina svojstva ili poboljšala pojedina svojstva. Postoje dva tipa ovih dodataka, to su inertni i polu-inertni (skoro inertni) dodaci (Tip I) i pucolanski ili latentno hidraulični dodaci (Tip II). Mineralni dodaci tipa II se nazivaju i pucolanima.

Pucolani su materijali koji sami ne poseduju ili poseduju slaba vezivna svojstva, ali će u fino sprašenom obliku i uz prisustvo vode, reagovati sa Ca(OH)_2 i formirati jedinjenja koja poseduju vezivna svojstva [16],[263]. Pucolani po pravilu imaju visok sadržaj amornog silicijuma (koji varira u pucolanima kao što su leteći pepeo, sprašena zgura, metakaolin i silikatna prašina), veliku specifičnu površinu i amorfno ponašanje pri ispitivanjima rendgenskim X-ray zracima. Ostali faktori, kao što su oblik čestica,

sadržaj Al_2O_3 i CaO takođe utiču na reaktivnost pucolana. Glavni sastojci mineralnih dodataka, SiO_2 i Al_2O_3 nakon reakcije sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kao produktom hidratacije cementa, dovode do formiranja kalcijum-silikata i aluminatnih hidrata. Pucolanska reakcija takođe smanjuje debljinu i poroznost prelazne zone, na taj način povećavajući čvrstoću veze između paste i agregata [154],[305]. U svakom slučaju, reakcija između produkata hidratacije cementa i pucolana je pri normalnim temperaturama spora, pa se često primenjuje jedan od tri metoda za ubrzavanje pucolanske aktivnosti:

- 1) Mehanički tretman – pucolani postaju aktivniji poboljšanjem finoće mlevenjem
- 2) Hemijska aktivacija – aktivnost pucolana se ubrzava dodavanjem hemikalija
- 3) Termički tretman – reakcija se može podstaći negom pri povišenim temperaturama i/ili pritiscima

Generalno posmatrano, upotreba finijih mineralnih dodataka (što povlači veće specifične površine i manje razmake između čestica) vodi većem unutrašnjem trenju prilikom pokretanja betona, na taj način rezultirajući visokim graničnim smičućim naponom i plastičnom viskoznošću nego kod upotrebe krupnijih mineralnih dodataka.

U smislu finoće (krupnoće čestica) mineralnih dodataka, frakcija ispod 0.125mm krupnoće se smatra generalno prihvatljivom, pri čemu je poželjno da više od 70% materijala prođe kroz sito otvora 0.063mm. Posebno samleveni fileri su u prednosti za upotrebu kod SCC zbog poboljšanih svojstava i kontinualnog kvaliteta prilikom proizvodnje betona [82].

2.7.4.2 Krečnjačko brašno

Krečnjačko brašno je najčešće primenjivan mineralni dodatak u SCC. Njegovom upotrebom se povećava granična vrednost napona smicanja, ali se ne postiže vidljiv efekat na plastičnu viskoznost i na rasprostiranje sleganjem [47]. Krečnjačko brašno ne utiče na hidrataciju cementa [309]. Sa druge strane, iako ne spada u pucolanske materijale, ono može doprineti čvrstoći jer fino samlevene čestice krečnjaka mogu igrati ulogu mesta nukleacije za hidrataciju cementa, ubrzavajući razvoj čvrstoće pri malim starostima [77],[251]. Krečnjak u izvesnom stepenu reaguje sa produktima hidratacije cementa i proizvodi vezivnu komponentu. Takođe, upotrebom krečnjačkog brašna se

može smanjiti skupljanje betona i apsorpcija vode. U odnosu na leteći pepeo, krečnjačko brašno doprinosi višim ranim čvrstoćama betona, a leteći pepeo višim kasnijim čvrstoćama betona [161],[170].

Uticao finocće mliva krečnjačkog brašna (finoća mliva određena prema BET metodi) na svojstva betona u svežem i očvrslom stanju istraživano je uz pomoć metode reometra i rasprostiranja sleganjem (u svežem stanju), odnosno merenjem čvrstoće pri pritisku i autogenog skupljanja, kao i praćenjem tendencija u smislu pojave plastičnih prslina u očvrslom stanju [81]. Na osnovu BET metode zaključeno je da se potreba za vodom za istu obradljivost SCC menja za 0.8% sa promenom finoće mliva od 1000 m²/kg. Veća specifična površina filera znači povećano autogeno skupljanje, manje isparavanje i sklonost pojavi plastičnih prslina, uz veću čvrstoću.

U studiji [294] su poređene serije SCC spravljene bez krečnjačkog brašna sa SCC i NVC, sa konstantnom vrednošću W/C faktora. Na osnovu rezultata izvedeno je nekoliko zaključaka, između ostalog da SCC imaju finiju pornu strukturu nego NVC, zbog upotrebe većih količina sitnih čestica, zatim zbog nižeg sadržaja agregata i zbog jačih superplastifikatora koji omogućuju disperziju najsitnijih čestica. Upotreba VMA u svojstvu zamene za mineralni dodatak rezultirala je krupnijim pornim sistemom. Sadržaj vazduha zavisio je od reoloških karakteristika SCC, sposobnosti tečenja i viskoznosti. Autori [294] su predložili jednačinu u cilju procene sadržaja vazduha na osnovu ova dva podatka. Jednačina glasi:

$$V(\%)=12.15-0.16\varnothing_f+0.33T_{50} \quad (2.8.)$$

gde je: V sadržaj vazduha (%), \varnothing_f (cm) i T_{50} (s) su prečnik i vreme dobijeni metodom rasprostiranja sleganjem. Ova relacija je u pomenutom istraživanju dala dovoljno dobre rezultate, sa koeficijentom korelacije od $R^2=0.92$.

2.7.4.3 Leteći pepeo

Leteći pepeo je fini materijal koji se dobija u industrijskim pećima pri sagorevanju čvrstih goriva (najčešće spraćenog uglja) [303]. Ovaj materijal se sakuplja u mehaničkim ili elektrostatičkim separatorima (elektrofilterima), pa se često naziva i elektrofilterski pepeo. Leteći pepeo, sposoban da reaguje sa kalcijum-hidroksidom na sobnoj temperaturi, usled prisustva SiO₂ i Al₂O₃ u amorfnom obliku u njegovom

sastavu, može da se smatra pucolanskim materijalom pogodnim za upotrebu u betonima i malterima [121],[124],[126],[127]. Veličina čestica letećeg pepela se najčešće kreće u granicama od 1-150 μm .

Faktori koji utiču na promenljivost sastava letećeg pepela [246] su: tip i mineraloški sastav uglja, stepen sprrašivanja samog uglja, tip peći za sagorevanje, uslovi pod kojima se dovodi vazduh, uključujući odnos vazduh-gorivo, način na koji se pepeo sakuplja, kako se sa njime postupa i način na koji se skladišti. Neujednačenost sastava letećeg pepela je jedna od najvećih mana koja smanjuje mogućnost za njegovu upotrebu [303].

Prema podacima iz perioda 1993-2008. generisanje produkata sagorevanja uglja u zemljama EU (EU 15) iznosi oko 60 miliona tona godišnje. Leteći pepeo čini skoro 68% te količine (oko 40 miliona tona godišnje). Na osnovu podataka iz 2008. oko 45% proizvedenog letećeg pepela se utroši u građevinskoj i rudarskoj industriji (oko 18 miliona tona), oko 47% se utroši za osiguranje otvorenih rudnika, jama i kamenoloma, oko 2% se nalazi na privremenim odlagalištima, a oko 6% se odlaže na deponije [84]. Oko 32% ukupne količine proizvedenog letećeg pepela u Evropi se upotrebljava kao dodatak cementu, ali i kao dodatak za proizvodnju betona. Količina letećeg pepela koji je upotrebljen u betonu porasla je sa 2.3 miliona tona u 1993. na 5.9 miliona tona u 2007 [84].

Na osnovu dostupnih podataka od EPS, u Srbiji postoji 11 termoelektrana, od kojih su najznačajnije (u smislu proizvodnje električne energije i generisanja letećeg pepela) prikazane u tabeli 2.7. Sve navedene termoelektrane u procesu proizvodnje električne energije koriste ugalj, i to pre svega lignit. Termoelektrane koje koriste lignit stvaraju oko 6 miliona tona letećeg pepela godišnje, koji se neadekvatno skladišti (pokriva područje od oko 1.800 ha). Procenjuje se da se na odlagalištima u Republici Srbiji nalazi preko 200 miliona tona pepela iz termoelektrana [115],[116],[117].

Najveći deo letećeg pepela u Srbiji koriste fabrike cementa. Tako, na primer, ugovorom sa fabrikom cementa „Holcim (Srbija)“, Novi Popovac praktično sav pepeo sa deponije TE Morava se koristi za potrebe cementare, tako da ne preostaju količine za eventualne druge korisnike [111]. Kada je u pitanju upotreba letećeg pepela za potrebe fabrika

cementa u Srbiji, isporuka se u najvećem broju slučajeva vrši sa aktivnih kaseti deponija pepela i šljake (pozajmište).

Raznim zakonskim i podzakonskim aktima ova problematika je uređivana na nivou države. Na primer, na osnovu Uredbe o korišćenju letećeg pepela i šljake u putogradnji - izgradnji i rekonstrukciji saobraćajnica i građevinarstvu propisuje se obavezno korišćenje letećeg pepela i šljake kao nusproizvoda iz termoelektrana i termoenergetskih postrojenja za izgradnju i rekonstrukciju saobraćajnica u građevinarstvu. Osim pomenute Uredbe, tematikom letećeg pepela se bavi i sledeća zakonska regulativa u Srbiji: Nacionalna strategija održivog razvoja (Službeni glasnik Republike Srbije br. 57/08), Pravilnik o uslovima i načinu sakupljanja, transporta, skladištenja i tretmana otpada koji se koristi kao sekundarna sirovina ili za dobijanje energije (Službeni glasnik Republike Srbije, br. 98/2010) i Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine (Službeni glasnik Republike Srbije br. 29/10).

Tabela 2.7 Termoelektrane u sistemu EP Srbije (izvor EPS)

Termoelektrana	Generatori	Početak rada	Gorivo	Napomena
TE Kolubara 270 MW	3 X 32 MW, 1 X 64 MW, 1 X 110 MW	1956-1979. god.	lignit	U sastavu Privrednog društva "TENT" radi i najstariji termokapacitet EPS-a – TE "Kolubara" u Velikim Crljenima.
TE Kostolac-A 310 MW	1 X 100 MW, 1 X 210 MW CHP	1967-1980. god.	lignit	U okviru Termoelektrane "Kostolac A" rade dva bloka: blok A1 100 MW, koji je počeo sa proizvodnjom 1967. godine i blok A2 210 MW, koji je počeo sa proizvodnjom 1980.
TE Kostolac-B 698 MW	2 X 349 MW	1987-1991. god.	lignit	U okviru Termoelektrane "Kostolac B" takođe rade dva bloka: blok B1 348,5 MW, koji je počeo sa proizvodnjom 1987. godine i blok B2 348,5 MW, koji je počeo sa proizvodnjom 1991. godine.
TE Kosovo-A 800 MW	1 X 65 MW, 1 X 125 MW, 2 X 200 MW, 1 X 210 MW	1962-1975. god.	lignit	TE "Kosovo A" sa 5 blokova ukupne snage 617 MW i proizvodnjom od 975 GWh, ugalj za potrebe proizvodnje električne energije iz ove TE doprema se sa kopa "Dobro Selo".
TE Morava 125 MW	1 X 125 MW	1969. god.	devet vrsta uglja	Termoelektrana "Morava" u Svilajncu izgrađena je na obodu područja u kojem se nalaze jamski rudnici uglja, sa ulogom da troši najsitnije frakcije uglja iz tih rudnika. Koristi čak devet vrsta ovog goriva različite toplotne vrednosti.
TE Nikola Tesla-A 1640 MW	2 X 210 MW, 4 X 305 MW	1970-1979. god.	lignit	TE "Nikola Tesla A" je najveća u Srbiji i na Balkanu, sa šest blokova ukupne snage 1.650 megavata. Smeštena je na desnoj obali Save, 30 kilometara uzvodno od Beograda
TE Kosovo-B 680 MW	2 X 340 MW	1983-1984. god.	lignit	TE "Kosovo B" sa 2 bloka ukupne snage 618 MW i proizvodnjom od 2.585 GWh. Termoelektrana "Kosovo B" se nalazi 15 kilometara od Prištine, kao pogonsko gorivo koristi lignit sa kopa "Belačevac".
TE Nikola Tesla-B 1240 MW	2 X 620 MW	1983-1985. god.	lignit	U Termoelektrani "Nikola Tesla B", 50 kilometara uzvodno od Beograda, nalaze se dve najveće elektroenergetske jedinice u Srbiji, do skoro i u Evropi na niskokalorični lignit, pojedinačne snage 620 megavata.

U svetu se leteći pepeo primenjuje u širokim okvirima. Najveće količine pepela koriste se u putogradnji, cementarama i industriji građevinskog materijala. Postoji nekoliko različitih podela letećih pepela i prirodnih pucolana, od kojih je najčešća podela prema ASTM C 618 (1993) [16], na tri klase:

Klasa N: Sirovi ili kalcifikovani prirodni pucolani kao što je dijatomejska zemlja, opalski rožnac i škriljac, vulkanski pepeo i tuf. Kalcifikovane kaolinske gline takođe spadaju u ovu kategoriju pucolana.

Klasa F: Leteći pepeo, koji se obično dobija sagorevanjem antracita ili bitumenoznog uglja, spada u ovu kategoriju. Ova klasa letećeg pepela poseduje pucolanska svojstva, ali veoma retko ili nikada sposobnost da očvršćava.

Klasa C: Leteći pepeo, koji se obično proizvodi od lignita ili uglja sa niskim sadržajem bitumena, je jedina vrsta pepela koja spada u ovu kategoriju. Ova klasa letećeg pepela ima pucolanska svojstva, ali i sposobnost sopstvenog očvršćavanja, u većoj ili manjoj meri. Najveći broj letećih pepela klase C sadrži više od 15% CaO. Neki pepeli koji spadaju u ovu klasu mogu imati i samo 10% CaO.

U tabeli 2.8 su dati zahtevi za leteći pepeo i prirodne pucolane za upotrebu u svojstvu mineralnih dodataka u Portland cementnim betonima, prema američkim normama [16].

Tabela 2.8 Zahtevi za leteći pepeo i prirodne pucolane za upotrebu u svojstvu mineralnih dodataka u Portland cementnim betonima [16]

Zahtevi	Klasifikacija pepela		
	N	F	C
Hemijski zahtevi: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, min (%)	70.0	70.0	50.0
SO_3 , max (%)	4.0	5.0	5.0
Sadržaj vlage, max (%)	3.0	3.0	3.0
Gubitak žarenjem, max (%)	10.0	6.0	6.0
Fizički zahtevi			
Ostatak pri mokrom sejanju na situ otvora 45 μm , max (%)	34	34	34
Indeks pucolanske aktivnosti, sa Portland cementom na 28 dana, min (%) u odnosu na kontrolni uzorak	75	75	75
Indeks pucolanske aktivnosti, sa hidratisanim krečom na 7 dana, min (MPa)	5.5	5.5	–
Zahtevi za vodom, max (%) u odnosu na kontrolni	115	105	105
Autoklavna ekspanzija ili kontrakcija, max (%)	0.8	0.8	0.8
Specifična masa, max. varijacija od prosečne (%)	5	5	5

Većina istraživača slaže se da je sa povećanjem finoće mliva samlevenog letećeg pepela moguće povećati njegovu pucolansku aktivnost, ali ovaj efekat se gubi sa povećanjem specifične površine preko $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ [246].

Upotreba u svojstvu mineralnog dodatka za beton predstavlja najvažniju primenu letećeg pepela, pa je stoga evropski standard EN 450, koji se odnosi na upotrebu letećeg pepela u betonu, veoma važan. U Srbiji je u primeni od 2010. godine. Standardom je obuhvaćen i obrađeni leteći pepeo, koji se proizvodi npr. klasifikacijom, selekcijom, prosejavanjem, sušenjem, mešanjem, mlevenjem ili redukcijom ugljenika.

U standardu SRPS EN 450-1 se definišu zahtevi u vezi sa homogenošću, stabilnošću i efektivnošću letećeg pepela. Zahtevi u vezi sa hemijskim sastavom su takođe definisani, u smislu gubitka pri žarenju, sadržaja sulfata, hlorida i slobodnog kreča. U slučaju ko-sagorevanja (co-combustion) u prisustvu reaktivnog SiO_2 , moraju se proveravati ukupni sadržaji oksida SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , sadržaj alkalija, MgO i fosfata. Fizički parametri definišu zahteve za finoću, varijaciju finoće i zapreminske mase, stabilnosti i indeksa aktivnosti. U dodatku za ove zahteve, nakon kategorizacije po pitanju gubitka žarenjem i finoće, leteći pepeo iz ko-sagorevanja mora da zadovolji zahteve početka vezivanja i u vezi sa potrebom za vodom. SRPS EN 450-2 se bavi uslovima saglasnosti za primenu letećeg pepela u betonu, kada je leteći pepeo proizveden u termoelektranama ili postrojenjima za procesuiranje.

Standard SRPS EN 206-1 [263] definiše efekte upotrebe letećeg pepela u betonu u smislu korekcije vodocementnog faktora odnosnom mase vode i ukupne mase cementa zajedno sa masom dodatka tipa II koja je korigovana množenjem koeficijentom "k", kao i u smislu zahteva za minimalnom količinom cementa za spravljanje 1 m^3 betona određenih svojstava (koncept "k" vrednosti).

2.7.4.3.1 Svojstva svežeg betona koji sadrži leteći pepeo

Usled sferičnog oblika i staklaste površine najvećeg broja čestica letećeg pepela (uz uslov da su čestice letećeg pepela sitnije od čestica cementa, koji je u najvećem broju slučajeva zadovoljen) većina istraživanja dovela je do zaključka da se sa dodavanjem letećeg pepela u iznosu od 10% u odnosu na masu cementa smanjuje potreba za vodom za 3-4%. Kada se leteći pepeo upotrebljava kao delimična zamena za pesak, do sadržaja

letećeg pepela od oko 8% u odnosu na zapreminu peska povećava se i obradljivost i sleganje, pri istom vodocementnom odnosu [246]. Međutim, sa većim sadržajem čestica krupnijih od 0,045 mm, povećava se i potreba za vodom, kao i sa povećanjem sadržaja čestica nesagorelog uglja (gubitak žarenjem preko 1%).

Ukoliko se pre upotrebe u betonu vrši mlevenje letećeg pepela, što je čest slučaj kada je sadržaj čestica krupnijih od 45 μm veći od 12%, bilo posebno, bilo zajedno sa cementnim klinkerom (za spravljanje cemenata sa dodatkom letećeg pepela) može se postići pozitivan efekat u smislu potrebe za vodom [172]. Naime, sprašivanjem se najverovatnije postiže razbijanje nepravilnih krupnijih i poroznih čestica, bez većeg uticaja na fine staklaste sferne čestice (sitnije od 20 μm). Upotreba letećeg pepela savremenih termoelektrana može smanjiti potrebu betona za vodom do 15-20% [60], a redukcijom vode se postiže smanjenje pora i šupljina, smanjenje skupljanja usled sušenja i sprečava prodor agresivnih materija iz spoljašnje sredine. Što je veća količina sfernih čestica letećeg pepela u pasti, bolji je efekat podmazivanja zrna agregata i veća je pokretljivost betona.

Na isti način na koji njegova upotreba utiče na ugradljivost i obradljivost, takozvana pumpabilnost (sposobnost lakog transporta betona uz pomoć pumpe za beton) se poboljšava upotrebom letećeg pepela u betonu [9]. Povećana količina sitnih čestica sfernog oblika po pravilu poboljšava pokretljivost i smanjuje trenje u kontaktu sa unutrašnjošću cevi kroz koju se pumpa beton. Međutim, prisustvo letećeg pepela u mešavini SCC dovodi do bržeg gubitka konzistencije i sposobnosti prolaska [160]. Pri tome je stabilnost, merena na osnovu metode sa sitom, najveća za SCC sa 80% letećeg pepela. Upotreba letećeg pepela u betonu dovodi do efekta podmazivanja čestica agregata, kao i do povećanja odnosa čvrstih čestica i tečnosti, pri istom vodocementnom faktoru, pa prema tome sledi da se smanjuje opasnost od segregacije i izdvajanja vode na površini.

Što se vremena vezivanja tiče, iako sve vrste letećeg pepela koje spadaju u klasu F dovode do usporavanja hemijske reakcije hidratacije cementa u izvesnoj meri, kod pepela klase C to nije uvek slučaj. Naime, ispitivanja su pokazala da ovi pepeli, koji obično sadrže velike količine kalcijuma i niske količine ugljenika (visok sadržaj

reaktivnih i/ili vezivnih komponenata), mogu dovesti do ubrzanog vezivanja. Uticaj dodatka letećeg pepela na vreme vezivanja kod betona i maltera je manji nego uticaj finoće mliva cementa, sadržaja vode u pasti i temperature pri ugrađivanju [246].

U opštem slučaju, dodatak letećeg pepela u betonu povećava potrebu za hemijskim dodatkom aerantom, za istu ciljanu poroznost aeriranog betona. Za isti ciljani sadržaj uvučenog vazduha, potrebno je oko 6% više aditiva aeranta u betonu sa letećim pepelom nego u betonu sličnog sastava koji ne sadrži leteći pepeo. Iz tog razloga je od 1980. godine, prema ASTM C618, maksimalna dozvoljena vrednost gubitka žarenjem letećeg pepela, koji se upotrebljava u betonu, sa prethodnih 12% spuštена na 6%. U ovom smislu, upotrebom letećeg pepela klase F, koji poseduje veći sadržaj CaO i manji sadržaj organskih materija i nesagorelog uglja, postižu se bolji rezultati kod aeriranog betona.

Hidratacija portland-cementne paste praćena je povećanjem toplote koja prouzrokuje porast temperature u betonu. Pošto je pucolanska reakcija sporija, delimična zamena cementa letećim pepelom dovodi do oslobađanja toplote u dužem vremenskom intervalu. Iz tog razloga temperatura betona sa vremenom ostaje niža. Pomenuti fenomen je veoma koristan kod masivnih konstrukcija, gde značajne promene temperature usled hidratacije mogu dovesti do razvoja naprezanja i pojave prslina u masi betona.

2.7.4.3.2 Svojstva očvrslog betona koji sadrži leteći pepeo

Brzina prirasta čvrstoće kod betona koji sadrži leteći pepeo zavisi od velikog broja faktora, u prvom redu od sledećih [246]: svojstava letećeg pepela (kao što su hemijski i mineraloški sastav, sadržaj sitnih čestica, pucolanska aktivnost), tipa cementa, nivoa zamene cementa letećim pepelom, odnosa komponenata u mešavini, temperature spoljašnje sredine i načina nege.

Leteći pepeo klase F doprinosi kasnijem prirastu čvrstoće betona više nego leteći pepeo klase C, uprkos svom sporijem razvoju čvrstoće pri malim starostima.

Efekat delimične zamene sitnog agregata (peska) sa različitim masenim procentima (10%, 20%, 30%, 40%, 50%) letećeg pepela klase F na čvrstoću NVC istraživana je u studiji [244]. Čvrstoća pri pritisku, savijanju i zatezanju cepanjem NVC kod koga je deo agregata bio zamenjen letećim pepelom bila je viša nego kod običnog betona pri svim starostima, pri čemu je ovaj efekat bio uočljiviji pri većim starostima betona. Najveće vrednosti čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri zatezanju cepanjem dostignute su kod betona sa 50% letećeg pepela pri svim starostima. Rezultati brojnih istraživanja ukazuju na to da leteći pepeo usporava proces očvršćavanja i redukuje čvrstoću pri pritisku NVC pri manjim starostima [246].

Korelacije uspostavljene između čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju cepanjem, brzine ultrazvučnog impulsa i dinamičkog modula elastičnosti kod ispitivanih SCC su bliske onima za NVC. Pri istim vrednostima čvrstoće pri pritisku za starost od 28 dana, SCC ima viši vodopraškasti faktor nego NVC sa velikim sadržajem letećeg pepela, kao i manji zapreminski odnos pesak/malter [160].

Na SCC mešavinama projektovanih čvrstoća 30-70 MPa [277], spravljanim sa velikim količinama letećeg pepela (60-100% u odnosu na masu mineralnog dodatka) razvijena je formula za utvrđivanje čvrstoće pri pritisku SCC pri malim starostima u obliku:

$$f_{ct} = f_{c28} \cdot \frac{t}{4.2 + 0.85 \cdot t}, \quad (2.9.)$$

gde su f_{ct} i f_{c28} čvrstoće pri pritisku posle t dana i 28 dana, respektivno. Razvijena je i formula za određivanje čvrstoće pri zatezanju f_t u funkciji od čvrstoće pri pritisku f_{c28} na 28 dana u obliku:

$$f_t = 0.0843 \cdot f_{c28} + 0.818. \quad (2.10.)$$

Autori [70] su istraživali uticaj zamene cementa sa dodatkom pucolana (nisu koristili čist cement) u iznosu od 10-70% letećeg pepela na SCC. Vodopraškasti faktor je održavan na nivou od 0.30. Ispitivanja su pokazala da bi najbolji efekti mogli da se postignu sa upotrebljenim cementom pri procentima zamene od 30-50%.

Veći broj istraživača primetio je da je efekat dodavanja letećeg pepela cementu u betonima na modul elastičnosti sličan kao i efekat koji ovaj dodatak ima na čvrstoću. Generalno, modul elastičnosti betona sa dodatkom letećeg pepela je niži pri manjim

starostima, i malo viši pri većim starostima [246]. Takođe, generalno je primećeno da dodatak letećeg pepela dovodi do povećanja modula elastičnosti betona iste čvrstoće (pri čemu prevazilazi proračunske vrednosti dobijene na osnovu formule prema ACI [5]: $E_c = 0.043 \cdot \gamma \cdot (f_c)^{3/4}$, gde je γ zapreminska masa betona (kg/m^3), a f_c čvrstoća pri pritisku (MPa).

Iako je ovaj fenomen mnogo složeniji, istraživanja su pokazala da je, za istu veličinu najkrupnijeg zrna agregata i za sve nivoe čvrstoće, skupljanje betona sa letećim pepelom niže nego kod betona bez pepela [246]. Takođe, u većini radova koji se bave predmetnom tematikom, navodi se da je uticaj sušenja, vlaženja i temperaturnih uticaja u betonu na skupljanje veći nego uticaj dodatka letećeg pepela. Međutim, neki istraživači ukazuju na to da sa povećanjem količine letećeg pepela na 30-50% ovo prestaje da važi i da su kod ovih betona primećene veće vrednosti deformacija skupljanja. Može se reći da za manje količine letećeg pepela on nema značajan uticaj na ovo svojstvo.

Efekat dodavanja letećeg pepela betonima ima efekta na tečenje u smislu njegovog uticaja na čvrstoću pri pritisku. Zbog efekta povećanja čvrstoće sa vremenom usled pucolanske reakcije, beton sa letećim pepelom (projektovan tako da ima istu čvrstoću kao i beton bez letećeg pepela) imaće manje deformacije tečenja pri svim kasnijim starostima.

2.7.4.3.3 Trajnost betona sa letećim pepelom

Iako poroznost materijala spada u fizička svojstva, smatra se da je upravo ona osnovno svojstvo koje može da se poveže sa svim svojstvima u vezi sa trajnošću betona. Istraživanja su pokazala da početna nega betona u velikoj meri utiče na upijanje vode i formiranje pora kod različitih vrsta betona. Kod betona sa dodatkom letećeg pepela primećeno je da je taj efekat još izraženiji. Autori [70] su istraživali uticaj zamene cementa sa dodatkom pucolana (nisu koristili čist cement) u iznosu od 10-70% letećeg pepela na SCC, sa konstantnim vodopraškastim faktorom ($W/P=0.30$). Na osnovu istraživanja je zaključeno da sa povećanjem sadržaja letećeg pepela raste upijanje, ali je za sve mešavine početno upijanje bilo ispod 3%. Najveće upijanje imao je SCC sa 70% zamene letećim pepelom.

Brzina oštećenja strukture betona u konstrukciji usled hemijskih reakcija zavisi u najvećoj meri od prodiranja agresivnih rastvora u beton, ili ispiranja rastvorenih produkata reakcije iz betona. Permeabilnost betona igra veoma važnu ulogu u ovim situacijama; manja permeabilnost, generalno, znači veću trajnost. Permeabilnost betona pre svega zavisi od veličine, rasporeda i kontinuiteta pora u cementnoj pasti u betonu. Važni faktori koji utiču na ova svojstva betona su stepen hidratacije i vodocementni faktor. Dodatak letećeg pepela dovodi do značajnog povećanja finoće mreže pora. On transformiše veće pore u manje usled formiranja produkata pucolanske reakcije, paralelno sa odvijanjem hidratacije cementa. Naravno, ovo vodi većoj čvrstoći i manjoj permeabilnosti betona.

U studiji [173] su, u smislu trajnosti, pucolanski dodaci (leteći pepeo i granulirana zguza visokih peći) dali najbolje rezultate kod svežeg i očvrslog SCC. Na osnovu ispitivanja vodonepropustljivosti, sa povećanjem količine mineralnih dodataka, povećavala se i dubina prodora vode pod pritiskom. Na osnovu istraživanja [26] je zaključeno da je leteći pepeo pogodan za primenu kod SCC, zato što poboljšava mehanička svojstva i potencijalnu trajnost.

Otpornost na dejstvo mraza kod svih vrsta betona, pa i kod onih sa letećim pepelom, zavisi od poroznosti, kvaliteta agregata, stepena hidratacije i čvrstoće vezivne paste, starosti i sadržaja vlage u betonu. Istraživanja su pokazala da nema značajnih razlika u efektima letećeg pepela na otpornost prema dejstvu mraza, u odnosu na obične betone. Izvestan broj istraživača ukazao je na mogućnost pojave "kokica" ili ljuštenja betona, nakon većeg broja ciklusa (više od 200).

Upotreba letećeg pepela (kako klase C, tako i klase F) dovodi do povećanja otpornosti na sulfate i potencijalno korozivne soli koje mogu oštetiti armaturu uz pojavu pukotina i ljuštenja betona. Pouzdano je utvrđeno da reakcija letećeg pepela sa kalcijum-hidroksidom oslobođenim prilikom hidratacije cementa rezultira formiranjem dodatnih kalcijum-aluminatno-silikatnih hidrata, i praćena je redukcijom propusnosti betona.

Upotrebom mineralnih dodataka tipa letećeg pepela, mlevene granulirane zguze ili silikatne prašine, može se umanjiti efekat alkalno-silikatne reakcije. Betoni koji imaju manju permeabilnost usled niskog vodocementnog faktora, u koje spada i SCC, u

izvesnoj meri su otporniji na alkalno-silikatnu reakciju, usled otežanog kretanja vlage kroz pore betona.

Studija karbonatizacije [138] na uzorcima cementnog maltera spravljenog sa različitim vrstama cementa i letećeg pepela nakon 7 dana nege u vlažnoj sredini dovela je do sledećih zaključaka: 1) Karbonatizacija rapidno propagira prva tri meseca, nakon čega dolazi do usporavanja i 2) što je veći koeficijent permeabilnosti uzorka, veća je podložnost na dejstvo CO₂ u smislu povećanja dubine karbonatizacije. Uzorci spravljeni sa cementima koji su sadržali leteći pepeo pokazali su veće efekte karbonatizacije nego uzorci spravljeni sa čistim Portland cementom. U studiji [95] istraživana je stepen ubrzane karbonatizacije tri vrste betonskih mešavina: 1) običan beton, 2) beton koji je sadržao superplastifikator i 3) beton koji je sadržao leteći pepeo u svojstvu dela zamene cementa. Sa produženom negom do 90 dana, betoni koji su sadržali leteći pepeo pokazali su niži stepen karbonatizacije u poređenju sa običnim betonom i betonom sa superplastifikatorom. Pri procentima zamene cementa letećim pepelom u iznosu od 15% do 35% istraživani su [245] čvrstoća pri pritisku i pri zatezanju cepanjem u očvrslom SCC, a vršena je i ocena trajnosti (dejstvo soli na površini betona, karbonatizacija i otpornost na dejstvo hlorida). Istraživanje je pokazalo optimalno ponašanje betona sa sadržajem letećeg pepela od 35%.

2.7.4.4 Sprašena zgura visokih peći

Upotrebom sprašene zgure visokih peći postiže se porast viskoznosti betona i ranih čvrstoća; obzirom da ona ispoljava latentno hidrauličko ponašanje, može zameniti do 70% mase cementa; dovodi do produženja vremena vezivanja (30 minuta) i izvesnog smanjenja potrebe za vodom, što može dovesti do efekta izdvajanja vode [282]. U poređenju sa letećim pepelom i krečnjačkim brašnom, beton sa ovim mineralnim dodatkom je robusniji na varijacije vode.

Istraživanja efekta upotrebe sprašene granulisanе zgure visokih peći (u svojstvu mineralnog dodatka visoke finoće od 3500 cm²/g) i dve vrste superplastifikatora na svojstva SCC istraživana su na betonima sa 10%, 15%, 20% i 25% zgure [38]. Poboljšanje obradljivosti SCC je primećeno do sadržaja zgure od 20%, sa optimalnim sadržajem od 15%. Čvrstoća pri pritisku je opadala sa povećanjem sadržaja zgure pri

malim starostima, ali pri kasnijim ispitivanjima (na 56 i 90 dana) dostizala je vrednosti reda veličine čvrstoće pri pritisku referentnog betona.

2.7.4.5 Silikatna prašina

Silikatna prašina je veoma fini praškasti materijal, međutim i veoma skup. Upotrebom ovog mineralnog dodatka postiže se porast smičućih napona i plastične viskoznosti, a time i pad vrednosti rasprostiranja sleganjem i segregacije [47]. U istraživanjima Bonena i saradnika [36], upotreba silikatne prašine dovela je do gubitka konzistencije. Međutim, umerenom upotrebom silikatne prašine (u iznosu do 5%) poboljšavaju se svojstva SCC u očvrslom stanju, kao i trajnost [148].

Autori [240] su proučavali uticaj vodocementnog faktora i različitih količina silikatne prašine u svojstvu zamene dela cementa u SCC na ateziju između betona i čelične armature. Izvedeni su pull-out testovi na 11 SCC betona i 4 NVC. U ovim testovima šipke rebraste armature prečnika 16 mm čupane su iz betonskih kocki ivice 200 mm i merena je granična vrednost atezije čelika i betona. Povećanje količine silikatne prašine, u svojstvu zamene dela cementa, nije pokazalo značajno odstupanje vrednosti atezije.

2.7.4.6 Metakaolin

Metakaolin se proizvodi termičkom obradom gline. Njegov kvalitet je stabilniji nego kod ostalih mineralnih dodataka, dobijenih u svojstvu industrijskih nusprodukata. Upotreba metakaolina dovodi do povećanja reološke pojave takozvanog "smičućeg zguščavanja" (*shear thickening*, [61]). Uobičajen stepen zamene cementa metakaolinom iznosi 5-10%, što redukuje izdvajanje vode, dok veći procenti zamene (do 20%) u SCC mogu da poboljšaju otpornost na permeabilnost kod SCC.

Zamena dela cementa metakaolinom (MK) dovodi do bržeg gubitka konzistencije SCC mešavina (za procenat zamene od 15% obradljivost se zadržava oko 60 min) [164]. Prisustvo MK povećalo je i rane čvrstoće i čvrstoće pri većim starostima, mada je taj efekat bio naglašeniji u prvih 14 dana (27%). Slično kao kod čvrstoće pri pritisku, primećeno je povećanje brzine ultrazvučnog impulsa, sa povećanjem količine MK. Na

osnovu ispitivanja, autori su zaključili da se najbolji efekti upotrebe MK dobijaju pri zameni cementa u masenom iznosu od 10%.

2.7.4.7 Alternativni mineralni dodaci

Reciklirani beton u sprasenom stanju takođe se može upotrebiti u svojstvu mineralnog dodatka. Na osnovu reoloških ispitivanja na cementnim pastama, spraseni reciklirani beton bio je najefektivniji mineralni dodatak u poređenju sa letećim pepelom i krečnjačkim brašnom [58]. U SCC mešavinama sa vodocementnim faktorom 0.42 odnosno 0.45 upotrebljen je krečnjak, kao i spraseni reciklirani agregat, kao alternativa u svojstvu mineralnog dodatka. Upotrebljen je i krupan reciklirani agregat. Svi betoni su u svežem stanju pokazali prihvatljivo ponašanje za SCC. Betoni sa recikliranim agregatom dostigli su prihvatljive nivoe čvrstoće pri pritisku.

Postoje rezultati istraživanja [313] iz oblasti primene sprasene krede u iznosu 25-55% od ukupne količine filera. Na osnovu istraživanja izvedeni su zaključci da su mešavine SCC sa sprasenom kredom morale biti spravljene sa većim količinama superplastifikatora u odnosu na one sa krečnjačkim brašnom, za istu sposobnost punjenja; sprasena kredo može doprineti povećanju čvrstoće; čvrstoća pri pritisku u SCC uz upotrebu dve vrste sprasene krede pokazala je povećanje od 67% i 70% pri starosti od 7 dana, 23% i 28% pri starosti od 28 dana i 23% odnosno 18% na 90 dana, u odnosu na NVC sa istim W/C faktorom.

Pored već navedenih, češće korišćenih mineralnih dodataka, SCC je uspešno spravljan i sa sitnom prašinom koja se dobija prilikom obrade (sečenja) kamena, sa zadovoljavajućim ponašanjem u svežem i očvrsлом stanju [78].

Vršena su ispitivanja SCC spravljenog sa prirodnim zeolitom (specifične površine od 310 m²/kg), sa različitim odnosima vode i veziva [225]. U svežem stanju ispitivani su: rasprostiranje sleganjem, indeks vizuelne stabilnosti (VSI), t_{500} , t_v i odnos H2/H1 kod L-boksa, a u očvrsлом: čvrstoća pri pritisku, pri zatezanju cepanjem, brzina ultrazvučnog impulsa i upijanje (inicijalno, posle 30 minuta i konačno). Generalno, zamena cementa prirodnim zeolitom u iznosu od 10% može se smatrati odgovarajućom vrednošću sa

aspekta ekonomske efikasnosti i svojstava SCC sa prirodnim zeolitom u svežem i očvrslom stanju.

Staklo na bazi bor-silikata, poreklom od starih i neupotrebljivih lampi takođe je fino sprášeno i upotrebljavano u svojstvu filera za SCC [241]. Na osnovu ispitivanja, autori su zaključili da fino samleveno staklo ima izvesna pucolanska svojstva, da stupa u interakciju sa cementom i dovodi do značajnog povećanja čvrstoće pri pritisku SCC. Generalno, u dobro projektovanim mešavinama SCC, upotrebom sprášenog stakla se mogu postići čvrstoće istog nivoa kao kada se upotrebljava leteći pepeo [161].

Simultana primena dva ili tri materijala u svojstvu mineralnog dodatka rezultira SCC mešavinama koje se nazivaju binarnim i ternernim mešavinama. Upotreba mermernog praha, krečnjačkog brašna i letećeg pepela u ovom smislu je takođe istraživana, kako na binarnim tako i na ternernim mešavinama [87]. Iako su upotreba mermernog praha i krečnjačkog brašna povećavali potrebu za superplastifikatorom, ovaj efekat je bio suprotan u slučaju upotrebe letećeg pepela, kada je količina plastifikatora mogla biti smanjena. Povećanje količine filera, bez obzira na njegovo poreklo, dovelo je do pada ugradljivosti SCC. Povećanje količine mermernog praha i letećeg pepela povećalo je i viskoznost binarnih i ternernih mešavina. Dodatak letećeg pepela u ternernim sistemima je omogućio smanjenje viskoznosti mešavina, u poređenju sa binarnim mešavinama. Generalno, čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju ternernih mešavina pri starosti od 28 dana bile su nešto niže nego kod binarnih mešavina. Prednost upotrebe binarnih i ternernih mešavina ogleda se u smanjenju sorptivnosti, penetracije elektrona i hloridnih jona u SCC, što generalno ukazuje na betone veće trajnosti.

U smislu primene svih pomenutih, alternativnih mineralnih dodataka, čiji je uticaj na SCC manje istražen, generalno se preporučuje veći oprez, povećana kontrola prilikom proizvodnje i veći obim prethodnih ispitivanja [82].

2.7.5 Voda

Voda u skladu sa *SRPS EN 1008:2010 Voda za pripremu betona - Specifikacije za uzimanje uzoraka, ispitivanje i ocenu pogodnosti vode za pripremu betona, uključujući*

vodu dobijenu iz procesa u industriji betona može se primeniti za spravljanje SCC [253]. Posmatrano sa stanovišta hidratacije cementa, kao i sa aspekta sadržaja sastojaka koji bi mogli nepovoljno uticati na proces hidratacije cementa, voda za piće je pogodna za beton i nije potrebno vršiti njena ispitivanja. Reciklirana voda, koja je već korišćena u fabrici betona, može biti primenjena, pri čemu se tip i količina suspendovanih čestica moraju uzeti u obzir, jer bi se u suprotnom narušila uniformnost sastava betona tokom kontinualne proizvodnje. Podzemna, prirodna površinska voda i voda iz industrijskih postrojenja može biti pogodna za beton, ali nakon prethodnog ispitivanja. Morska voda se može koristiti za nearmirani beton, ali nije pogodna za armirani ili prednapregnuti beton. Otpadna voda nije pogodna za primenu u betonu. Vodu, koja se ne koristi za piće, a koristi se za izradu betona na osnovu sprovedenih ispitivanja, treba kontrolisati bar jednom u tri meseca.

Smatra se da je voda podobna za izradu betona ako [274]:

- vodonikov pokazatelj (pH) varira u granicama od 4.5 do 9.5,
- sadržaj sulfatnih jona ima veličinu manju od 2700 mg/l vode,
- količina hloridnih jona u vodi ne prelazi 300 mg/l,
- indeks organskih sastojaka (humusne kiseline, šećera i dr.), izražen kao utrošak kalijumovog permanganata (KMnO_4) po metodi oksidacije, ne prelazi granicu od 200 mg/l vode,
- ukupna količina rastvorenih soli, izražena kao suvi ostatak, nije veća od 5000 mg/l vode, s tim što se ovaj uslov ne odnosi na morsku vodu.

Voda ima značajan uticaj na svojstva SCC, kako u svežem, tako i u očvrslom stanju. Sa povećanjem količine vode smanjuju se i granični smičući napon i plastična viskoznost. U slučaju da se dozira samo voda da bi se popravila sposobnost punjenja, beton postaje mnogo osetljiviji na segregaciju. Zbog toga SCC nije ni mogao biti razvijen pre nego što su se pojavili odgovarajući superplastifikatori.

Voda se u svežem betonu deli na slobodnu vodu i vodu koju zadržavaju praškasta komponenta (mineralni dodatak i cement), pesak i VMA. Smatra se da krupan agregat utiče u zanemarljivoj meri na zadržavanje vode. U suštini, slobodna voda kontroliše performanse SCC. Slobodna voda je jedan od najznačajnijih faktora koji definišu

sposobnost popunjavanja i otpornost prema segregaciji kod SCC [201]. Koristeći količinu slobodne vode za predviđanje rasprostiranja sleganjem i t_{500} , ova činjenica je i potvrđena sa zadovoljavajućom tačnošću u modelu deformabilnosti [139].

Vlažnost agregata ima značajan efekat na sadržaj slobodne vode. Varijacija vlažnosti peska u granicama od 3-4% može dovesti do varijacije u W/C faktoru od ± 0.1 [210]. Zato je važno korektno proceniti vlažnost agregata. Istraživanja bazirana na testiranju SCC rezultirala su preporukom da sadržaj vode u agregatu treba da bude veći od nivoa zasićenog, površinski suvog zrna (saturated surface dry – SSD) [1],[2]. Robusnost mešavine tako može biti testirana na bazi njene osetljivosti na varijaciju u količini vode [161].

Takođe, veća količina vode rezultira dužim zadržavanjem konzistencije, osim uticaja tipa plastifikatora, odnosno, više vrednosti W/C faktora rezultiraju manjim padom konzistencije za istu početnu konzistenciju [83].

2.7.6 Vlakna u SCC

Dodatak mikroarmature, u vidu vlakana različitog sastava, dimenzija i oblika, može da značajno popravi veliki broj svojstava betona i maltera [119],[120],[122],[129],[175]. Savremena istraživanja na polju mikroarmiranih betona vrše se u pravcu kvantifikacije i boljeg sagledavanja žilavosti, pogotovo udarne žilavosti betona [310].

Da bi se modifikovala duktilnost/tvrdoća očvrslog betona, uspešno su upotrebljavana čelična [22],[45], karbonska [290] i staklena vlakna [306] u svojstvu mikroarmature, vodeći računa o pažljivom projektovanju sastava. Ispitivanja sa polipropilenskim vlaknima [130] ukazala su na poboljšanje apsorpcije udarne energije, naročito kod SCC sa agregatom koji je sadržao granule reciklirane gume [114]. Međutim, doziranje vlakana po pravilu je rezultiralo smanjenjem sposobnosti popunjavanja i povećanjem blokiranja [149].

Kombinacija karbonskih i čeličnih vlakana upotrebljavana je u SCC, sa ciljem utvrđivanja efekata upotrebe vlakana na ugradljivost betona [19]. Efekti su kvantifikovani na osnovu zapreminskog učešća i tipa vlakana. Osim dva pomenuta

faktora, deformabilnost, oblik i površinska hrapavost su takođe uočeni kao važni parametri koji utiču na svojstva SCC. Sve mešavine testirane u studiji su bile sposobne da sadrže do 2% zapremiskog udela čeličnih i karbonskih vlakana bez gubitka tečenja i obradljivosti. Međutim, sve mešavine sa povećanim količinama vlakana nadmašile su gornje granice preporučene od strane EFNARC [253]. Da bi se dobila bolja svojstva u smislu ugradljivosti mikroarmiranih SCC, autori preporučuju povećanje količine paste, odnosno cementa, sitnog agregata ili upotrebu pucolanskih mineralnih dodataka.

2.7.7 Ostale komponente

Reciklirana guma u svojstvu agregata, dobijena usitnjavanjem automobilskih pneumatika uspešno je upotrebljavana kao komponenta betona i maltera [128],[204]. Osnovni problem upotrebe reciklirane gume je pogoršanje mehaničkih svojstava kompozita u kojima je ona inkorporirana [113]. Osnovne prednosti, osim duktilnosti, odnose se i na trajnost, pre svega na otpornost na dejstvo mraza, obzirom da, zbog karakteristične deformabilnosti, granule reciklirane gume u kompozitu omogućavaju relaksaciju napona, nastalih širenjem leda pri mržnjenju vode u porama kompozita [228]. U kombinaciji sa polipropilenskim vlaknima, u SCC betonima može se postići bolja disperzija granula gume, uz poboljšanje duktilnosti [110].

U svojstvu sitnog punioca ili filera, prašene automobilske gume [28], prašina iz kamenoloma [96] i prašinaste čestice iz peska [83] su takođe upotrebljavane u SCC sa posebnom pažnjom usmerenom na projektovanje sastava. Ovi dodaci mogu smanjiti cenu i omogućiti izvesne prednosti proizvođačima cementa. Takođe, izvesna istraživanja rađena su sa prašenim i spaljenim ljuskama od pirinča, obzirom da ovako dobijen materijal ima pucolanska svojstva [234].

U cilju procene efekata upotrebe recikliranog asfalta, autori [165] su spravljali 12 "zelenih" SCC mešavina sa različitim kombinacijama letećeg pepela, zgure i recikliranog asfalta. Istraživana su svojstva SCC u svežem i očvrslom stanju. Rezultati ovih ispitivanja pokazali su da upotreba recikliranog asfalta ne samo da smanjuje konačne čvrstoće, nego smanjuje i prirast čvrstoće pri pritisku. Dodatak recikliranog asfalta mešavinama dovodi do pada čvrstoće posle 3, 14 i 28 dana sa povećanjem

sadržaja od 0% do 50%. Izvestan broj mešavina koje su sadržale relativno velike procenete pucolanskih materijala i recikliranog asfalta zadovoljile su zahteve na bazi čvrstoće pri pritisku za kolovoze i mostove.

Crveni mulj, koji se javlja kao nusprodukt prilikom prerade boksita u proizvodnji aluminijuma, takođe je upotrebljavan u svojstvu filera za spravljanje maltera i betona [151]. Rezultati su pokazali da je rasprostiranje kod maltera veće sa povećanjem sadržaja crvenog mulja, do procenta zamene cementa crvenim muljem u iznosu od 50%. Čvrstoća pri pritisku betona koji sadrži crveni mulj nešto je veća od čvrstoće pri pritisku betona koji sadrži crveni mulj i fino sprasenu silikatnu prašinu (do 5%). Otpornost na hloride i sulfatna otpornost maltera se takođe mogu poboljšati dodavanjem crvenog mulja. Skupljanje betona koji sadrži crveni mulj je veće nego kod običnog betona.

Sumpor dobijen procesom gasne desulfurizacije, iz gasovitog vodonik-sulfida, takođe se koristi u betonima. Na osnovu ovog postupka se na godišnjem nivou kao nusprodukt u rafinerijama nafte i drugim fabrikama koje procesuiraju ugljovodonike dobija preko 64 miliona tona sumpora [171]. Sumpor se upotrebljava za spravljanje sumporne kiseline, lekova, u kozmetičkoj industriji i industriji gume, kao i za spravljanje veštačkih đubriva. Međutim, količine sumpora koje se na ovaj način mogu utrošiti značajno su ispod vrednosti njegove godišnje proizvodnje, pa tako najveći deo sumpora završi na deponijama. Odlaganje na deponije predstavlja problem sa aspekta zaštite životne sredine. Najčešća primena sumpora je u sumpornim betonima (sulphur concrete) u kojima on ima svojstvo veziva [298],[299]. Istraživan je i uticaj sumpora koji se nalazio u betonima na bazi cementa, na fizičko-mehanička svojstva tih betona [284].

3.Svojstva SCC u svežem stanju

Načelno, ispitivanja svežeg SCC uključuju ona uobičajena za NVC, kao što su sledeća standardizovana ispitivanja:

1. SRPS EN 12350-1:2010 (Deo 1: Uzimanje uzoraka),
2. SRPS EN 12350-6:2010 (Deo 6: Zapreminska masa),
3. SRPS EN 12350-7:2010 (Deo 7: Sadržaj vazduha - Metode pritiska).

Standardne metode za ispitivanje konzistencije (delovi 2 do 5 standarda 12350) ne koriste se, jer nisu primenljive kod SCC. Međutim, neka od karakterističnih ispitivanja konzistencije kod svežeg SCC su standardizovana i o njima će biti reči kasnije u ovom delu:

4. SRPS EN 12350-8:2012 (Deo 8: Samougrađujući beton - Ispitivanje rasprostiranja sleganjem),
5. SRPS EN 12350-9:2012 (Deo 9: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću V-levka),
6. SRPS EN 12350-10:2012 (Deo 10: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću L-kutije),
7. SRPS EN 12350-11:2012 (Deo 11: Samougrađujući beton - Ispitivanje segregacije pomoću sita),
8. SRPS EN 12350-12:2012 (Deo 12: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću J-prstena).

Za razliku od konvencionalnog betona, koji se ugrađuje vibriranjem, kod samozbijajućeg betona, njegov kvalitet u elementu zavisi isključivo od svojstava kojima se karakteriše u svežem stanju. Specifični zahtevi za samozbijajući beton u svežem stanju zavise od načina primene, a prvenstveno od: graničnih uslova koji se odnose na geometriju elementa, količinu, tip i položaj armature, debljinu zaštitnog sloja i sl., načina transporta do elementa u koji se SCC izliva (pumpanjem, direktno iz miksera, kipom, levkom), metode izlivanja SCC u element (broja i pozicija mesta isporuke) i završne obrade [82].

3.1 Sposobnost tečenja

Sposobnost tečenja (analogno sposobnost popunjavanja oplata) u direktnoj je vezi sa deformabilnošću SCC, tj. sposobnošću da menja svoj oblik pod dejstvom sopstvene težine [146],[188]. Deformabilnost se odnosi na dva aspekta: kapacitet deformacija je maksimalna sposobnost da se deformiše, tj. "koliko daleko" beton može da teče; drugi aspekt je brzina deformacije, koja se odnosi na vreme potrebno da beton prestane da teče, odnosno na to koliko brzo beton može da teče. Na primer, beton sa visokim kapacitetom za deformaciju i veoma malom brzinom deformacije teži da bude veoma viskozian i treba mu veoma mnogo vremena da popuni oplatu [229].

SCC mora da bude sposoban da teče i popunjava oplatu, usled smanjenog trenja između čvrstih čestica (krupan agregat, pesak i filer) u betonu, što se može postići upotrebom superplastifikatora i manjeg sadržaja krupnog agregata [146],[250]. Ovo smanjenje trenja između čvrstih čestica može se postići i dodavanjem vode, ali se na taj način istovremeno smanjuje viskoznost, što vodi segregaciji. Previsok sadržaj vode, sa druge strane, takođe može dovesti do neželjenih uticaja na čvrstoću i trajnost. Dakle, veoma niske i veoma visoke vrednosti W/P faktora vode slaboj sposobnosti tečenja.

Za razliku od dodavanja vode, kada se smanjuje i napon unutrašnjeg smicanja (yield stress) i viskoznost, upotrebom superplastifikatora ne samo da se smanjuje trenje između čestica dispergovanjem čestica cementa, već se zadržava kapacitet deformacije i viskoznost. Efekat na svojstva u očvrslom stanju je takođe mnogo manji nego što je to slučaj kada se pokretljivost betona postiže dodavanjem vode. Granulometrijski sastav agregata takođe utiče na sposobnost tečenja. Trenje između čestica može se redukovati upotrebom agregata sa kontinualnim granulometrijskim krivama, kako agregata, tako i praškastih čestica [146],[252].

3.2 Sposobnost prolaska

Sposobnost prolaska je svojstvena za SCC. Ona opisuje u kojoj meri mešavina može da teče kroz uske prostore pune prepreka, odnosno kroz uzanu oplatu i kroz guste armaturne sklopove, što osigurava upotrebu SCC u gusto armiranim konstrukcijama, kao što su mostovske ploče, potporni zidovi, tunelski elementi i sl. To zavisi od rizika

od blokiranja koje može da se pojavi usled interakcije između komponentnih materijala SCC i prepreka.

Kada se SCC ugrađuje u konstrukcije sa gustom armaturom, beton mora da prođe između šipki bez blokiranja. Blokiranje je posledica interakcije čestica agregata, odnosno interakcije čestica agregata i armature. Kada beton dođe u uzan prostor, usled razlike u brzini tečenja maltera i krupnog agregata dolazi do lokalnog povećanja količine krupnog agregata [184],[193]. U tom slučaju, neka zrna agregata mogu da premoste razmak između šipki armature, formirajući svod i na taj način blokiraju prolazak ostatka betona. Prema tome, blokiranje uglavnom zavisi od veličine, oblika i sadržaja krupnog agregata [30]. Smanjenje sadržaja krupnog agregata i smanjenje najkrupnijeg zrna agregata dovode do pozitivnog efekta u smanjenju i sprečavanju blokiranja. Zapremina paste je takođe veoma važan faktor kada se posmatra blokiranje [30]. Pritom, sa reološke tačke gledišta, blokiranje najviše zavisi od unutrašnjeg napona smicanja, dok plastična viskoznost ne utiče na sposobnost prolaska SCC.

Međutim, grupisanje krupnog agregata u svežem SCC može se predupediti projektovanjem SCC sa dovoljno viskoznom pastom. Upotrebom praškastih komponenata, kao što su krečnjačko brašno, leteći pepeo i zgura visokih peći, viskozitet se može povećati usled boljeg granulometrijskog sastava i pakovanja čestica [77]. Uobičajena alternativa da se omogući potreban nivo viskoznosti je upotreba VMA. U suštini, kod SCC sposobnost prolaska se može postići redukcijom veličine zrna agregata i njegovog sadržaja, kao i upotrebom VMA ili podesnim izborom filera.

3.3 Otpornost prema segregaciji

Otpornost prema segregaciji se ponekad zove "stabilnost". SCC je podložan segregaciji, samim tim što se sastoji od materijala različitih faza, veličina i specifičnih masa. Segregacija se, prema tome, može očekivati kao raslojavanje između tečnih i čvrstih čestica, ili između paste i agregata, ili između maltera i krupnog agregata, i to u stanju mirovanja ili kretanja betona [229].

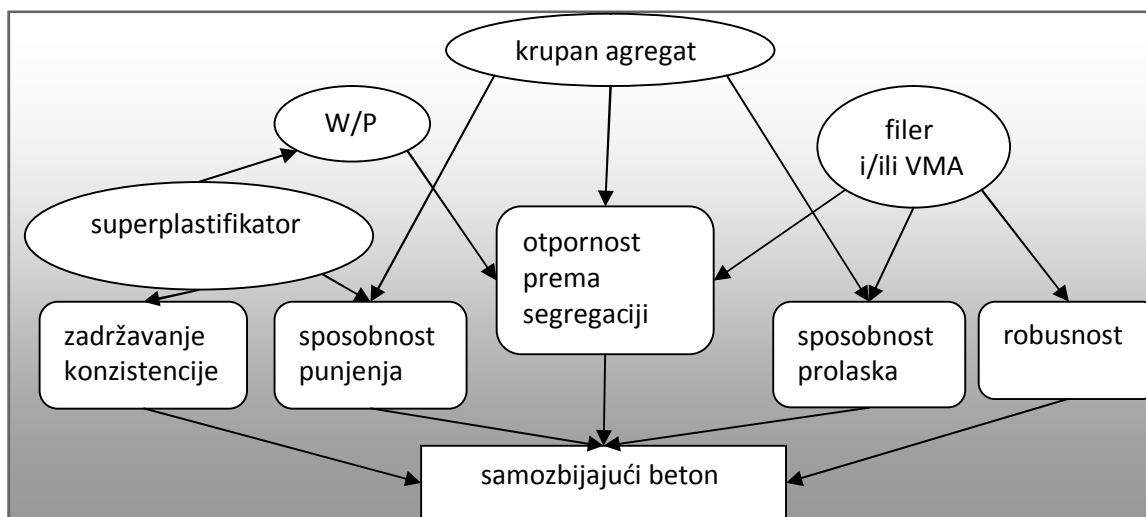
Može se reći da slobodna voda, koja ne može da se veže za čvrste čestice i koja se slobodno kreće u betonu, predstavlja glavni uzrok segregacije. Voda koja se izdvaja na površini betona, ili pak biva zarobljena na preprekama (zrna agregata, šipke armature) dovodi do slabljenja prelazne zone i rezultira smanjenom čvrstoćom i trajnošću.

Stabilnost betona može se posmatrati kao dinamička i statička. Dinamička stabilnost odnosi se na otpornost mešavine prema segregaciji prilikom transporta, izlivanja i rasprostiranja do tačke gde počinje efekat statičke stabilnosti. Dva primera dinamičke stabilnosti su stabilnost tokom transporta bez opreme za agitovanje i stabilnost prilikom tečenja na dugim rastojanjima. U velikom broju fabrika za prednaprezanje, beton se ugrađuje u kalupe bez agitovanja. Ako mešavina nije korektno projektovana, može doći do sleganja čestica agregata usled vibracija koje se javljaju tokom transporta. Takođe, ako sastav mešavine nije dobro balansiran i ako se dozvoli kretanje na dugim rastojanjima, pokazalo se da može doći do razdvajanja komponente maltera od krupnih zrna. Tehnike za poboljšanje dinamičke stabilnosti SCC uključuju smanjenje vrednosti rasprostiranja sleganjem i smanjenje veličine i količine krupnog agregata.

Statička stabilnost odnosi se na sposobnost komponenata mešavine da se odupru segregaciji i sleganju betona koji miruje. Ova pojava se ogleda u dva karakteristična efekta: sleganje krupnih zrna agregata i kretanje vode i vazduha prema površini (izdvajanje vode). U smislu otpornosti prema segregaciji, svežu samozbijajuću masu, bez obzira na tečnu konzistenciju, treba da karakteriše visoka otpornost prema segregaciji, odnosno otpornost na sva tri oblika mogućeg raslojavanja: otpornost prema spoljašnjoj segregaciji - nema izdvajanja vode na površini (Bleeding) i krupnog agregata (Aggregate Settlement) iz sveže smeše, otpornost prema unutrašnjoj segregaciji - ravnomerna distribucija svih komponentnih materijala u mešavini tokom ugrađivanja i otpornost prema segregaciji prilikom rasprostiranja - nema međusobnog uklještenja zrna agregata i njihovog sudaranja (Collision) sa oplatom ili šipkama armature [319].

Poboljšanje otpornosti prema segregaciji uključuje pre svega smanjenje W/P faktora, zatim upotrebu VMA ili većih količina filera, smanjenje veličine najkrupnijeg zrna i sadržaja krupnog agregata.

Navedena tri ključna svojstva su u izvesnoj meri povezana i međuzavisna. Promena u jednom svojstvu rezultiraće promenom u drugom, ili oba preostala svojstva. Na primer, i sposobnost tečenja i segregacija mogu nezavisno prouzrokovati nedovoljnu sposobnost prolaska, odnosno blokiranje. Rizik od segregacije povećava se sa povećanjem sposobnosti tečenja. Međusobni odnos ovih svojstava prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1 Međusobni odnosi svojstava SCC u svežem stanju [161]

3.4 Robusnost

Robusnost je sposobnost betona da zadrži svoja svojstva pri promenama kao što su: mala varijacija sadržaja finih čestica, kao i sadržaja vode u agregatu, varijacije u hemijskom sastavu plastifikatora, cementa, promene uslova spoljašnje sredine (temperatura, vlažnost i sl). U tom smislu, pomenuto svojstvo takođe predstavlja otpornost prema segregaciji i izdvajanju vode ("bleeding") [224].

Pošto su tri najbitnija svojstva u svežem stanju (sposobnost tečenja, sposobnost prolaska i otpornost prema segregaciji) suštinski u koliziji, a samozbijajući betoni se prave sa visokim sadržajima hemijskih dodataka i filera, ovi betoni su mnogo podložniji promenama usled varijacija komponenata nego NVC. U tom svetlu, uticaj promene vode u agregatu i količine doziranog superplastifikatora mogu biti značajni [33],[80].

Robusnost se može popraviti pravilnom selekcijom filera i upotrebom VMA u smislu povećanja viskoziteta. Pozitivan efekat upotrebe VMA na poboljšanje robusnosti ogleda se u činjenici da je gradijent oštriji kod mešavina bez, nego kod mešavina sa dodatkom

VMA [282]. Robustan SCC može da primi 5~10 l/m³ vode više i zadrži svoja zahtevana svojstva [82].

3.5 Zadržavanje konzistencije

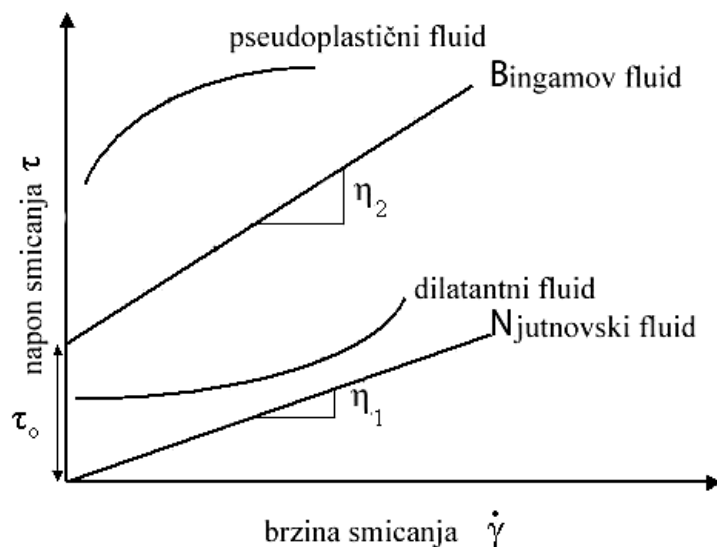
Zadržavanje konzistencije se ponekad zove "otvoreno vreme" tokom koga SCC zadržava svoja svojstva, što je od izuzetne važnosti za transport i ugrađivanje, naročito kod betoniranja na licu mesta.

Potrebno je svojstva SCC u svežem stanju nakon spravljanja zadržati tokom transporta i ugrađivanja, obično 60-90 minuta [82],[139],[250]. Gubitak konzistencije u najvećoj meri predstavlja posledicu interakcije između filera i superplastifikatora, usled različitih efekata koje upotreba filera ima na adsorpciju vode i hemijske dodatke [146] i nižu adsorpciju superplastifikatora na hidratisanim delovima cementa [67].

Superplastifikatori na bazi polikarboksilata mogu omogućiti bolje efekte, odnosno duže zadržavanje konzistencije [38],[93].

3.6 Ponašanje svežeg SCC sa aspekta reologije

Svež beton je kompleksan, višefazni sistem sa svojstvima koja zavise od vremena u nelinearnom obliku [161]. U reološkom smislu, svež beton se uobičajeno predstavlja modelom elastoplastično-viskoznog tela. U ovom kontekstu, SCC je istraživani dugi niz godina. Uobičajeni reološki modeli betona su skicirani na slici 3.2.



Slika 3.2 Najčešće primenjivani reološki modeli za svež beton (η – plastični viskozitet)

Njutnovske tečnosti, u koje spadaju voda i ulje, pokazuju linearnu vezu između napona (naprezanja) smicanja (τ) i brzine (odnosno priraštaja) smicanja ($\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.1.)$$

gde je η koeficijent viskoznosti. Međutim, opštiji izraz za definisanje smičućeg naprezanja pri tečenju uzima u obzir i koheziju (c) i suvo trenje u masi:

$$\tau = c + \eta \cdot \dot{\gamma} + s \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (3.2.)$$

gde član $s \cdot \dot{\gamma}^2$ predstavlja uticaj suvog trenja u masi. Mešavine betona kod kojih se pomenuti član ne može zanemariti retko se primenjuju u praksi.

Bingamov model (model kod koga se može zanemariti suvo trenje u masi, tj. član $s \cdot \dot{\gamma}^2$) primenjiv je za svež beton u najvećem broju slučajeva. Ovakav beton može da se suprotstavi naponima nižim od graničnog smičućeg napona (u tom slučaju se ponaša kao elasto-plastično telo), ali pri višim naponima ovakav materijal počinje da teče kao svaka viskozna tečnost, odnosno postoji linearna veza između smičućeg napona i brzine smicanja:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3.3.)$$

gde su τ , τ_0 i η napon smicanja, napon na granici tečenja (granično smičuće naprezanje - strukturna čvrstoća) i plastična viskoznost (koeficijent plastične viskoznosti), respektivno. Veličine koje karakterišu svaku Bingamovu tečnost su granični smičući napon (τ_0) i plastična viskoznost (η). Grafički posmatrano, granični smičući napon (τ_0)

predstavlja tačku preseka sa osom smičućeg napona. Plastična viskoznost (η) je tangens ugla koji zaklapa data funkcija zavisnosti sa osom brzine smičuće deformacije. Beton počinje da teče tek nakon što napon smicanja nadmaši vrednost graničnog smičućeg napona. Plastična viskoznost omogućava da tečenje ostane stabilno, nakon što je granični smičući napon premašen. Ukoliko je viskoznost betona veća, za istu promenu brzine smicanja (videti dijagram na slici 3.2) biće potrebno veće smičuće naprezanje da bi se nastavilo tečenje. U opštem slučaju je neophodno utvrditi obe karakteristične veličine, granični napon tečenja (τ_0) i plastični viskozitet (η), da bi se u potpunosti opisalo ponašanje svežeg betona.

U izvesnom broju slučajeva, pri pokušaju opisivanja ponašanja betona pomoću Bingamovog modela, dobijaju se negativne vrednosti graničnog napona smicanja, što ukazuje na to da mešavina ne prati ovaj model [161]. U tom slučaju se tečenje može bolje opisati Herschel-Bukley modelom [43],[65],[280]:

$$t = t_0 + a \cdot \dot{\gamma}^b. \quad (3.4.)$$

U ovom izrazu je τ_0 granični napon tečenja, a i b su konstante, dok je $\dot{\gamma}$ brzina smičuće deformacije.

U funkciji od varijacije različitih komponentnih materijala može se dati generalna procena kako će se pomenuti parametri Bingamovog modela menjati u svežem betonu [83]. Što se osnovnih komponentnih materijala tiče, povećanje količine vode rezultiraće smanjenjem oba parametra, a povećanje količine vazduha u betonu smanjiće njegovu viskoznost i donekle granični smičući napon. Silikatna prašina smanjuje viskoznost u izvesnoj meri, ali može dovesti do povećanja graničnog smičućeg napona. Povećanje količine letećeg pepela (ili zgure visokih peći) može da smanji granični smičući napon. Njihov efekat na viskoznost je različit: leteći pepeo smanjuje viskoznost, dok je zgura visokih peći povećava. To može biti posledica sfernog oblika čestica letećeg pepela. Superplastifikator će uticati na smanjenje unutrašnjeg trenja između čestica i tako izazvati smanjenje graničnog smičućeg napona (beton će lakše početi da teče) dok je njegov uticaj na viskoznost veoma mali, za razliku od modifikatora viskoziteta, čiji je očekivani efekat povećanje viskoznosti bez uticaja na granični smičući napon. Pasta, kao komponenta svežeg betona utiče na njegove reološke parametre na taj način što povećanjem količine paste može da se donekle smanji granični smičući napon, uz

neminovno povećanje viskoznosti svežeg betona. Ovi efekti prikazani su šematski na slici 3.3.



Slika 3.3 Efekti variranja komponentnih materijala na parametre Bingamovog modela kod svežeg betona [182]

Tiksotropnost je još jedan veoma važan reološki pojam, i definiše se kao smanjenje viskoznosti pri dejstvu smičućeg napona, posle koga sledi vraćanje u prethodno stanje, u periodu nakon što prestane dejstvo tog smičućeg napona. Ovaj efekat zavisi od vremena [21]. Prema tome, nakon što se SCC unese u oplatu, javlja se pojava izgradnje strukture i posledičnog povećanja viskoznosti. Beton u izvesnoj meri prima sopstvenu težinu, što sa vremenom rezultira sve nižim pritiskom na oplatu i doprinosi većim brzinama građenja [150]. Svojstvo tiksotropije smanjuje rizik od segregacije nakon ugrađivanja i smanjuje pritisak betona na oplatu.

Reološki posmatrano, SCC ima nizak granični napon smicanja, i dovoljnu plastičnu viskoznost da osigura ravnotežu između svojih svojstava u svežem stanju. Niska granica smičućeg napona neophodna je da bi se poboljšao kapacitet deformacije, dok je viskoznost od suštinskog značaja da bi se zadržao homogen sistem prilikom manipulacije i ugradnje dok ne počne očvršćavanje. Potreban nivo viskoznosti mora biti postignut da bi se omogućila dobra brzina deformacije, sposobnost prolaska i otpornost na segregaciju.

Granični smičući napon kod SCC betona je mnogo niži (manje od 60 Pa) nego kod normalnog betona (100-1000 Pa), ali je plastična viskoznost SCC istog reda veličine (20-200 Pa·s) [161]. Ukoliko je plastična viskoznost niža od 40 Pa·s, SCC bi trebalo da poseduje značajnu vrednost graničnog napona smicanja, da bi zadržao potrebnu

homogenost; a ukoliko je plastična viskoznost preko 70 Pa-s, granični smičući napon mora težiti nuli da bi se postigla zadovoljavajuća sposobnost punjenja, odnosno SCC je viskozan, ali veoma pokretan, deformabilan [301].

SCC karakteriše upotreba većih količina mineralnog dodatka (filera) u koje spadaju krečnjačko brašno, leteći pepeo, zgura visokih peći, silikatna prašina, metakaolin i ostalo. Efekat upotrebe silikatne prašine na reološka svojstva u literaturi je kontradiktorno dokumentovan, na primer, Carlsward [47] je zaključio da dodatak silikatne prašine dovodi do povećanja graničnog napona smicanja, dok su Zhang i Han [311] objavili potpuno suprotan zaključak. Ovi rezultati ukazuju na to da je uticaj filera složen i da varira u izuzetnoj meri u funkciji vrste i količine.

Istraživanja sprovedena na nivou paste [207] ili na nivou maltera [161] ukazala su na značaj reoloških svojstava matrice u postizanju ciljanih svojstava SCC u svežem stanju. Usled manjeg sadržaja krupnog agregata u SCC, malter ima veći efekat na svežem SCC nego na NVC. Malter ne samo da omogućava podmazivanje krupnijih zrna agregata i ispunjava šupljine između čestica, nego poseduje slična svojstva u svežem stanju kao i SCC; odnosno u slučaju potrebne sposobnosti punjenja (bez blokiranja i segregacije), treba da poseduje nisku vrednost granice unutrašnjeg smicanja i odgovarajuću viskoznost. Ovo ukazuje na značaj malterske komponente prilikom projektovanja SCC mešavina, kao "conditio sine qua non" za uspešnu proizvodnju SCC.

3.7 Pritisak SCC na oplatu

Nesigurnost u vezi sa vrednostima pritiska svežeg betona na oplatu smatra se jednim od razloga iz kojih se u praksi odustaje od primene SCC na terenu. Ova problematika razmatrana je od samog početka primene SCC i u tom periodu predloženo je više različitih proračunskih modela za izračunavanje vrednosti pritiska SCC na oplatu [3],[31],[145]. Organizacija RILEM je 2010. godine formirala tehnički komitet u vezi sa pritiskom svežeg SCC na oplatu, pod nazivom TC 233-FPC, koji je u okviru svog rada uključivao procenu stepena u kome različiti modeli za proračun pritiska svežeg betona na oplatu opisuju ovaj fenomen kod SCC. Na osnovu najuspešnijih modela (Ovarlez i Roussel, Khayat i Omran, Lange i Tajeda-Dominguez, Perrot, Gardner, Beitzel,

Proske), validacijom na terenu je zaključeno da su svi upotrebljeni modeli sposobni da u zadovoljavajućoj mjeri predvide bočni pritisak betona na oplatu i da na parametre svakog od modela utiče kao faktor ponašanje betona u stanju mirovanja [32]. Na osnovu rezultata ispitivanja izveden je i zaključak da je, pri malim brzinama betoniranja, korelacija između brzine betoniranja i relativnog maksimalnog bočnog pritiska na oplatu mala, što ukazuje na činjenicu da bi pri proračunu pritiska trebalo imati u vidu strukturno ponašanje betona u stanju mirovanja. U radu [179] je navedeno i da bi utvrđivanje efekta doziranja hemijskog dodatka, temperature i uticaja vlažnosti bili važni parametri kod formiranja efektnog modela koji imaju uticaja na pritisak svežeg betona na oplatu.

3.8 Uticaj pojedinih komponenata na svojstva SCC

Veliki broj različitih materijala i njihovih odnosa u mešavinama SCC različito utiču na ponašanje SCC u svežem stanju. U tabeli 3.1. dat je opšti prikaz međusobnog uticaja ovih faktora. U literaturi je dat detaljniji opis ovih relacija [4].

3.9. Ispitivanja na SCC u svežem stanju

Kao što je već rečeno, najveća razlika u ponašanju normalno vibriranog betona (NVC) i samozbijajućeg betona (SCC) je u njihovom ponašanju u svežem stanju. U cilju procene ponašanja SCC u svežem stanju razvijeno je više od deset metoda za kvantifikaciju osnovnih aspekata njegovog ponašanja, sposobnosti popunjavanja, sposobnosti prolaska i stabilnosti (otpornosti na segregaciju) od kojih je pet standardizovano. Osim činjenice da se za ispitivanja SCC u svežem stanju može koristiti veliki broj metoda, od NVC se SCC razlikuje i po različitim principima projektovanja sastava, od kojih najveći broj uključuje ispitivanje ponašanja paste i maltera kao sastavnih delova SCC. Iz tog razloga će u ovom delu, pre ispitivanja koja se sprovode na svežem SCC, biti navedena i karakteristična ispitivanja paste, odnosno maltera.

Tabela 3.1 Uticaj karakteristika i količina komponenata na svojstva svežeg SCC [64]

Komponenta	Uticaj karakteristika i sadržaja komponenata na svež SCC		
	Sposobnost punjenja	Sposobnost prolaska	Stabilnost
Prašasta komponenta	Gustina pakovanja zrna, oblik čestica (uglast ili zaobljen) i reaktivnost, kombinacija upotrebljenih praškastih komponenata utiče na potrebu za vodom i/ili superplastifikatorom.	Vrlo mali, ili potpuno zanemarljiv uticaj na sposobnost prolaska, samo u meri u kojoj utiču na sposobnost punjenja i stabilnost.	Sitne čestice utiču na izdvajanje vode i viskoznost, a time i na segregaciju krupnih čestica.
	Pri odgovarajućim odnosima vode i praškastih čestica, povećanje sadržaja praškaste komponente dovodi do povećanja zapremine paste i njene viskoznosti, na taj način poboljšavajući sposobnost punjenja, prolaska i stabilnost. Previsok sadržaj paste, bez povećanja količine vode, vodi mešavini sa previsokim vrednostima viskoznosti, što smanjuje sposobnosti punjenja i prolaska.		
Agregat	Bolja gustina pakovanja i zaobljen oblik mogu povećati sposobnost punjenja SCC mešavine. Previsok sadržaj agregata u odnosu na zapreminu paste smanjiće sposobnost punjenja.	Uglastija zrna smanjiće sposobnost međusobnog pregrupisanja pri tečenju kroz sužene prostore. Manje čestice će prolaziti lakše kroz sužene prostore. Previsok sadržaj krupnijih zrna agregata dovodi do blokiranja i smanjenja sposobnosti prolaska. Granulometrijska kriva mešavine i odnosi komponenata definišu ovaj sadržaj.	Manje čestice će imati manju tendenciju da se sležu. Veći sadržaj sitnih čestica smanjiće izdvajanje vode. Veći sadržaj sitnog agregata smanjiće izdvajanje vode i sleganje krupnih zrna agregata.
Superplastifikator	Povećava fluidnost paste u betonu. U dobro projektovanom SCC, pasta veće fluidnosti će poboljšati sva tri svojstva: sposobnosti punjenja i prolaska i stabilnost. U loše projektovanom SCC, kao na primer onome sa nedovoljnom količinom paste, povećanje količine ovog hemijskog dodatka smanjuje stabilnost, povećava izdvajanje vode i smanjuje sposobnost prolaska.		
Modifikator viskoziteta (VMA)	Povećava viskoznost paste u SCC. Pri dobro definisanim odnosima komponenata, VMA će imati mali uticaj na sposobnost punjenja, dok će povećati sposobnost prolaska i stabilnost. U loše projektovanim mešavinama, ovo povećanje viskoznosti paste vodiće smanjenju sposobnosti punjenja i prolaska.		
Voda	Povećanje količine vode dovodi do povećanja zapremine paste i sposobnosti punjenja, sve dok se ne pojavljuje segregacija.	U nekim slučajevima povećanje količine vode dovodi do povećanja sposobnosti prolaska sa povećanjem zapremine paste i poboljšanjem sposobnosti punjenja. U ostalim slučajevima, može dovesti do smanjenja viskoznosti paste i smanjenja sposobnosti prolaska.	Previsok sadržaj vode može dovesti do povećanog izdvajanja vode i nestabilnosti.

3.10 Testovi na svežoj pasti/malteru

Testovi na nivou sveže paste i maltera karakteristični su za projektovanje sastava SCC, jer kod NVC ne postoje [238].

Svojstva maltera imaju značajan uticaj na ponašanje SCC. Za taj efekat mogu se nabrojati sledeći razlozi: SCC sadrži veću količinu maltera i manju količinu krupnog agregata nego NVC, a varijacije u sastavu agregata su ograničene; malter sadrži sve komponente od kojih se pravi SCC, superplastifikator, VMA i praškaste materijale; sposobnost punjenja SCC se u potpunosti ogleda u ispitivanjima na nivou maltera. Nakon što se postignu ciljana svojstva maltera, ispitivanja na nivou betona mogu se minimizovati. Osim toga, ispitivanja na nivou maltera su mnogo efikasnija i praktičnija nego ispitivanja betona.

Važnost ispitivanja na nivou maltera naglasio je i Domone [72]. Autori [156] su utvrdili da reološka svojstva maltera imaju dobru korelaciju sa svojstvima odgovarajućeg SCC, pa su, prema tome, relevantna za projektovanje SCC.

Međutim, ispitivanja na nivou betona su nezamenljiva i ne mogu se izbeći, pre svega zbog uticaja krupnog agregata i drugačije interakcije između komponenata. Prema tome, stvarno ponašanje SCC može u potpunosti biti sagledano tek prilikom ispitivanja na betonu.

3.10.1 Testovi rasprostiranja i V-levka za malter

Rasprostiranje na pasti/malteru i mali V-levak su od samog početka primene SCC bili široko primenjene metode prilikom odabira i karakterizacije međusobnog uticaja komponenata za SCC [188]. Osnovni razlozi za to su [161]:

- Pomenuti testovi imaju pouzdanu reološku osnovu, obzirom da između rasprostiranja i graničnog napona smicanja postoji dobra korelacija, kao i između vremena malog V-levka i plastične viskoznosti ispitivanih maltera. Ovaj

stav je potvrđen u kasnijim ispitivanjima [231],[238]. Kombinacija ovih testova daje relevantne podatke za tumačenje reološkog ponašanja maltera.

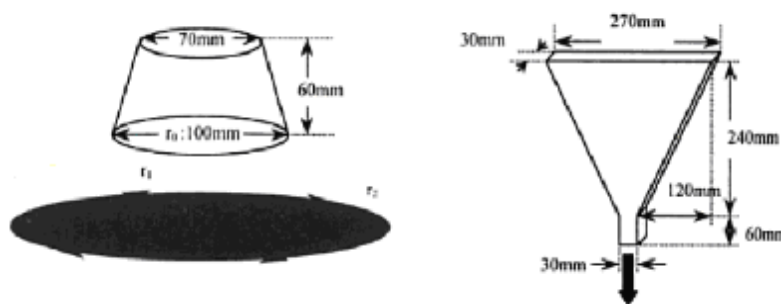
- Postoji dobra veza rasprostiranja i vremena malog V-levka sa sposobnošću popunjavanja SCC.
- Testovi maltera su jednostavni i efikasni, a u odnosu na testove betona brži su, jednostavniji za izvođenje i utrošak materijala je znatno manji.

Na slici 3.4 prikazane su aparature za merenje rasprostiranja i vremena malog V-levka, sa karakterističnim dimenzijama. Mera rasprostiranja je prosek prečnika u dva upravna pravca uzorka nakon što je rasprostiranje završeno. Na osnovu merenja vremena potrebnog da celokupna masa maltera, pod dejstvom sopstvene težine, izađe iz malog V-levka, procenjuje se viskoznost maltera, merena ovom metodom. Dva izlazna podatka za ove dve metode, vrednost rasprostiranja i vreme malog V-levka konvertuju se u relativno rasprostiranje R_a i relativnu viskoznost R_v , respektivno:

$$R_a = \left(\frac{F}{F_0} \right)^2 - 1, \quad (3.5.)$$

$$R_v = \frac{10}{t}, \quad (3.6.)$$

gde su F , F_0 i t prosečna vrednost rasprostiranja iz dva izmerena prečnika u dva upravna pravca, prečnik osnove zarubljenog konusa (100 mm) i prosečno vreme dva poslednja od tri izmerena vremena na malom V-levku, respektivno.



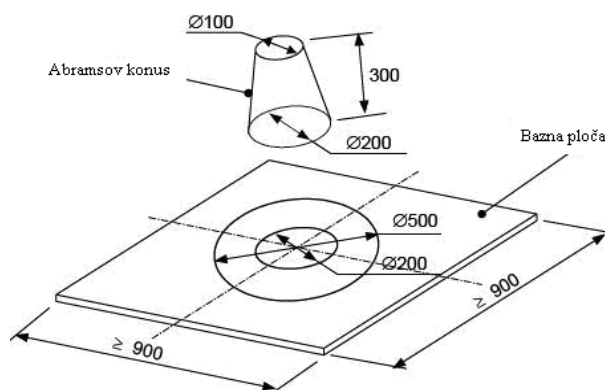
Slika 3.4 Mali konus (levo) i V-levak (desno) za sveže paste/maltere [229]

3.11. Testovi na svežem SCC u vezi sa sposobnošću punjenja

Testovi u vezi sa sposobnošću punjenja (popunjavanja oplata) spadaju u najbrže i najčešće primenjivane testove kod ispitivanja svežeg SCC [64].

3.11.1 Test rasprostiranja sleganjem i test - t_{500} (*Slump-Flow Test i t_{500}*)

Ovaj test (slika 3.5) predstavlja standardni test ispitivanja svežeg betona i usvojen je u propisima pod punim nazivom SRPS EN 12350-8:2012 Samougrađujući beton – Ispitivanje rasprostiranja sleganjem, odnosno ASTM C1611 / C1611M. Baziran je na standardizovanom testu za ispitivanje konzistencije konvencionalnih vibriranih betona sleganjem - EN 12350-2. Rezultati testa rasprostiranja sleganjem ukazuju na sposobnost popunjavanja, pri čemu se merenjem vremena t_{500} ocenjuje brzina tečenja, a time i viskoznost samozbijajućeg betona. Ovo je jednostavna i brza metoda, koja se može izvoditi i na gradilištu, uz minimum ispunjenih uslova u vezi sa ispitivanjem (ravna i čvrsta podloga odgovarajućih dimenzija, Abramsov konus). Takođe, rezultati testa mogu u izvesnoj meri poslužiti prilikom procene otpornosti prema segregaciji.

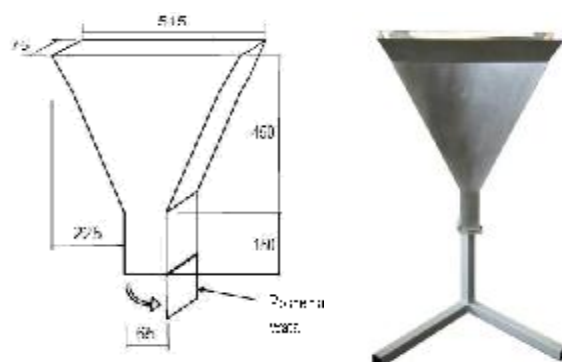


Slika 3.5 Osnovna aparatura za test rasprostiranja sleganjem [68]

3.11.2 Test pomoću V-levka

Test V-levkom i test - t_{5min} (slika 3.6) opisuju viskoznost i sposobnost punjenja (tečenja) samozbijajućeg betona [82]. U pitanju je standardizovana metoda, SRPS EN 12350-9:2012 Ispitivanje svežeg betona - Deo 9: Samozbijajući beton - Ispitivanje V-levkom (*EN 12350-9, Testing Fresh Concrete - Part 9: Self-Compacting Concrete - V-Funnel Test*). Ovaj test nije pogodan kada je maksimalno zrno agregata veće od 22.4 mm.

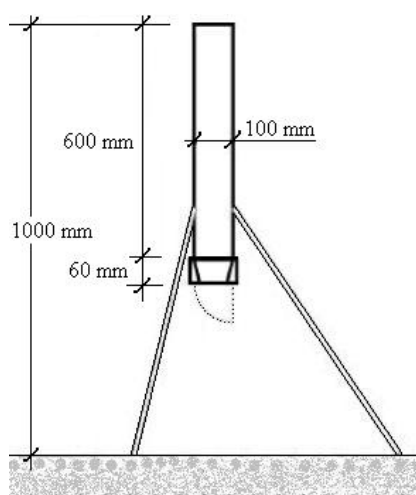
Ovim testom se jednostavno meri sposobnost punjenja (tečenja) svežeg betona. Prema evropskim preporukama [253] iz 2002. godine, smatra se da je za samozbijajuće betone preporučljivo vreme isticanja iz V-levka oko 10 s. Prema istim preporukama, smatra se da razlika vrednosti dva izmerena vremena isticanja iz V-levka, t_v i t_{5min} , ne sme biti veća od 3 s.



Slika 3.6 Dimenzije i izgled V-levka [82]

3.11.3 Orimet test

Test je osmišljen u cilju kvantifikacije karakteristika betona izražene obradljivosti, tekućih konzistencija, na gradilištu. Baziran je na principu reometra sa otvorom. Ova metoda specificira se na osnovu preporuka iz 2002. godine [253], uzimajući u obzir preporuke za testiranje samozbijajućeg betona, evropskog istraživačkog projekta "TESTING - SCC", iz 2005. godine [68]. Ovaj test nije pogodan kada je maksimalno zrno agregata veće od 20 mm [253]. Prema preporukama za samozbijajući beton, izrađenim u sklopu projekta "Brite EuRam BE96-3801", iz 2000. godine, smatra se da ova metoda testiranja nije pogodna za mikroarmirane samozbijajuće betone sa čeličnim vlaknima [157]. Predmetni uređaj prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7 Dimenzije "Orimet" aparature [39],[253]

Aparat "Orimet" se može koristiti u kombinaciji sa J-prstenom, kako bi se istovremeno utvrdila sposobnost prolaska i sposobnost tečenja, odnosno viskoznost svežeg SCC [23],[253].

3.12. Testovi u vezi sa sposobnošću prolaska

Sposobnost prolaska predstavlja sposobnost betona da prolazi kroz složene preseke u konstruktivnim elementima bez blokiranja. Generalno posmatrano, ovo svojstvo je u vezi sa prolaskom između šipki armature, ali može se odnositi i na kretanje betona kroz uske preseke u oplati, ili prilikom pumpanja betona. Sve situacije u kojima čvrste čestice moraju da se pregrupišu da bi prošle između prepreka su situacije u kojima je važna sposobnost prolaska. Među metodama koje se koriste u cilju testiranja sposobnosti prolaska betona između šipki armature, najčešće se koriste: U-boks, L-boks, Kajima test i J-ring. Sve pomenute metode ne odnose se samo na sposobnost prolaska, nego i na sposobnost punjenja, a njihovom upotrebom mogu se proceniti i izvesni efekti koji su u vezi sa segregacijom.

3.12.1 Test L-boks (L-Box Test)

Test pomoću uređaja pod nazivom L-boks (standardno označen kao SRPS EN 12350-10:2012 Ispitivanje svežeg betona – Deo 10: Samougrađujući beton - Ispitivanje pomoću L-kutije), koristi se za procenu sposobnosti prolaska samozbijajućeg betona, odnosno sposobnosti da teče kroz uske otvore, uključujući i prostor između šipki armature i drugih prepreka, bez pojave segregacije ili efekta blokiranja (sl. 3.8). Postoje dve varijante ovog testa i to: test sa dve šipke i test sa tri šipke glatke armature (prečnika 12mm) u sklopu L-boksa.



Slika 3.8 Izgled L-boksa [82]

Faktor prolaska (*Passing Ratio*), predstavlja odnos visina betona u L-boksu na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa:

$$PA = \frac{H_2}{H_1} \quad [-] \quad (3.7)$$

gde je:

PA - faktor prolaska (*Passing Ratio*), zaokružen na bližih 0.01,

H₂ - srednja visina betona u L-boksu na kraju horizontalnog dela i

H₁ - srednja visina betona u L-boksu na početku horizontalnog dela.

Kada bi beton tekao slobodno kao voda, površina betona nakon sprovedenog testa bila bi horizontalna, tj. odnos visina imao bi vrednost jedan (H₂/H₁=1). Dakle, što je vrednost faktora prolaska veća, odnosno bliža vrednosti jedan, to beton ima bolju sposobnost tečenja [253]. Na slikama 3.9 i 3.10 prikazani su primeri samozbijajućeg betona bez efekta blokiranja i samozbijajućeg betona sa izraženim efektom blokiranja u zonama šipki armature, pri ispitivanju u L-boksu, sa tri šipke armature.



Slika 3.9 Samozbijajući beton bez efekta blokiranja pri testiranju L-boksom



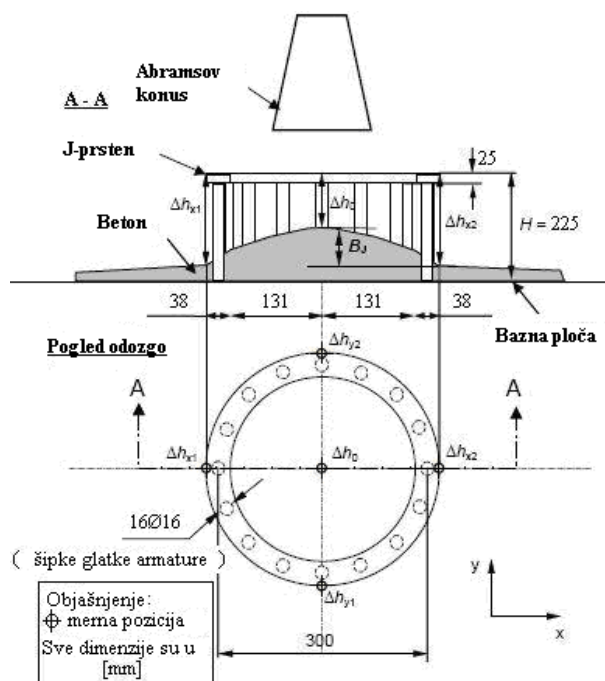
Slika 3.10 Samozbijajući beton sa izraženim blokiranjem pri testiranju L-boksom

3.12.2 Test J-prsten (J-Ring Test)

Pored J-prstena, kao aparatura za sprovođenje ovog testiranja, koristi se aparatura testa rasprostiranja sleganjem (Abramsov konus, bazna ploča i dr.), videti sl. 3.11. Ovaj test nije pogodan kada je maksimalno zrno agregata veće od 25 mm. U standardima ovaj test je označen oznakom SRPS EN 12350-12:2012 Ispitivanje svežeg betona – Deo 12: Samougrađujući beton – Ispitivanje pomoću J-prstena, odnosno ASTM C 1621/C 1621M: “Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-ring”. Test sa J-prstenom daje dobru procenu sposobnosti prolaska betonske mase kroz armaturne sklopove, a takođe, u izvesnoj meri, ukazuje na otpornost prema segregaciji i eventualnom efektu blokiranja.

Evropskim preporukama za samozbijajući beton [82] iz 2005. godine i [253] iz 2002. godine nije definisano ograničenje u pogledu vrednosti sposobnosti prolaska J-prstenom

(PA_j), iako se u proceduri testa navodi merenje srednjeg prečnika rasprostiranja J-prstenom (SF_j), nego je samo preporukama [253] definisana maksimalna dozvoljena razlika visina betona, neposredno iza i ispred šipke armature J-prstena, u iznosu od 10 mm. Prema ovim preporukama, samozbijajući betoni treba da imaju vrednosti stepena blokiranja ne veće od 20 mm [68]. Ova metoda je jedna od pogodnih za primenu i na gradilištu.



Slika 3.11 Osnovna aparatura za test J-prstenom i pozicije merenja [253]

Na osnovu rezultata ispitivanja računa se stepen blokiranja J-prstenom, B_J, zaokružen na bližih 10 mm:

$$B_J = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2} - \Delta h_0}{4} \quad [\text{mm}] \quad (3.8)$$

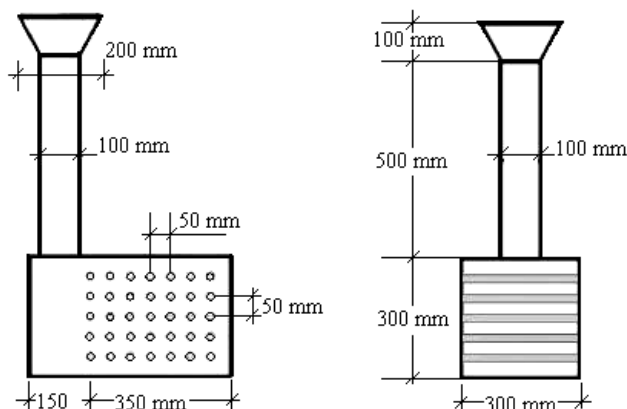
gde je:

- Δh_{x1}, Δh_{x2}, - razlike visina između gornje površine betona i gornje površine prstena, merene sa spoljašnje strane J-prstena u dva međusobno upravna pravca i
- Δh_{y1}, Δh_{y2}
- Δh₀ - razlika najviše tačke površine betona unutar J-prstena i gornje površine J-prstena.

3.12.3 Test popunjavanja kutije ili "Kajima" test

Test popunjavanja boksa, poznat i pod nazivom "Kajima" test (slika 3.12), koristi se za kombinovanu procenu sposobnosti popunjavanja i sposobnosti prolaska samozbijajućeg betona. Test se sprovodi isključivo u laboratorijskim uslovima, tj. nije pogodan za

ispitivanja na terenu s obzirom na složenu strukturu aparature i veliku količinu betona potrebnog za testiranje. Ovaj test omogućava dobru ocenu svojstava svežeg samozbijajućeg betona. Čak i za slučaj da beton ima dobru sposobnost popunjavanja, dobiće se nezadovoljavajući rezultati ispitivanja, ako je sposobnost prolaska i otpornost prema segregaciji tog betona loša. Khayat [149] je pokazao da test rasprostiranja sleganjem nije u korelaciji sa testom popunjavanja boksa.



Slika 3.12 Dimenzije "Kajima"-boksa [39],[253]

Popunjavanje (*Filling*), predstavlja odnos srednje visine popunjavanja i početne maksimalne visine. Dakle, na osnovu rezultata ispitivanja računa se:

$$F_k = \frac{H_{F1} + H_{F2}}{2 \cdot H_{F1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.9)$$

gde je:

- F_k - popunjavanje (*Filling*), zaokruženo na bliži celi procenat,
- H_{F1} - srednja visina betona na početku "Kajima"-boksa, odakle beton počinje da se kreće kroz boks i
- H_{F2} - srednja visina betona na kraju "Kajima"-boksa.

3.12.4 Test U-boks (U-Box Test)

Test U-boksom se koristi za procenu sposobnosti prolaska, u kombinaciji sa sposobnošću popunjavanja (ispunjavanja) samozbijajućeg betona. Test U-boksom je razvijen u tehnološkom istraživačkom centru korporacije "Taisei" u Japanu, a alternativna metoda "oblikovanim boksom" data je preporukama za ispitivanja samozbijajućeg betona, od strane japanskog udruženja građevinskih inženjera [39]. Izrada aparata za testiranje, zbog zakrivljenog oblika (slika 3.13), komplikovana je, pa

se stoga često kao alternativa ove metode testiranja primjenjuje testiranje tzv. "oblikovanim boksom" (slika 3.14), koje se zasniva na istim principima testiranja.



Slika 3.13 Izgled U-boksa [39] Slika 3.14 Izgled "oblikovanog boksa"

Visina popunjavanja (*Filling Height*), predstavlja razliku visina betona u U-boksu leve i desne komore. Dakle, na osnovu rezultata ispitivanja računa se:

$$H_U = H_{U1} - H_{U2} \quad [\text{mm}] \quad (3.10)$$

gde je:

- H_U - visina popunjavanja (*Filling Height*), zaokružena na bližih 0.01,
- H_{U1} - srednja visina betona u višem delu U-boksa i
- H_{U2} - srednja visina betona u nižem delu U-boksa.

3.13 Testovi u vezi sa otpornošću prema segregaciji (stabilnosti)

Ova karakteristika odnosi se na sposobnost SCC da se suprotstavi razdvajanju svojih komponentnih materijala. Osim različitih načina da se manje ili više precizno proceni segregacija pomoću drugih metoda, razvijene su i metode koje se posebno odnose na ocenu segregacije betona. U ove metode spadaju: standardni test stabilnosti pomoću sita, test segregacije u stubu, test penetracije, VSI i metoda za merenje izdvajanja vode na površini.

3.13.1 Test otpornosti prema segregaciji sitom ili "GTM" test

Test otpornosti prema segregaciji sitom (sl. 3.15), za koji se koristi i termin "GTM" test, razvila je francuska građevinska firma "GTM" za procenu otpornosti samozbijajućih betona prema segregaciji [141]. Test otpornosti prema segregaciji sitom daje dobru procenu stabilnosti svežeg samozbijajućeg betona. Međutim, ova metoda testiranja, iako je jednostavna, nije pogodna za primenu na gradilištu, pre svega zbog dužine trajanja, ali i zbog potrebe za preciznim merenjem mase. U pitanju je standardizovan test (SRPS

EN 12350-11:2012 Ispitivanje svežeg betona – Deo 11: Samougrađujući beton – Ispitivanje segregacije pomoću sita, kao i “ASTM C 1610/C 1610M—Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique”).



Slika 3.15 Izgled aparature za test otpornosti prema segregaciji sitom [39],[64]

Otpornost prema segregaciji, odnosno faktor segregacije (*Segregation Ratio*), predstavlja odnos mase betona koji je prošao kroz sito otvora 5 mm i mase uzorka usutog u sito, zaokružen na bližih 1% [253]. Na osnovu rezultata ispitivanja računa se:

- ukupna masa uzorka betona, prema izrazu:

$$W_c = W_{ppc} - W_{pp} \quad [g], \quad (3.11)$$

- masa betona koji je prošao kroz sito otvora $d = 5$ mm, prema izrazu:

$$W_s = W_{ps} - W_p \quad [g], \quad (3.12)$$

- otpornost prema segregaciji, odnosno faktor segregacije (*Segregation Ratio*), prema izrazu:

$$SR = \frac{W_s}{W_c} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3.13)$$

gde je:

- W_{pp} - masa dna i sita otvora $d = 5$ mm, izražena u g,
- W_{ppc} - ukupna masa uzorka betona sa sitom i dnom, izražena u g,
- W_c - ukupna masa uzorka betona stavljenog u sito, izražena u g,
- W_p - masa prazne posude (dna), izražena u g,
- W_{ps} - masa posude (dna) i betona, koji je prošao kroz sito, izražena u g,
- W_s - masa betona koji je prošao kroz sito otvora $d = 5$ mm, izražena u g i
- SR - faktor segregacije (*Segregation Ratio*), zaokružen na bližih 1%.

Dakle, što je vrednost faktora segregacije SR veća, to je otpornost betona prema segregaciji niža.

3.13.2 Test segregacije u stubu (Column Segregation Test)

Za ovaj test se koristi kalup visine 650 mm i prečnika 150 mm [4],[12], videti sliku 3.16. Ovaj kalup je tako konstruisan da se najviša i najniža četvrtina mogu ukloniti. Prvi korak u ovom postupku je punjenje kalupa svežim samozbijajućim betonom. Nakon 15 min, koliko je dozvoljeno da ugrađeni beton stoji u miru, odvaja se najviša i najniža četvrtina betona i ispiraju se kroz sito otvora 4.75 mm, tako da na situ ostane samo krupan agregat. Razlika u sadržaju krupnog agregata između gornje i donje četvrtine utvrđuje se u smislu stepena segregacije.



Slika 3.16 Segregacija u stubu [64]

3.13.3 Test sa penetrometrom

Kod ovog testa meri se dubina prodiranja praznog valjka kroz svež beton, posle izvesnog vremena [4],[14]. Generalno posmatrano, valjak tone dok ne dođe do krupnog agregata, što više tonu zrna krupnog agregata, to će više tonuti i valjak. Upotrebljeni penetrometar prikazan je na slici 3.17. Ovo ispitivanje je u korelaciji sa segregacijom u stubu i mnogo je korisnije sa aspekta primene na gradilištu.

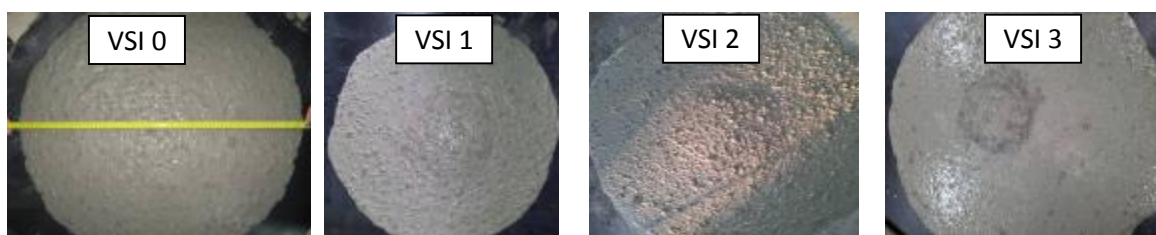


Slika 3.17 Aparat za ispitivanje penetracije kod SCC [64]

3.13.4 Vizuelni indeks stabilnosti - VSI

Kod metode rasprostiranja sleganjem moguće je u nekim slučajevima uočiti segregaciju betonske mase na baznoj ploči. Cementna pasta/malter može segregirati, odnosno izvojiti se od krupnog agregata, praveći prsten (od paste/maltera), debljine nekoliko milimetara, po obimu mase. Takođe je moguće zapaziti pojavu segregacije krupnog agregata u centralnom delu površine betonske mase. U slučaju da se navedene pojave zapaze, treba u sklopu izveštaja evidentirati uočenu segregaciju, te u zavisnosti od okolnosti, sprovesti ispitivanja otpornosti prema segregaciji ili u slučajevima izražene navedene pojave korigovati recepturu [8], [289].

U tom kontekstu, metoda za ispitivanje VSI se obavlja u sklopu ispitivanja rasprostiranja sleganjem [13],[64]. Sastoji se iz vizualne procene izgleda rasprostrte gomile betona i usvajanja broja od 0 do 3, koji označavaju stepen nestabilnosti. Mešavina sa VSI procenom 0 je visoko stabilna mešavina, dok je mešavina sa stepenom 3 veoma nestabilna. Na 3.18 su prikazana četiri nivoa stabilnosti na bazi ove procene. Prema originalnim preporukama [62],[63] za ovu metodu, potrebno je posmatrati beton u mikseru ili kofi, takođe. Ovaj aspekt je važan jer će veća dubina betona u posudi dovesti do bolje vizualne procene segregacije betona. Vrednosti 0 i 1 prema ovoj metodi smatraju se prihvatljivim. Generalno, mešavine sa vrednostima 0 i 3 su ekstremni slučajevi, i kao takvi se najlakše opažaju. Ocena mešavine sa vrednostima 1 i 2 obično zahteva veće iskustvo sa samozbijajućim betonima.



Slika 3.18 Četiri karakteristična nivoa VSI

Vizuelnom kontrolom u metodi J-prstena takođe se može uočiti pojava segregacije po obimu betonske mase u vidu malterske granice bez sadržaja krupnog agregata. Međutim, segregacija se može pojaviti i naknadno, tako da odsustvo navedenih pojava ne podrazumeva da segregacije neće biti nakon izvesnog vremenskog perioda [8].

Testiranje L-boksom takođe omogućava vizuelnu kontrolu otpornosti betona na segregaciju, koja se, u slučaju da postoji, može uočiti u vidu efekta blokiranja, tj. nagomilavanja zrna krupnog agregata u zoni postavljenih šipki armature.

3.13.5 Izdvajanje vode na površini

Merenje izdvajanja vode na površini (tzv. bliding) kod tradicionalnih betonskih mešavina je u suštini standardizovana procedura, i može se primeniti i kod samozbijajućeg betona [15],[64]. Ova pojava je jedan od aspekata otpornosti prema segregaciji samozbijajućeg betona, a metoda se donekle može smatrati metodom koja kvantifikuje dinamičku segregaciju kod SCC.

3.14 Testovi sa reometrom

Kao što je to već rečeno, kada se radi o SCC ključnu ulogu ima razumevanje i kontrola njegovog ponašanja u svežem stanju. U reološkom smislu, ovo se odnosi na Bingamov model i reološke parametre svežeg betona, ugao unutrašnjeg trenja i granični smičući napon. Stoga su razvijene i metode pomoću kojih se veoma precizno mogu utvrditi pomenuti parametri na svežem betonu, što je osnova za eventualne korekcije sastava. Većina komercijalno dostupnih reometara meri vrednosti otpora mešalici u bubnju, pri različitim brzinama okretanja, tj. smicanja.

3.15 Testovi SCC na gradilištu

U zavisnosti od uslova na gradilištu metode pomenute u prethodnim poglavljima mogu se primeniti sa više ili manje uspeha i pouzdanosti. Ni jedna od pomenutih metoda nije razvijena sa posebnim ciljem da se može primeniti na gradilištu. Test prilikom preuzimanja betona na gradilištu postavljen je na gradilištu i osmišljen sa ciljem da se procene svojstva SCC u svežem stanju u trenutku kada on stigne na gradilište [196]. Beton se ugrađuje u uređaj koji sadrži veliki broj šipki armature. Beton je SCC samo ako prolazi kroz uređaj. Ovaj test je upotrebljen na gradilištu LNG (*Liquid Natural Gas*) rezervoara (videti poglavlje 1).

3.16 Međusobna veza svojstava svežeg SCC i testova za ispitivanje

Čak i u slučaju da se menja samo jedan od ulaznih parametara kod SCC, malo je verovatno da on neće uticati na veći broj svojstava. Potrebno je imati uvid u međusobnu zavisnost svojstava i način na koji se ona menjaju sa variranjem parametara.

Slično kao kod sleganja kod normalno vibriranog betona, sleganje SCC se povećava sa smanjenjem graničnog napona smicanja [183],[293]. Međutim, sve mešavine SCC moraju imati relativno niski granični napon smicanja da bi bile samozbijajuće. Što se viskoznosti tiče, moguće je ostvariti relativno širok spektar vrednosti viskoznosti pri kojima SCC zadržava svojstva samozbijanja. Generalno, kada se postigne ciljana vrednost rasprostiranja sleganjem, pre svega treba vršiti korekcije plastične viskoznosti, da bi se kontrolisale performanse betona.

Vrednosti vremena izmerenog u testu V-levka, kao i t_{500} rastu sa porastom plastične viskoznosti. Iako se ovim metodama ne može izmeriti stvarna vrednost viskoznosti, one predstavljaju način da se proceni relativna promena viskoznosti sa korekcijama koje se čine u sastavu SCC, bez potrebe za upotrebom reometra. Ove korekcije su korisne iz ugla razvoja mešavine, kontrole kvaliteta i rešavanja problema u vezi sa ponašanjem SCC.

Kada je mešavina projektovana i napravljena, rasprostiranje sleganjem može se ciljano povećati dodavanjem više superplastifikatora. Za jednu mešavinu povećanje rasprostiranja sleganjem vodiće povećanju segregacije agregata. Veza između rasprostiranja sleganjem i segregacije je jedinstvena za datu kombinaciju komponenata i njihovih odnosa. Sa povećanjem rasprostiranja sleganjem povećavaju se i izdvajanje vode i rezultati VSI testa. Ipak, za različite vrednosti nivoa rasprostiranja sleganjem može se korekcijama postići povećanje stabilnosti u smislu smanjenja sleganja zrna agregata i izdvajanja vode.

Pored promenljivih u projektovanju mešavine, na sposobnost prolaska SCC mešavine utiče odnos između rasprostiranja sleganjem i viskoznosti mešavine. Za različite nivoe rasprostiranja sleganjem potrebno je podesiti plastičnu viskoznost, da bi se postigla dobra sposobnost prolaska, merena, na primer, kao razlika rasprostiranja sleganjem bez

i sa J-prstenom. U suštini, za mešavinu sa većim vrednostima rasprostiranja sleganjem potrebno je imati i visoku vrednost viskoznosti, da bi se postigla odgovarajuća sposobnost prolaska. Sa previše niskom vrednošću viskoznosti, lakše će doći do segregacije krupnog agregata iz maltera, što dalje može voditi pojavi grupisanja agregata i blokiranja prilikom prolaska kroz uske prostore. Sa druge strane, mešavina sa nižom vrednošću rasprostiranja sleganjem mora da ima relativno malu viskoznost da bi došlo do potrebne deformacije pri proticanju između prepreka. Što je veća plastična viskoznost kod mešavina sa malim rasprostiranjem sleganjem, veća je verovatnoća da se neće postići željena vrednost sposobnosti prolaska, odnosno sposobnosti punjenja.

3.17 Preciznost testova ispitivanja i preporuke

U cilju utvrđivanja poverenja u rezultate ispitivanja i pouzdanog uvida u veličinu greške nastale prilikom ispitivanja, a da bi se na ispravan način vršilo tumačenje rezultata, neophodno je poznavati preciznost ispitivanja. Preciznost ispitivanja se može proceniti preko statističkih merila greške učinjene prilikom ispitivanja: ponovljivosti i reproduktivnosti.

Ponovljivost se, prema standardu SRPS ISO 5725-6:2011 Tačnost (istinitost i preciznost) mernih metoda i rezultata - Deo 6: Korišćenje u praksi tačnih vrednosti, definiše kao razlika između dva rezultata koja je dobio isti operater, koristeći isti metod i aparaturu, na istom materijalu, u istoj laboratoriji i pri istim uslovima sredine, u kratkom periodu vremena, i može se prekoračiti samo jednom u 20 merenja. Reproductivnost se, u tom smislu, definiše kao razlika između dva rezultata ispitivanja sprovedenog od strane različitih operatera, pomoću iste metode ali različitih aparatura, merenim na istom materijalu u različitim laboratorijama i sredinama, u kratkom vremenskom intervalu, i može se prekoračiti samo jednom u 20 merenja.

Sa verovatnoćom od 95%, ponovljivost (r) i reproduktivnost (R) se dobijaju množenjem standardne devijacije ponovljivosti (SD_r) i reproduktivnosti (SD_R) sa faktorom 2.8 odnosno:

$$r = 2.8 \cdot SD_r \quad (3.14)$$

$$R = 2.8 \cdot SD_R \quad (3.15)$$

Ovo znači da maksimalna razlika između bilo koja dva merenja od dvadeset učinjenih mora biti manja od r , ukoliko ispitivanje sprovodi isti operater, a maksimalna razlika između bilo koja dva od dvadeset učinjenih pri uslovima reproduktivnosti mora da bude manja od R .

Međutim, beton je materijal čija svojstva se menjaju sa vremenom. Iz ovog razloga, standardni zahtevi za ponovljivost i reproduktivnost ne mogu biti zadovoljeni u potpunosti. Ukoliko se, sa druge strane, zanemari ova činjenica, promena u svojstvima svežeg SCC je mala ukoliko se ispitivanja vrše u kratkim vremenskim periodima. Uzimajući sve navedeno u obzir, preciznost najčešće korišćenih metoda ispitivanja kod SCC se može proceniti kao u tabeli 3.2 [161].

Tabela 3.2 Granične vrednosti merenja, ponovljivosti i reproduktivnosti za SCC [161]

Test	Klase	Ponovljivost	Reproduktivnost
Rasprostiranje sleganjem	Rasprostiranje sleganjem (mm) (± 50)	<600	-
		600-750	42
		>750	22
	t_{500} (sec) (± 0.5)	<3.5	0.66
		3.5-6.0	1.18
		>6.0	-
V-levak	Vreme V-levka (t_V) (sec) (± 2)	3-15	$0.335t_V - 0.62$
		>15	4.4
Orimet	Vreme Orimeta (T_{OT}) (sec) (± 2)	3-15	$0.433T_{OT} - 0.594$
		>15	6.6
J-prsten	Rasprostiranje (mm)	<600	59
		600-750	46
		>750	25
	Razlika u visini (mm) (± 5)	≤ 20	4.6
		>20	7.8
L-boks	Odnos visina PA	≤ 0.35	$0.463PA - 0.011$
		>0.35	0.18
Test sa penetrometrom	Dubina penetracije (mm) (± 5)	≤ 17	$0.59P + 1.7$
		>17	12
Stabilnost na situ	Segregacija pomoću sita (%) (± 5)	≤ 20	3.7

Na osnovu vrednosti datih u tabeli, mogu se izvesti sledeći zaključci [161]:

- Nema značajne razlike u ponovljivosti i reproduktivnosti kod metoda ispitivanja SCC u svežem stanju, što znači da tačnost ne zavisi od operatera;

- Za vrednosti rasprostiranja sleganjem veće od 750mm, tačnost kod metode rasprostiranja sleganjem je bolja;
- Kod metoda V-levka i Orimet tačnost je slična i greške u merenju se povećavaju sa povećanjem vremena isticanja;
- Stabilnost mešavine ispitivana metodom sita daje rezultate sa većom tačnošću nego metoda penetracije: na primer, za tipičnu vrednost segregacije od 13% i dubinu penetracije od 17mm, ponovljivost kod metode sita je 3.7, a kod metode penetracije 12;
- Metoda J-prstena pokazala je bolju tačnost nego L-boks, sa koeficijentom varijacije od 27-29% u odnosu na 50-55% kod metode L-boksa [68];
- Može se izvesti generalni zaključak da pojedinačno merenje može da bude dovoljno precizno da bi se procenili izvesni aspekti ponašanja SCC.

U cilju procene efikasnosti i primenljivosti različitih metoda za ispitivanje SCC u svežem stanju, ispitivane su različite mešavine SCC sa različitim nivoima ugradljivosti i obradljivosti [159]. Svi testovi su ponovljeni po četiri puta na svakoj mešavini, nakon čega je vršeno poređenje njihove ponovljivosti, pouzdanosti i relativne cene. Svi testovi, osim testa L-boksa, pokazali su visoku ponovljivost ($E_{90} \leq 5\%$). Međutim, ponovljivost testova stabilnosti se značajno smanjuje sa smanjenjem stabilnosti samog betona. Svi testovi, osim testova L-boksa, pokazali su odgovarajuću pouzdanost ($SRM \geq 1$), i zaključeno je da se pomoću njih mogu na ispravan način ispitati promene u ugradljivosti i obradljivosti SCC mešavina. Na osnovu ovih analiza, rasprostiranje sleganjem, J-prsten i test sa penetrometrom bili su najjeftiniji, a segregacija u stubu jedan od skupljih testova. Na osnovu istraživanja, zaključeno je da, za procenu obradljivosti i ugradljivosti SCC na efektan i ekonomičan način, treba upotrebiti testove rasprostiranja sleganjem i J-prstena (za ocenu pokretljivosti) i segregaciju u stubu, penetrometar i test izdvajanja vode na površini (za ocenu stabilnosti). Takođe je preporučena upotreba U-boksa i V-levka, kod ugrađivanja SCC u gusto armiranim i uskim prostorima, da bi se osigurala odgovarajuća sposobnost prolaska SCC i izbegla mogućnost blokiranja.

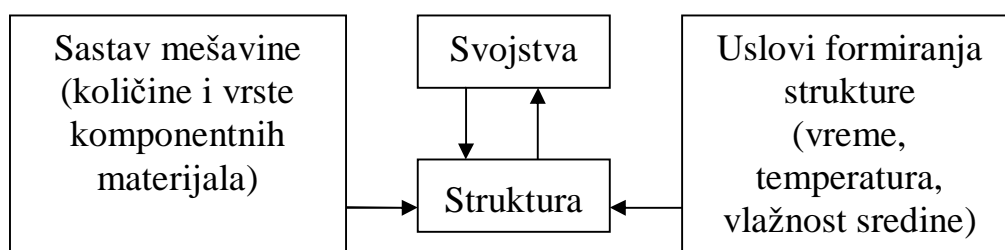
Evaluacija testova ispitivanja stabilnosti SCC u pogonima za prefabrikaciju i povezivanje sa svojstvima u očvrslom stanju (pull-out, ultrazvuk) može se svesti na sledeće zaključke [141]:

1. Test sa stabilnošću pomoću sita je kvantitativan i koreliše relativno dobro sa rezultatima testiranja segregacije u očvrslom betonu, obavljenim pomoću metode ultrazvuka i pull-out testiranja, kao i sa VSI i segregacijom u stubu. Trebalo bi ga smatrati primarnim testom za stabilnost mešavine prilikom osvedočenja u kvalitet tokom proizvodnje.
2. Pošto poseduje relativno dobru korelaciju sa testom segregacije u stubu, a potrebno je manje vremena za njegovo izvršenje, uz bolju korelaciju sa merama uniformnosti na licu mesta, test stabilnosti pomoću sita trebalo bi upotrebljavati umesto testa segregacije u stubu prilikom testiranja stabilnosti SCC.
3. Prilikom osvedočenja u kvalitet na licu mesta, VSI test stabilnosti je dobar test za primenu na licu mesta, jer relativno dobro korelira sa kvantitativnim testom stabilnosti na situ, kao i sa rezultatima ispitivanja segregacije u očvrslom betonu, obavljenim pomoću metode ultrazvuka i "pull-out" testiranja.
4. Za primenu na licu mesta, test stabilnosti pomoću sita može se upotrebljavati u cilju prevazilaženja subjektivnosti VSI testa, u slučajevima kada VSI test ukazuje na potencijalni nedostatak stabilnosti. Ukoliko beton pokazuje vrednosti VSI preko 1, preporučuje se upotreba testa stabilnosti pomoću sita, u cilju kvantifikacije procene stabilnosti.

4. Svojstva SCC u očvrslom stanju

4.1 Struktura očvrsllog betona

U zavisnosti od primenjenih komponentnih materijala (agregata, cementa, vode, mineralnih i hemijskih dodataka), njihovih odnosa u mešavini, tehnoloških postupaka prilikom izrade, uslova sredine i velikog broja drugih faktora, formira se i sa vremenom menja struktura očvrsllog betona. Struktura očvrsllog betona predstavlja osnovni i najvažniji faktor koji utiče na različita fizičko-mehanička i ostala svojstva od značaja kod betona. Funkcionalna zavisnost "svojstva betona – sastav – struktura" prikazana je na slici 4.1 [118].



Slika 4.1 Funkcionalna zavisnost "svojstva betona – sastav – struktura" [118]

Struktura betona formira se nakon završetka ugrađivanja sveže betonske mešavine, a kao rezultat procesa hidratacije cementa. Pri W/C faktorima manjim od 0.4 postoji velika verovatnoća da izvesna količina cementa ne bude obuhvaćena hidratacionim procesom, a pri većim vrednostima W/C faktora može se formirati poroznija struktura, zbog veće količine prisutne vode u betonu. Može se poći od generalnog stava da su kod razmatranja strukture betona najvažniji predmeti istraživanja makrostruktura, mikrostruktura i prelazna zona.

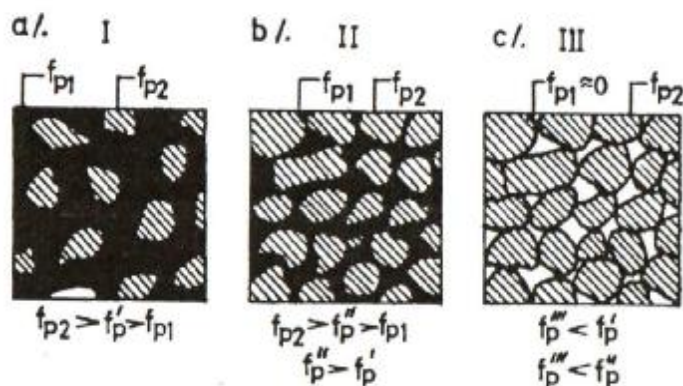
Makrostruktura betona je suštinski nehomogena, pošto se u očvrslom betonu zapažaju tri osnovne faze: agregat, očvrsla cementna pasta i šupljine (zaostale, kapilarne i gelske pore). Kada se pođe od jedinične zapremine betona, za 1 m³ betona važi jednačina:

$$\bar{v}_a + \bar{v}_{cp} + \bar{v}_p = 1 \quad (4.1)$$

gde su: \bar{v}_a , \bar{v}_{cp} , \bar{v}_p apsolutna zapremina agregata, apsolutna zapremina cementne paste i zapremina vazduha zaostalog u betonu nakon ugrađivanja (zapremina vazduha je najčešće 1-3%), respektivno.

Ukoliko se u strukturi očvrsllog betona zanemare šupljine, može se reći da se on sastoji od agregata i očvrslle cementne paste, koji svojom interakcijom opredeljuju fizičko-mehanička i ostala relevantna svojstva očvrsllog betona.

Na osnovu ovakvog razmatranja, mogu se zapaziti tri karakteristične strukturne grupe, kako je to dato na slici 4.2. Prva struktura je ona u kojoj preovladava očvrsla cementna pasta, dok su zrna agregata na većim rastojanjima i praktično se ne dodiruju međusobno. Druga struktura je ona u kojoj je cementne paste dovoljno za obmotavanje zrna agregata, ali i za ispunjavanje slobodnih prostora između tih zrna. Treći slučaj je, naravno, onaj u kome je cementne paste još manje, odnosno ima je dovoljno da obezbedi povezivanje zrna agregata njihovim obmotavanjem slojem potrebne debljine, ali pri tome cementne paste nema dovoljno za ispunjavanje prostora između zrna.



Slika 4.2 Tipovi makrostrukture betona [176]

U prvom i trećem slučaju fizičko-mehanička svojstva betona opredeljena su svojstvima očvrslle cementne paste. Fizičko-mehanička svojstva očvrsllog betona mogu se analizirati na osnovu čvrstoće f_p koju u ova tri slučaja ima beton, ali i njegove komponente (očvrsla cementna pasta – f_{p1} i agregat – f_{p2}). Pri tome se u okviru očvrslle cementne paste čvrstoća može smatrati kombinacijom čvrstoće same očvrslle cementne paste i čvrstoće kontakta između zrna agregata i cementne paste. U sva tri slučaja se može reći da je čvrstoća pri pritisku paste f_{p1} manja od čvrstoće pri pritisku agregata f_{p2} , ali i da je čvrstoća betona f_p' kao sistema koji se sastoji od ova dva dela po intenzitetu između čvrstoće paste i čvrstoće agregata. U prvom slučaju veća količina paste uslovljava veći uticaj njene čvrstoće na čvrstoću betona. U drugom slučaju je uticaj paste manji nego u prvom, jer paste ima manje, tako da je čvrstoća betona f_p'' veća nego u prvom slučaju f_p' . Konačno, u trećem slučaju čvrstoća paste se može smatrati znatno nižom nego u

prethodno opisana dva slučaja, iz razloga što je paste mnogo manje i praktično se njena čvrstoća svodi na čvrstoću kontaktnog vezivnog sloja (prelazne zone) samo na uskim odblastima kontakta između zrna agregata ($f_{p1} \approx 0$). Zato je čvrstoća betona u trećem slučaju f_p''' najmanja, odnosno manja od čvrstoće u prvom f_p' i od čvrstoće u drugom slučaju f_p'' .

Betoni najčešće imaju strukturu drugog tipa. U tom slučaju izvršena je optimizacija količine cementne paste, ali je definisana i optimalna količina različitih frakcija agregata u betonu (granulometrijski sastav mešavine agregata u betonu) pošto agregat, pored očvrsele cementne paste, ima značajan uticaj na fizičko-mehanička svojstva betona kao sistema. Posmatrano u svetlu svega navedenog, za slučaj optimalne granulometrijske krive i maksimalnu redukciju zapremine šupljina u samoj očvrslj cementnoj pasti, kod SCC se preostali uslovi za visoka fizičko-mehanička svojstva očvrsljog betona postižu upotrebom hemijskog dodatka sa visokim stepenom redukcije vode (HRWR), koji omogućuje optimalnu redukciju vode i eliminiše faktore u vezi sa ugrađivanjem. Takođe, ukoliko se mineralni dodatak u SCC ne tretira kao agregat, može se zaključiti da je struktura SCC bliža onoj opisanoj u prvom slučaju, kada zrna agregata nisu u direktnom kontaktu u očvrslom betonu [125].

U slučaju analize mikrostrukture očvrsljog betona, uobičajeno je razmatranje strukture već pomenutih osnovnih elemenata – nosilaca strukture: agregata i očvrsele cementne paste (cementnog kamena), ali i kontaktnog sloja na granici ovih elemenata – prelazne zone. U smislu strukture, najčešće se analizira poroznost u okviru svakog od ovih elemenata.

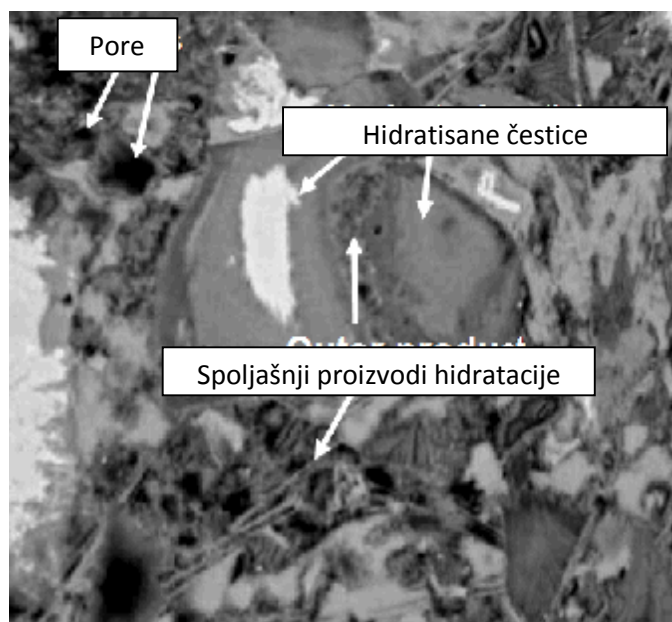
U slučaju upotrebe agregata nezanemarljive poroznosti (npr. pri upotrebi recikliranog betona u svojstvu agregata), osim uticaja prisustva otvorenih i zatvorenih pora u zrnima agregata na fizičko-mehanička svojstva agregata i očvrsljog betona, postoji i uticaj upijanja vode iz cementne paste, pa je realno postignut W/C faktor u mešavini niži od početnog. Ovo može da rezultira višim ili nižim fizičko-mehaničkim svojstvima očvrsljog betona, u zavisnosti od toga koji se procesi u betonu odigraju, pa zato treba ovaj mehanizam kontrolisati (npr. sračunavanjem i dodavanjem količine vode potrebne za "kvašenje" agregata, na osnovu poznate vrednosti upijanja vode kod agregata).

Međutim, kada se govori o poroznosti agregata, u najvećem broju slučajeva radi se o kompaktnom agregatu, čija poroznost može da se zanemari.

Najveći deo poroznosti u strukturi očvrslom betonu, u slučaju primene kompaktnog agregata, sastoji se od poroznosti unutar očvrslle cementne paste, i može se reći da se sastoji od pomenute kapilarne poroznosti, zatim gelske i zaostale poroznosti.

Produkti hidratacije u cementnoj pasti su međusobno pomešani i to na nivou nano- i mikro- strukture. Izuzetak od ove tvrdnje, u velikom broju slučajeva, predstavlja C-S-H gel formiran u okviru granica originalnih zrna cementa. Iz tog razloga se ne insistira na mikrostrukтури pojedinačnih produkata hidratacije cementa, već na opštoj distribuciji čvrstih faza i poroznosti. Imajući ovo u vidu, osnovni model koji opisuje mikrostrukturu cementne paste sastoji se od tri faze, prikazane na slici 4.3.

Hidratirane čestice cementa: Ova faza se sastoji od C-S-H gela visoke kompaktnosti, i u izvesnim slučajevima od nehidratiranog cementa. Ova faza je analogna zrnima agregata u betonu, pošto se njene čestice ponašaju kao pojedinačne čvrste čestice unutar kontinualne matrice ostalih faza. Te čestice se ponekad nazivaju i "fenočesticama" ("phenograins"), što je asocijacija na činjenicu da se pomoću mikroskopa jasno razlikuju od okoline.



Slika 4.3 BS/SEM slika očvrslle cementne paste sa osnovnim fazama mikrostrukture [285]

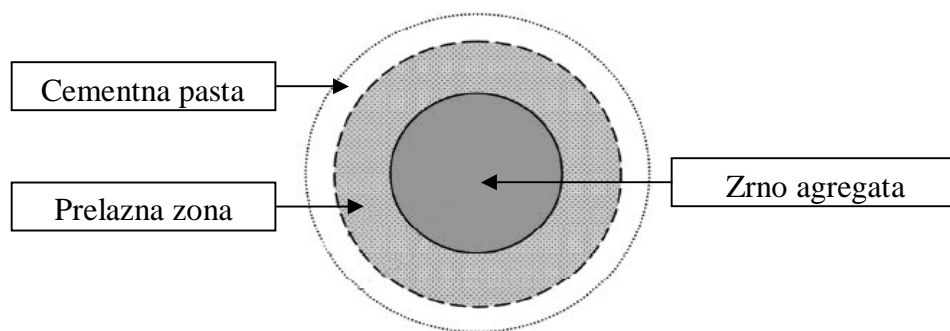
Spoljašnji produkti hidratacije: Ovo je kontinualna faza koja raste u okviru kapilarnog prostora i povezuje čestice cementa. Prateći gore pomenutu analogiju, ova faza igra ulogu sličnu cementu u betonu. Sastoji se iz čvrstog C-S-H gela, gelskih pora, kalcijum-hidroksida i faza kalcijum-sulfoaluminata. Ova faza se pomoću optičkog ili elektronskog mikroskopa zapaža kao masa sa različitim nijansama sive boje, i iz tog razloga se ponekad naziva osnovnom masom. U predmetnoj fazi je daleko najvažnija faza C-S-H gel male kompaktnosti (i pripadajuće gelske pore), jer ta faza daje pasti njenu čvrstoću.

Velike pore: Ove pore se sastoje od stvarnih kapilarnih pora i zarobljenih šupljina sa vazduhom. Ove faze, posmatrane pomoću elektronskog mikroskopa, izgledaju kao diskretne crne šupljine. Veliki porni sistem može biti kontinualan i diskontinualan, u zavisnosti od stepena hidratacije i polaznog W/C faktora, što se ne može utvrditi pomoću mikroskopa.

Kod SCC betona razvija se isti mehanizam hidratacije kao i kod NVC [229]. Međutim, veći sadržaj hemijskih i mineralnih dodataka može u izvesnoj meri uticati na razvoj hidratacije [161]. Na primer, upotreba krečnjačkog brašna u SCC može povećati intenzitet reakcije hidratacije [218]. Fine čestice filera mogu igrati ulogu heterogenih centara hidratacije, na taj način ubrzavajući ovu reakciju [136]. Vreme vezivanja SCC može biti dva puta duže u odnosu na NVC, usled upotrebe superplastifikatora i letećeg pepela [46]. Sa druge strane, veća disperzija čestica cementa, usled upotrebe superplastifikatora, vodi ravnomernijoj hidrataciji i homogenijoj strukturi očvrsllog betona, sa većim stepenom hidratacije nego što bi bio ostvaren u slučaju da se ne upotrebljava superplastifikator [230].

Čestice cementa u svežem betonu se tokom mešanja ne mogu međusobno tako nezavisno raspoređivati kada se nalaze u blizini čestica agregata (pojava poznata kao "efekat zida"). Rezultat ove pojave je uzan prostor oko zrna agregata, koji sadrži manju količinu zrna cementa i veću količinu vode (takozvana "prelazna zona", ili ITZ od anglosaksonskog "interfacial transition zone").

Prelazna zona je oblast sa višim W/C faktorom i većom poroznošću nego što je to slučaj u pasti. Ova zona nije uniformna, već varira od tačke do tačke duž svakog zrna agregata, sa prosečnom debljinom od 20-40 μm . Zbog većih pora, u ovoj zoni se obično nalaze veći kristali, obično kalcijum-hidroksida, nego u pasti u okolini. Takođe, u prelaznoj zoni se može naći potreban prostor za formiranje igličaste strukture etringita. Ova zona teži da bude veća oko većih zrna agregata.

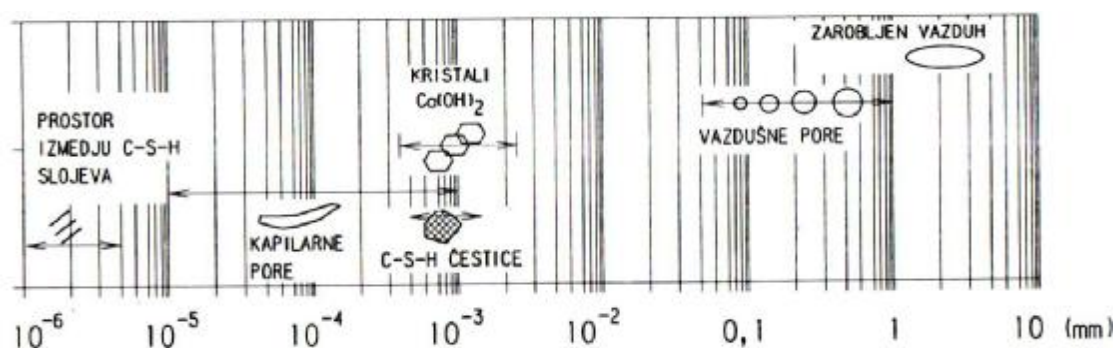


Slika 4.4 Šematski prikaz zrna agregata sa prelaznom zonom

Prelazna zona ima važan efekat na svojstva betona, jer predstavlja najslabije mesto u betonu, u odnosu na cementnu pastu i čestice agregata. Prelazna zona, zbog svoje veće poroznosti, poseduje i veću permeabilnost. Kod većine betona dolazi do povezivanja prelaznih zona oko pojedinačnih zrna, što čini kontinualnu fazu visoke permeabilnosti unutar cele mase. Kao rezultat, permeabilnost nekog betona može biti i 1000 puta veća nego kod cementne paste od koje se on sastoji [285]. Naravno, ovaj efekat je u direktnoj vezi sa padom trajnosti, usled veće izloženosti difuziji reaktivnih jona u masu betona, koji napadaju cementnu pastu ili armaturu [7]. Na slici 4.4 je dat šematski prikaz prelazne zone. Eliminacijom procesa kompaktiranja i upotrebom filera kod SCC postiže se gušća cementna matrica i poboljšana veza između agregata i paste [213],[287]. Na primer, razlika u prelaznoj zoni (u smislu kvaliteta, odnosno homogenosti) u betonu ugrađenom u jedan isti zid na delu bližem vrhu zida i na delu bližem dnu zida izrađenog od SCC mnogo je manja nego kada je zid napravljen od NVC [314].

Uopšteno posmatrano, poroznost betona sastoji se od zaostale, gelske i kapilarne. Za veće vrednosti stepena hidratacije može se očekivati manja ukupna poroznost. Pošto sa povećanjem količine cementnog gela raste i ukupna poroznost, povećanje stepena hidratacije, kao i količine cementa u betonu u tom smislu negativno će uticati na

hidrataciju cementa. Sa druge strane, kapilarna poroznost će opadati sa vodocementnim faktorom i sa povećanjem stepena hidratacije. Pošto se potpuna hidratacija cementa praktično nikada ne ostvaruje (nikada se ne dostiže vrednost $\alpha_h=1$), onda se može zaključiti da je u realnom slučaju konačna, minimalna poroznost povezana sa postignutim konačnim stepenom hidratacije. Pri tome treba imati na umu da smanjivanje W/C faktora putem povećanja količine cementa u betonu nije tehnički opravdano. Naime, na taj način postići će se niži W/C faktor, ali će se povećati količina cementne paste i gelska poroznost, uz srazmerno malo smanjenje kapilarne poroznosti. Treba napomenuti da pomenuto povećanje količine cementa u betonu ima negativan ekonomski efekat, kao i da dovodi do povećanja deformacija usled skupljanja u betonu. Ovde treba napomenuti da se pomenuta redukcija vode može ostvariti samo uz poštovanje uslova dovoljno dobre ugradljivosti, što opravdava upotrebu hemijskih dodataka tipa plastifikatora, a naročito HRWR. Dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona prikazane su na slici 4.5.

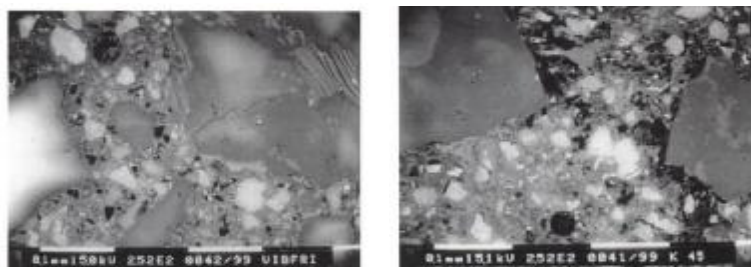


Slika 4.5 Dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona [118]

Samozbijajući betoni se odlikuju manjom poroznošću prelazne zone i generalno boljom mikrostrukturom [137],[237],[297], ali i makrostrukturom u odnosu na konvencionalne betone (NVC). Razlozi za navedene efekte poboljšanja strukture SCC u odnosu na NVC su: razlike u pogledu sastava i izbora komponentnih materijala, drugačiji odnosi komponenti, strožiji uslovi spravljanja, ugrađivanja i nege kod SCC, izostanak vibriranja ili nabijanja prilikom ugrađivanja.

Na primerima mikrostrukture SCC i NVC betona upotrebljenih u realnim konstrukcijama, prikazanim na slici 4.6, uočava se bolja kompaktnost i ujednačenost sastava kod SCC. Sa druge strane, kod NVC se može primetiti da je prelazna zona veće širine, a samim tim i veće poroznosti u okolini zrna agregata (na slici vidljivo kao

tamnija polja), kao i neujednačenost strukture cementnog kamena, kao posledica neujednačenog vodocementnog faktora (na slici se uočavaju značajne razlike u boji) kod NVC [287],[283]. Generalna analiza na makro i mikro nivou ukazuje na prednosti primene SCC u odnosu na NVC, koji se ugrađuje vibriranjem.



Slika 4.6 Uporedni prikaz strukture SCC i NVC [287]

Izgleda da vrsta filera nema efekta na prirodu poroznosti (mikro ili makro) kod SCC, iako utiče na kritični prečnik pora, naročito kada se posmatra mikrostruktura pri starosti od 28 dana [166]. Istraživanja mikrostrukture i poroznosti ukazala su na prisustvo većih količina $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i CaCO_3 kod SCC sa krečnjačkim brašnom, kako u matrici, tako i u prelaznoj zoni (ITZ), u poređenju sa SCC sa letećim pepelom. Ovo se slaže sa generalnim zaključkom da je krečnjačko brašno relativno neaktivan sastojak. Međutim, veće količine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u betonima sa krečnjačkim brašnom indikacija su efekta akceleratora na proces hidratacije C_3S komponente cementa [166].

4.2 Čvrstoća pri pritisku SCC

Za slične vrednosti W/P faktora, čvrstoća pri pritisku se ne razlikuje značajno kod SCC i kod NVC. Brzine priraštaja čvrstoće pri pritisku SCC i NVC sa vremenom su takođe slični [69],[73],[89],[97],[229],[250]. Razlika u 28-dnevnoj čvrstoći pri pritisku između SCC spravljenih sa drobljenim i rečnim agregatom je mala, za iste ostale parametre, dok je kod NVC ta razlika dvostruko veća [73]. Razlozi za to su prema [73] mnogo homogenija matrica kod SCC i manji sadržaj krupnog agregata, čime se njegov uticaj smanjuje.

Čvrstoće pri pritisku SCC pri starosti od 28 dana varirale su između 20 i 100 MPa, u zavisnosti od W/P faktora i sastava filera [74], što pokazuje da SCC može da se primeni u širokom spektru različitih uslova.

Razvoj računarske tehnologije i primenjenih numeričkih metoda trebalo bi da dovede do napretka i u oblasti projektovanja sastava i predviđanja ponašanja SCC u svežem i očvrslom stanju [153]. Izvestan broj radova baziran je na povezivanju ulaznih parametara, koji se najčešće odnose na sastav i svojstva u svežem stanju, sa svojstvima u očvrslom, u smislu predviđanja ponašanja [34].

Autori [243] su izvršili komparativnu analizu modela razvijenih u cilju predviđanja 28-dnevne čvrstoće pri pritisku, upotrebom neuralnih mreža, na osnovu podataka datih u literaturi i eksperimentalno razvijenih za SCC sa ložišnim pepelom iz peći, u svojstvu delimične zamene sitnog agregata. Ulazni podaci za analizu bili su: cement, pesak, krupan agregat, leteći pepeo kao delimična zamena peska, voda i vodocementni faktor, količina superplastifikatora, a izlazni parametri bile su vrednosti čvrstoće pri pritisku na 7, 28, 90 i 365 dana. Postignute su dobre korelacije između predviđenih i stvarnih vrednosti.

4.3 Čvrstoća pri zatezanju SCC

U slučaju sličnih W/P faktora, čvrstoća pri zatezanju cepanjem SCC je viša nego kod NVC [97],[314]; odnos čvrstoće pri zatezanju prema čvrstoći pri pritisku kod SCC iznosio je 10-30% više nego kod NVC [89],[101]. Ovo je u pomenutim istraživanjima pripisano boljoj mikrostrukturi SCC.

Međutim, druga ispitivanja [206] su pokazala da je čvrstoća pri zatezanju cepanjem kod SCC betona niža 15% nego kod NVC. Razlike imaju tendenciju smanjenja sa povećanjem količine mineralnog dodatka.

Eksperimentalnim ispitivanjem 154 grede različitih dimenzija, izrađenih od SCC sa različitim vodocementnim faktorima (između 0.35 i 0.75), istraživao je uticaj vodocementnog faktora na parametre deformabilnosti očvrslom SCC betona [27]. Uzorci su ispitivani pri konstantnoj brzini deformacije od 0.4 mm/min. Na osnovu istraživanja izvedeno je više zaključaka. Prvo, najveća energija pri lomu zabeležena je na betonu sa W/C faktorom od 0.4. Zatim, sa smanjivanjem vodocementnog faktora, nagib silaznog dela dijagrama opterećenje-pomeranje raste, ukazujući na krtije ponašanje. Konačno, primećeno je i da je sa povećanjem W/C faktora rasla i žilavost betona. Poređenjem sa

rezultatima iz literature, zaključeno je da je SCC donekle žilaviji nego NVC i beton visokih performansi, za iste nivoe čvrstoće.

4.4 Modul elastičnosti SCC

Modul elastičnosti je važan podatak prilikom proračuna deformacije u elastičnoj oblasti ponašanja konstrukcije, što predstavlja kontrolni parametar, naročito važan prilikom projektovanja ploča i prednapregnutih konstrukcija.

Modul elastičnosti najčešće se definiše kao odnos između napona i dilatacija. Kod betona je napon-dilatacija dijagram nelinearan, što donekle usložnjava proces određivanja vrednosti modula elastičnosti. Stoga se definišu različiti moduli elastičnosti, kao što su na primer: statički, dinamički, sekantni i tangenti. Statički modul elastičnosti (E_s) predstavlja nagib tangente na krivu pri manjim vrednostima napona (manje od trećine čvrstoće) i u tom smislu se može smatrati tangentnim za manje napone, dok je dinamički modul (E_d) nagib tangente na krivu u koordinatnom početku. Vrednost statičkog modula elastičnosti, E_s obično iznosi 0.8-0.85 od E_d , u zavisnosti od čvrstoće pri pritisku i drugih faktora [101].

Poznato je da modul elastičnosti betona zavisi od modula elastičnosti komponentnih materijala i njihovog zapreminskog odnosa. Sa smanjenjem sadržaja agregata, ili povećanjem sadržaja cementa, ili sa povišenom poroznošću, dolazi do pada vrednosti modula elastičnosti [161].

Obzirom da je sadržaj krupnog agregata kod SCC niži nego kod NVC, može se očekivati da modul elastičnosti SCC bude niži [69]. Modul elastičnosti SCC može da bude čak 20% niži u odnosu na NVC iste čvrstoće, napravljen sa istim agregatom [97]. Dalja analiza zasnovana na rezultatima iz literature pokazala je da modul elastičnosti SCC može biti i 40% niži nego kod NVC, pri nižim čvrstoćama pri pritisku; ali se ta razlika smanjuje na manje od 5% pri višim čvrstoćama (90-100 MPa) [73]. U svakom slučaju, razlika se kreće u granicama definisanim u CEB-FIB Model Code [73],[97].

Prilikom jednog drugog, sličnog istraživanja, dobijeni su rezultati u skladu sa očekivanim trendovima koji važe za NVC, što znači da je statički modul elastičnosti (E_s)

varirao u funkciji od količine paste i krupnog agregata [85]. Za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku, betoni sa većom količinom agregata i većim najkrupnijim zrnom agregata imali su više vrednosti statičkog modula elastičnosti. Isto ponašanje je primećeno u slučaju čvrstoće pri zatezanju. Takođe, sa povećanjem zapreminske mase betona, značajno je rasla i vrednost modula elastičnosti. Funkcionalna zavisnost između čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti (dobijenih eksperimentalnim putem) grafički posmatrano, bila je malo iznad većine relacija datih pravilnicima. Generalno posmatrano, pomenute zavisnosti daju bolje rezultate (bliže stvarnim) za čvrstoće između 45 i 50 MPa, ali za niže vrednosti čvrstoće betona (između 40 i 45 MPa) dobijaju se niže vrednosti statičkog modula elastičnosti od stvarnih. Empirijski obrazac koji povezuje čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju, na osnovu ispitivanja zatezanja cepanjem, daje rezultate koji su niži od onih dobijenih na osnovu preporuka datih u većini pravilnika. Za nivo poverenja od 95%, statistički je procenjeno da je broj rezultata dovoljan za pouzdan zaključak, u skladu sa Gausovom raspodelom svojstava.

4.5 Atezija između betona i armature kod SCC

Veza između armature i betona je izuzetno važna, ako se u obzir uzme činjenica da se u konstrukcijama beton uglavnom spravlja kao armirani, na bazi proračunskih modela koji definišu kvalitet i količinu armature, kao i kvalitet betona.

Manja atezija između betona i armature često je posledica pojave poznate kao "bliding", odnosno posledica segregacije betona. Voda i vazduh se izdižu i ostaju zarobljeni ispod šipki armature, što uzrokuje neravnomernu ateziju duž šipki, kao i po obodu poprečnog preseka šipke. Takođe, atezija je veća u nižim delovima betonskog elementa i smanjuje se na višim nivoima.

Iz tog razloga efektivna veza može poboljšati ponašanje u konstrukciji i zaštititi armaturu od korozije. Čvrstoća ove veze menja se u zavisnosti od veličine, tipa i položaja šipki armature. Na osnovu istraživanja, atezija između betona i armature kod SCC bila je istog reda veličine [86] ili veća nego kod NVC [50],[69],[73]. Istraživanja [314] su pokazala da je atezija (prilikom čupanja šipki armature iz betona) kod SCC bila 10-40% viša nego kod NVC istog reda veličine čvrstoće pri pritisku od 35-60 MPa, za prečnik armature od 12 i 20 mm.

Eksperimentalnim putem [48] istraživane su moguće razlike u tipu veze i lomu SCC i NVC. Ispitivano je devet mešavina betona i nisu primećene razlike u slučaju ispitivanja veze na zategnutom elementu (stub od betona 10x10 cm, dužine 50 cm, sa šipkom rebraste armature $\varnothing 12$ u sredini), nosivosti pri savijanju armiranobetonskih greda, i u smislu ispitivanja betona metodama aksijalnog zatezanja, zatezanja cepanjem i savijanja. Ispitivanjem običnih i isečenih zategnutih elemenata uočen je pad čvrstoće pri zatezanju kod neobrađenih uzoraka SCC do 40% u odnosu na NVC, što je pripisano lošijem kvalitetu površinskog sloja SCC i većem sadržaju paste. Autori su zaključili da je neophodno povesti više računa prilikom nege svežeg ugrađenog SCC, kako bi se pomenuti negativni efekti minimizovali.

4.6 Skupljanje SCC

Zapreminske deformacije, u prvom redu skupljanje, veoma su važne za beton, zato što mogu proizvesti napone zatezanja unutar betona, što vodi razvoju prslina i omogućava gasovima, vodi i štetnim jedinjenjima da prodru u beton i izazovu dalje probleme u smislu trajnosti. Skupljanje je izuzetno važno kod prednapregnutog betona, obzirom da dovodi do pada sile prednaprezanja i pada nosivosti prednapregnutog elementa [18].

Skupljanje usled sušenja je relativno spor proces. Glavni razlog ove komponente skupljanja je gubitak vode iz pornog sistema usled niže vlažnosti u spoljašnjoj sredini. Difuzija vode kroz materijal pre svega zavisi od porne strukture, veličine i oblika uzorka, trajanja sušenja i preovladavajućih atmosferskih uslova [90],[294].

Veći sadržaj finih čestica (mineralnog dodatka i cementa) rezultira generalno i većom zapreminom paste u SCC, u poređenju sa NVC. Pošto je cementna pasta osnovni razlog promena u zapremini, sa povećanjem količine paste povećava se i skupljanje, pa je, sa teoretskog aspekta, SCC podložniji većim vrednostima skupljanja. Međutim, značajno povećanje zapremine paste ne vodi neminovno većem skupljanju, obzirom da i ostali faktori, kao što su, na primer, kontinuitet kapilarne mreže i gustina matrice, utiču na skupljanje. Na skupljanje takođe može uticati i usporavajući efekat snažnih superplastifikatora, koji se upotrebljavaju za spravljanje SCC. Sa povećanjem sadržaja ovih dodataka, duži je period odlaganja reakcije hidratacije, što utiče na povećanje

skupljanja. Mnogi autori smatraju da je skupljanje kod SCC veće nego kod NVC [53],[163]. Međutim, tu su i istraživanja koja nisu pokazala značajne razlike između ove dve vrste betona [56],[216],[217], pa i ona koja ukazuju na niže skupljanje kod SCC [94].

Ukupno skupljanje u SCC sa krečnjačkim filerom je donekle veće nego kod NVC (razlike ispod 9.2%). Međutim, SCC spravljen sa VMA pokazuje 7.7% niže skupljanje nego NVC. U studiji [232] su sa aspekta skupljanja diskutovana tri osnovna parametra sastava SCC: zapremina paste, sadržaj vode, sadržaj mineralnog dodatka. Skupljanje se povećavalo, gotovo linearno, sa povećanjem količine paste. Povećanje količine vode svakako vodi smanjenju čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti, a povećanje količine mineralnog dodatka u pasti redukuje skupljanje, ali u isto vreme povećava rizik od pojave prslina.

4.7 Tečenje SCC

Tečenje se definiše kao postepeno povećanje deformacije pri konstantnom naponu. U pitanju je deformacija koja, kao i skupljanje, zavisi od vremena. Do tečenja dolazi u cementnoj pasti i posledica je poroznosti, koja je u vezi sa W/C faktorom. Kako vreme prolazi, dolazi do hidratacije cementa i smanjenja poroznosti, što rezultira smanjenjem deformacije tečenja kod betona. Povrh toga, prisustvo agregata vodi smanjenju naprezanja i deformacija u pasti. Iz tog razloga se može očekivati manje tečenje kod betona sa većim sadržajem agregata i sa višim modulima elastičnosti.

Persson [209] je potvrdio da na tečenje utiče poroznost cementne paste i da opada sa povećanjem čvrstoće, kako kod NVC, tako i kod SCC. Zbog većeg sadržaja cementne paste, očekivalo se veće tečenje kod SCC u odnosu na NVC. Međutim, usled nedostatka podataka, kao i zbog kontradiktornosti postojećih rezultata, o pojavi tečenja kod SCC ne može se dati generalni zaključak. Kao i kod NVC, na skupljanje i tečenje SCC utiče W/P faktor i načini nege betona.

4.8 Trajnost SCC

Trajnost betona i betonskih konstrukcija ostvaruje se pravilnim projektovanjem konstrukcija, odgovarajućim izborom svih komponenti materijala u okviru betona, kao i

pravilnim izvođenjem i održavanjem konstrukcija [109]. Drugim rečima, betonske konstrukcije treba projektovati tako da se u očekivanim - poznatim uslovima konkretne sredine obezbedi dovoljna sigurnost i upotrebljivost bez visokih troškova održavanja i popravke. Traženo svojstvo trajnosti betona zavisi svakako od veka upotrebljivosti konstrukcije, od mogućeg budućeg načina korišćenja konstrukcije, od posebnih zaštitnih mera, planiranog održavanja tokom upotrebe, kao i od eventualnog otkazivanja u posebnim lokalnim uslovima. U praksi, postignut nivo trajnosti betona i betonskih konstrukcija zavisi od simultanog delovanja ovih, navedenih faktora. Pojavom samozbijajućeg (samougrađujućeg) betona, eliminiše se uticaj "faktora čovek", tako da trajnost betonske konstrukcije zavisi samo od ostvarenog kvaliteta betonske mešavine. Dobija se kvalitetno ujednačen zbijen beton odnosno beton visoke trajnosti.

Trajnost betona je usko povezana sa vrstom oštećenja do kojih može doći u betonu. U fizička oštećenja betona spadaju ciklusi vlaženja/sušenja, zamrzavanja/odmrzavanja ili zagrevanja/hlađenja. Hemijska oštećenja sastoje se od sulfatne korozije, dejstva kiselina, hloridne korozije i alkalno-silikatne reakcije u kojoj voda služi kao transportno sredstvo. Svi ovi fenomeni su usko povezani sa otpornošću površinskog sloja na odvijanje mehanizama kao što su propuštanje, adsorpcija i difuzija gasova i tečnosti.

U cilju procene trajnosti SCC u raznim istraživanjima su praćeni generalni indikatori trajnosti (poroznost za vodu, difuzija hlorida, prodor kiseonika) i dodatni, neophodni za bolje shvatanje (živina porozimetrija, kapilarno upijanje, karbonatizacija i izluživanje amonijum-nitrata) [11]. Cilj je bio poređenje svojstava NVC i SCC sličnih čvrstoća pri pritisku. Uprkos razlikama (pre svega u većoj količini mineralnog dodatka i superplastifikatora kod SCC) osnovne fizičke karakteristike ove dve vrste betona mogle su da se porede u smislu trajnosti. Pri sličnom vodocementnom faktoru i ekvivalentnom vodopraškastom faktoru, SCC je imao istu ili veću čvrstoću pri pritisku nego NVC. Na osnovu difuzije hlorida i upijanja vode, oba betona su imala slična svojstva u smislu transporta materija kroz porni sistem. Permeabilnost za kiseonik pokazala je da veću otpornost na prodor gasova ima SCC. U smislu ponašanja u agresivnoj sredini, oba materijala su imala slične parametre deterioracije. Ovo je u saglasnosti sa nekoliko ostalih istraživanja, koja su pokazala da, za isti nivo čvrstoće pri pritisku, SCC može da se smatra bar podjednako upotrebljivim i trajnim kao i NVC.

Istraživanje je pokazalo da je sadržaj kapilarnih pora u proseku 10.8% manji kod SCC nego kod NVC, zbog upotrebe krečnjačkog filera, što daje manju poroznost i finiju mikrostrukturu [295]. Sa približavanjem količine sitnih čestica u običnom betonu onoj za SCC, razlike se smanjuju, što je pripisano efektu pakovanja zrna. Sadržaj uvučenog vazduha (veličine preko 100 μm) je veći kod SCC 43.8% do 128.6% nego kod NVC. Step en karbonatizacije je niži kod SCC nego kod NVC, zbog niže poroznosti i finije strukture pora.

Ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza su pokazala da SCC sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera poseduje bolju unutrašnju otpornost na dejstvo mraza nego NVC sa istim W/C faktorom i sadržajem vazduha, ali postoji mala razlika između SCC i NVC za otpornost na dejstvo soli (NaCl) i sulfatnu otpornost [211]. U istraživanju [312] SCC je pokazao niži nivo otpornosti na dejstvo mraza nego NVC.

Ispitivanja koja su sprovedeli Al-Tamimi i Sonebi [10] na SCC sa krečnjačkim brašnom specifičnog sastava i sa W/P odnosom od 0.36 i NVC iste čvrstoće (W/P odnos 0.46) potopljenih u rastvore sumporne i hlorovodonične kiseline, pokazali su da nakon 18 nedelja gubitak mase usled sulfatne reakcije na SCC predstavlja samo polovinu u odnosu na NVC u rastvoru sumporne kiseline; ali u rastvoru hlorovodonične kiseline SCC je pokazao gubitak za oko 2.2% veći u odnosu na NVC. Ova razlika između SCC i NVC mogla bi se objasniti razlikom u komponentnim materijalima: veći sadržaj cementa kod NVC rezultirao je većim sadržajem kalcijum-hidroksida nego kod SCC; niži W/P faktor, kao i upotreba krečnjaka, koji je finiji od cementa, vodili su gušćoj strukturi SCC u odnosu na NVC.

Dejstvo požara na SCC je istraživano u manjem broju radova. Cilindri spravljeni od SCC mešavina različitog sastava, čvrstoće do 104 MPa izlagani su dejstvu požara, pri čemu je primećeno blago otpadanje površinskog sloja betona kod SCC; step en otpadanja je takođe zavisio od tipa upotrebljenih mineralnih dodataka [296]. Takođe, SCC je bio podložniji pojavi otpadanja površinskog sloja pri višim temperaturama u odnosu na NVC iste čvrstoće [37],[185]. Pomenuta pojava je pripisana gušćoj mikrostrukturi SCC.

Bakhtiyari i saradnici [20] su istraživali otpornost SCC sa krečnjačkim i kvarcnim brašnom, sa dve različite ciljane čvrstoće pri pritisku, na dejstvo požara, i poredili dobijene rezultate sa NVC. U skladu sa rezultatima ispitivanja, izveden je zaključak da su SCC podložniji otpadanju zaštitnog sloja nego NVC, ali relativna rezidualna čvrstoća nakon dejstva povišenih temperatura značajno brže opada kod NVC nego kod SCC. Takođe, u slučaju upotrebe kvarcnog filera u SCC, zaključeno je da će kvarcni filer ubrzati razvoj čvrstoće pri visokim temperaturama do 500°C, zbog svoje delimične pucolanske aktivnosti, koja je pri tim temperaturama značajnija. Ovaj efekat može da se odrazi na povećanje purnog pritiska što vodi većem riziku od otpadanja površinskog sloja u betonu. Autori su zaključili da je potrebno dodatno utvrditi uticaje starosti, sadržaja vlage i načina nege SCC na ponašanje pri visokim temperaturama.

Iako postoje izvesne razlike u svojstvima betona u očvrslom stanju, ove razlike se mogu pripisati različitim recepturama, odnosno različitim količinama i odnosima komponentnih materijala. Većina poređenja između SCC i NVC vršena je na bazi iste čvrstoće. Obzirom da se SCC može spravljati na bazi zahteva u svežem stanju, moglo bi biti korisno povezati svojstva u očvrslom stanju i trajnost sa svojstvima u svežem stanju [106],[161].

4.9 Metode ispitivanja očvrsllog SCC primenjene u okviru istraživanja

Ispitivanja na očvrslim samozbijajućim betonima (SCC) su, generalno posmatrano, potpuno ista kao i ispitivanja na normalno vibriranim betonima (NVC), obzirom da se SCC u suštini karakteriše svojim ponašanjem u svežem stanju. U očvrslom stanju SCC se od običnog betona razlikuje upravo u onim svojstvima koja su posledica njegove drugačije formirane strukture (u odnosu na NVC); dok je ta formirana struktura u direktnoj vezi sa sastavom i svim tehnološkim radnjama obavljenim do trenutka ispitivanja (mešanje, transport, izlivanje, nega) koje mogu da utiču na formiranje strukture SCC. U ovom poglavlju ukratko će biti opisane metode ispitivanja svojstava SCC u očvrslom stanju, primenjene u okviru eksperimenta, koji je opisan u drugom delu rada. Stoga u daljem tekstu nisu ni navođeni nazivi odgovarajućih standarda, nego su citirani i u celini navedeni u literaturi.

4.9.1 Ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava SCC

4.9.1.1 Zapreminska masa u očvrslom stanju

Zapreminska masa betona predstavlja masu jedinice zapremine uzorka betona. Zapreminska masa uzoraka betona merena je na uzorcima pri različitim starostima, u skladu sa programom ispitivanja za konkretni SCC, prema odgovarajućem standardu SRPS EN 12390-7:2010 [261]. Kod uzoraka koji stoje u vodi pre ispitivanja različiti sadržaji vlage, kao i različito vreme sušenja (nakon vađenja iz vode) pre ispitivanja utiču na rezultate u odnosu na zapreminsku masu. Da bi se maksimalno izbegli pomenuti efekti, usvojeno je da se uzorci ispituju dva sata nakon vađenja iz vode. Ovaj princip usvojen je kod svih ispitivanja, kako mehaničkih, tako i fizičkih za sve uzorke koji su ispitivani.

4.9.1.2 Ispitivanje čvrstoće pri pritisku

Čvrstoća pri pritisku predstavlja jedno od najčešće ispitivanih svojstava očvrsllog betona, obzirom da se radi o najvažnijem parametru za primenu betona u konstrukciji. Prema važećim standardima i preporukama, čvrstoća pri pritisku ispituje se obavezno za sve vrste betona, pa i u slučaju da se radi o konstrukcijama i elementima kod kojih čvrstoća pri pritisku nije od presudnog značaja, i to prema SRPS EN 12390-3:2010 [259]. Najbitniji proračunski parametar prilikom dimenzionisanja armirano-betonskih konstrukcija, marka betona [220] odnosno klasa čvrstoće betona (SRPS U.M1.021:1997, [270]) utvrđuje se statističkom analizom ovog svojstva betona.

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku vršeno je postupnim opterećenjem do loma betonskog tela, u hidrauličkoj presi proizvođača Amsler opsega 2500 kN (slika 4.7). Brzina nanošenja opterećenja iznosila je 0.6 ± 0.4 MPa/s. Neposredno pre svakog ispitivanja čvrstoće pri pritisku vršeno je merenje masa uzoraka, u cilju određivanja zapreminske mase betona u vreme ispitivanja čvrstoće.



Slika 4.7 Presa Amsler za ispitivanje čvrstoće pri pritisku

4.9.1.3 Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem usled linijskog pritiska, čvrstoće pri zatezanju savijanjem i ispitivanje metodom "pull-off"

Čvrstoća pri zatezanju cepanjem ispitivana je kao na slici 4.8, pri različitim starostima, u skladu sa planom ispitivanja i odgovarajućim standardom (SRPS EN 12390-6:2010, [260]. Ispitivanje je obavljeno na uzorcima oblika cilindra, prečnika osnove 15cm i visine 15cm, bez drvenih podloški.



Slika 4.8 Izgled uzorka neposredno nakon ispitivanja čvrstoće betona pri zatezanju cepanjem putem linijskog opterećenja

Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem obavljeno je saglasno odgovarajućem standardu SRPS ISO 4013:2000 [267], sa jednom silom u sredini raspona od 30 cm (uzorci dimenzija 12x12x36 cm).

Ispitivanje athezije prema odgovarajućem standardu SRPS EN 1542:2010 [262] vršeno je nakon lepljenja pečata direktno na betonske ploče dimenzija 40x40x5 cm. Na slici 4.9 je prikazan uzorak samozbijajućeg betona neposredno pre i posle ispitivanja metodom "pull-off" (pečati prečnika 50 mm su "isčupani", a pečati prečnika 20 mm tek treba da se "isčupaju").



Slika 4.9 Zalepljeni pečati u testu "pull-off" (levo) i dispozicija ispitivanja sa "isčupanim" pečatima sa uzorka (desno)

Ispitivanje uzorka betona "pull-off" aparatom tipa "Controls" opsega 0-16 kN vršeno je nakon 2 dana od lepljenja pečata. Ispitivanja su paralelno sprovedena sa dve vrste pečata (prečnika 20 mm i prečnika 50 mm), u cilju potvrde trenda promene athezije.

4.9.1.4 Ispitivanje statičkog modula elastičnosti

Statički modul elastičnosti predstavlja odnos promene napona (ΔS) i odgovarajuće promene elastične deformacije ($\bar{\epsilon}$) koja se dobija ispitivanjem uzorka izloženog pritisku, odnosno:

$$E_s = \frac{\Delta \sigma}{\bar{\epsilon}} [\text{GPa}]. \quad (4.2.)$$

U datom izrazu ΔS je promena napona od početne vrednosti ($\sigma_0 = P/F_0$) tj. tehničke nule – koja najčešće iznosi 0.5 MPa , do vrednosti S_b , pri čemu se obično postavlja uslov da ovaj napon bude u granicama elastičnog ponašanja materijala, odnosno $S_b \leq \frac{S_m}{3}$. Ovde je S_m čvrstoća betona pri pritisku, koja se obično dobija ispitivanjem do loma tri uzorka istog betona, istih dimenzija. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti u obimu predmetnih istraživanja sprovedeno je saglasno standardu ASTM C469 / C469M 10

[17], pomoću aparature proizvođača "CONTROLS" sa ugibomerom podatka 0.001 mm. U konkretnom slučaju upotrebljeni su uzorci oblika cilindra, prečnika osnove 15 cm i visine 30 cm (videti sliku 4.10).



Slika 4.10 Ispitivanje statičkog modula elastičnosti

4.9.1.5 Dijagram napon-dilatacija (σ - ϵ)

Pri istoj dispoziciji kao za ispitivanje statičkog modula elastičnosti, kao i na istim uzorcima, vršeno je očitavanje vrednosti napona (σ) i dilatacija (ϵ) u zoni elastičnog ponašanja uzoraka, prema postupku opisanom u dostupnoj literaturi [195]. Kao i kod određivanja modula elastičnosti, upotrebljen je ugibomer marke "Controls", prikazan na slici 4.11.



Slika 4.11 Upotrebljen ugibomer sa podatkom 0.001 mm

4.9.1.6 Dinamički modul elastičnosti, brzina prostiranja ultrazvučnog impulsa i dinamički Poasonov koeficijent

Dinamički modul elastičnosti ispitivan je na betonima u skladu sa standardom SRPS U.M1.026:1993 [271], na uzorcima oblika prizme, dimenzija 12x12x36 cm. Prilikom

ovog ispitivanja upotrebljena je aparatura ERUDITE (slika 4.12), pomoću koje se vrše merenja rezonantne frekvencije betonske prizme izložene longitudinalnim oscilacijama, pri čemu je prizma fiksirana (uklještena) na sredini.



Slika 4.12 Aparatura za određivanje dinamičkog modula elastičnosti betona

Merenja vrednosti dinamičkog modula elastičnosti vršena su svakodnevno u prvih 10 dana, a zatim jednom nedeljno do starosti od 28 dana. Nakon toga, merenja su vršena jednom mesečno, do starosti od 180 dana.

Ispitivanje brzine prostiranja ultrazvuka kroz beton obavljeno je prema SRPS U.M1.042:1998 [272]. Uređaj pod nazivom PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester) upotrebljen je na istim uzorcima, pri istoj dispoziciji ispitivanja i sa istom učestalošću kao ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti. Upotrebljena aparatura je prikazana na slici 4.13.



Slika 4.13 Aparatura za određivanje brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa kroz beton

Za poznate vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d i brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa v moguće je sračunati vrednosti dinamičkog Poasonovog koeficijenta, pa je i u ovom slučaju izračunata njegova vrednost za svaki od odgovarajućih parova vrednosti E_d i v .

4.9.2 Ispitivanja trajnosti

Trajnost betona predstavlja veoma važan aspekt njegove upotrebljivosti. Nije dovoljno da beton ima visoka fizičko-mehanička svojstva, ukoliko se ispostavi da ta svojstva ne mogu da budu održana dugo vremena u uslovima agresivne spoljašnje sredine (npr. pod dejstvom vode pod pritiskom, mraza, kiselina i alkalija ili kombinovanog dejstva mraza i soli).

4.9.2.1 Ispitivanje vodonepropustljivosti betona

Ispitivanje vodonepropustljivosti ukazuje na kvalitet kompaktiranja betona, raspored i veličinu pora u njemu i podložnost potencijalnom prodoru agenasa iz spoljašnje sredine u unutrašnjost betona. Ispitivanja su sprovedena prema postupku propisanom važećim standardom SRPS U.M1.015:1998 [268]. Uzorci oblika cilindra, prečnika osnove 15 cm i visine 15 cm postavljeni su u uređaj u pravcu ugrađivanja, nakon što je "pikovanjem" na sredini donje baze uklonjen površinski sloj maltera i time omogućen prodor vode u uzorak (slika 4.14).



Slika 4.14 Aparatura za ispitivanje vodonepropustljivosti

4.9.2.2 Ispitivanje otpornosti prema dejstvu mraza

Ispitivanje otpornosti prema dejstvu mraza podrazumeva sposobnost betona da u stanju zasićenosti vodom podnese višekратно smrzavanje i odmrzavanje. Za ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza primenjuje se više različitih metoda, od kojih su

kod nas najčešće primenjivane dve: destruktivna (sa razaranjem uzoraka) i nedestruktivna (koja podrazumeva merenje dinamičkog modula elastičnosti betona). U konkretnom slučaju primenjen je destruktivni postupak.

Ispitivanje je obavljeno prema metodi SRPS U.M1.016:1992 [269]. Od standarda se odstupilo u smislu dimenzija uzoraka, koje su u slučaju ovog ispitivanja iznosile oko 50 mm, zbog lakše manipulacije uzorcima (vađenje iz komore i stavljanje u komoru), ali je iz tog razloga povećan broj uzoraka koji su ispitivani nakon određenog broja ciklusa (umesto standardna 3 po seriji, pri određenoj starosti betona ispitivano je 5 uzoraka po seriji). Svi uzorci su dobijeni sečenjem kocki ivice 10 cm pomoću testere sa dijamantskom krunicom, a nakon toga brusilicom su korigovane neravne ivice posle sečenja. Izlaganje uzoraka dejstvu mraza obavljeno je pomoću termo-komore proizvođača Heraus-Vetsch, sa dva ciklusa u toku 24 sata. Sračunate su ekvivalentne starosti etalona, koje su odgovarale tretmanu od 150 i 200 ciklusa. Ispitano je svih 15 uzoraka etalona, prema sledećem planu: 5 uzoraka na početku ispitivanja, 5 uzoraka pri ekvivalentnoj starosti kojoj je odgovaralo 150 ciklusa i 5 uzoraka pri ekvivalentnoj starosti kojoj je odgovaralo 200 ciklusa. Tretirani uzorci ispitivani su nakon 150 i 200 ciklusa smrzavanja-odmrzavanja. Ovde se napominje da je, prema planu ispitivanja, ispitivanju otpornosti prema dejstvu mraza podvrgnuto samo pet vrsta betona sa dodatkom letećeg pepela. Pre svega, male količine ostalih primenjenih prašenih dodataka, ali i rokovi za završetak različitih faza ispitivanja, kao i dostupnost odgovarajuće laboratorijske opreme, bili su razlozi što su ova ispitivanja obavljena samo u pomenutom obimu.

4.9.2.3 Ispitivanje otpornosti na istovremeno dejstvo mraza i soli

Ispitivanje otpornosti na istovremeno dejstvo mraza i soli je obavezno kod betona koji se primenjuje kod mostovskih konstrukcija koje su, po pravilu, izložene direktnim atmosferskim uticajima uz istovremeno dejstvo soli, koja se redovno posipa po putevima u zimskim uslovima, radi nesmetanog održavanja saobraćaja. Predmetno ispitivanje sprovedeno je prema standardu SRPS U.M1.055:1984 [273]. Posle 25 ciklusa definisanih pomenutim standardom, zaključak o ostvarenoj otpornosti betona pod ovakvim uslovima izvodi se na bazi kriterijuma datih u tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Kriterijumi degradacije betona izloženog istovremenom delovanju mraza i soli za odmrzavanje prema [273]

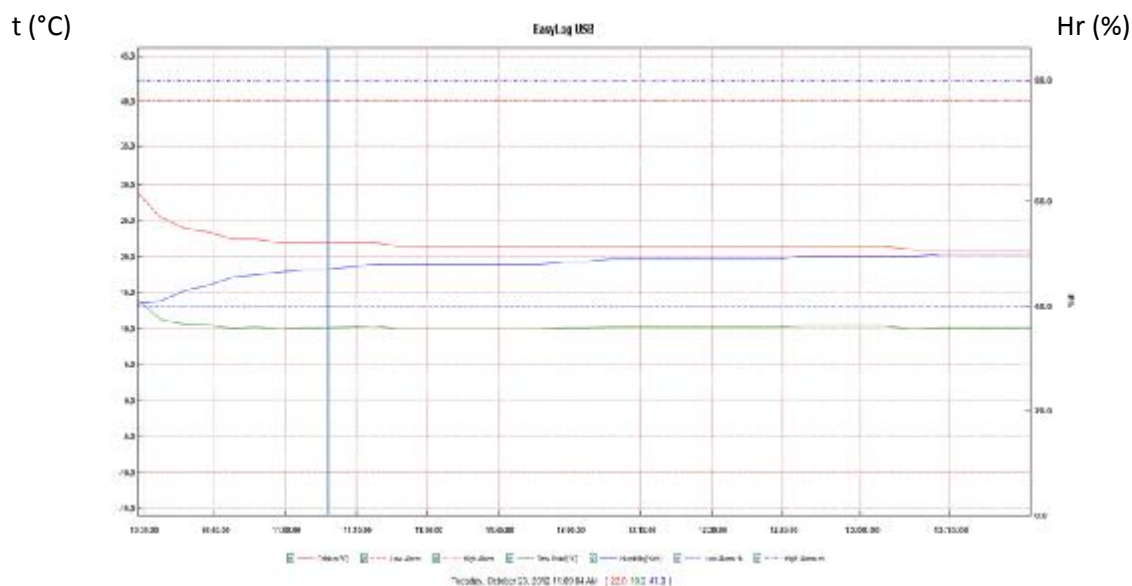
Stepen oštećenja	Gubitak mase (mg/mm ²)	Dubina oštećenja, najviše (mm)	Vizuelni opis	Kriterijum za ocenu
0 – bez ljuštenja	0	0	Nema promena na površini	Otporan
1 – slabo ljuštenje	0,2	1	Oštećenje finog maltera	Otporan
2 – srednje ljuštenje	0,5	4	Oštećenje površine, vidljiva pojedina zrna agregata	Otporan
3 – jako ljuštenje	1,0	10	Vidljiva zrna agregata po celoj površini	Neotporan

Na po tri uzorka oblika kocke ivice 10 cm za svaki od betona, postavljene su kadice sa slanom vodom. Slana voda je bila u direktnom kontaktu sa betonskim uzorcima, po površini betona koja je predstavljala dno kadice. Zatim su uzorci izlagani ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja. U skladu sa definisanim programom, ispitivanje je obavljeno samo na pet serija SCC sa letećim pepelom.

4.9.3 Ispitivanje skupljanja

Prilikom realizacije ovog ispitivanja su korišćeni deformetri - struna pretvarači na bazi vibrirajuće žice proizvođača Geokon Model 4000 namenjeni prevashodno za merenje kako dugotrajnih, tako i kratkotrajnih dilatacija betonskih i čeličnih elemenata (kao što su tunelske obloge, ojačanja, šipovi itd.) [223].

Pre nego što se počelo sa eksperimentalnim ispitivanjima, kontrolisani uslovi u okviru Laboratorije za beton i reologiju su provereni merenjem temperature i vlažnosti prostorije dva dana uzastopno, pre početka ispitivanja. Dijagrami koji pokazuju promenu ovih veličina sa vremenom prikazani su na slici 4.15. U toku samog ispitivanja skupljanja na uzorcima periodično su proveravani uslovi sredine u prostoriji (Laboratorija za beton i reologiju). Kao što se sa dijagrama vidi, temperatura i relativna vlažnost u prostoriji bili su konstantnih 20°C i 50%, respektivno. Uzorci za ovo ispitivanje bili su oblika prizme dimenzija 12x12x36 cm. U skladu sa definisanim programom, ispitivanje je obavljeno samo na pet serija SCC sa letećim pepelom.



Slika 4.15 Dijagrami promene temperature i vlažnosti u prostoriji sa kontrolisanim uslovima

4.9.4 SEM analiza poprečnog preseka uzoraka betona

Prilikom ovih ispitivanja upotrebljen je skenirajući elektronski mikroskop koji postiže visoku rezoluciju slike sa uvećanjima do 100.000x, može da radi u uslovima niskog i visokog vakuuma, a kao izvor elektrona (katode) koristi volframsko vlakno ili kristal LaB6 [40]. Pored detektora za sekundarne elektrone (SE) i povratno-rasute elektrone (BSE), kojim su opremljeni uglavnom svi elektronski mikroskopi, ovaj mikroskop je opremljen i savremenim energetske-disperzivnim spektrometrom (EDS), kao i detektorom za katodoluminescenciju (CL).

Osim rezultata EDS analize na praškastim materijalima, koji se mogu smatrati kvantitativnim, svi rezultati ispitivanja u ovom slučaju su kvalitativnog tipa.

Osnovni aspekti mikrostrukture ispitivani na svim uzorcima betona obuhvatili su sledeće parametre:

- raspored pora i poroznost prelazne zone betona (prema istraživanjima, kod betona starosti oko 365 dana poroznost iznosi do 3% [158]),

- prelazna zona (dimenzije prelazne zone, slojevi, minerali u zoni – C-S-H (kalcijum silikat hidrat), CH (kalcijum hidroksid), ako postoji prepoznatljiv AFt (etringit) i AFm (monosulfat),
- očvrslu cementni kamen i raspored produkata hidratacije u porama i samom očvrslom cementnom kamenu,
- nehidratirani ostaci cementa (cementni klinker generalno svetlije faze nego produkti hidratacije – Ferit C_4AF je najsvetliji, Alit C_3S je tamniji, Aluminat C_3A i belit C_2S su slične nijanse sive, dok su od produkata koji su tamniji CH svetliji, a CSH i AFm slične nijanse tamnije sive [222]),
- raspored zrna mineralnog dodatka (disperzija) i način na koji su odreagovala sa CH (u slučaju da je došlo do reakcije),
- karakter kontakta zrna mineralnog dodatka i cementne matrice (da li postoji kontaktna zona ili kontakta nema, da li je zona drugačija nego na kontaktu krupnijih zrna agregata i cementne matrice itd.).

5. Metode projektovanja sastava SCC

U cilju obezbeđenja potrebnog odnosa između svojstava SCC u svežem stanju, koja su po samoj svojoj prirodi specifična, a u izvesnom broju slučajeva čak i suprotstavljena, količine komponentnih materijala moraju biti pažljivo definisane. Kada je reč o projektovanju sastava, postoje dve osnovne razlike između SCC i NVC [161]:

- Iako izbor komponenata SCC, kao kod NVC, zavisi od lokalnih uslova (da bi se redukovala cena [34],[248]), karakteristike komponentnih materijala mnogo više utiču na svojstva kod SCC nego kod NVC. Kao rezultat, metode projektovanja sastava vezane su za lokalne uslove, jer je mnogo teže predvideti svojstva SCC nego svojstva NVC, a potrebna su naknadna ispitivanja i nakon što je beton ušao u proizvodnju, u cilju konstantne kontrole njegovih parametara.
- Projektovanje sastava NVC počinje utvrđivanjem W/C faktora na osnovu ciljanih zahteva vezanih za čvrstoću pri pritisku i obično se završava proračunom količina svih frakcija agregata. Projektovanje sastava SCC, sa druge strane, obično počinje definisanjem zahteva u vezi sa ciljanim svojstvima u svežem stanju; uz obavezno dodavanje superplastifikatora sa/bez VMA, ograničavanje sadržaja agregata i odgovarajućeg W/P faktora, da bi se postigla svojstva u svežem stanju. Projektovanje sastava SCC ne uključuje čvrstoću pri pritisku kao parametar, zato što je W/P faktor po pravilu kod SCC nizak, što omogućava visoke čvrstoće, obično više od potrebnih za primenu u konstrukciji.

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.

5.1 Opšta metoda (General purpose mix design method)

Ova metoda razvijena je na Univerzitetu u Tokiju [189],[190],[192]. Ona se bazira na upotrebi japanskih materijala; gde je maksimalno zrno agregata 20 mm, a granica između sitnog i krupnog agregata 5 mm. Cement koji je upotrebljavan u ovoj metodi bio je Portland cement sa umerenom toplotom hidratacije, osim toga beton je sadržao i aerant, a mešanje je vršeno pomoću mešalice sa protivstrujnim lopaticama. Ova metoda naročito je razvijena za projektovanje mešavine SCC praškastog tipa.

Predmetna metoda zasniva se na principu "korak po korak", gde se parametri definišu za svaku fazu posebno. U metodi se SCC posmatra kao dvokomponentni materijal koji se sastoji od maltera i krupnog agregata. Malter se sastoji od praškastih čestica, koje se sastoje od cementa i finih čestica (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 0.09mm) 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 250mm (relativno rasprostiranje maltera u iznosu od 5) i vreme mereno na V-levku od 9-11s (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 rasprostiranje sleganjem do 650mm i vreme mereno pomoću V-levka od 10-20s.

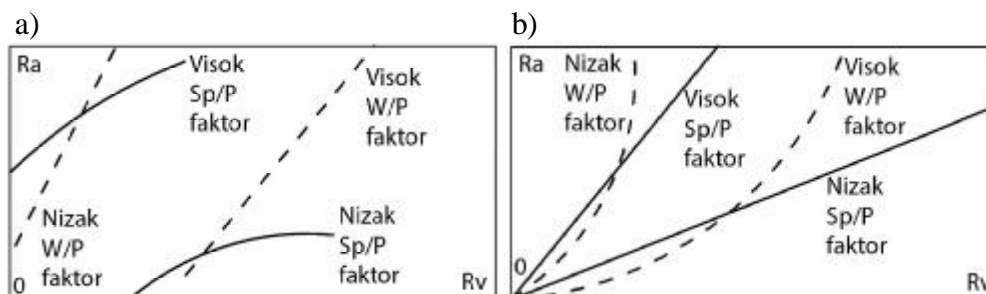
Na osnovu ove metode, definisanje sastava maltera predstavlja prvu fazu pri projektovanju SCC; malter ima svojstva koja omogućavaju sposobnost punjenja, sposobnost prolaska i otpornost na segregaciju betona; a poseduje i dovoljnu viskoznost da nosi zrna krupnog agregata. Ova metoda odlično karakteriše SCC i pomaže pri sagledavanju ponašanja SCC bolje nego ostale metode.

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 [161].

5.1.1. Modifikacije opšte metode

Razvijen je veliki broj modifikacija metode projektovanja sastava SCC koja je opisana u prethodnom poglavlju; od ovih metoda će biti navedene tri karakteristične [161]:

1. Korelacija između relativnog rasprostiranja (R_a) i relativne brzine rasprostiranja (R_v) je linearna za konstantnu količinu superplastifikatora, tj. nelinearna za konstantan W/P odnos, pri čemu sve linije zavisnosti prolaze kroz koordinatni početak (slika 5.1.a). Uz pretpostavku da relacije ne zavise od vrste upotrebljenog komponentnog materijala, navedene relacije su upotrebljavane u cilju utvrđivanja optimalne kombinacije W/P faktora i količine superplastifikatora kod maltera sa fiksiranim rasprostiranjem i vremenom V-levka. Upotrebom ovih korelacija se stoga može smanjiti broj ispitivanja na malteru. Ispostavilo se da ove veze nisu iste u slučaju materijala koji se upotrebljavaju u Velikoj Britaniji [161]. Približno linearna veza između R_a i R_v za konstantan W/P faktor (0.28-0.38) i konstantnu količinu superplastifikatora (0.25-1.50%) dobijena je na malteru spravljenom sa hemijskim dodatkom Glenium 51 [72]. Ovo se može prikazati šematski na slici 5.1.b).



Slika 5.1. Relacije između veličina R_a i R_v a) za maltere sa umerenom toplotom hidratacije, pesak/malter=0.4 b) za maltere u metodi UCL, pesak/malter=0.45 [161]

2. Opšta metoda je uspešno primenjena u Holandiji [25],[208],[279],[302]. Usvajajući maksimalno zrno agregata od 16 mm, karakteristično za holandske uslove, sadržaj krupnog agregata je povećan na 55-60% od njegove zapremine mase u suvom zbijenom stanju, a W/P faktor za beton je bio 5% veći nego W/P faktor dobijen iz testova na malteru. Sadržaj paste je zato bio 10% manji nego u slučaju da je primenjena opšta metoda bez modifikacija.
3. U studiji u kojoj je istraživana uticaj fizičkih svojstava čestica u malteru na sposobnost punjenja svežeg betona, interakcija između krupnog agregata i maltera je procenjivana upotrebom staklenih zrna prečnika 10 mm, koja su dozirana u svojstvu standardnog krupnog agregata [77]. Odnos zapremine peska i maltera je iznosio 0.40%, kao i u opštoj metodi. U ovoj modifikaciji je utvrđeno da je odnos relativnih brzina rasprostiranja maltera sa i bez staklenih zrna (doziranih u količini od 25%) bio u korelaciji sa visinom punjenja betona u U-boks testu, pa se može koristiti za projektovanje SCC različitih nivoa sposobnosti punjenja, na osnovu ispitivanja na nivou maltera. Ova korelacija je primenljiva i u slučaju spravljanja SCC sa različitim praškastim materijalima, uključujući Portland cement, leteći pepeo, granulisanu zguru visokih peći i krečnjački filer.

5.2. Metoda UCL (University Colledge of London)

Ispitivanja na nivou maltera u opštoj metodi korisna su za relativno brz postupak definisanja sastava SCC betona. Teza da, ukoliko se postigne receptura maltera koja je dobra, mešavina za beton takođe može postići potrebno svojstvo deluje bliska realnom

stanju stvari i od te teze se pošlo i u metodi UCL 1994. godine. Ispitivanja su sprovodili Chai i Jin, a u manjem ili većem obimu nastavljena su do danas.

Chai [70] je razvio primenljiv metod za projektovanje SCC sa materijalima koji su dostupni u Velikoj Britaniji, optimizujući sadržaj veziva za agregat određenog tipa i maksimalne veličine zrna. Ova metoda je usvojena prilikom spravljanja mešavina za poređenje metoda ispitivanja prilikom projekta Testing SCC, 2005. godine [1],[2]. Jin [161] je obavio opsežna ispitivanja na malterskoj komponenti SCC. Uspostavljena je veza između svojstava maltera i odgovarajućeg SCC sa krupnim agregatom od 50-55% u odnosu na zapreminsku masu agregata u suvom zbijenom stanju. Ispitivanja na nivou maltera pokazala su se efikasnim i efektivnim načinom da se proceni SCC, odnosno produženo vreme doziranja superplastifikatora, efekat praškaste komponente (uključujući Portland cimente sa dodacima, letećim pepelom, zgurom visokih peći, silikatnom prašinom i krečnjačkim brašnom), interakciju između veziva i superplastifikatora, efekat modifikatora viskoziteta itd.

Na osnovu istraživanja koje je sproveo Jin, utvrđene su i usvojene veze između svojstava maltera i odgovarajućeg SCC, sa visokim sadržajem krupnog agregata (55-65% zapreminski, u suvom zbijenom stanju). Primenom ove modifikacije, Liu i saradnici [161] uspešno su projektovali SCC sa visokim sadržajem letećeg pepela i sa spršenim staklom, SCC sa recikliranim agregatom i SCC tipa VMA.

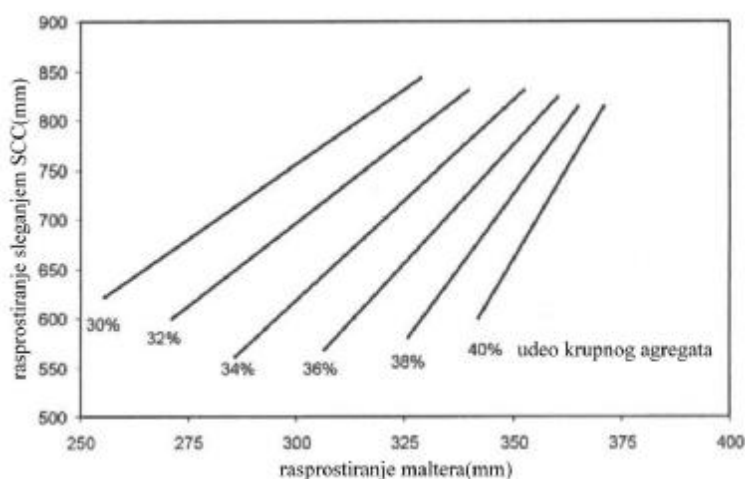
Metoda opisana u produžetku predstavlja modifikovanu UCL metodu:

1. Procenjuje se sadržaj krupnog agregata, na osnovu iskustvenih tabelarnih vrednosti [67], koje su korelisane sa svojstvima definisanim u preporukama [253]. Ova metoda se može primeniti za krupan agregat prečnika maksimalnog zrna agregata u granicama 16-20 mm, drobljeni ili rečni, pri čemu granica između krupnog i sitnog može iznositi 4 ili 5 mm,
2. Odnos sadržaja peska i maltera je fiksiran na 45% (vol), što je uobičajena vrednost za SCC [72],
3. Sadržaj vazduha je procenjen na 1%,

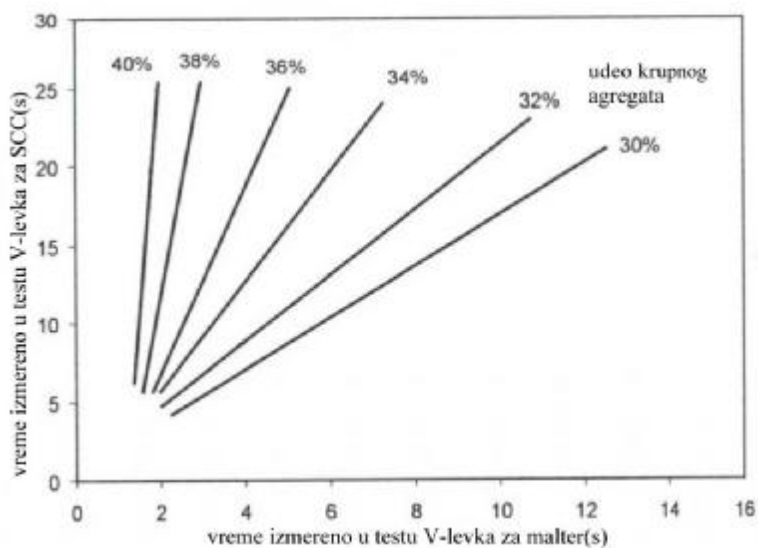
4. Sadržaj cementa je procenjen na bazi prethodnog iskustva i na osnovu projektovane čvrstoće pri starosti od 28 dana,
5. Vodopraškasti (W/P) odnos, doziranje plastifikatora i sastav praškaste faze su utvrđeni na osnovu ispitivanja na nivou maltera.

Uspostavljene su dobre korelacije između rasprostiranja maltera i rasprostiranja sleganjem betona i između vremena V-levka maltera i betona, u slučaju da je sadržaj krupnog agregata u betonu iznosio 30-40% (slika 5.2).

a)



b)



Slika 5.2 Veza rasprostiranja maltera i SCC (a) i veza vremena izmerenog u testu V-levka za maltere i SCC (b) kod SCC sa različitim sadržajem krupnog agregata [67]

Na osnovu ciljanih vrednosti rasprostiranja i vremena V-levka kod SCC, pomoću ovih dijagrama dobijene su vrednosti rasprostiranja i V-levka za malter. Uticaj W/P odnosa i

količine superplastifikatora na svojstva maltera može se takođe prikazati na grafiku koji povezuje rasprostiranje i vreme V-levka. U svakom slučaju, ova ispitivanja neophodno je obaviti na komponentnim materijalima koji su namenjeni za spravljanje konkretnog SCC, jer sa promenom komponente može doći do promene svojstava betona.

Za projektovano rasprostiranje sleganjem i vreme V-levka, pomoću pomenutih dijagrama mogu se utvrditi vrednosti W/P faktora i sadržaja superplastifikatora. Sadržaj praškaste komponente se procenjuje na osnovu istih testova, sa ciljem postizanja željenog rasprostiranja sleganjem i vremena V-levka. Na taj način se utvrđuje sastav paste za odgovarajući SCC, W/P faktor, količina superplastifikatora i mineralnih dodataka i sastav praškaste komponente.

6. Probe na betonu su poslednji korak, kada se može, ukoliko se to ukaže potrebnim, dodatno korigovati sastav betona, da bi se dobila zahtevana svojstva. Rasprostiranje sleganjem, V-levak, J-prsten i test stabilnosti mešavine sa sitom mogu se koristiti da bi se potvrdila sposobnost punjenja, prolaska i otpornost na segregaciju, respektivno.

U globalu, ispitivanje malterske komponente je suštinski deo UCL metode. Ova metoda je relativno jednostavna i efektivna. SCC se može projektovati sa različitim svojstvima u svežem stanju, a metoda je primenljiva na SCC sa širokim spektrom različitih komponentnih materijala, uključujući VMA.

5.3 Metoda CBI i njene modifikacije

Metoda CBI razvijena je u okviru Švedskog instituta za ispitivanje cementa i betona [33],[214]. Ova metoda tretira SCC kao mešavinu agregata sa jedne i paste (mešavina vode, praškaste komponente i dodataka) sa druge strane. U praškaste čestice spadaju sve čestice ispod 0.125 mm, uključujući cement, praškaste dodatke i fine čestice u sitnom agregatu. Cilj CBI metode je da se proizvede mešavina sa optimalnim skeletom agregata i sa minimalnim, ali dovoljnim sadržajem paste, baziranim na kriterijumu blokiranja, koji će biti opisan u produžetku.

Predmetna metoda se sastoji od tri koraka: sračunavanje minimalne zapremine paste, sastav paste i procena (evaluacija) SCC.

Prvi korak – minimalna zapremina paste

Minimalna zapremina paste utvrđuje se na bazi zapremine šupljina i kriterijuma blokiranja, koji su zasnovani na svojstvima agregata i uslovima u konstrukciji.

Zapremina šupljina se dobija eksperimentalnim putem, variranjem odnosa krupan/sitan agregat, što utiče i na ukupnu površinu agregata. Minimalna zapremina paste trebalo bi da je dovoljna za popunjavanje svih šupljina u agregatu i za obavljanje svih površina čestica agregata slojem zadate debljine.

Kvantitativni kriterijum blokiranja razvio se iz istraživanja rizika od blokiranja kod maltera koji se sastoji od peska sa istom veličinom svih zrna [201]. Istraživanja su pokazala da je uticaj svakog ovakvog peska na blokiranje kod maltera nezavisan od bilo kog drugog takvog peska i da se rizik od blokiranja kod agregata koji sadrži više različitih veličina zrna može izraziti kao:

$$\text{Rizik od blokiranja} = \sum_i \left(\frac{n_{ai}}{n_{abi}} \right), \quad (5.1.)$$

gde je n_{ai} – udeo zapremine grupe agregata jedne veličine i n_{abi} – zapreminski udeo blokiranja.

Koncept je nakon toga proširen i na beton i utvrđena je relacija između odnosa zapremine blokiranja agregata (n_{abi}) i odnosa čistog otvora između šipki armature i prosečne veličine prečnika čestice agregata (D_{ca}) [42],[200],[281].

Parametri za ovaj proračun su definisani kao:

$$n_{abi} = \frac{V_{abi}}{V_t}, \quad (5.2.)$$

$$D_{ca} = \frac{c}{D_{af}}, \quad (5.3.)$$

$$D_{af} = M_{i-1} + \frac{3}{4}(M_i - M_{i-1}), \quad (5.4.)$$

$$K = \frac{f}{D_{\max}}, \quad (5.5.)$$

gde je n_{abi} – zapreminski odnos blokiranja grupe agregata i ; V_{abi} – zapremina blokiranja grupe agregata i ; V_t – ukupna zapremina mešavine betona; D_{ca} – odnos čistog razmaka (c) i veličine čestice agregata (D_{af}); M_i i M_{i-1} su gornja i donja dimenzija sita grupe agregata, respektivno.

K je odnos između prečnika šipke armature (ϕ) i maksimalne veličine agregata (D_{\max}). Navedeni kriterijum je u vezi sa svojstvima agregata (npr. drobljeni ili rečni, veličina i granulometrijska kriva agregata) i uslovima ugrađivanja (odnosno prečnik i razmak šipki armature). Ovo je jedna od prednosti predmetne metode.

Maksimalni ukupni sadržaj agregata bez blokiranja javiće se kada je rizik od blokiranja jednak 1, odnosno:

$$\text{Kriterijum blokiranja} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ai}}{V_{abi}} = 1, \quad (5.6.)$$

gde su V_{ai} i V_{abi} zapremina i zapremina blokiranja grupe agregata "i", respektivno.

Prema tome, minimizacija zapremine paste karakteristična je za ovaj model, pa se kao rezultat dobija beton koji poseduje dovoljnu sposobnost punjenja, ali bez efekta blokiranja.

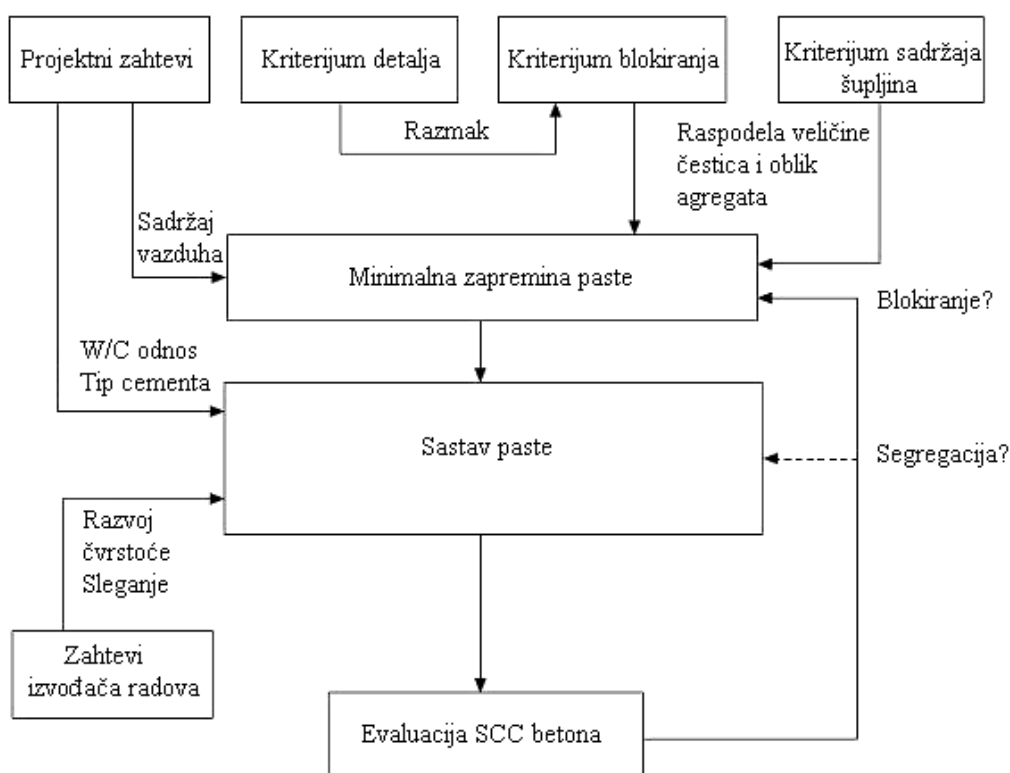
Drugi korak – sastav paste

Praškasta komponenta se sastoji od cementa i filera, koji doprinose čvrstoći i zapremini paste, respektivno. Zahtevi na očvrslom betonu definišu maksimalni W/C odnos, kao i tip cementa. Dobre korelacije između reoloških svojstava paste i sposobnosti punjenja betona uspostavljaju se izvođenjem reoloških ispitivanja na malteru sa viskozimetrom da bi se utvrdio sastav maltera i procenilo doziranje superplastifikatora [214]. Na ovaj način mogu se minimizovati granični naponi smicanja i može se postići dobra viskoznost. Preporučeno je da Bingamovi parametri na nivou paste za SCC budu granični napon smicanja od 10-20 Pa i plastična viskoznost od 0.5-1.2 Pa·s [33],[214].

Treći korak – Evaluacija samozbijajućeg betona

Doziranje superplastifikatora se dodatno podešava prilikom ispitivanja na nivou betona, da bi se postigla ciljana svojstva, npr. rasprostiranje sleganjem od preko 700 mm i odnos blokiranja kod L-boks metode veći od 0.8. Vreme potrebno da beton pređe 200 mm ili 400 mm se u metodi L-boksa ponekad ispituje, ali preporuke za odgovarajuće vrednosti ne postoje.

Iz navedenog se može videti da se W/P faktor i sastav praškaste komponente utvrđuju na osnovu zahteva čvrstoće i trajnosti, što je još jedna prednost ove metode. Prema tome, upotrebom ove metode moguće je proizvesti SCC sa projektovanom (ciljanom) čvrstoćom i trajnošću. Međutim, CBI metod zahteva poznavanje ponašanja pri blokiranju svih vrsta agregata. Referentna kriva za kriterijum blokiranja ne važi za sve agregate i nije je lako dobiti [161]. Šematski prikaz pristupa prema CBI dat je na slici 5.3.



Slika 5.3 Model projektovanja sastava SCC razvijen u CBI, Švedska [54]

Postoji nekoliko karakterističnih modifikacija metode opisane u ovom delu. Koncept "kriterijum tečne faze" razvijen je da bi omogućio dodatni kriterijum za sračunavanje minimalne zapremine paste [44]. Cilj definisan u ovom pristupu je da se sračuna minimalni razmak između zrna agregata, koji varira u funkciji od: W/P faktora, maksimalne veličine zrna krupnog agregata i prosečnog prečnika zrna agregata. Dodatak VMA nije uzet u obzir kod ove metode, ali je moguća njegova upotreba u cilju daljeg smanjenja zapremine paste [212].

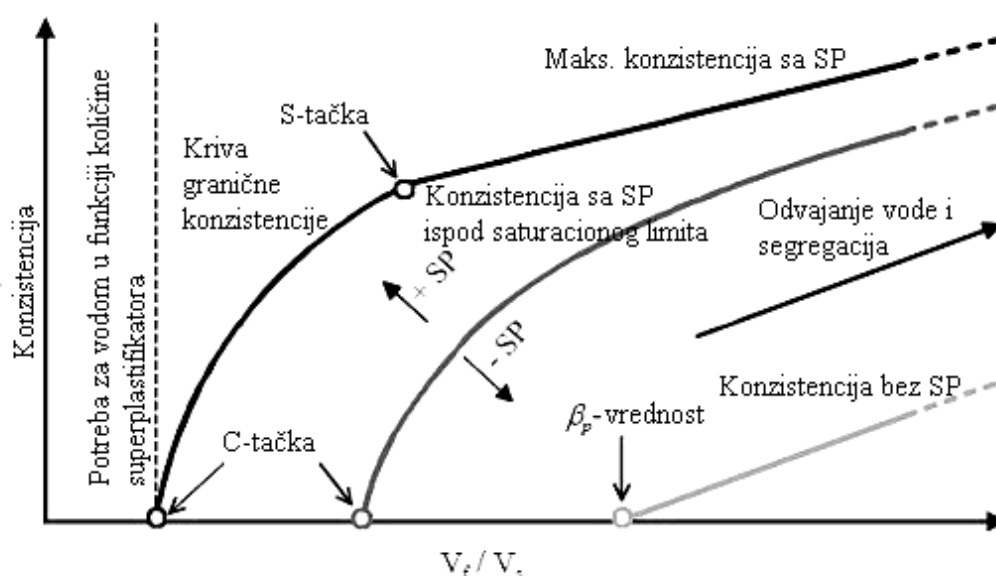
Na osnovu karakterističnih parametara (npr. količine slobodne vode, vode koju zadržavaju praškaste čestice i agregati, minimalne količine vode da bi se pokrenulo rasprostiranje, i efektivne površine čvrstih čestica), predloženi su modeli za predviđanje ključnih svojstava SCC i verifikovani rezultatima autora i ostalih istraživača [139],[140]. Prema ovim autorima, rasprostiranje sleganjem, t_{500} , izdvajanje vode i rizik od blokiranja mogu se predvideti sa zadovoljavajućom tačnošću.

5.4 Metoda bazirana na upotrebi superplastifikatora

Generalno posmatrano, potreba za vodom svake mešavine zrnastih materijala zavisi od njihove specifične površine i gustine pakovanja zrna. Za krupan agregat je dominantan parametar gustina pakovanja zrna. Međutim, ispitivanja su pokazala da je i za fine praškaste čestice, na nivou veličine čestica cementa, i dalje gustina pakovanja dominantan faktor koji utiče na kvantifikaciju potrebe za vodom, u odnosu na specifičnu površinu [221].

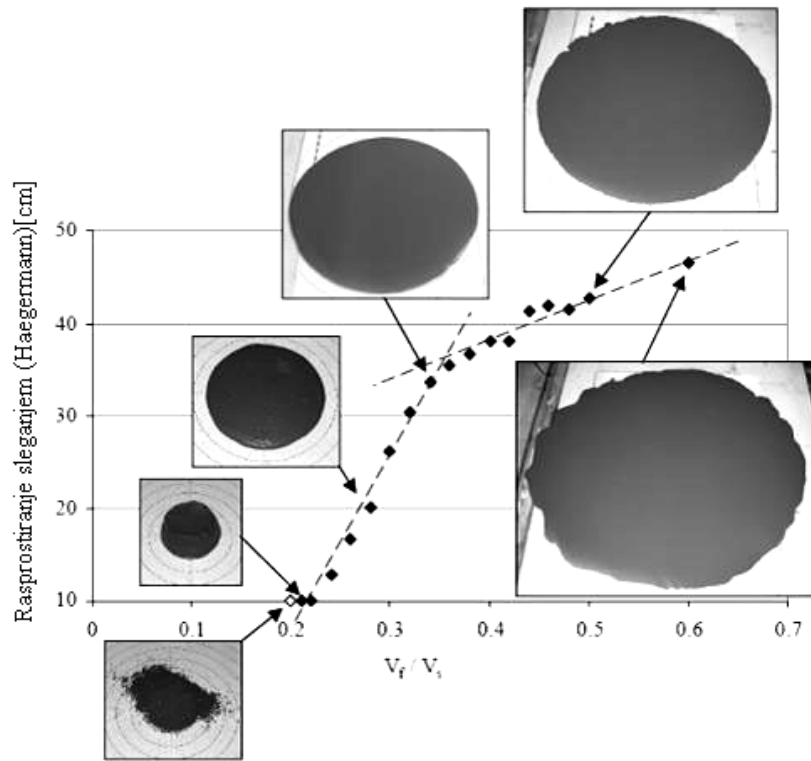
Jedan od načina za projektovanje SCC je tzv. pristup projektovanju SCC na bazi superplastifikatora (*Superplasticizer Based Approach*) [224] i zasniva se na uspostavljanju veze između konzistencije paste sa superplastifikatorom (karakterisane testom rasprostiranja) i zapreminskog odnosa tečne i čvrste faze u pasti (V_f/V_s). Koncept ovog modela ilustrovan je na slici 5.4. Najpre je potrebno definisati tačku C, kada je u pasti prisutno dovoljno vode da bi se popunile sve praznine između čvrstih čestica, ali ne i dovoljno da bi se omogućilo rasprostiranje paste ili maltera. Sa povećanjem fluido-praškastog odnosa definiše se i takozvana kriva granične konzistencije (veza između fluido-praškastog odnosa i rasprostiranja) na kojoj je S tačka, takozvana tačka segregacije (prevojna tačka na slici 5.4). Nakon toga se povećava

količina superplastifikatora da bi se postigla veća otpornost na segregaciju (robusnost). Na taj način se dobijaju nove krive sa manjim vrednostima fluido-praškastog odnosa za iste vrednosti rasprostiranja. Tačka C, koja odgovara minimalnom fluido-praškastom odnosu i karakterističnoj graničnoj konzistenciji sa superplastifikatorom označena je kao potreba za vodom u funkciji količine superplastifikatora. U ovom stanju paste gustina pakovanja je znatno veća, zahvaljujući činjenici da se ista pokretljivost postiže sa znatno manjom količinom vode, obzirom da je upotrebljen superplastifikator.



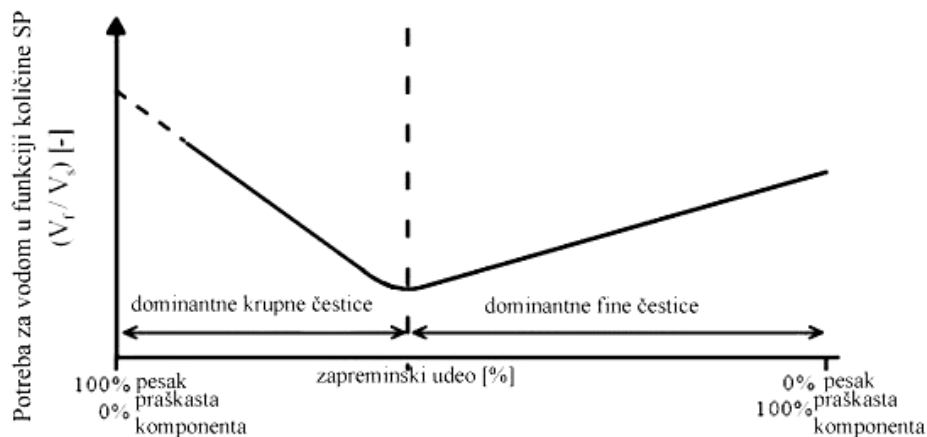
Slika 5.4 Model pristupa na bazi superplastifikatora [224]

Slikovit prikaz ovih ispitivanja dat je na slici 5.5, sa fotografijama paste koje odgovaraju karakterističnim tačkama na dijagramu. Sa povećanjem krupnoće čestica gubi se pozitivan efekat superplastifikatora, obzirom da je tečna faza nedovoljne viskoznosti da bi sprečila segregaciju. Zato je metoda primenljiva samo na nivou praškastih čestica, uključujući i praškastu fazu kod peska.



Slika 5.5 Primeri stanja paste u karakterističnim tačkama na krivoj [224]

U sledećoj fazi, na nivou maltera određuje se granična vrednost odnosa peska kao krupne faze koja se nalazi u pasti i praškaste komponente. Šematski prikaz ovog koraka dat je na slici 5.6.



Slika 5.6 Opšti odnosi između dominantnih uslova i gustine pakovanja [224]

Eksperimentalnim putem dobijeni podaci o potrebnim odnosima tečne i praškaste faze na nivou paste, kao i odnos peska i finih čestica na nivou maltera (pri kome je potreba za vodom kod mešavine minimalna) osnovni su parametri na osnovu kojih se može nastaviti proces definisanja odnosa komponenata u betonu. Dalji postupak podrazumeva

povećanje količine paste u odnosu na te parametre, da bi se postigla potrebna sposobnost za ugrađivanje, tj bolje tečenje paste.

Prikazana metoda zasniva se na eksperimentalnim ispitivanjima i iterativnom postupku za definisanje konačnih količina komponentnih materijala. Ova metoda dobro oslikava ponašanje paste i maltera, tj. odnose komponenata na nivou paste i maltera, sa posebnim naglaskom na optimizaciji (smanjenju) količine superplastifikatora, kao najskuplje komponente betona. Međutim, pomenuta metoda se koncentriše na grupu ispitivanja, koja bi trebala da budu dovoljno dobro polazište za definisanje konačnih količina materijala u betonskim mešavinama (kada se upotrebljava i krupan agregat).

5.5 JSCE metoda

Metoda razvijena u Japanu, na osnovu preporuka Japanskog udruženja građevinskih inženjera (Japan Society of Civil Engineers) daje orijentacione vrednosti količine komponentnih materijala, dobijene na bazi većeg broja uspešno projektovanih SCC mešavina. Različiti komponentni materijali su definisani za mešavine SCC sa i bez VMA i sa različitim vrstama VMA, kao što je to prikazano u tabeli 5.1. Posledično, sadržaj sitnog agregata može se sračunati iz zapremina krupnog agregata, vode, praškastih čestica i vazduha. Ovo je jedina metoda koja je predložena za projektovanje SCC sa VMA [161].

Tabela 5.1. JSCE preporuke [161],[226]

	SCC bez VMA	SCC sa VMA
Sadržaj krupnog agregata	0.30-0.32 m ³ /m ³ ; maksimalno zrno 20 ili 25 mm	
Sadržaj vode	155-175 kg/m ³	≤ 180 kg/m ³
Vodopraškasti odnos	28-37% (maseno)	Zavisno od vrste i sadržaja VMA
Sadržaj praškaste komp.	0.16-0.19 m ³ /m ³	
Sadržaj vazduha	4.5%	

5.6 Model pakovanja agregata

Prema ovoj metodi se najpre (na osnovu poznavanja načina pakovanja zrna agregata) utvrđuje sadržaj agregata, a u narednom koraku se definišu količine ostalih materijala, na bazi procene optimalne količine paste (koja sadrži leteći pepeo i sprasenu zguru visokih peći) u šupljinama [275],[276]. Prema ovom modelu projektuju se ekonomičnije mešavine SCC prosečnih čvrstoća (28-35 MPa), zbog činjenice da je velika količina

cementa zamenjena letećim pepelom i zgurom, koji se takođe upotrebljavaju da bi se poboljšala konzistencija. Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana utvrđuje se na bazi vodocementnog faktora i sadržaja cementa; a konzistencija se definiše na bazi odnosa zapremina agregata i paste i količine doziranog superplastifikatora.

Projektovanjem SCC na ovaj način, sa aspekta ciljane čvrstoće, postiže se saglasnost sa uobičajenim pristupom u praksi. Ovu metodu karakteriše smanjenje količine paste, a samim tim manji troškovi i više čvrstoće, uz poboljšanje svojstava permeabilnosti, tečenja i skupljanja. Ova metoda uspešno je primenjena u Holandiji [41] i prilagođena kod lakoagregatnih SCC u Južnoj Koreji [51]. Treba napomenuti da se kod ove metode ne uzima u obzir doprinos zgure visokih peći i letećeg pepela čvrstoći, pošto se za definisanje veze sastava i čvrstoće kod nje koristi vodocementni faktor, u cilju pojednostavljenja projektovanja sastava. Ovo može voditi višim čvrstoćama pri većim starostima nego što je to potrebno [161].

5.7 LCPC metoda

Pristup projektovanju SCC u Francuskoj razvijen je u laboratoriji LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Caussees*). U ovim istraživanjima korišćen je tzv. model "čvrste suspenzije" u cilju predviđanja sadržaja šupljina između zrna agregata, i dalje optimizacije strukture agregata, odnosno minimizacije potrebne količine vode za SCC [239]. Koncept "referentne relativne viskoznosti" upotrebljen je da bi se procenila gustina pakovanja komponentnih materijala i da bi se dobila optimizovana granulometrijska kriva mešavine [161].

5.8 Modeli na bazi reološkog ponašanja SCC

Poznavanje reoloških parametara SCC ne samo da predstavlja koristan način za opisivanje njegovih svojstava, već se može upotrebiti u cilju razvoja efikasnog pristupa projektovanju sastava SCC. Uspešno projektovanje SCC bazirano je na uslovu da pasta i malter imaju zadovoljavajuće reološke parametre. To u prvom redu podrazumeva niske vrednosti graničnih smičućih napona (da bi se omogućila sposobnost punjenja), kao i odgovarajuću viskoznost (da bi se izbeglo blokiranje i segregacija). Metode

opisane u daljem tekstu su bazirane na reološkim ispitivanjima na odgovarajućoj pasti ili malteru za SCC.

Uvođenjem pojma debljine sloja viška paste (polovina rastojanja između dva susedna zrna agregata, uz pretpostavku da je rastojanje nezavisno od veličine zrna agregata) i utvrđivanjem relacija između rasprostiranja sleganjem, t_{500} , vremena V-levka, granice unutrašnjeg smicanja i plastične viskoznosti na SCC sa jedne i debljine viška paste sa druge strane, mogu se dobiti korisni polazni parametri za projektovanje SCC [184],[186],[227].

Otpornost na segregaciju modelirana je posmatranjem sfernih čestica konstantnog prečnika koje se nalaze u cementnoj pasti [233]. Na segregaciju betona utiče vrednost granice unutrašnjeg smicanja, vrednost viskoznosti, kao i gustina paste; SCC se može projektovati na bazi poznavanja segregacije agregata u statičkim i dinamičkim uslovima prilikom reoloških ispitivanja. Ovo je za sada jedina metoda bazirana na minimizaciji segregacije. Za određeni sadržaj agregata, postoji minimalna viskoznost i granica unutrašnjeg smicanja da bi se sprečila segregacija. Ovaj model je dalje razvijan tako što je uzeta u obzir interakcija između čestica [43].

Ostali reološki modeli za projektovanje, odnosno definisanje sastava SCC bazirani su na ispitivanjima: optimalnih odnosa komponentnih materijala [280],[300], relacija između paste i betona [155],[207],[233] merenja Bingamovih parametara za malter [246].

5.9 Projektovanje na bazi uticaja komponenata

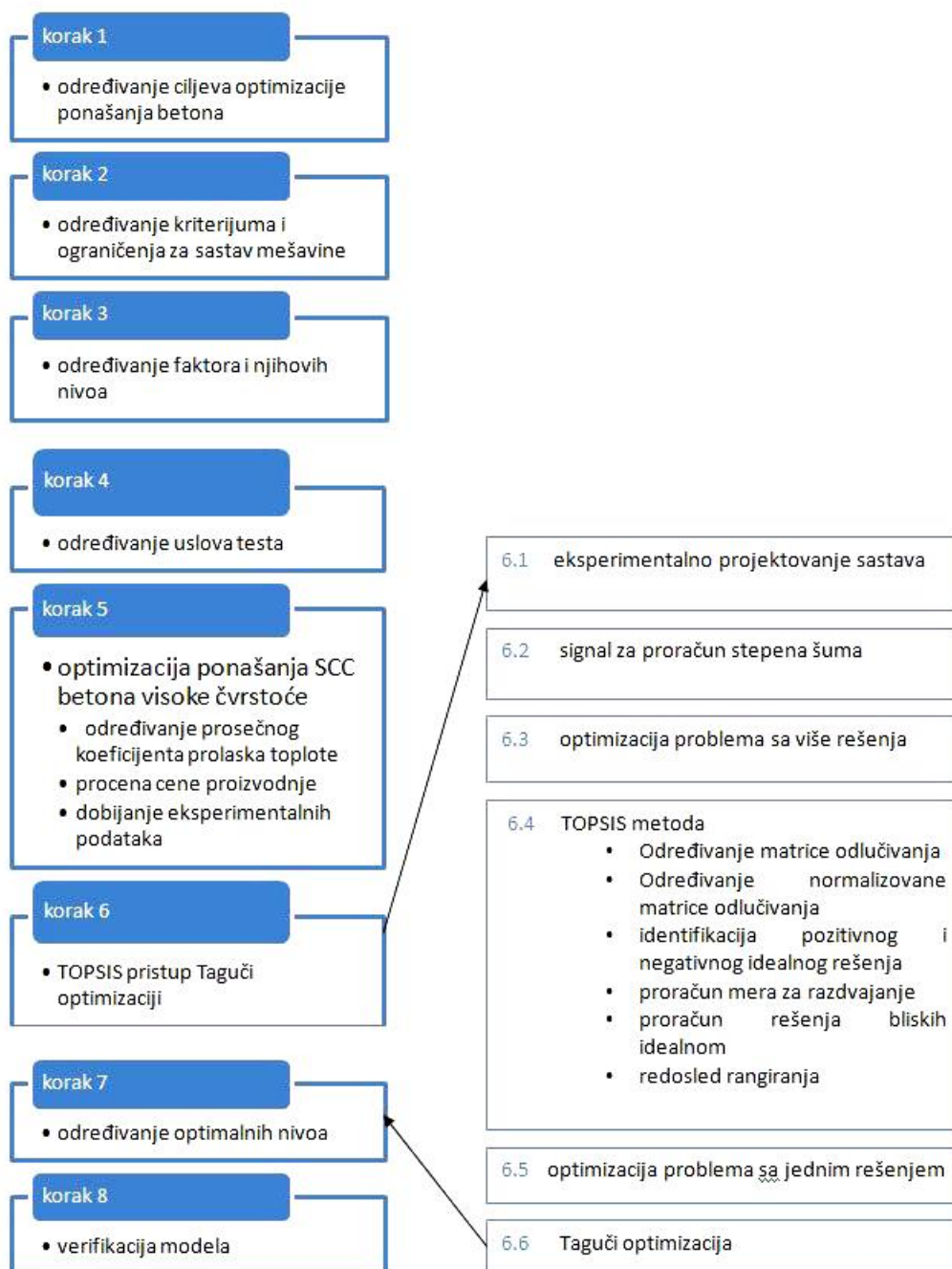
Pošto veliki broj faktora utiče na svojstva SCC, projektovanje na bazi njihovog uticaja može se upotrebiti u cilju optimizacije udela komponentnih materijala i minimizacije broja ispitivanja. Osnovni parametri, kao što su sadržaj praškaste komponente, sastav praškastih komponenata, W/P faktor, zapreminski udeo krupnog agregata (*Coarse Aggregate Volume Ratio*), doziranje superplastifikatora i VMA utvrđuju se u prvoj fazi, a zatim se spravlja i ispituje nekoliko mešavina sa odgovarajućim kombinacijama ovih parametara, nakon čega se utvrđuje i ispituje njihov uticaj na SCC [143],[251]. Ova metoda je korisna pri proučavanju efekta ključnih parametara i njihove interakcije na ponašanje SCC prilikom različitih ispitivanja [161]. Na primer, na zadržavanje

konzistencije umnogome utiče sadržaj veziva, kao i vodovezivni faktor, sadržaj VMA i zapremina krupnog agregata [88]. Ova metoda omogućuje smanjenje broja ispitivanja na betonu. Međutim, zaključak u smislu ponašanja mešavine važi samo za dati set ispitivanih materijala.

Osnovna mana ovog pristupa, osim činjenice da se može primeniti samo na zadati set komponenata, je i vreme potrebno da se obavi potreban broj ispitivanja, ali i utrošak materijala na prethodne probe. Na primer, $2^5 = 32$ ispitivanja je potrebno obaviti ako se vrši variranje samo pet faktora (W/P faktor, sadržaj mineralnog dodatka, doziranje superplastifikatora, zapreminski odnos peska i maltera, sadržaj krupnog agregata), što je značajno više nego u drugim metodama [161].

Eksperimentalni pristup projektovanju sastava SCC može se kombinovati sa teorijom planiranja eksperimenta i računarskom simulacijom problema [278]. Prilikom istraživanja su analizirani parametri za spravljanje samozbijajućih betona visokih čvrstoća (*High Strength Self-compacting Concrete – HSSCC*) pomoću Tagučići (Taguchi) metodologije za optimalno projektovanje sastava [203]. Tom prilikom uočeni su i analizirani sledeći ulazni faktori: W/P faktor, sadržaj vode, odnos sitnog i krupnog agregata, sadržaj letećeg pepela, sadržaj hemijskog dodatka za uvlačenje vazduha i sadržaj superplastifikatora. Budući da je projektovanje ovih betona složen zadatak, koji obuhvata veći broj parametara, sistematski pristup baziran na Tagučići metodologiji predložen je za smanjenje broja probnih mešavina, uz postizanje parametara karakterističnih za HSSCC.

Autori [247] su primenili TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*) pristup Tagučići optimizaciji u cilju utvrđivanja najboljeg sastava HSSCC za spravljanje u gradilišnoj fabrici betona. Šematski prikaz primenjene procedure dat je na slici 5.7. Primljeni su sledeći kriterijumi za optimizaciju: prosečan koeficijent prolaska toplote, procenat vazduha, rasprostiranje sleganjem, vreme t_{500} , upijanje, čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem i cena proizvodnje. Utvrđeno je pet faktora sa tri kontrolna nivoa i jedan faktor sa dva kontrolna nivoa koji utiču na ove kriterijume. TOPSIS pristup je u ovom slučaju primenjen da bi se transformisao problem sa velikim brojem odgovora u problem sa jednim odgovorom.



Slika 5.7 Šema procedure Topsis pristupa Tagučići metode optimizaciji HSSCC [247]

6. Sopstvena eksperimentalna istraživanja

Imajući na umu prihvaćeno opredeljenje za implementaciju i promociju održivog razvoja u oblasti graditeljstva, sa jedne strane, kao i savremena dostignuća i trendove u tehnologiji betona i upotrebi komponentnih materijala sa druge strane, istraživana je uticaj primene različitih industrijskih nusprodukata kao zamene dela filera na svojstva u svežem i očvrsлом stanju SCC mešavina, kako bi se došlo do optimizacije svojstava betona.

U svežem stanju praćeni su efekti zamene dela filera na sva tri svojstva svežeg betona: sposobnost tećenja, sposobnost prolaska i otpornost prema segregaciji, a u očvrsлом stanju osnovna fizičko-mehanička svojstva betona i trajnost.

Za ispitivanja su izabrani sledeći industrijski nusprodukti: leteći pepeo, sprášeni reciklirani beton i sprášeni otpadni sumpor. Pri tome je variran sadržaj i poreklo letećeg pepela, odnosno sadržaj sprášenog recikliranog betona i sprášenog otpadnog sumpora, pri konstantnim ostalim kolićinama 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 kolićina mineralnog dodatka i praćeni efekti te zamene ima malo u svetu.

6.1 Ciljevi i obim istraživanja

Da bi se ostvarila svojstva koja samozbijajući beton mora da poseduje, u skladu sa definicijom, vrše se korekcije njegovog sastava: redukuje se najkrupnije zrno agregata, a u najvećem broju slučajeva povećava se kolićina cementa kao komponente, što konkretno prouzrokuje povećanje cene i takođe može dovesti do pojave prslina usled visoke toplote hidratacije, kao i do povećanog skupljanja i tećenja betona. Upotrebom filera (mineralnog dodatka velike finoće mliva) može se postići smanjenje segregabilnosti svežeg SCC, ali i pomenuti negativni efekti. Pošto filer može biti materijal koji se inaće tretira kao otpadni materijal ili industrijski nusprodukt, upotreba

ovih materijala dovodi i do drugih pozitivnih efekata, ne samo u smislu poboljšanja fizičko-mehaničkih svojstava betona (u slučajevima kada se koristi pucolanski filer), već i do pozitivnih ekonomskih i nezanemarljivih ekoloških efekata [57]. U okviru disertacije istraživana je i prikazana mogućnost upotrebe letećeg pepela, spraćenog otpadnog sumpora i spraćenog otpadnog (recikliranog) betona u svojstvu filera za samozbijajuće betone.

Upotreba letećeg pepela u betonu već je u velikoj meri uspostavljena i rasprostranjena; ne samo sa ekonomske tačke gledišta, već i usled poboljšanja svojstava betona u svežem i očvrslom stanju. Takođe se leteći pepeo koristi kao mineralni dodatak u industriji cementa, pa se na ovaj način može rešiti problem skladištenja i odlaganja pepela. U ovom smislu, uobičajena je upotreba 15-30% pepela u odnosu na količinu cementa.

Polazeći od upotrebe letećeg pepela u NVC, vršena su ispitivanja njegove primene i kod SCC. Na osnovu rezultata istraživanja može se dati generalna ocena da, kada se upotrebljava u SCC, leteći pepeo pomaže održanju viskoznosti betona, smanjujući rizik od blokiranja i smanjuje količinu superplastifikatora potrebnog da se postignu slična svojstva u svežem stanju [252]. Da bi se koncept visokog sadržaja letećeg pepela proširio na SCC, istraživani su SCC sa najmanje 40% letećeg pepela, koji je u najvećem broju slučajeva zamenjivao odgovarajuću masu cementa, i ovakvi betoni su istraživani sa aspekta održivosti i smanjenja cene. Izvesna istraživanja vršena su sa SCC koji su sadržali do 60% pepela, a veoma mali broj istraživanja daje rezultate sa još većim količinama ovog industrijskog nusprodukta, pre svega zbog činjenice da u tim slučajevima dolazi do značajnog pada fizičko-mehaničkih svojstava takvih betona.

Aspekti recikliranja otpadnog betona, nastalog rušenjem dotrajalih i drugih armiranobetonskih konstrukcija predviđenih za rušenje, poznata su tema savremenih istraživanja u oblasti građevinarstva. Ova istraživanja pokazuju mogućnost upotrebe recikliranog betona u svojstvu agregata u konstruktivnim elementima, sa ponašanjem sličnim prirodnom agregatu [131].

U raspoloživoj literaturi ima vrlo malo rezultata istraživanja mogućnosti primene spraćenog recikliranog betona u svojstvu mineralnog dodatka u SCC. U pitanju je

uglavnom praškasti materijal koji se dobija nakon frakcionisanja recikliranog betona [101], ili suspenzija otpadne betonske prašine i vode, koja se dobija prilikom sečenja betona. Međutim, nema rezultata istraživanja efekta primene sprašenog recikliranog betona (betona spravljenog sa agregatom poreklom od drobljenog otpadnog betona).

Generisanje otpadnog sumpora ubraja se u jedan od ozbiljnih problema savremene naftne industrije. Osim upotrebe van oblasti građevinarstva, poznata je upotreba sumpora u nekim sekundarnim aspektima kao što su industrija boje i lakova, odnosno priprema betonskih uzoraka za ispitivanje pri pritisku. Spravljaju se i sumporni betoni, sa sumporom u svojstvu veziva, koji postaje tečan zagrevanjem komponenata [298]. Ove betone karakterišu dobre fizičko-mehaničke karakteristike [299].

Cilj istraživanja predstavljenog u okviru ove disertacije je da se prouče mogućnosti upotrebe raspoloživih komponentnih materijala prilikom spravljanja SCC u smislu:

- Upotrebe letećeg pepela iz domaćih termoelektrana, u dostavljenom stanju u svojstvu filera, uz postizanje zadovoljavajućih svojstava samougradljivosti;
- Procene mogućnosti upotrebe sprašenog otpadnog sumpora (kao nusprodukta prilikom rafinacije nafte), odnosno sprašenog otpadnog betona, u svojstvu filera, što bi povećalo obim raspoloživih mineralnih dodataka betonu sa jedne, i utrošak ovih nusprodukta, sa druge strane;
- Procene mogućnosti poboljšanja svojstava SCC upotrebom primenjenih mineralnih dodataka.

Ovo istraživanje sastoji se iz sledećih faza:

1. Dopremanje i ispitivanje komponentnih materijala;
2. Selekcija metoda za projektovanje i ispitivanje ciljanih svojstava betona;
3. Spravljanje SCC sa letećim pepelom do 50% u odnosu na ukupnu masu filera, sa istraživanjem svojstava SCC u svežem i očvrslom stanju;
4. Spravljanje SCC sa sprašenim sumporom u količini do 20% u odnosu na ukupnu masu filera, sa istraživanjem uticaja na svojstva SCC u svežem i očvrslom stanju;

5. Spravljanje SCC sa prašenim recikliranim betonom u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera, sa osvrtom na svojstva SCC u svežem i očvrsлом stanju;
6. Procena efekta upotrebe pomenutih mineralnih dodataka na svojstva SCC betona u svežem i očvrsлом stanju.

U prvoj fazi organizovano je i realizovano dopremanje komponentnih materijala za spravljanje SCC i ispitivanje njihovih fizičko-mehaničkih svojstava.

U drugoj fazi bilo je neophodno da se usvoji i razvije odgovarajući metod za projektovanje mešavine i procedure za spravljanje betona (videti poglavlje 6). U ovoj fazi upotrebljen je modifikovani metod u kome se najpre odrede odnosi količine odgovarajućih komponenata u pasti i malteru, pa tek onda na betonu, što je značajno minimizovalo potrebna ispitivanja na nivou betona u smislu probnih mešavina.

Cilj treće faze bilo je projektovanje receptura SCC betona sa dobrim svojstvima u svežem i očvrsлом stanju, uz upotrebu letećeg pepela (do 50% u odnosu na masu filera) u izvornom, netretiranom obliku. Praćeni su efekti upotrebe ovog mineralnog dodatka na promenu svojstava SCC u svežem i očvrsлом stanju.

U četvrtoj fazi proučavani su efekti upotrebe prašenog sumpora u betonu i njegov uticaj na svojstva SCC u svežem i očvrsлом stanju.

U petoj fazi istraživani su efekti upotrebe prašenog recikliranog betona u svojstvu filera u SCC i njegov uticaj na svojstva SCC u svežem i očvrsлом stanju.

U zavisnosti od ranga važnosti svojstava, količine i vrste upotrebljenog mineralnog dodatka, vremenskih ograničenja i raspoloživog prostora i opreme u Laboratoriji za materijale Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, definisan je obim, a na bazi obima i plan i program ispitivanja SCC u svežem i očvrsлом stanju. U svežem stanju na svim spravljenim SCC ispitivana su sva sledeća svojstva: zapreminska masa, temperatura svežeg betona, sadržaj uvučenog vazduha, rasprostiranje sleganjem, vremena t_{500} i t_v , kao i odnos visina kod L-kutije. U očvrsлом stanju ispitivana su, u obimu definisanom u funkciji od primenjenog mineralnog dodatka, sledeća svojstva: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju savijanjem,

čvrstoća pri zatezanju cepanjem, statički modul elastičnosti, athezija ("pull-off" metodom), brzina prostiranja ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, dinamički Poasonov koeficijent, kao i aspekti trajnosti (otpornost pri prodoru vode pod pritiskom, otpornost na dejstvo mraza i soli, otpornost na dejstvo mraza nakon 200 ciklusa). Obavljeno je i ispitivanje reprezentativnih SCC sa letećim pepelom, sa sprašenim sumporom i sa sprašenim recikliranim betonom, pomoću SEM mikroskopa, u kombinaciji sa EDS analizom ispitivanih SCC.

U skladu sa najvećim potencijalom koji leteći pepeo ima u odnosu na ostala dva usvojena mineralna dodatka, kao i u na osnovu raspoloživih količina komponentnih materijala, na SCC sa letećim pepelom obavljen je najveći broj ispitivanja u očvrslom stanju.

Reciklirani beton (reciklirani pesak, dobijen drobljenjem demoliranog betona) prethodno je sprašen, da bi mogao da se upotrebi u svojstvu mineralnog dodatka. Varirana je vrsta sprašenog recikliranog betona, a količina je uvek bila ista i iznosila je 50% u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (sprašenog recikliranog betona i krečnjačkog brašna).

Otpadni sumpor, dobijen kao nusprodukt u Rafineriji nafte Pančevo, prethodno je sprašen, da bi mogao da se upotrebi u svojstvu mineralnog dodatka. Variran je sadržaj otpadnog sumpora, do količine od 20% u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (sprašenog sumpora i krečnjačkog brašna).

6.2 Karakterizacija komponentnih materijala

U ovom delu biće opisane procedure i rezultati ispitivanja komponentnih materijala upotrebljenih prilikom eksperimentalnih ispitivanja. Ispitivanja su obavljena detaljno, u cilju karakterizacije komponenata koje se nalaze u sastavu konkretnih betonskih mešavina, kao i sagledavanja eventualnih efekata koje svaka od komponenata (agregat, cement, mineralni dodaci, voda i superplastifikator) može imati na svojstva SCC.

6.2.1 Svojstva upotrebljenog agregata

Agregat proizveden u periodu jun-avgust 2012, od strane "Inkop" d.o.o., Beograd, upotrebljen je za predmetna ispitivanja iz ove disertacije. Celokupna dostupna dokumentacija u vezi sa ispitivanjima fizičko-mehaničkih svojstava svih frakcija ovog agregata, preuzeta je od proizvođača i ovde će biti predstavljena u celosti. Ispitivanja svojstava agregata obavljena su u Institutu IMS, Beograd (Izveštaj br. KIA 0316/11).

Frakcionisani prirodni agregat (rečni agregat) vodi poreklo iz reke Dunav, separacija "Sava" u Beogradu. Agregat je podeljen na frakcije, od kojih su prilikom spravljanja SCC u okviru ove disertacije upotrebljene sledeće: I (0/4), II (4/8) i III (8/16).

6.2.1.1 Petrografski sastav agregata

U skladu sa standardom [256] utvrđen je i u pomenutom Izveštaju dat petrografski sastav agregata (genetska klasifikacija). Petrografski sastav agregata prikazan je u okviru tabele 6.1.

Tabela 6.1 Petrografski sastav agregata

Naziv stene ili minerala	Sadržaj stene ili minerala u (%) kao broj zrna				Sadržaj stene ili minerala u (%) masenim		
	0.125-0.25 mm	0.25-0.5 mm	0.5-1 mm	1-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
Magmatske stene							
Granitoid	0	0	0	0	0.5	3.2	5.6
Andezit-bazalt	0	0	0	1	0.8	2.2	1.2
Sedimentne stene							
Peščar	0	1	3	8	14.5	16.0	20.8
Rožnac	0	0	0	0	0	1.2	0.9
Metamorfne stene							
Kvarcit	12	23	34	49	71.6	73.8	60.9
Škriljac	0	0	0	1	1.1	3.6	10.6
Minerali							
Kvarc	80	70	60	40	11.5	0	0
Feldspati	2	2	1	1	0	0	0
Amfiboli-pirokseni	3	2	1	0	0	0	0
Liskuni	3	2	1	0	0	0	0
Ukupno (%)	100	100	100	100	100	100	100

Iz tabele se vidi da je dominantan sadržaj zrna minerala kvarca u sitnom agregatu, odnosno metamorfne stene kvarcita u sitnom i krupnom agregatu. Pomenuti materijali

u svom sastavu sadrže velike količine silicijum-oksida, koji predstavlja osnovu za dobra fizičko-mehanička svojstva betona u čijem sastavu se nalazi ovaj agregat. Sadržaj sedimentne stene peščara je najveći u odnosu na sadržaj ostalih stena i minerala, pri čemu ovaj sadržaj opada sa smanjenjem veličine zrna agregata. U pogledu mineralnog sastava peščari su obično izgrađeni dominantno od zrna kvarca, ljuspica muskovita i feldspata, a potom i cirkona, apatita, magnetita, granata, turmalina. Vezivo može biti kalcijumkarbonatno (vapnovito), laporovito, glinovito, dolomitsko, silicijumsko, gvožđevito (limonit), bituminozno (organskog porekla) i dr.

6.2.1.2 Sadržaj štetnih i potencijalno opasnih materijala

Ispitivan je i u pomenutom Izveštaju dat sadržaj štetnih i potencijalno opasnih materijala u krupnom i sitnom agregatu, prema standardu [254].

Nakon obavljenih ispitivanja sadržaja štetnih čestica, utvrđeno je da se u agregatu, od svih standardom definisanih štetnih i potencijalno opasnih materijala, samo u frakciji III (8/16 mm) nalazi 3.8% rožnaca (kalcedon), koji mogu biti reaktivni u betonu.

6.2.1.3 Fizička, mehanička, hemijska i geometrijska svojstva agregata

Fizička, mehanička, hemijska i geometrijska svojstva upotrebljenog agregata takođe su bila predmet ispitivanja agregata i prikazana su u okviru tabele 6.2, zajedno sa navodom standarda po kome su predmetna svojstva kvantifikovana.

Tabela 6.2 Fizička, mehanička, hemijska i geometrijska svojstva agregata

Vrsta ispitivanja	Metoda prema SRPS	Jed. mere	Frakcije (mm)			Uslovi kvaliteta SRPS B.B2.011 SRPS B.B3.100
			0/4	4/8	8/16	
Postojanost na dejstvo mraza (5 ciklusa u Na ₂ SO ₄)	B.B8.044:1982 (povučen)	%	2.0	1.7	1.5	Gubitak mase Najviše: Drobljeni -5%, Prirodni -12%
Sadržaj ukupnog sumpora u obliku SO ₃	B.B8.042:1984 (povučen)	%	0	0	0	Najviše 1%
Sadržaj hlorida izražen kao Cl ⁺	B.B8.042:1984 (povučen)	%	0	0	0	Najviše 0.1%
Određivanje stvarne zapreminske mase vodom zasićenog i površinski suvog uzorka zrna agregata	ISO 6783 :1999 ISO 7033 :1999	kg/m ³	Pikno- metar	Hidrostatička vaga		U granicama 2000-3000 kg/m ³
			2640	2641	2642	
Nasuta zapreminska masa u rastresitom suvom stanju	ISO 6782 :1999	kg/m ³	1667	1519	1493	Nije propisano

(nastavak tabele 6.2)						
Nasuta zapreminska masa u zbijenom suvom stanju	ISO 6782 :1999	kg/m ³	1788	1621	1599	Nije propisano
Određivanje upijanja vode	ISO 6783 :1999 ISO 7033 :1999	%	1.0	0.8	0.7	Najviše 1.5
Sadržaj organskih materija (u 3% rastvoru NaOH)	B.B8.039 :1982	-	Rastvor svetliji od standardne boje		-	Rastvor ne sme biti tamniji od standardne boje
Oblik zrna	B.B8.049 :1984	-	-	0.24	0.25	Najmanje Prirodni – 0.1 Drobljeni – 0.15
Sadržaj grudvi gline	B.B8.038:1982	%	0.0	0.0	0.0	Najviše Za < 4mm max Za > 4mm max
Sadržaj slabih zrna	B.B8.037 :1986	%	0.0	0.0	0.0	Najviše 3.0~4.0
Sadržaj lakih čestica	B.B8.034 :1986	%	0.0	0.0	0.0	Najviše 1.0~0.5
Obavijenost površine zrna agregata	B.B8.004 :1987	-	0.0	0.0	0.0	Nije propisano
Otpornost na dinamičke udare (drobljenje) i habanje trenjem	B.B8.045 :1978	%	-	25.9	29.2	Koef. LA najviše 30.0
Otpornost protiv drobljenja u cilindru	B.B8.033 :1994	%	-	14.6	18.6	Najviše 30.0

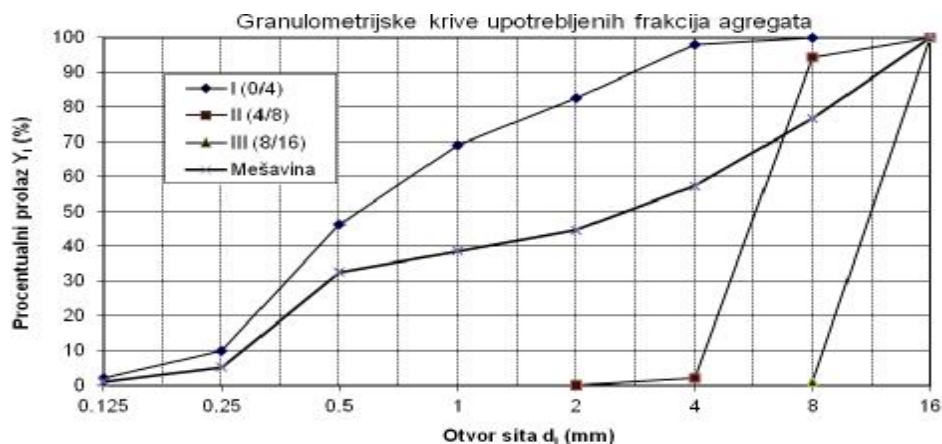
6.2.1.4 Granulometrijski sastav upotrebljenog agregata

Granulometrijski sastav upotrebljenog agregata ispitan je u Laboratoriji za materijale IMK, Građevinski fakultet, prema standardu [265] i prikazan je u okviru tabele 6.3, kao i grafički, na slici 6.1. Prema standardu [255] ograničen je sadržaj zrna sitnijih od donje nazivne granice frakcije (takozvana podmerena zrna) na maksimalno 15% i sadržaj zrna krupnijih od gornje nazivne granice frakcije (nadmerena zrna) na 10%.

Tabela 6.3 Rezultati suvog prosejavanja upotrebljenog agregata

Otvori sita (mm)	0.125	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0	11.2	16.0
I (0/4), %	2.1	9.9	46.2	68.9	82.7	98.0	100	100	100
II (4/8), %	-	-	-	-	0	1.8	94.2	100	100
III (8/16), %	-	-	-	-	-	0	0.9	47.8	100

Sadržaj podmerenih zrna u frakcijama II (4/8) i III (8/16) iznosio je 1.84% i 0.94% respektivno, a sadržaj nadmerenih zrna u frakcijama I (4/8), II (4/8) i III (8/16) iznosio je 1.96%, 5.81% i 0%, respektivno. Modul finoće (modul zrnivosti) frakcije I (0/4) iznosio je 2.92, i nalazio se u granicama 2.30-3.60, definisanim važećim standardom SRPS B.B2.010. Izračunati moduli finoće (moduli zrnivosti) frakcija II (4/8) i III (8/16) iznosili su 6.04 i 6.99, respektivno.



Slika 6.1 Granulometrijske krive upotrebljenih frakcija agregata (zajedno sa krivom mešavine)

6.2.1.5 Sadržaj sitnih čestica u upotrebljenom agregatu

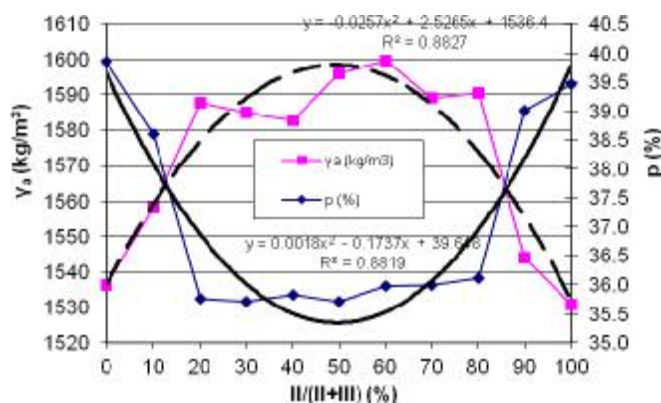
Sadržaj sitnih čestica u agregatu ispitivan je u Laboratoriji za materijale IMK, Građevinski fakultet, saglasno važećem standardu SRPS B.B8.036:1982 [258] i kod frakcije I (0/4) iznosio je 0.59% za zrna sitnija od 0.063 mm, odnosno 1.68% za zrna sitnija od 0.09 mm, što je znatno manje od dozvoljene granice od 5% za rečni agregat prečnika zrna manjeg od 4 mm. U krupnom agregatu (krupniji od 4 mm) ovaj sadržaj je bio blizak nuli.

6.2.1.6 Zapreminska masa mešavine frakcija

Generalno posmatrano, potreba za vodom svake mešavine zrnastih materijala zavisi od specifične površine i gustine pakovanja zrna. Za agregat je dominantan parametar gustina pakovanja zrna, kako za krupan, tako i za sitan agregat [224].

Za spravljanje SCC betona upotrebljene su frakcije krupnog agregata II (4/8) i III (8/16). 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 ovog ispitivanja (kao prosečne vrednosti od dva ispitivanja za svaki odnos II i III frakcije) prikazani su na slici 6.2. Uprkos rasipanju rezultata ispitivanja, 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 (za ekstremne vrednosti aproksimativnih funkcija zapremine mase i poroznosti mešavine pri ~50%). U tom slučaju se dobija maksimalna vrednost od 1598 kg/m^3 ($\sim 1600 \text{ kg/m}^3$) zapremine mase mešavine agregata, i minimalna poroznost od 35.4%.



Slika 6.2 Promena zapremine mase i poroznosti mešavine frakcija II (4/8) i III (8/16) pri različitim odnosima II/(II+III)

6.2.1.7 Uticaj količine agregata na sposobnost punjenja

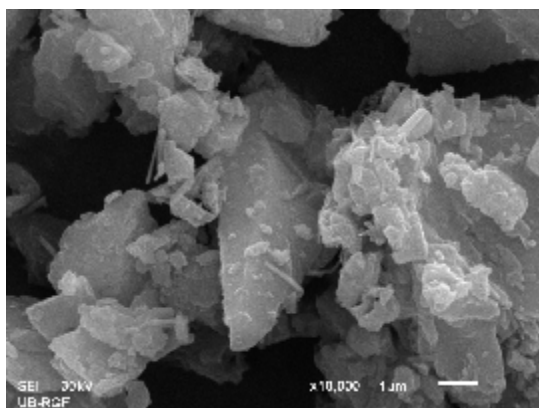
Sa povećanjem zapremine peska u malteru dolazi do smanjenja rasprostiranja sleganjem, kao i do povećanja vremena u metodi V-levka. Kako je rasprostiranje sleganjem najbolji pokazatelj graničnog smičućeg napona, a V-levak viskoznosti, jasno je da se i granični smičući napon i viskoznost povećavaju sa povećanjem zapremine peska u pasti (pri konstantnom W/C faktoru i konstantnoj količini doziranog superplastifikatora). Potpuno isti efekat se može primetiti na betonu, pri povećanju količine krupnog agregata. Naime, i rasprostiranje sleganjem i vreme V-levka se povećavaju sa povećanjem količine agregata, odnosno može se reći da dolazi do pogoršanja sposobnosti punjenja. Ovo pogoršanje ima snažniji efekat ukoliko se upotrebljava više od 36% krupnog agregata u betonu [161].

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.

6.2.2 Svojstva upotrebljenog cementa

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, proizveden u periodu 01.01.2012. – 31.03.2012. godine (slika 6.3). Hemijski sastav upotrebljenog cementa, ispitan metodom EDS analize na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, prikazan je u tabeli 6.4. Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava cementa (Institut IMS, Beograd), prikazani su u okviru tabele 6.5, a granulometrijski sastav (dobijen na osnovu ispitivanja u Institutu ITNMS, Beograd) cementa dat je na slici 6.4.



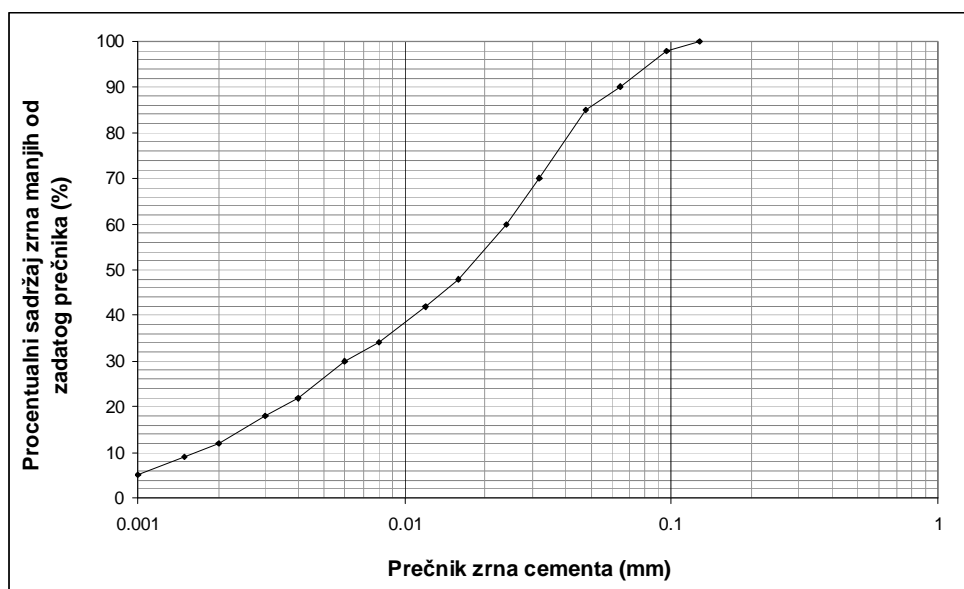
Slika 6.3 Izgled zrna cementa CEM I PC 42.5R dobijen pomoću SEM uređaja

Tabela 6.4 Hemijski sastav upotrebljenog cementa (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
21.21	4.81	61.64	2.13	2.22	1.11	0.33	0.18	6.37

Tabela 6.5 Rezultati fizičko-mehaničkih ispitivanja cementa

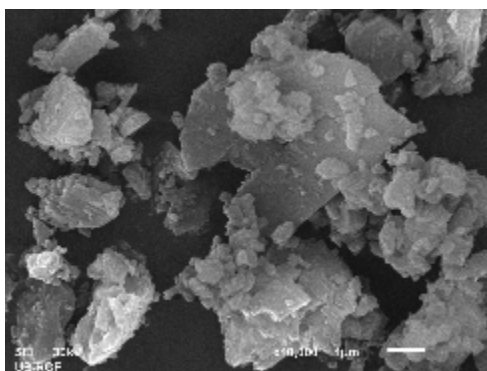
Svojstvo	Vrednost
Ostatak na situ 0.09mm, %	0.5
Specifična površina - Blaine, cm ² /g	4240
Specifična masa, kg/m ³	3040
Zapreminska masa u rastresitom stanju, kg/m ³	890
Zapreminska masa u zbijenom stanju, kg/m ³	1440
Standardna konzistencija, %	27.8
Vreme vezivanja - početak, min	170
Vreme vezivanja - kraj, min	270
Postojanost zapremine - metoda kolačića	Postojan
Postojanost zapremine - Le-Chatelier, mm	1.0
Čvrstoća pri savijanju 2d, MPa	5.1
Čvrstoća pri savijanju 28d, MPa	9.0
Čvrstoća pri pritisku 2d, MPa	24.8
Čvrstoća pri pritisku 7d, MPa	40.6
Čvrstoća pri pritisku 28d, MPa	50.7



Slika 6.4 Granulometrijski sastav upotrebljenog cementa

6.2.3 Svojstva upotrebljenog krečnjačkog brašna

U svojstvu filera za sve mešavine je upotrebljeno krečnjačko brašno proizvođača "Granit Pešćar", Ljig (slika 6.5). Mermerisani krečnjak se eksploatiše i obrađuje u površinskom kopu "Rujevac", koji se nalazi na istoimenom brdu u selu Ba, udaljenom oko 8 km od Ljiga. Krečnjačko brašno deklarirano je kao karbonatno punilo (dva puta mleveni filer) srednje krupnoće zrna od 250 μm .



Slika 6.5 Izgled zrna krečnjačkog brašna dobijen pomoću SEM uređaja

Prema specifikaciji proizvođača, krečnjak je svetlo sive boje, masivne teksture i homogene strukture, ravnog do školjkastog preloma sa finohrapavom površinom i oštrim ivicama loma. Reakcija stene na 5% HCl je burna. Fizičko-mehanička svojstva ovog materijala data su u tabeli 6.6, a hemijska u tabeli 6.7 (preuzeto od proizvođača

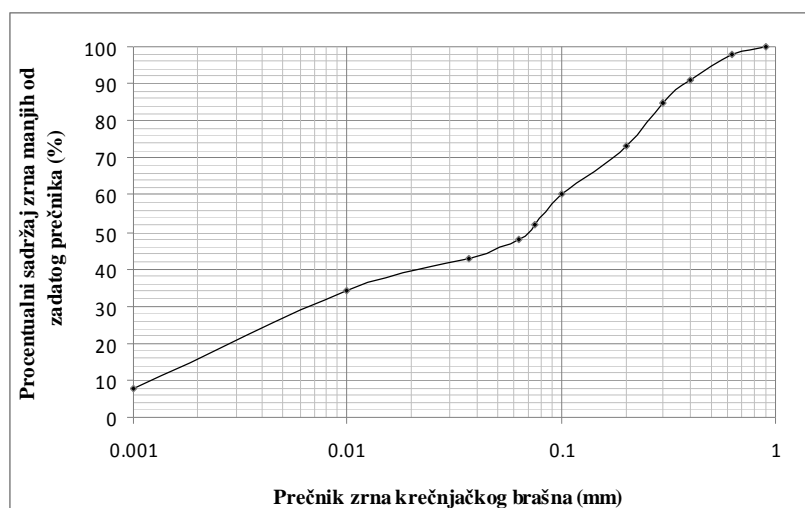
"Granit Peščar", Ljig). Na slici 6.6 data je granulometrijska kriva upotrebljenog krečnjačkog brašna, specifične površine 3800 cm²/g.

Tabela 6.6 Fizičko-mehanička svojstva ispitivanog krečnjačkog brašna

Svojstvo	Vrednost
Zapreminska masa bez pora i šupljina	2720 kg/m ³
Zapreminska masa sa porama i šupljinama	2700 kg/m ³
Poroznost kamena	0,7 %
Upijanje vode kamena	0,12 %
Čvrstoća pri pritisku u suvom stanju	143 MPa
Čvrstoća pri pritisku u zasićenom stanju	137 MPa
Čvrstoća pri pritisku posle mraza	132 MPa
Čvrstoća pri savijanju	21 MPa
Otporost na habanje brušenjem	18 cm ³ /50cm ²
Otpornost na mraz	Postojan na dejstvo mraza

Tabela 6.7 Hemijska svojstva ispitivanog krečnjačkog brašna

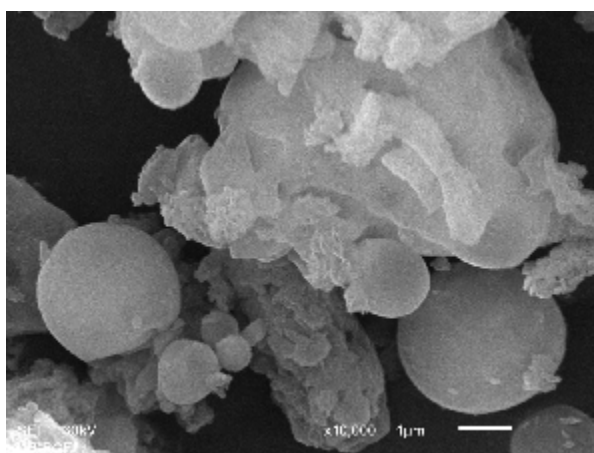
Svojstvo	Vrednost
Gubitak žarenjem	43.64 %
SiO ₂ nerastvorni deo	0.21 %
Al ₂ O ₃	0.5 %
CaO	54.86 %
Fe ₂ O ₃	0.09 %
MgO	1.10 %
K ₂ O	0.05 %
MnO	0.005 %
P ₂ O ₅	0.5 %
SO ₂	Tragovi
S	0
pH	8.85
Nerastvorno u HCl	0.255 %



Slika 6.6 Granulometrijski sastav upotrebljenog krečnjačkog brašna

6.2.4 Svojstva upotrebljenog letećeg pepela

U ovim istraživanjima, leteći pepeo (LP, slika 6.7) je dopremljen iz dve različite termoelektrane. U pitanju su Termoelektrana "Kostolac" i Termoelektrana "Kolubara". Uzorkovanje i pakovanje LP sprovedo je osoblje ovih postrojenja. LP je skladišten u plastičnim vrećama od uzorkovanja do trenutka ispitivanja, zaštićen od vlage i promena temperature. Rezultati ispitivanja hemijskog sastava LP (sprovedenog u Institutu ITNMS) prikazani su u okviru tabele 6.8.



Slika 6.7 Izgled zrna letećeg pepela dobijen pomoću SEM uređaja

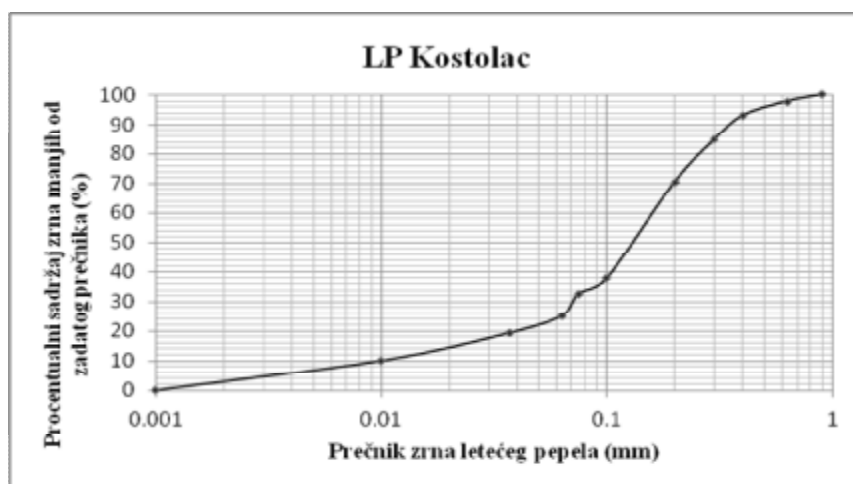
Tabela 6.8 Hemijski sastav upotrebljenih LP

Parametar	TE "Kostolac"	TE "Kolubara"
SiO ₂ (%)	43.01	58.60
Al ₂ O ₃ (%)	27.85	21.92
CaO (%)	9.09	6.12
Fe ₂ O ₃ (%)	11.17	5.97
MgO (%)	1.95	1.77
K ₂ O (%)	0.75	1.50
Na ₂ O (%)	0.16	0.37
TiO ₂ (%)	0.82	0.49
Gubitak žarenjem (%)	3.75	3.09
Pb (%)	0.0095	0.017
Cd (%)	0.0007	0.0005
Zu (%)	0.0087	0.0092
Cu (%)	0.0145	0.01
Cr (%)	0.0115	0.014
Ni (%)	0.012	0.013
Mn (%)	0.041	0.036
PO ₄ ³⁻ (%)	0.07	0.053
SO ₄ ²⁻ (%)	1.34	<0.02
Cl (%)	<0.035	<0.035

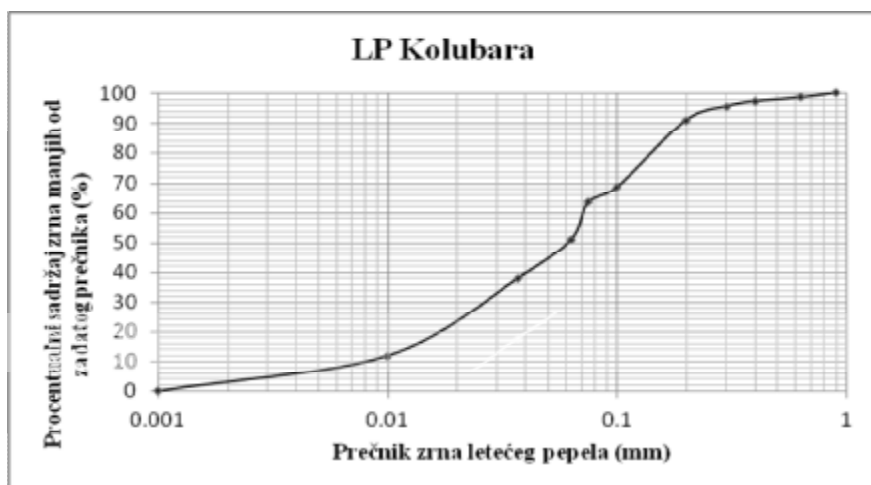
Zapreminska masa letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" u rastresitom i zbijenom stanju iznosila je 650 kg/m^3 i 900 kg/m^3 . Zapreminska masa letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u rastresitom i zbijenom stanju iznosila je 690 kg/m^3 i 910 kg/m^3 . Specifična masa određena na osnovu tri ispitivanja metodom piknometra u Laboratoriji za materijale IMK, Građevinski fakultet, iznosila je 2210 kg/m^3 za leteći pepeo iz TE "Kostolac", a u slučaju pepela iz TE "Kolubara" iznosila je 2190 kg/m^3 . Granulometrijski sastav LP je prikazan tabelarno, u tabeli 6.9 i grafički na slikama 6.8 i 6.9. Leteći pepeo je korišćen u originalnom stanju, bez prethodne pripreme u vidu rasejavanja, mlevenja i slično.

Tabela 6.9 Granulometrijski sastav upotrebljenih letećih pepela

Prečnik (mm)	Y (%)	
	"Kostolac"	"Kolubara"
0.9	100.0	100.0
0.63	97.8	98.6
0.4	93.0	97.3
0.3	84.8	95.6
0.2	70.5	90.9
0.1	37.8	68.6
0.075	32.7	63.6
0.063	25.1	51.0
0.037	19.4	38.0
0.01	10.0	12.0
0.001	0.0	0.0



Slika 6.8 Granulometrijska kriva LP "Kostolac"



Slika 6.9 Granulometrijska kriva LP "Kolubara"

6.2.5 Svojstva upotrebljenog sprašenog recikliranog betona

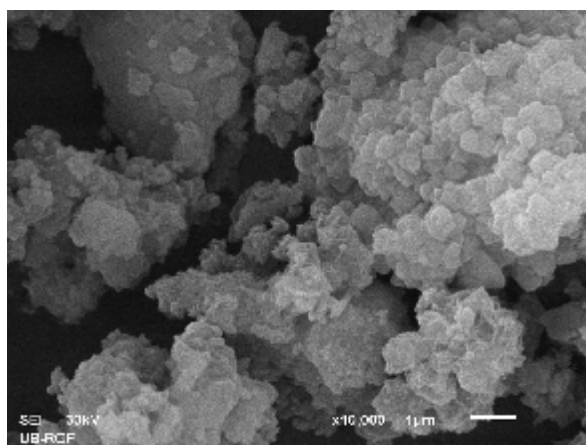
Sušтина primene sprašenog betona u ovom slučaju ogledala se u upotrebi praškastog materijala dobijenog finim sprašivanjem tri različite vrste peska pomoću ultracentrifugalnog mlina. Ova tri peska dobijena su drobljenjem tri različite vrste betona kontrolisanog porekla [131] u Institutu za Puteve, Beograd. Sprašivanje peska i ispitivanje njegovih fizičkih svojstava obavljeno je u Institutu ITNMS. 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 sprašena – sprašivanjem 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 sprašena – sprašivanjem 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 sprašena – sprašivanjem ovog peska dobijen je reciklirani praškasti mineralni dodatak C.

U tabeli 6.10 prikazan je hemijski sastav predmetna tri sprašena reciklirana betona (ispitivanje obavljeno u Institutu ITNMS). U pogledu granulometrijskog sastava može se reći da su ova tri betona bila veoma slična, sa prosečnim granulometrijskim sastavom datim u tabeli 6.11 i sa specifičnom površinom od $4400 \text{ cm}^2/\text{g}$. Na slici 6.10 je prikazan izgled zrna praškastog mineralnog dodatka A. U pogledu teksture, morfologije i krupnoće, svi navedeni dodaci dobijeni od recikliranog betona bili su slični.

Tabela 6.10 Hemijski sastav sprašenih betona

Parametar	Mineralni dodatak A	Mineralni dodatak B	Mineralni dodatak C
SiO ₂ (%)	67.13	60.55	61.31
Al ₂ O ₃ (%)	6.58	6.84	6.65
CaO (%)	12.94	17.77	16.06
MgO (%)	0.76	0.94	0.86
Fe ₂ O ₃ (%)	1.33	1.32	1.32
K ₂ O (%)	0.86	0.83	0.79
Na ₂ O (%)	1.27	1.13	1.05
TiO ₂ (%)	<0.17	<0.17	<0.17
Gubitak žarenjem (%)	9.11	10.59	11.93



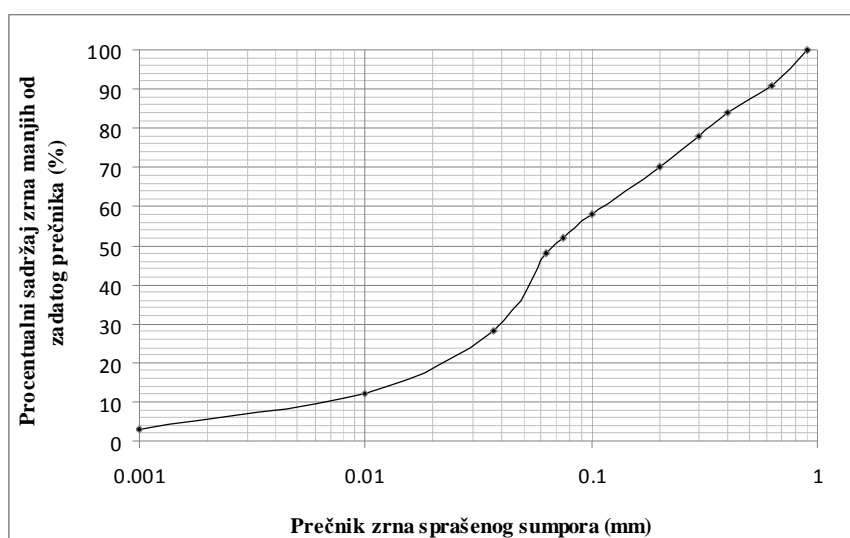
Slika 6.10 Izgled zrna mineralnog dodatka A (sprašenog betona) dobijen pomoću SEM uređaja

Tabela 6.11 Granulometrijski sastav upotrebljenih sprašenih betona

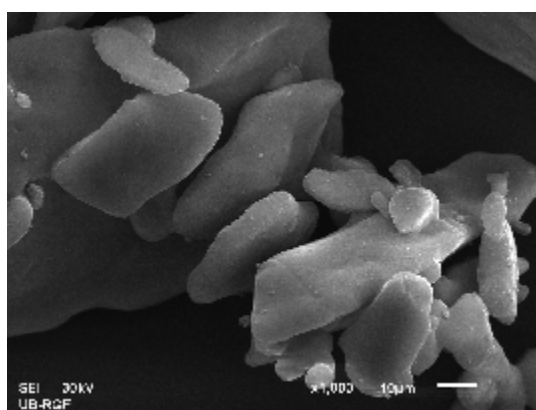
Prečnik (mm)	0.9	0.63	0.4	0.3	0.2	0.1	0.075	0.063	0.037	0.01	0.001
Proc. prolaz Y (%)	100	95-97	88-91	83-86	75-76	61-63	54-55	51-52	47-49	33-34	0-1

6.2.6 Svojstva upotrebljenog spraćenog sumpora

Sumpor (specifične mase 2050 kg/m^3), koji je upotrebljavan u svojstvu mineralnog dodatka u ovom radu, potiče iz Rafinerije nafte Pančevo. Pre upotrebe sumpor je fino samleven u prah, pomoću ultracentrifugalnog mlina. Finoća mliva upotrebljenog spraćenog sumpora iznosila je $2600 \text{ cm}^2/\text{g}$, a granulometrijski sastav je prikazan na slici 6.11. Spraćivanje i ispitivanja fizičkih svojstava sumpora su obavljani u Institutu ITNMS. Na slici 6.12 je prikazan izgled zrna spraćenog sumpora upotrebljenog u eksperimentalnim ispitivanjima.



Slika 6.11 Granulometrijska kriva spraćenog sumpora



Slika 6.12 Izgled zrna sumpora dobijen pomoću SEM uređaja

6.2.7 Upotrebljena voda

Obična voda iz gradskog vodovoda upotrebljena je prilikom spravljanja betona. Temperatura vode je merena prilikom svakog ispitivanja i kretala se u uskim granicama od $19\text{-}22^\circ\text{C}$.

6.2.8 Svojstva upotrebljenog superplastifikatora

U svim ispitivanjima koja su predmet ovog rada upotrebljena je samo jedna vrsta superplastifikatora, Glenium Sky 690, proizvođača BASF (BASF Contruction Chemicals Spa Italia). Celokupna količina superplastifikatora koja je upotrebljena poreklom je iz jedne šarže proizvođača, a rok trajanja superplastifikatora nije bio prekoračen.

Superplastifikator je skladišten u ambalaži u kojoj ga je dostavio proizvođač, i sve vreme u uslovima definisanim tehničkom dokumentacijom proizvođača. U pitanju je superplastifikator na bazi polikarboksilata, sa karakteristikama definisanim od strane proizvođača, prikazanim u tabeli 6.12.

Tabela 6.12 Fizičko-hemijska svojstva upotrebljenog superplastifikatora

Izgled	Smeđa tečnost
Specifična masa na 20°C	1.06 kg/dm ³
Viskoznost na 20°C	30-200 mPa·s
Sadržaj čvrstih čestica	26%
pH vrednost	5-8
Sadržaj jona hlorida	0.01%
Sadržaj alkalija (kao Na ₂ O ekvivalent)	0.26%

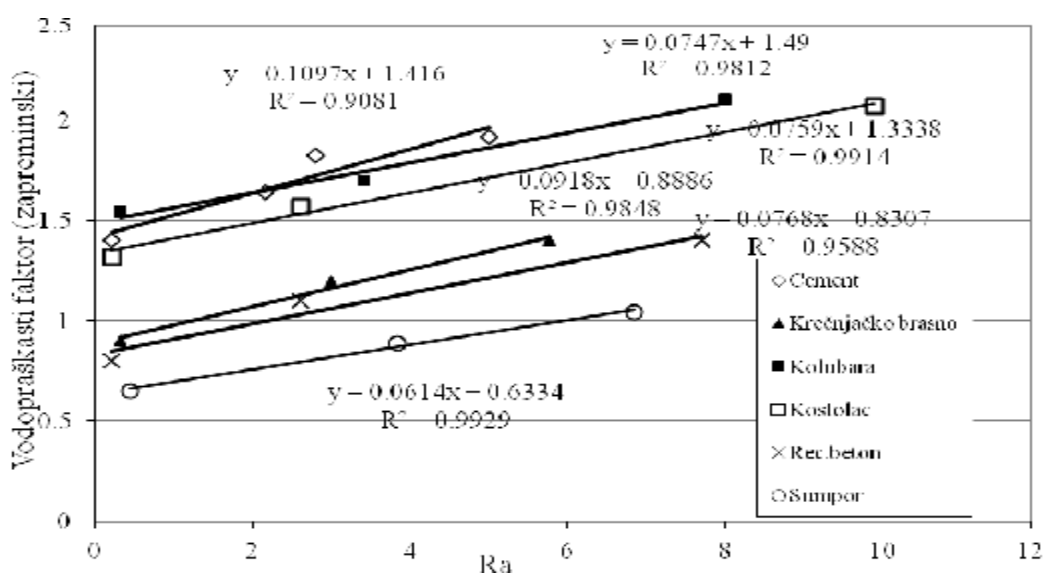
6.3 Prethodna ispitivanja paste i maltera

Princip projektovanja SCC betona sastoji se, između ostalog, i iz eksperimentalnih ispitivanja sveže paste (mešavina vode i praškaste komponente) i svežeg maltera (mešavina vode, praškaste komponente i peska). Na osnovu tih ispitivanja, u većini predloženih metoda za projektovanje sastava SCC, dolazi se do odnosa komponenata, na bazi testova malog konusa i malog V-levka. U okviru ovog rada upotrebljena je samo metoda malog konusa za definisanje ponašanja paste i maltera, kao i za okvirno određivanje odnosa komponenata.



Slika 6.13 Test malog konusa za definisanje ponašanja pasti sa letećim pepelom

Na slici 6.13 je prikazano ispitivanje testom malog konusa, na primeru ponašanja pasti sa letećim pepelom. Variranjem količine vode u odnosu na praškastu komponentu dobijane su različite vrednosti rasprostiranja pasti, i na taj način došlo se do zavisnosti između vodopraškastog faktora (W/P) i relativnog rasprostiranja (R_a). Pri tome, vodopraškasti faktor može da se definiše na različite načine, a kao najbolji za ove testove se pokazao odnos apsolutnih zapremina komponenata, tj. vode i praškaste komponente (krečnjačko brašno, leteći pepeo, sprášeni sumpor, sprášeni reciklirani beton). Na slici 6.14 je prikazana zavisnost pomenuta dva faktora za sve primenjene praškaste komponentne materijale.



Slika 6.14 Relacija između vodopraškastog faktora i relativnog rasprostiranja paste R_a

Ispitivanjem na nivou maltera, sa dodatim peskom i superplastifikatorom, dalje su definisani odnosi komponenata u malteru, odnosno u probnim betonskim mešavinama, koje su spravljane u sledećem koraku.

6.4 Spravljanje i ispitivanje probnih SCC mešavina

Sa aspekta projektovanja optimalnog sastava SCC, a imajući u vidu da ne postoje precizni algoritmi za definisanje korektne recepture SCC, spravljanje betona u okviru prethodnih proba je od izuzetne važnosti. Rezultati dobijeni ispitivanjima na nivou paste i maltera imaju svoj doprinos prilikom procesa odlučivanja o sastavu betona, ali je tek na nivou betona moguće sa sigurnošću tvrditi kako će se beton ponašati. Takođe, eventualne dalje korekcije komponenata daju direktne i pouzdane rezultate samo na

nivou betona. Pre usvajanja konačnih receptura za potrebe predmetne disertacije, u okviru prethodnih proba vršeno je prethodno optimizovanje sastava betona. Spravljeno je ukupno 12 različitih probnih (pilot) mešavina betona, sastava prikazanog u tabeli 6.13. U svim prikazanim mešavinama količine agregata zadržane su konstantnim i to: I frakcija 840 kg/m^3 , a II frakcija i III frakcija po 428.5 kg/m^3 .

Tabela 6.13 Sastav betona spravljenih prilikom prethodnih proba*

Komponenta	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Cement	450	420	430	380	380	380	380	380	430	380	380	380
Krečnjačko brašno	170	170	170	220	220	220	198	176	119	176	110	110
Leteći pepeo	-	-	-	-	-	-	22	44	-	-	-	-
Sumpor	-	-	-	-	-	-	-	-	51	44	-	-
Rec. beton	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110	110
Voda	176	187	190	178.5	164.5	173	185	178.5	190	183	183	183
Hem. dodatak	4.95	4.95	5.59	7.6	11.4	7.6	7.6	7.6	5.59	11.4	11.4	7.6
Rasprostiranje sleganjem (cm)	55	62	70	79	75	76	78**	65	60	80**	86	80
Zapr. masa, kg/m^3	2411	2401	2408	2401	-	-	2391	2381	2374	2369	2372	2377

* Količine komponentnih materijala date su u tabeli u kg/m^3

** kod mešavine je došlo do segregacije

Spravljene su količine od po 8 lit i utvrđena su najvažnija svojstva ovih betona: zapreminska masa, rasprostiranje sleganjem, čvrstoća pri pritisku. Za spravljanje ovih betona upotrebljena je laboratorijska mešalica "Beckel baustoffprüftechnik" (Kleinmischer Typ EM 20/1, THB Technischer Hander Beckel, Germany), kapaciteta 10 lit, sa rotirajućim bubnjem i fiksiranom osovinskom mešačkom glavom, sa podesivim položajima lopatica.

U smislu sastava, prvih šest betona (betoni P1-P6) spravljeni su samo sa krečnjačkim brašnom, tj. kao betoni bez dodatka drugih praškastih materijala. Betoni P7 i P8 spravljeni su sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" u količini od 10% i 20% u odnosu na ukupnu usvojenu količinu praškaste komponente (220 kg/m^3), pri čemu je u njihovom sastavu varirala količina upotrebljene vode. Betoni P9 i P10 spravljeni su sa različitim odnosima cementa, praškaste komponente, vode i hemijskog dodatka, pri čemu je količina dodatog spršenog sumpora iznosila 30% i 20% u odnosu na ukupnu količinu praškaste komponente za betone P9 i P10, respektivno. Konačno, kod betona P11 i P12 se pošlo od uslova upotrebe velike količine (50%) spršenog recikliranog betona u svojstvu praškaste komponente, uz variranje količine plastifikatora, kako bi se postigla optimalna svojstva u svežem stanju. Kao što se iz tabele vidi, korekcije su

vršene u "grubim" koracima, u cilju sticanja što pouzdanijeg uvida u promenu svojstava betona usled šireg variranja količine komponenata. Osnovni parametri prilikom predmetnih korekcija sastava mešavina bili su:

- 1) Smanjenje količine cementa;
- 2) Smanjenje količine plastifikatora;
- 3) Smanjenje količine vode;
- 4) Poboljšanje svojstava betona u svežem stanju;
- 5) Optimizacija svojstava betona u očvrslom stanju.

Procedura mešanja betona prilikom izrade probnih (pilot) mešavina usvojena je prema sledećem algoritmu:

1. Doziranje krupnih komponenata agregata (II i III frakcija);
2. Doziranje sitnog agregata (I frakcija) i praškaste komponente (krečnjačko brašno, leteći pepeo, sumpor, reciklirani beton);
3. Mešanje u mešalici u trajanju od 60 s, nakon čega se mešalica zaustavlja;
4. Doziranje cementa;
5. Nastavak mešanja u mešalici u trajanju od 30 s;
6. Doziranje vode i superplastifikatora u narednih 30 s, bez prekida rada mešalice;
7. Dodatno mešanje u trajanju od 240 s (4 min).

Krupan agregat doziran je prvi u mešalicu da ne bi došlo do grudvanja sitnog agregata na ivicama bubnja (kofe) i da bi se mešanje pospešilo prirodnim putem, obzirom da krupnija zrna imaju težnju da isplivaju na površinu, a sitnija da padnu na dno prilikom mešanja. Cement je doziran kasnije, u izmešani agregat, kako bi ispunio šupljine između zrna agregata kao najsitnija čvrsta komponenta. Na potpuno isti način kao cement tretirane su i ostale praškaste komponente, odnosno mineralni dodaci. Doziranje vode i superplastifikatora trebalo je da pospeši proces disperzije cementa, prilikom fluidizacije mešavine. Superplastifikator je doziran nakon što je već dozirano oko 50% ukupne količine vode, saglasno važećoj praksi i preporukama proizvođača, a u cilju povećanja efekta njegovog dejstva. Kao što je uobičajeno za sve betone koji se spravljaju sa hemijskim dodacima, a pogotovu za SCC, mešanje je nakon doziranja vode produženo za dodatnih 4 minuta, a trajalo je ukupno 6 minuta. Trajanje faza procesa mešanja je sve vreme kontrolisano pomoću štoperice.

Za svaku mešalicu su, na osnovu receptura za 1 m³, najpre izračunate, a zatim i odmerene količine komponentnih materijala za spravljanje 8 litara betona. Ispitivanje betona P1-P12 u svežem stanju podrazumevalo je merenje rasprostiranja sleganjem, kao najboljeg pokazatelja svojstava SCC. Rezultati ovih ispitivanja prikazani su u okviru tabele 6.13, zajedno sa sastavom betona. Ispitivanja su vršena pri spoljašnjoj temperaturi koja je varirala od 19°C do 25°C. Sa povećanjem količine vode sa 176 kg/m³ na 190 kg/m³ (8%) i superplastifikatora sa 4.95 kg/m³ na 5.59 kg/m³ (sa 1.2% na 1.3% u odnosu na masu cementa), pri količini praškaste komponente od 590-620 kg/m³, rasprostiranje sleganjem je povećano sa 55 cm na 70 cm, odnosno promenjena je klasa SCC (sa klase SF1 na klasu SF2). Kod recepture P9, sa dodatkom 30% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu praškaste komponente, postignuto je relativno malo rasprostiranje od 60 cm (klase SF1).

U sledećoj iteraciji je, u cilju osiguranja robusnosti, odnosno pouzdanijeg ponašanja SCC sa dodatkom letećeg pepela, sumpora i spraćenog recikliranog betona, smanjena količina cementa na 380 kg/m³ (uz nepromenjenu količinu praškastih čestica, od oko 600 kg/m³, uz istovremeno nužno povećanje količine superplastifikatora na 7.6-11.4 kg/m³ (što čini 2-3% u odnosu na količinu cementa, tj. 1.3-1.9% u odnosu na ukupnu količinu praškastih čestica). To je slučaj sa svim mešavinama P4-P12, sa izuzetkom mešavine P9, koja je prethodno diskutovana.

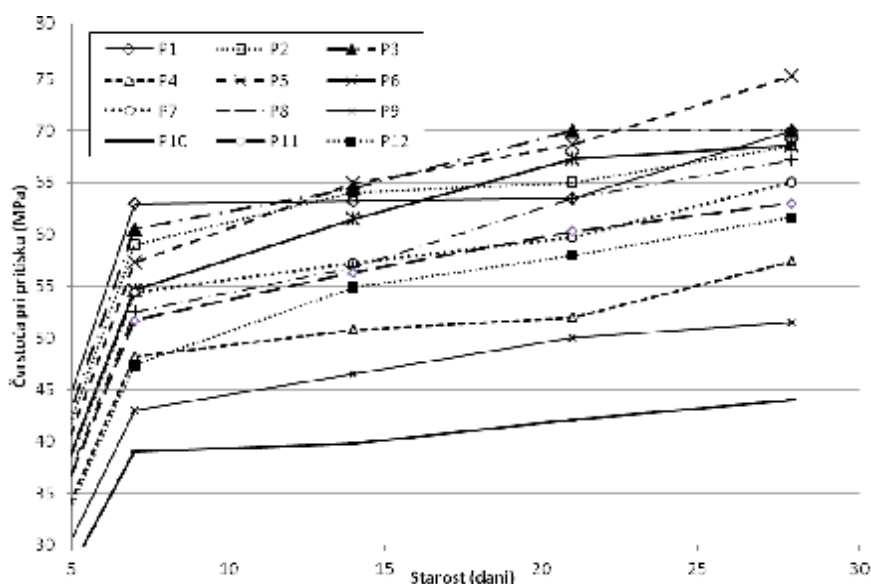
Kod mešavina P4-P12 (sa izuzetkom P9) uočeno je da povećanje količine superplastifikatora ima dalji pozitivan efekat na svojstva svežeg SCC, pri čemu je kod mešavina P7 i P10 uočena pojava segregacije (slika 6.15). Osim grupisanja zrna agregata, koje je uočeno kod obe mešavine, kod mešavine P10 je uočen i tzv. "bliding", praćen isplivavanjem dela spraćenog sumpora na površinu betona. Ispitivanja mešavine P5 su pokazala da sa daljim smanjenjem količine vode i sa povećanjem količine superplastifikatora i iznad uobičajene gornje granice (2%) postoji trend poboljšanja svojstava u svežem stanju. Poređenjem mešavina P7, P10 i P12, koje imaju sličan sastav po svemu osim po mineralnom dodatku, mešavina P12 se pokazala kao najstabilnija, što je posledica upotrebe spraćenog recikliranog betona u količini od 50%. Na osnovu dobijenih rezultata, u daljem iterativnom postupku je ograničena količina superplastifikatora na 2% u odnosu na masu cementa (1.2% u odnosu na ukupnu masu

praškaste komponente betona). Takođe, na osnovu dobijenih rezultata ograničena je i količina vode u betonima, uz mogućnost njenog povećanja u slučajevima kada je sastav praškaste komponente (u prvom redu pri dodatku letećeg pepela) na to ukazivao.



Slika 6.15 Pojava segregacije kod mešavine P7 sa 10% letećeg pepela

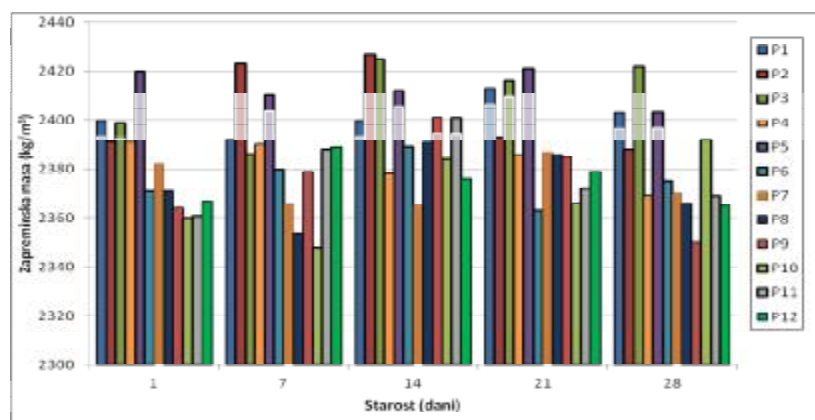
Rezultati ispitivanja SCC betona u očvrsлом stanju podrazumevali su ispitivanje čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase betona. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku prikazani su u okviru dijagrama na slici 6.16, a odgovarajuće zapreminske mase na slici 6.17.



Slika 6.16 Grafički prikaz rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona P1-P12

Probne mešavine spravljane su sa ciljem utvrđivanja takvog sastava koji će betonu obezbediti svojstva samougradljivosti, odnosno svojstva po kojima se on može definisati kao SCC. Iz pomenutog razloga svojstva probnih betona u očvrsлом stanju

nisu bila od primarnog interesa. Ipak, rezultati tih ispitivanja korišćeni su za orijentacionu kontrolu odgovarajućih vrednosti kod SCC mešavina koje su prikazane u poglavljima koja slede. Uopšteno posmatrano, betoni koji su sadržali veću količinu cementa nisu imali značajno veće čvrstoće nego betoni kod kojih je smanjena količina cementa, osim pri malim starostima. Najveće čvrstoće postigli su beton oznake P1, sa 450 kg/m^3 cementa i beton P8, kod koga je upotrebljeno 20% letećeg pepela, naročito pri većim starostima (posledica pucolanske reakcije letećeg pepela). Najmanje čvrstoće imali su betoni sa dodatkom sumpora, što se može objasniti time da sumpor ne doprinosi čvrstoći betona, a sa svojim relativno skromnim mehaničkim karakteristikama čestice sumpora u betonu predstavljaju slaba mesta pri lomu. Najveći prirast čvrstoće imali su betoni sa većim količinama cementa i betoni sa letećim pepelom, a najmanji prirast pokazali su betoni sa sumporom.



Slika 6.17 Grafički prikaz rezultata ispitivanja zapremine mase betona P1-P12

Ispitivanja zapremine masa probnih mešavina korespondiraju sa ispitivanjem čvrstoće pri pritisku odgovarajućih uzoraka. Mešavine sa najvećom količinom cementa imale su najveće vrednosti zapremine mase, dok su mešavine sa sumporom i recikliranim betonom imale najmanje vrednosti zapremine mase. Specifična masa sumpora je manja od specifične mase letećeg pepela i cementa, pa je kod mešavina sa sumporom (mešavine P9 i P10) ovo i očekivano. U slučaju mešavina sa sprasanim betonom, ova konstatacija ne stoji. U ovom slučaju radi se o efektu veće količine sprasnog recikliranog betona u svojstvu filera, koji ima manju zapreminsku masu nego što je specifična masa krečnjačkog brašna. Ovde se napominje da se u sledećoj fazi istraživanja nije išlo na dalju optimizaciju recepture betona, u smislu povećanja količine agregata uz istovremeno smanjenje praškaste komponente; a u cilju povećanja čvrstoće

pri pritisku betona. Takođe, iako su visoke vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona ukazivale na mogućnost smanjenja količine cementa, dalja optimizacija nije vršena ni u ovom pravcu.

6.5 Usvojen postupak spravljanja SCC mešavina

Na osnovu ispitivanja definisanih planom za svaku vrstu SCC proračunate su potrebne količine betona i sa time u vezi potreban broj ciklusa mešanja. Za svaki ciklus mešanja izračunate su količine komponentnih materijala. Potrebne količine materijala odmeravane su neposredno pre spravljanja betona. Za spravljanje betona upotrebljena je laboratorijska mešalica marke "Controls", nominalnog kapaciteta 60 litara, sa fiksnim bubnjem i lopaticama-mešačima na vertikalnoj osovini u osi bubnja. Ova mešalica prikazana je na slici 6.18.



Slika 6.18 Laboratorijska mešalica kapaciteta 60 litara

Količine materijala za mešanje definisane su za svaki pojedinačni ciklus mešanja u zavisnosti od broja i veličine uzoraka betona predviđenih za taj ciklus. Sve komponente odmerene su maseno, uključujući i vodu i superplastifikator. Jedan ciklus mešanja sastojao se iz istih koraka (procedure) koji su definisani prilikom prethodnih ispitivanja. Od pomenute procedure se odstupilo samo u povećanju vremena mešanja sa 4 min na 5 min, nakon što su sve komponente dozirane. Korekcija je proistekla iz razlike u načinu mešanja između dve mešalice; naime mešalica opisana u ovom delu rada sporije i manje efikasno agituje kako suhu smešu komponenata, tako i mešavinu nakon dodavanja tečne faze (vode i superplastifikatora). Konačan efekat je da je zahvaljujući predmetnoj korekciji, u smislu mere konzistencije svežeg betona, konzistencija betona istog sastava spravljenog pomoću pomenute mešalice bila slična konzistenciji iz prethodnih proba.

7. Ispitivanje SCC mešavina sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata

7.1 Ciljevi ispitivanja SCC mešavina sa letećim pepelom

Iako su brojna ispitivanja potvrdila pozitivan efekat upotrebe letećeg pepela kod NVC, kao i kod SCC, u stručnoj javnosti i dalje postoji izvestan otpor da se projektuju ili upotrebljavaju mešavine sa upotrebom LP. Razlozi za to u manjem broju slučajeva su nepoznavanje svojstava materijala, a u većem činjenica da sastav letećeg pepela može značajno da varira, na taj način utičući i na svojstva rezultujućeg betona. Takođe, kolege iz prakse često ukazuju na dodatni problem skladištenja LP na pogonu za proizvodnju; potrebno je obezbediti silose u kojima bi se skladištio LP, i na taj način očuvala u najvećoj mogućoj meri njegova pozitivna svojstva. Moguće rešenje je obezbeđenje takvih silosa kroz stimulacije od strane proizvođača LP (slično kao kod proizvođača superplastifikatora) ili kroz donacije od strane ekoloških agencija i države.

Upotrebljene su dve vrste letećeg pepela, poreklom iz TE "Kostolac" i iz TE "Kolubara", čija se osnovna svojstva u izvesnoj meri razlikuju (videti poglavlje 6). Nadalje je u ispitivanjima celokupna analiza ograničena na uticaj ove dve različite vrste LP, doziranih u različitim količinama.

Takođe, sadržaj LP u sastavu SCC ograničen je na 20% u odnosu na ukupnu masu filera (ukupna masa praškaste komponente u jednom SCC, bez mase cementa) što u slučaju ispitivanih betona predstavlja 12% u odnosu na masu cementa, odnosno 2% u odnosu na ukupnu masu SCC. Još jedan razlog koji je doveo do izbora ovih količina je redukcija uticaja količine LP na robusnost mešavine, dakle veća stabilnost u uslovima promene karakteristika ulaznih komponenata SCC, što takođe implicira veću primenljivost u realnim uslovima, uz uslov primene LP kao industrijskog nusprodukta u SCC.

Najveći broj dosadašnjih istraživanja baziraju se na mogućnosti zamene izvesne količine cementa dodatkom LP, što rezultira neminovnim smanjenjem čvrstoće SCC. Integralni deo postavke problema u ovom istraživanju bio je alternativni pristup, sa

konstantnom količinom cementa (380 kg/m^3 , što je manje nego što se obično koristi u SCC) i korigovanjem količine LP u odnosu na ukupnu količinu praškastog mineralnog dodatka. Ispitivan je širok spektar svojstava SCC u svežem i očvrsлом stanju, koja su od interesa za istraživanja kod betona ovako definisanog sastava.

U cilju produblivanja istraživanja uticaja LP na svojstva SCC, išlo se na istraživanje još jedne, dodatne mešavine SCC sa povećanim sadržajem LP (50% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka, mešavina oznake LP5 u tabeli 7.1. Ovako definisana SCC mešavina imala je nekoliko prednosti, među kojima su najvažnije mogućnost primene većih količina letećeg pepela i istraživanje svojstava ovakvih specifičnih mešavina, koje nisu uobičajene za primenu u praksi.

7.2 Ispitivanja SCC mešavina sa letećim pepelom

Nakon analize rezultata prethodnih ispitivanja (videti poglavlje 6), prilikom kojih su vršene varijacije količine komponenata i praćenje promene svojstava u svežem i očvrsлом stanju, usvojene su konačne recepture SCC sa LP koje su u daljem toku eksperimentalnog rada detaljno istraživane.

Spravlano je ukupno sedam mešavina SCC sa LP, sa sastavom prikazanim u tabeli 7.1. Svi prikazani SCC imali su isti sadržaj cementa (380 kg/m^3), ukupne količine praškaste komponente (600 kg/m^3 – praškasti tip SCC, videti poglavlje 2), kao i odnose i ukupnu količinu sve tri upotrebljene frakcije agregata (1700 kg/m^3).

U pitanju su sledeći samozbijajući betoni:

1. SCC bez dodatka pepela, oznake E1; beton koji je služio kao etalon prilikom poređenja svojstava iste klase čvrstoće SCC bez i sa dodatkom letećeg pepela;
2. SCC bez dodatka pepela, oznake E2; sa povećanom količinom vode, beton koji je služio kao etalon prilikom poređenja svojstava SCC istog sastava u svežem i očvrsлом stanju i radi lakše procene uticaja povećanja količine LP na svojstva u svežem stanju;
3. SCC sa LP (LP1) poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka (filera);

4. SCC sa LP (LP2) poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka;
5. SCC sa LP (LP3) poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka;
6. SCC sa LP (LP4) poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka;
7. SCC sa LP (LP5) poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka, uz povećanu količinu superplastifikatora (3% u odnosu na masu cementa) da bi se postigla slična svojstva SCC u svežem stanju kao kod etalona E1.

Tabela 7.1 Sastav SCC sa letećim pepelom

Mešavina	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
Voda W (kg/m ³)	173	183	183	183	183	183	183
Cement C (kg/m ³)	380	380	380	380	380	380	380
Krečnjačko brašno KB (kg/m ³)	220	220	198	176	198	176	110
Leteći pepeo LP (kg/m ³)	0	0	22	44	22	44	110
Praškasta komp. P=C+KB+LP	600	600	600	600	600	600	600
Pesak (0/4mm) (kg/m ³)	840	840	840	840	840	840	840
Krupan agregat (4/8mm) (kg/m ³)	430	430	430	430	430	430	430
Krupan agregat (8/16mm) (kg/m ³)	430	430	430	430	430	430	430
Superplastifikator (kg/m ³)	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	11.4
Vodocementni faktor W/C	0.455	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482
Vodopraškasti faktor W/P	0.288	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305
Fluidopraškasti faktor F/P	0.301	0.318	0.318	0.318	0.318	0.318	0.324
Superplastifikator GS690 % C	2	2	2	2	2	2	3
Superplastifikator GS690 % P	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.90
LP/P %	0	0	3.7	7.3	3.7	7.3	18.3
LP/C %	0	0	5.8	11.6	5.8	11.6	28.9

7.2.1 Ispitivanja SCC sa letećim pepelom u svežem stanju

Ispitivanja svežeg SCC sa letećim pepelom obavljena su u skladu sa unapred utvrđenim odgovarajućim planom ispitivanja. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 7.2.

Tabela 7.2 Rezultati ispitivanja svojstava u svežem stanju na serijama SCC sa LP

Mešavina	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
Temperatura betona (°C)	23.6	20.6	22.4	23.65	23.9	20.3	22.0
Sadržaj uvučenog vazduha (%)	2.1	1.9	2.1	2.2	1.5	2.0	2.8
Zapreminska masa (kg/m ³)	2413	2397	2393	2376	2391	2370	2347
Rasprostiranje sleganjem (cm)	66.38	76.12	73.75	69.88	70.12	66.38	70.25
Vreme t ₅₀₀ (s)	7.22	2.62	5.00	6.72	5.71	10.91	11.32
Vreme V-levka t _v (s)	22.31	9.73	16.87	20.17	15.92	22.46	27.21
L-boks (H1/H2)	0.92	0.97	0.90	0.90	0.92	0.92	0.95
Faktor segregacije (%)	1.5	3.5	2.9	2.5	3.0	2.0	1.7

7.2.2 Ispitivanja SCC sa letećim pepelom u očvrsлом stanju

Rezultati ispitivanja svojstava SCC sa letećim pepelom u očvrsлом stanju prikazani su u tabelama 7.3-7.11. U pitanju su sledeća ispitivanja:

- Čvrstoća pri pritisku;
- Čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska;
- Čvrstoća pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona;
- Ispitivanje "pull-off" metodom;
- Statički modul elastičnosti;
- Brzina ultrazvuka;
- Dinamički modul elastičnosti;
- Dinamički Poasonov koeficijent;
- Ispitivanja trajnosti betona (prodiranje vode pod pritiskom, dejstvo mraza, dejstvo mraza i soli);
- Ispitivanje skupljanja;
- SEM analiza.

7.2.2.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa letećim pepelom

Ispitivanja čvrstoće pri pritisku su vršena na po pet uzoraka oblika kocke ivice 10 cm pri svakoj starosti betona. Veći broj uzoraka (u odnosu na uobičajena tri) ispitivan je u cilju postizanja veće pouzdanosti metode ispitivanja. Čvrstoća pri pritisku ispitivana je pri starostima od 3, 7, 14, 21, 28, 63, 90, 180 dana, u zavisnosti od programa ispitivanja za konkretnu vrstu SCC, tabela 7.3. U tabeli 7.4 data je brzina prirasta čvrstoće pri pritisku kod ispitivanih mešavina SCC sa LP.

Tabela 7.3 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku f_p [MPa]

Starost (dani)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
3	50.7	48.8	48.2	51.2	48.8	48.8	45.3
7	55.2	53.9	57.8	55.8	58.2	55.4	57.7
14	59.0	58.3	58.0	57.6	62.4	67.2	62.0
21	65.8	59.9	65.0	64.2	65.8	69.8	63.7
28	67.8	62.0	70.0	68.8	69.0	72.4	70.0
63	67.6	63.2	71.0	69.8	72.6	73.2	73.1
90	74.4	70.1	73.0	75.2	73.6	74.4	73.6
180	75.8	71.3	75.6	79.2	76.4	81.0	81.7

Tabela 7.4 Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku f_p

Starost (dani)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
3	0.75	0.79	0.69	0.74	0.71	0.67	0.65
7	0.81	0.87	0.83	0.81	0.84	0.77	0.82
14	0.87	0.94	0.88	0.86	0.90	0.89	0.89
21	0.97	0.97	0.93	0.93	0.95	0.96	0.91
28	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
63	1.00	1.02	1.02	1.05	1.05	1.01	1.05
90	1.10	1.13	1.04	1.09	1.07	1.03	1.04
180	1.12	1.15	1.08	1.15	1.11	1.12	1.17

7.2.2.2 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, čvrstoće pri zatezanju savijanjem i "pull-off" SCC sa letećim pepelom

Čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska ispitivana je na uzorcima oblika cilindra dimenzija $\text{Ø}15\text{H}15$ cm, pri starosti od 28, 63 i 180 dana. Ispitivanja pri zatezanju savijanjem vršena su pri starosti od 28 i 180 dana. Ispitivanja kvaliteta površinskog sloja metodom "pull-off" vršena su pri starosti od 28 dana. Ispitivanja su vršena sa pečatima različitih prečnika, $\text{Ø}20$ mm i $\text{Ø}50$ mm. Vršeno je po pet ispitivanja za jedan beton i za jedan prečnik pečata. Rezultati ispitivanja ovih svojstava očvrslog betona prikazani su u tabeli 7.5.

Tabela 7.5 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem, savijanjem i athezije

Čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska $f_{z,c}$ [MPa]							
Starost (dani)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
28	4.3	4.3	4.3	4.2	4.2	4.4	4.4
63	3.8	3.9	3.8	4.0	4.2	4.8	4.1
180	4.1	4.1	3.9	4.2	3.7	4.4	4.1
Čvrstoća pri zatezanju savijanjem f_{zs} [MPa]							
Starost (dani)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
28	10.7	10.3	10.1	10.4	10.2	11.5	10.6
180	11.4	10.5	10.3	12.2	8.0	8.6	10.4
Athezija f_{at} [MPa]							
Prečnik pečata	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
Ø20	9.08	5.53	7.05	7.30	6.09	5.69	5.35
Ø50	6.23	5.77	5.57	5.80	6.09	6.52	5.37

7.2.2.3 Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti SCC sa letećim pepelom

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti vršeno je na po tri uzorka od svake serije betona. Ispitivanja su vršena pri starosti od 28 i 180 dana. Rezultati ispitivanja prikazani su u okviru tabele 7.6.

Tabela 7.6 Rezultati ispitivanja statičkog modula elastičnosti E_s [GPa]

Starost (dani)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
28	38.4	34.1	37.0	35.1	35.6	35.7	37.3
180	38.7	38.5	40.6	40.9	41.6	41.9	39.4

7.2.2.4 Grafički prikaz odnosa napon-dilatacija kod betona – dijagram σ - ε SCC sa letećim pepelom

Prilikom utvrđivanja statičkog modula elastičnosti E_s paralelno su praćene vrednosti sile na instrumentu prese i očitavanja na ugibomer-satu uređaja za određivanje E_s . U cilju očuvanja opreme ove vrednosti nisu praćene do loma uzorka, već do nivoa opterećenja od oko 60% čvrstoće uzoraka pri pritisku. Za sve ispitivane betone dobijeni su gotovo linearni σ - ε dijagrami, što karakteriše krte betone visokih vrednosti čvrstoće pri pritisku.

7.2.2.5 Rezultati ispitivanja nedestruktivnim metodama (dinamički modul elastičnosti, brzina ultrazvuka i Poasonov koeficijent) SCC sa letećim pepelom

Sa merenjem vrednosti rezonantne frekvencije i brzine ultrazvučnog impulsa počelo se pri starosti od 7 dana. Uzorci su nakon raskalupljivanja negovani i čuvani u vodi, ali su pre svakog ispitivanja pripremljeni sušenjem u trajanju od 2h. Ispitano je po 3 uzorka od svake serije. Ispitivanja su vršena do starosti od 180 dana. Rezultati ovih ispitivanja pri karakterističnim starostima prikazani su u tabeli 7.7.

Tabela 7.7 Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d (GPa), brzine ultrazvuka v (m/s) i dinamičkog Poasonovog koeficijenta μ_d (-) kod SCC sa LP

Dinamički modul elastičnosti E_d [GPa]	Starost (dana)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
	7	44.9	41.6	43.2	42.3	43.4	43.3	41.3
	14	46.0	42.2	44.3	43.4	44.6	44.5	42.6
	21	46.3	42.8	45.0	44.0	45.2	45.1	43.3
	28	46.7	43.4	45.3	44.4	45.6	45.5	43.9
	63	47.8	43.6	46.2	45.4	46.4	46.3	44.2
	90	48.1	43.9	46.7	45.8	47.0	46.9	44.7
	180	49.0	44.1	47.7	46.9	47.6	47.5	45.3
Brzina ultrazvuka v (m/s)	Starost (dana)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
	7	4657	4525	4613	4576	4584	4606	4574
	14	4681	4601	4633	4631	4645	4667	4618
	21	4704	4639	4673	4653	4663	4698	4642
	28	4720	4657	4690	4668	4683	4720	4669
	63	4762	4662	4730	4710	4724	4739	4678
	90	4779	4665	4748	4737	4740	4763	4685
	180	4805	4669	4757	4742	4752	4765	4693
Dinamički Poasonov koeficijent μ_d (-)	Starost (dana)	E1	E2	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
	7	0.235	0.238	0.242	0.238	0.235	0.234	0.249
	14	0.227	0.250	0.233	0.237	0.235	0.234	0.243
	21	0.229	0.252	0.234	0.235	0.231	0.235	0.240
	28	0.228	0.249	0.235	0.234	0.232	0.235	0.239
	63	0.225	0.245	0.234	0.232	0.232	0.230	0.233
	90	0.226	0.248	0.232	0.234	0.229	0.229	0.238
	180	0.222	0.240	0.222	0.221	0.224	0.221	0.220

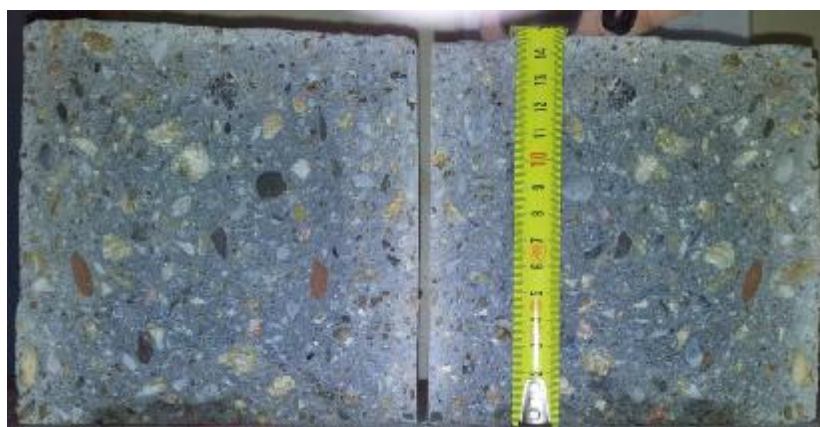
7.2.2.6 Ispitivanje vodonepropustljivosti SCC sa letećim pepelom

Prema postupku opisanom u poglavlju 4, pri starosti od 63 dana, uzorci su izloženi dejstvu vodenog stuba pod pritiskom. Nakon primenjenog postupka, registrovane su maksimalne i prosečne dubine prodora vode u svakom od uzoraka. Maksimalne i

prosečne dubine prodora vode u svakom pojedinačnom uzorku prikazane su u tabeli 7.8 za sve serije ispitivanih SCC, kao i njihove prosečne vrednosti po seriji. Karakterističan izgled uzorka nakon ispitivanja prikazan je na slici 7.1. Može se zapaziti da su zrna agregata ravnomerno raspoređena po celoj masi uzorka, što je postignuto bez ikakvog kompaktiranja.

Tabela 7.8 Dubine h [mm] prodora vode u ispitivane uzorke

Serija	E1		E2		LP1		LP2		LP3		LP4		LP5	
	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.
1	10	14	8	16	11	16	9	17	10	15	9	14	11	15
2	9	15	9	16	10	16	9	16	9	17	10	15	10	17
3	10	16	11	17	10	17	10	15	9	16	11	17	9	15
Prosečna vrednost:	9.7	15.0	9.3	16.3	10.3	16.3	9.3	16.0	9.3	16.0	10.0	15.3	10.0	15.7



Slika 7.1 Izgled poprečnog preseka uzorka nakon loma po izvodnici u cilju ispitivanja vodonepropustljivosti sa vidljivim tragom prodora vode

7.2.2.7 Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza SCC sa letećim pepelom

Kao što je već ranije navedeno, ispitivanju otpornosti na dejstvo mraza podvrgnuto je samo pet vrsta betona sa dodatkom letećeg pepela, odnosno betoni oznake E1, LP1, LP2, LP3 i LP4. Uzorci oblika kocke ivice oko 50 mm izlagani ovom ispitivanju isečeni su od kocki ivice 10 cm i ispitivani do isteka 200 ciklusa. Pad čvrstoće nakon 150 ciklusa i nakon 200 ciklusa u odnosu na etalone (uzorke koji nisu izlagani dejstvu mraza) prikazan je u tabelama 7.9 i 7.10. Radi pouzdanijeg utvrđivanja rezultata, pri svakoj starosti i za svaku vrstu betona ispitivano je po pet uzoraka.

Tabela 7.9 Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza nakon 150 ciklusa

SERIJA	ETALONI		MRAZ 150c		$\Delta f_{p,150c}$ (%)
	γ (kg/m ³)	f_p (MPa)	γ (kg/m ³)	f_p (MPa)	
E1	2380	55.6	2359	50.4	9.4
LP1	2418	66.0	2369	60.7	8.0
LP2	2350	67.4	2342	61.7	8.5
LP3	2393	70.6	2342	64.6	8.5
LP4	2371	75.3	2348	68.5	9.0

Tabela 7.10 Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza nakon 200 ciklusa

SERIJA	ETALONI		MRAZ 200c		$\Delta f_{p,200c}$ (%)
	γ (kg/m ³)	f_p (MPa)	γ (kg/m ³)	f_p (MPa)	
E1	2379	71.9	2360	63.5	11.7
LP1	2382	73.4	2324	65.0	11.4
LP2	2352	73.0	2295	63.3	13.3
LP3	2394	73.9	2323	63.8	13.7
LP4	2353	76.4	2324	66.3	13.2

Dispozicija ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza uzoraka prikazana je na slici 7.2.



Slika 7.2 Izgled uzoraka za ispitivanje otpornosti na dejstvo mraza

Na osnovu analize rezultata ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza, može se primetiti da su ispitane vrste betona imale slično ponašanje posle odgovarajućeg broja ciklusa smrzavanje-odmrzavanje (kako posle 150, tako i posle 200 ciklusa).

7.2.2.8 Rezultati ispitivanja otpornosti na simultano dejstvo mraza i soli SCC sa letećim pepelom

Ispitivanju otpornosti na dejstvo mraza i soli podvrgnuto je samo pet vrsta betona sa dodatkom letećeg pepela, i to: betoni E1, LP1, LP2, LP3 i LP4. Ciklusima dejstva mraza i soli izlagani su uzorci prikazani na slici 7.3.

Na slici 7.4 prikazan je jedan od tri uzorka betona E1 kod koga je došlo do najznačajnijeg oštećenja površine. U tabeli 7.11 je prikazan gubitak mase za svaku od ispitivanih serija, nakon 25 ciklusa dejstva mraza i soli, kao i dubina oštećenja.



Slika 7.3 Uzorci pre (levo) i posle (desno) izlaganja dejstvu mraza i soli



Slika 7.4 Uzorak E1-2 na kome su golim okom primetna neznatna oštećenja površine

Tabela 7.11 Gubitak mase na površini izloženoj dejstvu mraza i soli za odmrzavanje

SERIJA	Gubitak mase (mg/mm ²)	Dubina oštećenja (mm)
E1	0.11	0.5
LP1	0.10	0.3
LP2	0.08	0.4
LP3	0.09	0.4
LP4	0.10	0.4

7.2.2.9 Rezultati ispitivanja skupljanja SCC sa letećim pepelom

Praćenje smanjenja dimenzija uzoraka SCC obavljeno je na po tri uzorka oblika prizme dimenzija 12x12x36 cm, za svaki od SCC oznake E1, LP1, LP2, LP3 i LP4. Na svakom od uzoraka obeležene su i "ispikovane" baze, a zatim i postavljene sa obe strane uzorka i pričvršćeni instrumenti.

Uzorci su smešteni u prostoriju sa kontrolisanim uslovima, gde su stajali do kraja ispitivanja. Da bi se minimizovao uticaj podloge na kontaktu sa uzorcima, uzorci su postavljeni na PVC foliju. Očitavanja vrednosti skupljanja vršena su pri malim starostima na kraćim vremenskim razmacima, a sa proticanjem vremena od trenutka spravljanja SCC ovi vremenski razmaci su povećavani. Rezultati ovog ispitivanja, zbog velikog broja podataka ovde neće biti dati tabelarno, već će se dalje u radu koristiti grafička interpretacija dobijenih rezultata.

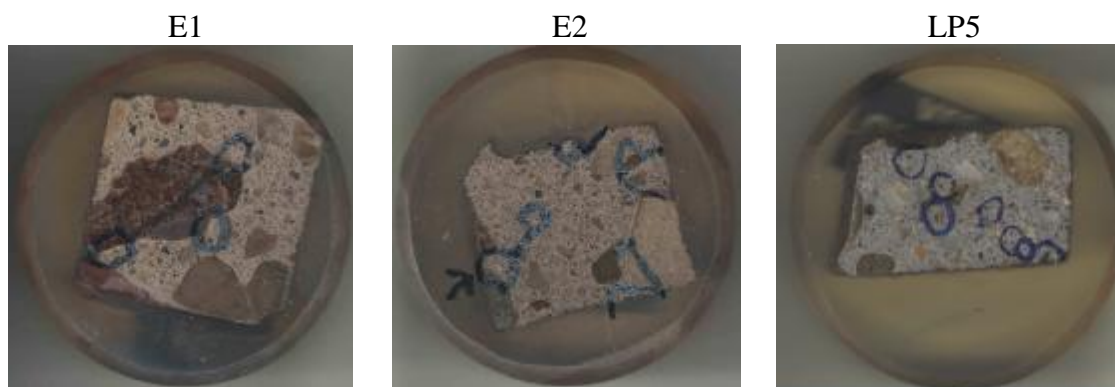
7.2.2.10 SEM analiza SCC sa letećim pepelom

U cilju karakterizacije strukture predmetnih SCC sa LP, pripremljeni su i ispitani uzorci betona E1, E2 i LP5 pomoću SEM uređaja, sa pratećim EDS analizama (metoda je opisana u poglavlju 4). U pitanju je pre svega kvalitativna analiza, sa izvesnim aspektima semikvantitativnog karaktera. Naime, EDS analiza je kvantitativna analiza posmatrane mikropovršine betona (manje ili veće površine, u zavisnosti od debljine snopa elektrona upotrebljenog u SEM uređaju), međutim potreban je veći broj ispitivanja na većem broju uzoraka da bi se rezultati ove analize pouzdano (statistički opravdano) smatrali kvantitativnim. Betoni E1 i E2 su odabrani za ovu analizu iz razloga njihovog međusobnog poređenja (različita količina vode u recepturi SCC), a analiza sa aspekta ponašanja zrna letećeg pepela obavljena je na očvrslom betonu LP5. Mešavina LP5 (sa najvećim procentom letećeg pepela, 50% u odnosu na masu mineralnog dodatka) odabrana je da bi se lakše uočila zrna letećeg pepela u očvrslom SCC, a time i obavila bolja karakterizacija mikrostrukturnog aspekta SCC sa LP.

Za svaku vrstu betona odabran je po jedan uzorak. Radi što bolje reprezentativnosti SCC, svaki od uzoraka za SEM analizu dobijen je postupkom iz više faza. U prvoj fazi su delovi uzoraka SCC (betonske prizme dimenzija 12x12x36 cm), preostali nakon ispitivanja čvrstoće pri savijanju, sečeni (pomoću testere sa krunicom od tehničkog dijamanta) da bi se dobile kocke dimenzija oko 4 cm. Vizuelnom procenom tako dobijenih kocki za svaki tip SCC izdvojene su po tri reprezentativne kocke koje su dalje tretirane. Pomoću brusilice su u sledećem koraku od pomenutih kocki odvajani manji komadi SCC (po najmanje pet komada) koji su dalje posmatrani pomoću optičkog

mikroskopa (sa uvećanjem 10x) u cilju prepoznavanja i karakterizacije reprezentativne strukture SCC. Prilikom vizuelne mikroskopske karakterizacije je, sa aspekta reprezentativnosti, svaki od komada posmatranog betona rangiran i konačno je za svaki SCC utvrđen uzorak koji najbolje predstavlja strukturu konkretne vrste SCC.

U sledećem koraku, odabrani reprezentativni uzorci SCC su polirani i zatapani u masu epoksida, u cilju pripreme za SEM analizu. Nakon toga je pomoću optičkog mikroskopa sagledana struktura polirane površine svakog od uzoraka, i definisan program eksperimenta obavljenog pomoću SEM uređaja. Program eksperimenta je definisan utvrđivanjem i ucrtavanjem oblasti interesovanja na posmatranom uzorku, kao i redosled SEM analize označenih oblasti na uzorku. Na slici 7.5 su prikazani pripremljeni uzorci za SEM analizu, sa ucrtanim oblastima ispitivanja (program eksperimenta), i to redom: Izgled uzorka dobijenog od samozbijajućeg betona oznake E1, zatim uzorka dobijenog od samozbijajućeg betona oznake E2 i uzorka dobijenog od samozbijajućeg betona oznake LP5 (sa letećim pepelom).



Slika 7.5 Izgled uzoraka pripremljenih za SEM analizu

7.3 Ispitivanja SCC mešavina sa sprasnim recikliranim betonom

Kod velikog broja armiranobetonskih konstrukcija, uglavnom izgrađenih sredinom prošlog veka, poslednjih godina postavlja se pitanje dalje upotrebljivosti, pa se pribegava njihovoj sanaciji, rekonstrukciji ili rušenju, u zavisnosti od toga koja strategija je primenljiva u određenom trenutku i situaciji. Rušenje armiranobetonskih konstrukcija rezultira velikim količinama građevinskog otpada, u kome otpadni beton zauzima najveći udeo [168].

Istraživanja aspekata recikliranja otpadnog betona, u svojstvu recikliranog agregata za spravljanje novog betona u velikom broju slučajeva davala su pozitivne rezultate, a izvori iz literature ukazuju na to da se može koristiti i najsitnija, praškasta komponenta recikliranog betona (videti poglavlje 2).

U okviru poglavlja 6. detaljno su prikazani poreklo i karakteristike praškastih mineralnih dodataka na bazi recikliranog betona (dodaci A, B i C), upotrebljenih za spravljanje SCC u okviru ovog rada. Osim odgovora na pitanje da li se takav materijal može upotrebiti za spravljanje SCC odgovarajućih svojstava u svežem stanju, u očekivane ciljeve rada na ovoj temi ubrajaju se i istraživanja svojstava očvrslilih SCC sa spršenim recikliranim betonom.

7.3.1 Usvojene recepture SCC sa spršenim recikliranim betonom

Nakon analize rezultata prethodnih ispitivanja na probnim mešavinama (prikazanih u poglavlju 6), prilikom kojih su vršene varijacije količine komponenata i praćenje promene svojstava u svežem i očvrslom stanju, usvojene su konačne recepture SCC koje su u daljem toku eksperimentalnog rada detaljno istraživane. Kada je reč o prethodnim probama, recepture oznake P11 i P12 sadržale su veliku količinu spršenog recikliranog betona, čak 50% u odnosu na ukupnu količinu mineralnog dodatka. Obzirom da se radi o SCC betonima, najveća pažnja poklonjena je njihovom ponašanju u svežem stanju, tako da su kao osnovni parametri usvojena svojstva u svežem stanju, pre svega vrednost rasprostiranja od preko 55 cm, na osnovu metode rasprostiranja sleganjem.

Pored zajedničkog etalona E2, spravljene su još tri mešavine SCC sa dodatkom 50% spršenog recikliranog betona u odnosu na masu mineralnog dodatka. Oznake mešavina su zajedno sa sastavom prikazane u tabeli 7.12. Svi prikazani SCC imali su isti sadržaj cementa (380 kg/m^3), praškaste komponente (600 kg/m^3 – praškasti tip SCC, videti poglavlje 2), kao i odnose i ukupnu količinu sve tri upotrebljene frakcije agregata (1700 kg/m^3).

Spravljeni su sledeći samozbijajući betoni:

1. SCC bez dodatka sprašenog recikliranog betona, oznake E2, već pomenut u delu 7.2, sa identičnim sastavom prikazanim u tabeli 7.1;
2. SCC oznake R0, sa recikliranim praškastim mineralnim dodatkom A, u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka;
3. SCC oznake R50, sa recikliranim praškastim mineralnim dodatkom B, u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka;
4. SCC oznake R100, sa recikliranim praškastim mineralnim dodatkom C, u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu praškastog mineralnog dodatka.

Tabela 7.12 Sastav SCC sa sprašenim recikliranim betonom

Mešavina	E2	R0	R50	R100
Voda W(kg/m ³)	183	183	183	183
Cement C (kg/m ³)	380	380	380	380
Krečnjačko brašno KB (kg/m ³)	220	110	110	110
Sprašeni reciklirani beton SRB (kg/m ³)	0	110	110	110
P=C+KB+SRB	600	600	600	600
Pesak (0/4mm) (kg/m ³)	840	840	840	840
Krupan agregat (4/8mm) (kg/m ³)	430	430	430	430
Krupan agregat (8/16mm) (kg/m ³)	430	430	430	430
Superplastifikator (kg/m ³)	7.6	7.6	7.6	7.6
Vodocementni W/C faktor	0.482	0.482	0.482	0.482
Vodopraškasti W/P faktor	0.305	0.305	0.305	0.305
Fluidopraškasti F/P faktor	0.318	0.318	0.318	0.318
Plastifikator GS690 % C	2.0	2.0	2.0	2.0
Plastifikator GS690 % P	1.27	1.27	1.27	1.27
SRB/C %	0	28.95	28.95	28.95
SRB/P %	0	18.3	18.3	18.3

7.3.2 Ispitivanja SCC sa sprašenim recikliranim betonom u svežem stanju

Rezultati ispitivanja SCC sa sprašenim recikliranim betonom u svežem stanju su prikazani u tabeli 7.13.

Tabela 7.13 Rezultati ispitivanja svojstava u svežem stanju na serijama SCC sa sprašenim recikliranim betonom

Mešavina	E2	R0	R50	R100
Temperatura betona (°C)	20.6	21.2	21.6	22.6
Sadržaj uvučenog vazduha (%)	1.9	2.3	2.2	2.4
Zapreminska masa (kg/m ³)	2397	2387	2389	2391
Rasprostiranje sleganjem (cm)	76.1	69.5	72.0	73.0
Vreme t ₅₀₀ (s)	2.62	4.78	4.85	4.53
Vreme V-levka t _v (s)	9.73	13.23	11.90	11.37
L-boks (H1/H2)	0.97	0.95	0.95	0.95
Faktor segregacije (%)	3.5	4.6	4.8	4.0

7.3.3 Ispitivanja SCC sa sprašenim recikliranim betonom u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja svojstava SCC sa sprašenim recikliranim betonom prikazani su u tabelama 7.14-7.18. U pitanju su sledeća ispitivanja:

- Čvrstoća pri pritisku;
- Čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska;
- Čvrstoća pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona;
- Ispitivanje "pull-off" metodom;
- Brzina ultrazvuka;
- Dinamički modul elastičnosti;
- Dinamički Poasonov koeficijent;
- Ispitivanja trajnosti betona (prodiranje vode pod pritiskom);
- SEM analiza.

7.3.3.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa sprašenim recikliranim betonom

Ispitivanja čvrstoće pri pritisku su vršena na po tri uzorka oblika kocke ivice 10 cm pri svakoj starosti betona. Čvrstoća pri pritisku ispitivana je pri starostima od 3, 7, 14, 21 i 28 dana, u zavisnosti od programa ispitivanja za konkretnu vrstu SCC, tabela 7.14. Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku u odnosu na čvrstoću uzoraka starosti 28 dana prikazana je u tabeli 7.15.

Tabela 7.14 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku f_p [MPa] SCC sa spršenim recikliranim betonom

Starost (dani)	E2	R0	R50	R100
3	48.8	46.0	46.9	49.2
7	53.9	47.6	52.0	56.6
14	58.3	51.0	58.0	57.3
21	59.9	53.2	58.4	60.8
28	62.0	60.0	59.2	61.6

Tabela 7.15 Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku f_p SCC sa spršenim recikliranim betonom

Starost (dani)	E2	R0	R50	R100
3	0.79	0.77	0.79	0.80
7	0.87	0.79	0.88	0.92
14	0.94	0.85	0.98	0.93
21	0.97	0.89	0.99	0.99
28	1.00	1.00	1.00	1.00

7.3.3.2 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, čvrstoće pri zatezanju savijanjem i ispitivanja "pull-off" SCC sa spršenim recikliranim betonom SCC sa spršenim recikliranim betonom

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem dobijeni su pri starosti od 63 dana, prilikom ispitivanja vodonepropustljivosti uzoraka oblika cilindra prečnika osnove 15 cm i visine 15 cm. Na osnovu dobijenih sila loma ispitivanih uzoraka dobijene su vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Nakon ispitivanja nedestruktivnim metodama, svi upotrebljeni uzorci su ispitani lomom koncentrisanom silom u sredini raspona, pri starosti od 180 dana. Ispitivanja kvaliteta površinskog sloja metodom "pull-off" vršena su pri starosti od 180 dana. Ispitivanja su vršena sa pečatima različitih prečnika, Ø20 mm i Ø50 mm. Vršeno je po pet ispitivanja za jedan beton i za jedan prečnik pečata. Rezultati pomenutih ispitivanja prikazani su u tabeli 7.16.

Tabela 7.16 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem, savijanjem i athezije

Čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska $f_{z,c}$ [MPa]				
Starost (dani)	E2	R0	R50	R100
63	3.90	3.37	3.58	3.51
Čvrstoća pri zatezanju savijanjem f_{zs} [MPa]				
Starost (dani)	E2	R0	R50	R100
180	10.5	9.4	9.2	8.9
Atezijska čvrstoća f_{at} [MPa]				
Ø	E2	R0	R50	R100
Ø20	5.53	4.58	5.20	5.14
Ø50	5.77	5.82	6.04	6.32

7.3.3.3 Rezultati ispitivanja nedestruktivnim metodama (dinamički modul elastičnosti, brzina ultrazvuka i Poasonov koeficijent) SCC sa spršenim recikliranim betonom

Sa merenjem vrednosti rezonantne frekvencije i brzine ultrazvučnog impulsa počelo se pri starosti 7 dana. Uzorci su nakon raskalupljivanja negovani i čuvani u vodi, ali su pre svakog ispitivanja pripremljeni sušenjem u trajanju od 2h. Ispitano je po 3 uzorka od svake serije. Ispitivanja su vršena do starosti od 28 dana, sa kontrolnim merenjem pri starosti od 180 dana. Rezultati ovih ispitivanja pri karakterističnim starostima prikazani su u tabeli 7.17.

Tabela 7.17 Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d (GPa), brzine ultrazvuka v (m/s) i dinamičkog Poasonovog koeficijenta μ_d (-) kod SCC sa spršenim recikliranim betonom

Dinamički modul elastičnosti E_d [GPa]	Starost (dana)	E2	R0	R50	R100
	7	41.6	41.8	42.6	42.0
	14	42.2	42.7	43.5	42.9
	21	42.8	43.6	44.4	43.7
	28	43.4	44.2	44.9	44.2
	180	44.1	44.3	44.9	44.4
Brzina ultrazvuka v (m/s)	Starost (dana)	E2	R0	R50	R100
	7	4525	4563	4592	4589
	14	4601	4603	4628	4612
	21	4639	4642	4660	4630
	28	4657	4669	4669	4681
	180	4669	4691	4706	4709
Dinamički Poasonov koeficijent μ_d (-)	Starost (dana)	E2	R0	R50	R100
	7	0.238	0.247	0.250	0.251
	14	0.250	0.245	0.247	0.245
	21	0.252	0.243	0.244	0.239
	28	0.249	0.242	0.240	0.246
	180	0.240	0.240	0.243	0.244

7.3.3.4 Ispitivanje vodonepropustljivosti SCC sa spršenim recikliranim betonom

Prema postupku opisanom u poglavlju 4, uzorci su izloženi dejstvu vodenog stuba pod pritiskom. Ovo ispitivanje obavljeno je pri starosti uzoraka od 63 dana. Nakon primenjenog postupka, registrovane su maksimalne i prosečne dubine prodora vode u svakom od uzoraka. Maksimalne i prosečne dubine prodora vode u svakom pojedinačnom uzorku prikazane su u tabeli 7.18 za sve serije ispitivanih SCC, kao i njihove prosečne vrednosti po seriji. Karakterističan izgled poprečnog preseka uzorka nakon loma po izvodnici u cilju ispitivanja vodonepropustljivosti prikazan je na slici 7.6. Može se zapaziti da su zrna agregata ravnomerno raspoređena po celoj masi uzorka, što je postignuto bez ikakvog kompaktiranja.

Tabela 7.18 Dubine h [mm] prodora vode u ispitivane uzorke SCC sa spršenim recikliranim betonom

Serija	E2		R0		R50		R100	
	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.	Pros.	Max.
1	8	16	12	18	10	19	11	18
2	9	16	10	16	12	17	10	17
3	11	17	11	17	10	16	12	18
Prosečna vrednost:	9.3	16.3	11.0	17.0	10.7	17.3	11.0	17.7

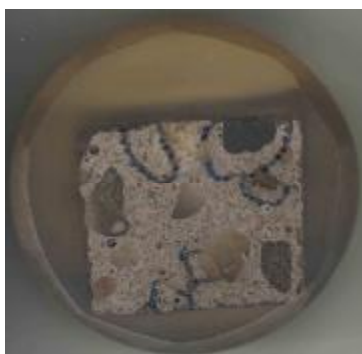


Slika 7.6 Poprečni presek uzorka sa tragom prodora vode (SCC sa spršenim recikliranim betonom)

7.3.3.5 SEM analiza SCC sa spršenim recikliranim betonom

Za kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture SCC sa spršenim recikliranim betonom pripremljen je samo jedan reprezentativan uzorak, čija mikrostruktura je

analizirana pomoću SEM uređaja. U pitanju je polirani uzorak, prikazan na slici 7.7. Beton od koga je uzorak napravljen sadržao je mineralni dodatak oznake C, dobijen spravljanjem recikliranog peska od betona koji je u svom sastavu sadržao 100% recikliranog krupnog agregata (beton sa prirodnim peskom i recikliranim krupnim agregatom). SCC sa ovim mineralnim dodatkom (oznake R100) je odabran iz razloga što je u njegovom sastavu očekivan najveći sadržaj sprasene cementne paste.



Slika 7.7 Izgled poliranog uzorka dobijenog od samozbijajućeg betona oznake R100

7.4 Ispitivanja SCC mešavina sa sprasnim sumporom

Prema saznanjima autora ovog rada, tematikom upotrebe sumpora u cementnim kompozitima ne bavi se veliki broj naučnih radova iz ove oblasti. U ovom delu biće predstavljeno naučno istraživanje koje je obuhvatalo definisanje receptura SCC mešavina sa dodatkom sprasnog sumpora i poređenje svojstava tako dobijenih kompozita sa referentnom mešavinom.

7.4.1 Usvojene recepture SCC sa sprasnim sumporom

Nakon analize rezultata prethodnih ispitivanja (probni mešavina razmatranih u poglavlju 6), prilikom kojih su vršene varijacije količine komponenata i praćenje promene svojstava u svežem i očvrslom stanju, usvojene su konačne recepture SCC koje su u daljem toku eksperimentalnog rada detaljno istraživane.

Istraživano je ukupno pet uporednih mešavina SCC, sa sastavom prikazanim u tabeli 7.19. Svi prikazani SCC imali su isti sadržaj cementa (380 kg/m^3), praškaste

komponente (600 kg/m^3 – praškasti tip SCC), kao i odnose i ukupnu količinu sve tri upotrebene frakcije agregata (1700 kg/m^3).

U pitanju su sledeći samozbijajući betoni:

1. SCC bez dodatka sumpora, oznake E2, već predstavljen u delovima 7.2 i 7.3 sa identičnim sastavom prikazanim u tabeli 7.1;
2. SCC sa dodatkom 2% sprāšenog sumpora u odnosu na ukupnu količinu praškaste komponente betona, oznake S2;
3. SCC sa dodatkom 5% sprāšenog sumpora u odnosu na ukupnu količinu praškaste komponente betona, oznake S5;
4. SCC sa dodatkom 10% sprāšenog sumpora u odnosu na ukupnu količinu praškaste komponente betona, oznake S10;
5. SCC sa dodatkom 20% sprāšenog sumpora u odnosu na ukupnu količinu praškaste komponente betona, oznake S20.

Tabela 7.19 Sastav SCC sa sprāšenim sumporom

Mešavina	E2	S2	S5	S10	S20
Voda W (kg/m^3)	183	183	183	183	183
Cement C (kg/m^3)	380	380	380	380	380
Krečnjačko brašno KB (kg/m^3)	220	215.6	209	198	176
Sprašeni sumpor S (kg/m^3)	0	4.4	11	22	44
Praškasta komponenta $P=C+KB+S$	600	600	600	600	600
Pesak (0/4mm) (kg/m^3)	840	840	840	840	840
Krupan agregat (4/8mm) (kg/m^3)	430	430	430	430	430
Krupan agregat (8/16mm) (kg/m^3)	430	430	430	430	430
Superplastifikator (kg/m^3)	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
Vodocementni W/C faktor	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482
Vodopraškasti W/P faktor	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305
Fluidopraškasti F/P faktor	0.318	0.318	0.318	0.318	0.318
Plastifikator GS690 % C	2	2	2	2	2
Plastifikator GS690 % P	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
S/C %	0	0.73	1.83	3.67	7.33
S/P %	0	1.16	2.90	5.79	11.58

7.4.2 Ispitivanja SCC sa sprāšenim sumporom u svežem stanju

Rezultati ispitivanja SCC sa sprāšenim sumporom u svežem stanju su prikazani u tabeli 7.20.

Tabela 7.20 Rezultati ispitivanja svojstava u svežem stanju na SCC sa prašenim sumporom

Mešavina	E2	S2	S5	S10	S20
Temperatura betona (°C)	20.6	20.7	20.9	21.2	21.4
Sadržaj uvučenog vazduha (%)	1.9	1.2	1.2	1.7	1.9
Zapreminska masa (kg/m ³)	2397	2394	2387	2381	2375
Rasprostiranje sleganjem (cm)	76.1	82.0	82.0	78.0	77.5
Vreme t ₅₀₀ (s)	2.62	2.59	2.84	3.42	3.07
Vreme V-levka t _v (s)	9.73	8.21	10.48	8.87	9.21
L-boks (H1/H2)	0.97	0.98	0.98	0.96	0.96
Faktor segregacije (%)	3.5	4.3	3.8	4.2	3.6

7.4.3 Ispitivanja SCC sa prašenim sumporom u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja svojstava očvrslilih SCC sa prašenim sumporom prikazani su u tabelama 7.21-7.24. U pitanju su sledeća ispitivanja:

- Čvrstoća pri pritisku;
- Čvrstoća pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona;
- Ispitivanje "pull-off" metodom;
- Brzina ultrazvuka;
- Dinamički modul elastičnosti;
- Dinamički Poasonov koeficijent;
- SEM analiza.

7.4.3.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa prašenim sumporom

Čvrstoća pri pritisku ispitivana je pri starostima od 3, 7, 14 i 28 dana. Ispitivanja čvrstoće pri pritisku su vršena na po tri uzorka oblika kocke ivice 10 cm, za sve starosti. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku SCC sa dodatkom prašenog sumpora prikazani su u okviru tabele 7.21. Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku u odnosu na čvrstoću uzoraka starosti 28 dana prikazana je u tabeli 7.22.

Tabela 7.21 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku f_p [MPa] SCC sa prašenim sumporom

Starost (dani)	E2	S2	S5	S10	S20
3	48.8	48.3	46.1	46.1	44.1
7	53.9	53.0	52.0	49.2	47.9
14	58.3	58.0	58.0	53.4	53.0
28	62.0	61.5	62.2	54.8	54.6

Tabela 7.22 Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku f_p SCC sa spršenim sumporom

Starost (dani)	E2	S2	S5	S10	S20
3	0.79	0.79	0.74	0.84	0.81
7	0.87	0.86	0.84	0.90	0.88
14	0.94	0.94	0.93	0.97	0.97
28	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

7.4.3.2 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem SCC sa spršenim sumporom

Nakon ispitivanja nedestruktivnim metodama, svi upotrebljeni uzorci su ispitani lomom koncentrisanom silom u sredini raspona, pri starosti od 180 dana. Ispitivanja kvaliteta površinskog sloja metodom "pull-off" vršena su pri starosti od 180 dana. Ispitivanja su vršena sa pečatima različitih prečnika, Ø20 mm i Ø50 mm. Vršeno je po pet ispitivanja za svaku vrstu betona i svaki prečnik pečata. Rezultati ovih ispitivanja prikazani su u tabeli 7.23.

Tabela 7.23 Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem i athezije

Čvrstoća pri zatezanju savijanjem f_{zs} [MPa]					
Starost (dani)	E2	S2	S5	S10	S20
180	10.5	8.6	8.1	7.8	6.9
Atezijska f_{at} [MPa]					
Ø	E2	S2	S5	S10	S20
Ø20	5.53	6.82	6.62	7.50	6.36
Ø50	5.77	6.25	6.13	6.28	5.82

7.4.3.3 Rezultati ispitivanja nedestruktivnim metodama (dinamički modul elastičnosti, brzina ultrazvuka i Poasonov koeficijent) SCC sa spršenim sumporom

Sa merenjem vrednosti rezonantne frekvencije i brzine ultrazvučnog impulsa počelo se pri starosti 7 dana. Uzorci su nakon raskalupljivanja negovani i čuvani u vodi, ali su pre svakog ispitivanja pripremljeni sušenjem u trajanju od 2h. Ispitano je po 3 uzorka od svake serije. Ispitivanja su vršena do starosti od 28 dana, sa jednim kontrolnim merenjem pri starosti od 180 dana. Rezultati ovih ispitivanja pri karakterističnim starostima prikazani su u tabeli 7.24.

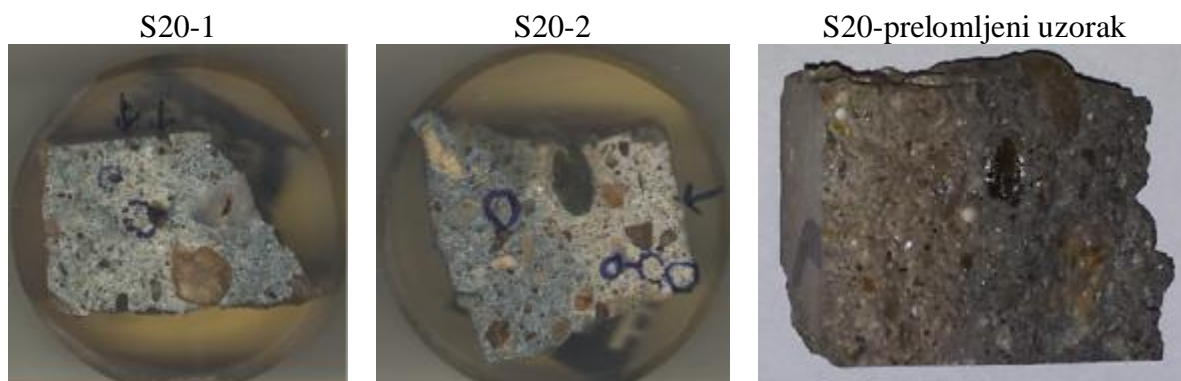
Tabela 7.24 Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d [GPa] SCC sa sprašenim sumporom

Dinamički modul elastičnosti E_d [GPa]	Starost (dana)	E2	S2	S5	S10	S20
	7	41.6	40.8	40.4	40.0	40.2
	14	42.2	42.1	41.8	41.4	41.0
	21	42.8	42.6	42.2	41.6	41.4
	28	43.4	43.4	42.8	42.2	41.5
	180	44.1	43.8	43.8	42.5	41.6
Brzina ultrazvuka v (m/s)	Starost (dana)	E2	S2	S5	S10	S20
	7	4525	4543	4511	4478	4483
	14	4601	4598	4561	4523	4540
	21	4639	4615	4602	4589	4577
	28	4657	4636	4622	4607	4589
	180	4669	4673	4676	4638	4630
Dinamički Poasonov koeficijent μ_d (-)	Starost (dana)	E2	S2	S5	S10	S20
	7	0.239	0.254	0.253	0.250	0.245
	14	0.250	0.252	0.248	0.243	0.250
	21	0.252	0.250	0.253	0.256	0.254
	28	0.248	0.245	0.250	0.254	0.255
	180	0.239	0.244	0.252	0.251	0.257

7.4.3.4 SEM analiza SCC sa sprašenim sumporom

Za kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture SCC sa sprašenim sumporom pripremljena su tri reprezentativna uzorka, čija mikrostruktura je analizirana pomoću SEM uređaja. Dva uzorka su odabrana, pripremljena i polirana, na isti način kao i uzorci za SEM analizu SCC sa letećim pepelom i sprašenim recikliranim betonom. Treći uzorak je ispitivan bez poliranja - takvi uzorci se nazivaju "prelomljeni uzorci" i kod njih je takođe moguće dobiti relevantne informacije o mikrostrukтури (homogenosti, poroznosti, karakteru očvrslog cementnog kamena i veze između čestica u očvrsлом SCC). Prednost posmatranja prelomljenih uzoraka je u manje narušenoj strukturi, jer se poliranjem u izvesnoj meri menja struktura površine uzorka. Zbog potencijalne destrukcije površine sa jedne, i male otpornosti na mehanički tretman sprašenog sumpora sa druge strane, programom ispitivanja SCC sa sprašenim sumporom je obuhvaćen i prelomljeni uzorak. Na slici 7.8 su prikazana tri pomenuta uzorka SCC sa sprašenim sumporom. Sva tri uzorka su dobijena od SCC sa 20% sprašenog sumpora, da bi se povećala mogućnost uočavanja čestica sumpora u matrici betona i da bi se na

taj način došlo do što većeg broja reprezentativnih podataka o mikrostrukturi ovakvih betona.



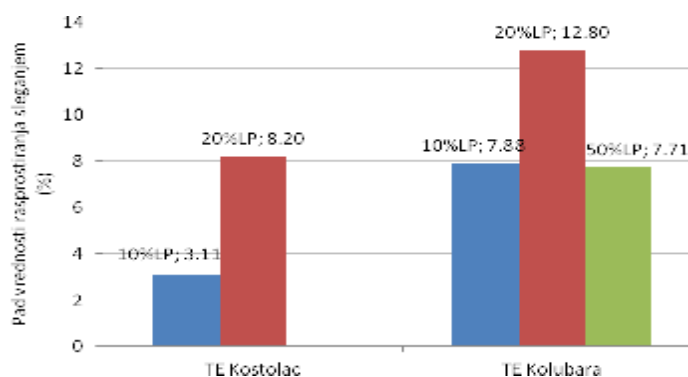
Slika 7.8 Izgled uzoraka dobijenih od SCC sa spršenim sumporom

8. Analiza i diskusija rezultata ispitivanja SCC mešavina u svežem stanju

8.1. Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u svežem stanju SCC mešavina sa letećim pepelom

U ovom delu će biti razmatrana svojstva spravljenih mešavina sa letećim pepelom (LP) u svežem stanju, dobijena na osnovu eksperimentalnih ispitivanja. U pitanju je sedam mešavina i to: dve referentne SCC mešavine (oznake E1 i E2, spravljene bez letećeg pepela), zatim SCC mešavine spravljene sa 10%, 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" (oznake LP1 i LP2) u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (filera), kao i SCC mešavine spravljene sa 10%, 20% i 50% letećeg pepela iz TE "Kolubara" (oznake LP3, LP4 i LP5), u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (filera). U pogledu sastava, količine cementa i agregata održavane su u svim mešavinama konstantnim (cement 380 kg/m^3 i agregat 1700 kg/m^3). Takođe, ukupan sadržaj filera (ukupna masa krečnjačkog brašna i letećeg pepela) održavan je konstantnim i iznosio je 600 kg/m^3 . Iz razloga bolje uporedne analize mešavina, spravljene su dve referentne mešavine SCC: jedna sa 10 kg/m^3 manje vode (mešavina označena sa E1, sa 173 kg/m^3 vode) uz uslov da čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana kod ove mešavine bude približno jednaka čvrstoći pri pritisku mešavina sa letećim pepelom ($70 \pm 3 \text{ MPa}$), i druga sa istom količinom vode (183 kg/m^3) kao kod svih mešavina sa LP (mešavina oznake E2). U mešavini sa 50% letećeg pepela (oznake LP5), da bi se dobila svojstva ugradljivosti za dati sadržaj LP i krečnjačkog brašna, povećana je količina superplastifikatora, sa 2% na 3% u odnosu na masu cementa (sa 7.6 kg/m^3 na 11.4 kg/m^3). Rasprostiranje sleganjem svih razmatranih SCC mešavina iznosilo je 66.4 cm do 73.8 cm, a vremena merena metodom V-levka bila su u granicama od 9.7 s do 27.2 s. Mešavine sa letećim pepelom (LP) spravljene su pri temperaturama koje su se kretale u opsegu 20-24°C.

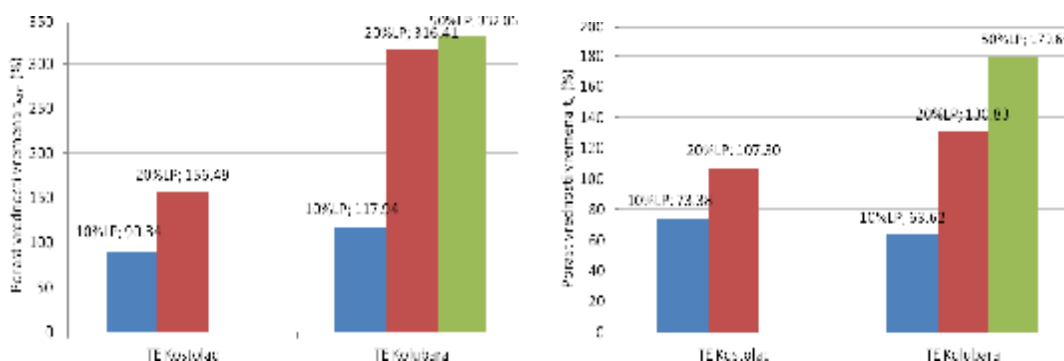
Generalno posmatrano, sa **rasprostriranjem sleganjem** u rasponu od 66.4 cm do 73.8 cm svi spravljeni SCC spadaju u kategoriju SF2 prema evropskim preporukama [82], sa izuzetkom betona E2 koji je nešto iznad gornje granice od 75 cm za datu kategoriju. Na slici 8.1 je prikazan procentualni pad vrednosti rasprostiranja sleganjem SCC mešavina sa LP u odnosu na mešavinu istog sastava, ali spravljenu bez letećeg pepela (mešavina oznake E2). 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%), ali i u funkciji od porekla letećeg pepela (leteći pepeo poreklom iz TE "Kostolac" i poreklom iz TE "Kolubara"). Kada se vrši poređenje efekta upotrebe letećeg pepela različitog porekla, a iste količine (uticaj porekla letećeg pepela) na rasprostiranje sleganjem SCC mešavina, može se primetiti da je pad sposobnosti prolaska u smislu rasprostiranja sleganjem brži sa dodavanjem letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", nego sa dodavanjem letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac".



Slika 8.1 Pad vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela (mešavina oznake E2)

Izmerene vrednosti rasprostiranja sleganjem mogu se uporediti i sa odgovarajućom vrednošću kod mešavine oznake E1 (10 kg/m^3 vode manje nego u mešavini E2). Naime, zamena 20% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" ima isti efekat na pad vrednosti rasprostiranja sleganjem kao i smanjenje količine vode u referentnoj SCC mešavini (oznake E2) za 10 kg/m^3 . Efekat zamene 50% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", uz istovremeno povećanje količine superplastifikatora za 1% u odnosu na masu cementa isti je kao i u slučaju zamene 10% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara".

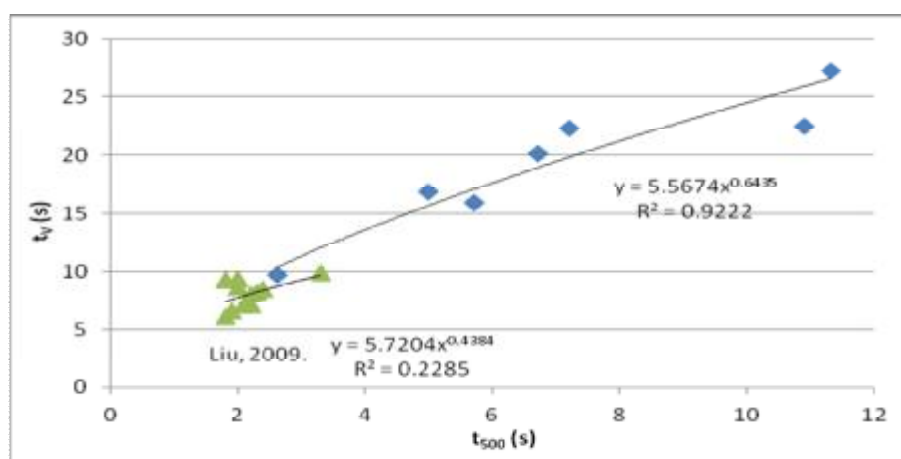
Što se tiče promene sposobnosti tečenja na osnovu merenja **vremena t_{500}** potrebnog za rasprostiranje i **vremena t_v** izmerenog kod metode V-levka, može se primetiti da je došlo do pada ovog svojstva (sposobnosti tečenja) usled promene količine letećeg pepela (10%, 20%, 50%), ali i u funkciji od porekla letećeg pepela (leteći pepeo poreklom iz TE "Kostolac" i poreklom iz TE "Kolubara"). Generalno posmatrano, prema evropskim preporukama [82] 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 E2 je bila najbliža datoj granici dok je mešavina LP5 (sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara") pokazala visoku viskoznost (vreme od 27.2 sekundi). Na slici 8.2 je prikazan procentualni porast vrednosti vremena t_{500} i vremena V-levka t_v u odnosu na mešavinu bez letećeg pepela (mešavina oznake E2). Može se primetiti da je pad konzistencije u smislu vremena t_{500} brži sa dodavanjem letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", nego sa dodavanjem letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac".



Slika 8.2 Porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela

Ukoliko se izmerena vrednost vremena t_v uporedi sa odgovarajućom vrednošću kod mešavine oznake E1 (10 kg/m^3 vode manje nego u mešavini E2), primetno je da zamena 20% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" ima isti efekat na porast vrednosti vremena t_v kao i smanjenje količine vode u SCC mešavini za 10 kg/m^3 . Interesantno je primetiti i da je, kada se radi o svojstvu sposobnosti prolaska kvantifikovanom na osnovu vremena rasprostiranja t_{500} , efekat zamene 50% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", uz istovremeno povećanje količine superplastifikatora za 1% u odnosu na masu cementa, isti kao i u slučaju zamene 20% krečnjačkog brašna letećim pepelom istog porekla.

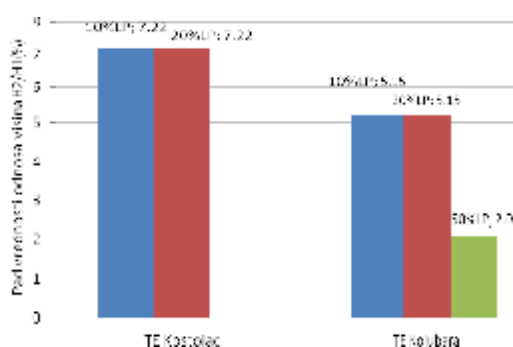
Na slici 8.3 je prikazana zavisnost između vremena t_v isticanja merenog metodom V-levka i vremena t_{500} merenog u metodi rasprostiranja sleganjem kod SCC mešavina sa letećim pepelom (pet SCC mešavina sa letećim pepelom i dve referentne mešavine) dobijena na osnovu prosečnih vrednosti ispitivanja na SCC betonima sa LP, sa dobrom korelacijom ($R^2=0.92$), zajedno sa rezultatima ispitivanja SCC mešavina sa LP autora Liu [161]. 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 prikazanih u ovom radu.



Slika 8.3 Zavisnost između vremena t_v merenog metodom V-levka u funkciji od vremena t_{500} kod SCC sa LP

Što se tiče promene sposobnosti prolaska merenog **testom L-boksa**, može se primetiti da je došlo do pada izmerenih vrednosti kod ovog svojstva usled promene količine letećeg pepela (10%, 20%, 50%), ali i u funkciji od porekla letećeg pepela (leteći pepeo poreklom iz TE "Kostolac" i poreklom iz TE "Kolubara"). Na slici 8.4 je prikazan procentualni pad vrednosti odnosa visina H_2/H_1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa, u odnosu na mešavinu bez letećeg pepela (mešavina oznake E2). 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: $H_2/H_1 > 0.8$) [87]. Nezavisno od porekla letećeg pepela (dakle nezavisno od toga da li je LP poreklom iz TE "Kostolac" ili TE "Kolubara"), može se primetiti da nije došlo do merljive promene vrednosti odnosa visina H_2/H_1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa sa povećanjem

količine letećeg pepela pri količinama od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera. 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 odnosa visina H2/H1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa predstavlja pad sposobnosti prolaska merenog ovom metodom od 2.06%.

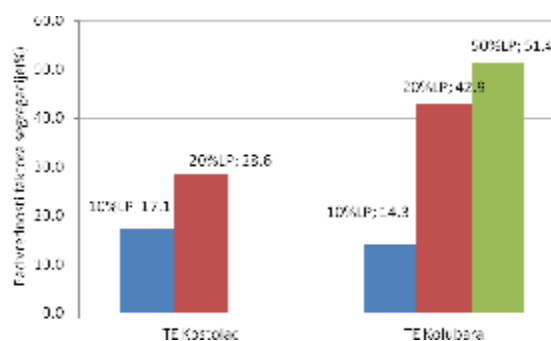


Slika 8.4 Pad vrednosti odnosa visina H2/H1 u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela

Kada se diskutovane vrednosti uporede sa vrednošću odnosa visina H2/H1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa za mešavinu E1 (koja je imala iste količine komponentnih materijala kao i kod mešavine E2, ali za 10 kg/m^3 manja količina vode nego kod E2 – 173 kg/m^3 , umesto 183 kg/m^3) može se primetiti da zamena 10% i 20% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" ima isti efekat na pad vrednosti odnosa visina H2/H1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa kao i smanjenje količine vode u SCC mešavini za 10 kg/m^3 .

Što se tiče promene **otpornosti prema segregaciji** merene testom pomoću sita (takozvani faktor segregacije), može se primetiti da je došlo do porasta vrednosti ovog svojstva usled promene količine letećeg pepela (10%, 20%, 50%), ali i u funkciji od porekla letećeg pepela (leteći pepeo poreklom iz TE "Kostolac" i poreklom iz TE "Kolubara"). Kada se ovo ispitivanje sagleda sa aspekta porekla letećeg pepela, može se primetiti da upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" ima sličan ili bolji efekat na faktor segregacije nego upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac". Na slici 8.5 je prikazan procentualni porast otpornosti prema segregaciji (pad vrednosti

faktora segregacije) merene testom pomoću sita, u odnosu na mešavinu bez letećeg pepela (mešavina oznake E2).



Slika 8.5 Porast otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita (faktor segregacije) u odnosu na referentnu mešavinu bez letećeg pepela

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 porastom otpornosti prema segregaciji (u odnosu na vrednosti za 10% i 20% zamene) merene ovom metodom. Kada se vrednost faktora segregacije od 1.7%, izmerena za SCC mešavinu sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", uporedi sa vrednošću faktora segregacije za mešavinu E1 (10 kg/m³ manja količina vode nego kod E2) može se primetiti da zamena 50% krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", uz istovremeno povećanje količine superplastifikatora za 1% u odnosu na masu cementa, ima sličan efekat na pad vrednosti faktora segregacije (porast otpornosti prema segregaciji, merene pomoću metode sita) kao i smanjenje količine vode u SCC mešavini za 10 kg/m³.

Što se tiče **zapreminske mase svežeg betona**, došlo je do pada vrednosti sa dodatkom LP, u funkciji od povećanja sadržaja LP, nezavisno od porekla LP. Na osnovu linearne interpolacije za vrednosti zapreminske mase SCC mešavina spravljenih sa LP poreklom iz TE "Kostolac", dobijena je zavisnost:

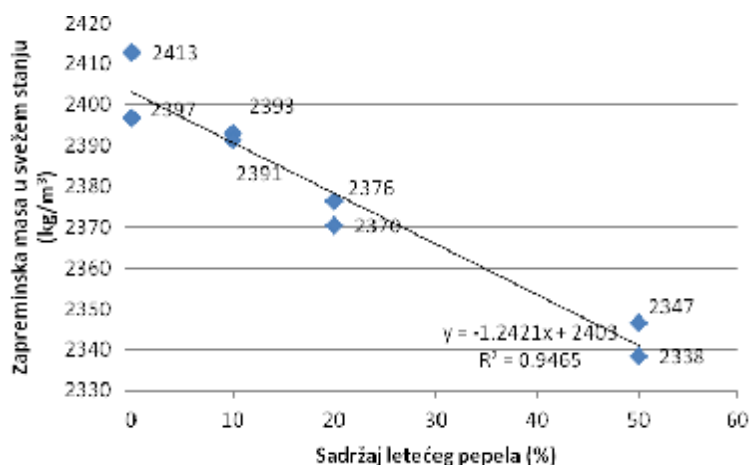
$$g = -1.02 \cdot p + 2398.8 \quad (r^2 = 0.881), \quad (8.1)$$

gde je: γ (kg/m³) zapreminska masa svežeg betona, a p (%) procenat zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom. Za iste parametre kod SCC mešavina spravljenih sa LP poreklom iz TE "Kolubara", dobijena je zavisnost:

$$g = -1.31 \cdot p + 2399.2 \quad (r^2 = 0.895). \quad (8.2)$$

Na osnovu analize prikazanih funkcionalnih zavisnosti, može se primetiti da do bržeg pada vrednosti zapreminske mase u svežem stanju dolazi u slučaju upotrebe letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara". Kada se uzmu sve vrednosti zapreminske mase, nezavisno od porekla LP, dobija se zavisnost sličnog oblika (prikazana na slici 8.6), sa većim stepenom korelacije:

$$g = -1.24 \cdot p + 2403 \quad (r^2 = 0.946). \quad (8.3)$$



Slika 8.6 Pad zapreminske mase u svežem stanju SCC mešavina u funkciji procenta 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.

Kada je reč o izmerenim vrednostima **sadržaja uvučenog vazduha** kod ispitivanih SCC mešavina, generalno posmatrano, ovaj sadržaj je rastao sa povećanjem količine dodatog LP. 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 LP kretale su se oko uobičajene vrednosti od 2%, što je postignuto bez ikakvog dodatnog kompaktiranja.

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 [246]). Naime, istraživanje [160] 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 istraživanja prikazanih u ovom radu pomenuta tvrdnja nije mogla biti potvrđena. U mešavini sa 50% LP 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 sastojala 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).

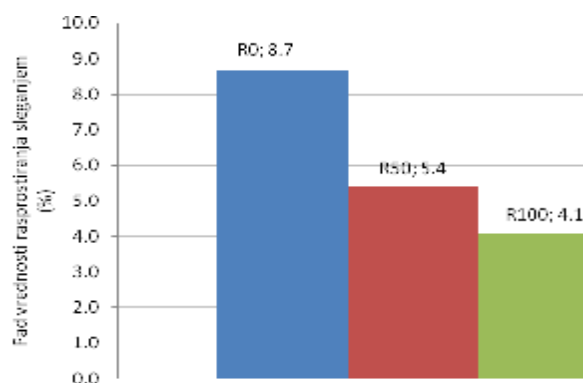
Stav iz literature, da se dodavanjem LP smanjuje opasnost od segregacije i izdvajanja vode na površini (pojava poznata i kao "bliding") [161], vizuelnom analizom svežih SCC je potvrđen, ali je takođe bio i u skladu sa prethodno diskutovanim kvantitativnim pokazateljima (rezultatima ispitivanja segregacije pomoću sita).

8.2. Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u svežem stanju SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom

U ovom delu će biti diskutovana svojstva spravljenih mešavina sa spraešenim recikliranim betonom (R) u svežem i očvrslom stanju, koja su ispitivana eksperimentalnim putem i prikazana u ovom radu. U pitanju su, pored referentne SCC mešavine oznake E2 (spravljene bez spraešenog recikliranog betona), još i tri SCC

mešavine oznake R0, R50 i R100, spravljane sa 50% sprášenog recikliranog betona različitog porekla u odnosu na ukupnu masu filera. Kod mešavine oznake R0 upotrebljen je sprášeni reciklirani beton oznake "A" poreklom od običnog betona, kod mešavine oznake R50 primenjen je sprášeni reciklirani beton "B" poreklom od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata i kod mešavine oznake R100 sprášeni reciklirani beton "C" poreklom od betona sa krupnim agregatom od recikliranog betona. Pri tome je masa cementa održavana konstantnom kod svih mešavina (380 kg/m^3), kao i količine agregata (1700 kg/m^3), vode (183 kg/m^3) i superplastifikatora (7.6 kg/m^3). Dakle, varirana je samo vrsta upotrebljenog sprášenog betona. Rasprostiranje sleganjem dobijenih SCC mešavina sa R iznosilo je 69.5 cm do 73.0 cm, a vremena merena metodom V-levka bila su u granicama od 9.7 s do 13.2 s. Mešavine sa sprášenim recikliranim betonom (R) spravljane su pri temperaturama koje su se kretale u opsegu od 20-23°C.

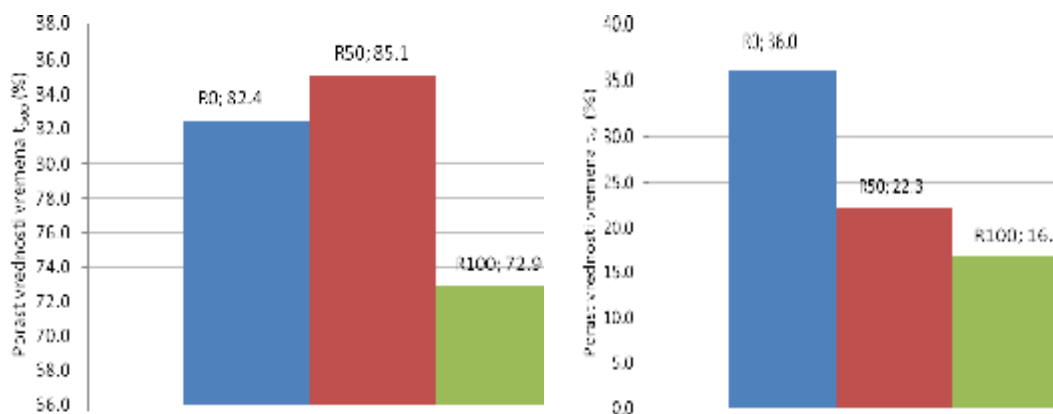
Što se tiče promene sposobnosti tečenja (kod **testa rasprostiranja sleganjem**), može se primetiti da je došlo do pada ovog svojstva usled zamene 50% krečnjačkog brašna sprášenim recikliranim betonom, u sva tri slučaja zamene krečnjačkog brašna sprášenim recikliranim betonom (ukupna masa filera, odnosno masa krečnjačkog brašna i sprášenog recikliranog betona, iznosila je 220 kg/m^3). Generalno posmatrano, sa rasprostiranjem sleganjem u rasponu od 69.5 cm do 73.0 cm svi spravljani SCC spadaju u kategoriju SF2 prema evropskim preporukama [82]. Na slici 8.7 je prikazan procentualni pad vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na mešavinu bez sprášenog recikliranog betona (mešavina oznake E2).



Slika 8.7 Pad vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog recikliranog betona (mešavina oznake E2)

Navedene vrednosti rasprostiranja sleganjem predstavljaju pad od 8.7% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna spraešenim recikliranim betonom poreklom od običnog betona), 5.4% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna spraešenim recikliranim betonom poreklom od betona sa 50% krupnog recikliranog agregata) i 4.1% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna spraešenim recikliranim betonom poreklom od betona sa krupnim recikliranim agregatom). Na osnovu prikazanih vrednosti može se primetiti da je pad vrednosti rasprostiranja sleganjem manji za slučaj zamene veće količine krupnog agregata recikliranim betonom u spraešenom betonu.

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. Generalno posmatrano, svi betoni spadaju u kategoriju VS2/VF2 sa >2 sec izmerenim vremenom t_{500} , odnosno sa >9 sec izmerenim vremenom t_v [82]. Pri tome, beton E2 je bio najbliži datoj granici dok su betoni sa spraešenim recikliranim betonom imali slične vrednosti oba izmerena vremena (vremena t_{500} potrebnog za rasprostiranje i vremena potrebnog za isticanje betona iz V-levka t_v). Na slici 8.8 je prikazan procentualni porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na mešavinu bez spraešenog recikliranog betona (mešavina oznake E2).

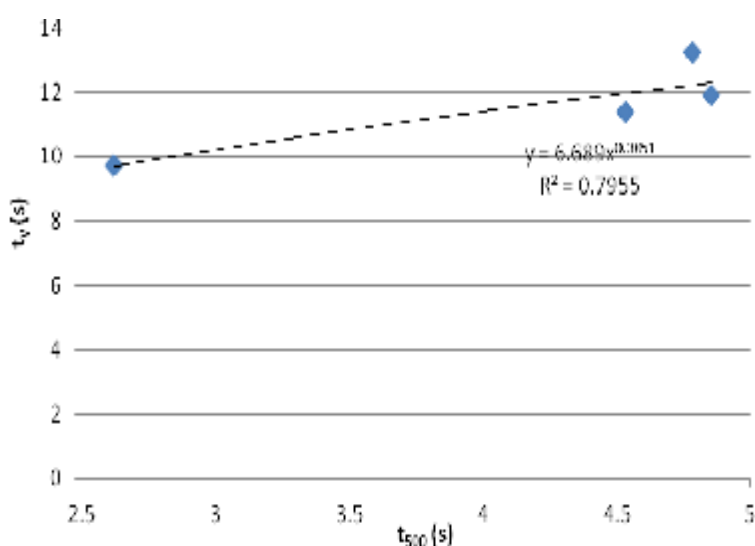


Slika 8.8 Porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na referentnu mešavinu E2 bez spraešenog recikliranog betona

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 E2, opada sa povećanjem količine krupnog recikliranog agregata u sprášenom betonu.

Na slici 8.9 je prikazana zavisnost između vremena V-levka t_v i vremena t_{500} izmerenog prilikom ispitivanja rasprostiranja sleganjem, dobijena na osnovu prosečnih vrednosti ispitivanja iz ovog rada na SCC betonima sa R. Vidi se da između tri SCC sa R nema velikih razlika u ponašanju, pošto su sve tri tačke na dijagramu grupisane i pomerene u odnosu na referentni SCC. Takođe, promena vremena t_{500} je veća u odnosu na promenu vremena V-levka.

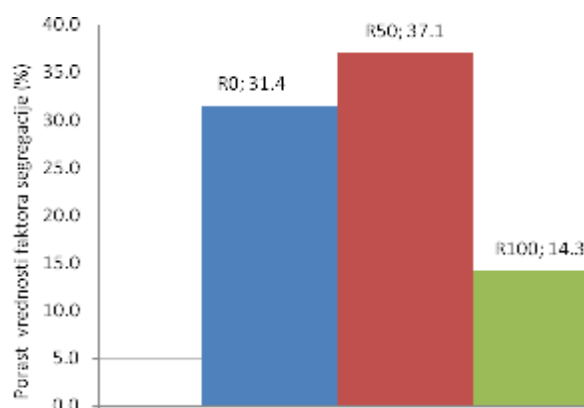


Slika 8.9 Zavisnost između vremena merenog metodom V-levka u funkciji od vremena t_{500} kod SCC sa R

Što se tiče razmatranja sposobnosti prolaska merenog **testom L-boksa**, može se primetiti da je došlo do promene (pada) ovog svojstva usled doziranja sprášenog recikliranog betona u iznosu od 50% nezavisno od porekla sprášenog recikliranog betona. Odnos visina H_2/H_1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa referentne mešavine spravljene bez sprášenog recikliranog betona (mešavina oznake E2) iznosio je 0.97, dok je zamena krečnjačkog brašna sprášenim recikliranim betonom u iznosu od 50% rezultirala istim padom sposobnosti prolaska sve tri SCC mešavine (kada je sprášeni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnog recikliranog agregata, respektivno): odnos visina H_2/H_1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa je iznosio 0.95 u sva tri slučaja, što predstavlja pad od 2.1%. Pošto je ovaj pad vrednosti

jednak kod sve tri mešavine SCC sa sprasnim recikliranim betonom, ovde će izostati grafički prikaz.

Kada je reč o promeni **otpornosti prema segregaciji** merene testom pomoću sita (faktor segregacije), može se primetiti da je došlo do pada ovog svojstva usled zamene 50% krečnjačkog brašna sprasnim recikliranim betonom u funkciji od porekla sprasnog recikliranog betona (kada je sprasni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnim recikliranim agregatom, respektivno). Na slici 8.10 je prikazan procentualni pad vrednosti otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita, u odnosu na mešavinu bez sprasnog recikliranog betona (mešavina oznake E2). Izmerene vrednosti faktora segregacije predstavljaju porast količine segregiranog materijala (pad otpornosti prema segregaciji) od 31.4% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna sprasnim recikliranim betonom poreklom od običnog betona), 37.1% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna sprasnim recikliranim betonom poreklom od betona sa 50% krupnog recikliranog agregata) i 14.3% (za zamenu 50% krečnjačkog brašna sprasnim recikliranim betonom poreklom od betona sa krupnim recikliranim agregatom) u odnosu na početnu vrednost izmerenu kod referentne mešavine E2 (spravljene bez sprasnog recikliranog betona). Napominje se da su izmerene vrednosti za sve mešavine u granicama dozvoljenih (vrednosti faktora segregacije niže od 20%).



Slika 8.10 Pad otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita (faktor segregacije) u odnosu na referentnu mešavinu bez sprasnog recikliranog betona

U slučaju upotrebe sprasnog 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 sprašenom betonu bila prisutna veća količina sitnih čestica (sprašenog, samlevenog betona) veće specifične mase i manje poroznosti.

Na osnovu svega rečenog može se primetiti da je kod ispitivanih mešavina SCC sa R došlo do izvesnog pada obradljivosti u odnosu na referentnu mešavinu sa istom količinom vode. Došlo je do porasta vremena potrebnog za rasprostiranje betona u metodi rasprostiranja sleganjem u odnosu na kontrolnu mešavinu, spravljenju bez sprašenog recikliranog betona, kao i vremena V-levka. Vrednosti rasprostiranja sleganjem SCC mešavina sa R bile su niže nego kod referentne mešavine.

Što se tiče **zapreminske mase svežeg betona**, došlo je do pada njene vrednosti nakon zamene 50% krečnjačkog brašna sprašenim recikliranim betonom, nezavisno od porekla sprašenog recikliranog betona. U odnosu na referentni SCC spravljen bez sprašenog recikliranog betona (mešavina oznake E2), kod koje je zapreminska masa svežeg SCC iznosila 2397 kg/m^3 , zapreminska masa kod svežih SCC sa zamenom 50% krečnjačkog brašna sprašenim recikliranim betonom iznosila je 2387 kg/m^3 , 2389 kg/m^3 i 2391 kg/m^3 za slučajeve kada je sprašeni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnim recikliranim agregatom, respektivno. Može se primetiti da je došlo do malog pada vrednosti zapreminske mase svežeg SCC sa dodatkom R, u iznosu od 8 kg/m^3 u proseku (0.3%). Ovaj pad (u odnosu na referentnu mešavinu E2) može se objasniti (izmerenim) porastom sadržaja uvučenog vazduha, kao i prisustvom donekle lakših zrna malterske komponente u okviru sprašenog recikliranog betona.

Sadržaj uvučenog vazduha kod ispitivanih SCC mešavina generalno posmatrano je porastao usled zamene 50% krečnjačkog brašna sprašenim recikliranim betonom, nezavisno od porekla sprašenog recikliranog betona. Kod referentne mešavine E2 (spravljene bez sprašenog recikliranog betona) sadržaj uvučenog vazduha je iznosio 1.9%, dok je kod svežih SCC sa zamenom 50% krečnjačkog brašna sprašenim recikliranim betonom iznosio 2.3%, 2.2% i 2.4% za slučajeve kada je sprašeni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnog recikliranog agregata, respektivno. U odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenju bez sprašenog 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 sprášeni reciklirani beton vodio poreklo od običnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnog recikliranog agregata, respektivno).

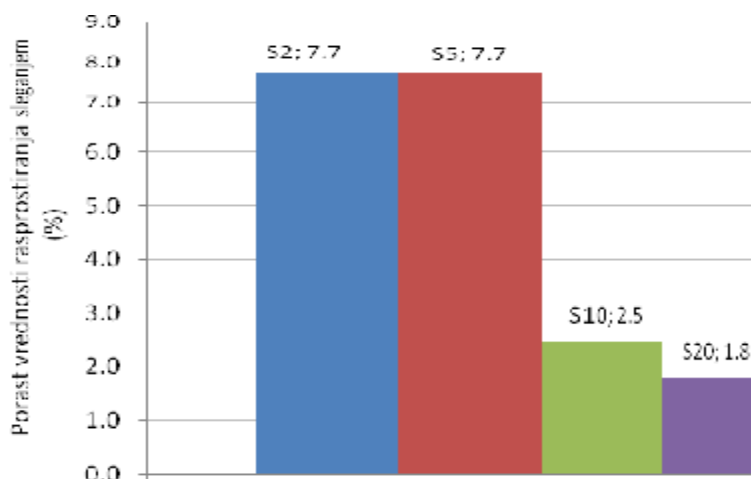
Uopšteno posmatrano, svi SCC spravljeni sa recikliranim sprášenim betonom pokazali su veoma slično ponašanje i opažanja u vezi sa njihovim ponašanjem u najvećem broju slučajeva se mogu svesti na efekat doziranja sprášenog recikliranog betona, nezavisno od vrste ("A", "B" ili "C", videti tačku 6.2.5).

8.3 Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u svežem stanju SCC mešavina sa sprášenim sumporom

U ovom delu će biti diskutovana svojstva spravljenih SCC mešavina sa sprášenim sumporom (S) u svežem stanju, dobijena kao rezultat eksperimentalnih ispitivanja. Poređeni su rezultati ispitivanja pet mešavina: referentna SCC mešavina (mešavina oznake E2, spravljena bez sumpora, odnosno samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu mineralnog dodatka), i četiri SCC mešavine (oznake S2, S5, S10 i S20) spravljane sa 2%, 5%, 10% i 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu (konstantnu) masu filera (mešavine krečnjačkog brašna i sprášenog sumpora, 220 kg/m^3). Pri tome je masa cementa održavana konstantnom kod svih mešavina (380 kg/m^3), kao i količine agregata (1700 kg/m^3), vode (183 kg/m^3) i superplastifikatora (7.6 kg/m^3). Rasprostiranje sleganjem pomenutih SCC mešavina kretalo se u granicama od 76.1 cm do 82.0 cm, a vremena merena metodom V-levka bila su u granicama od 8.2 s do 10.5 s. Mešavine sa sprášenim sumporom (S) spravljane su pri temperaturama koje su se kretale u opsegu od 20-22°C.

Što se tiče promene sposobnosti tečenja merene **testom rasprostiranja sleganjem**, može se primetiti da je došlo do porasta ovog svojstva usled povećanja količine sprášenog sumpora. Generalno posmatrano, sa rasprostiranjem sleganjem u rasponu od 76.1 cm do 82.0 cm svi spravljeni SCC spadaju u kategoriju SF3 prema evropskim standardima [82]. Na slici 8.11 je prikazano procentualno povećanje vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na mešavinu bez sprášenog sumpora (mešavina

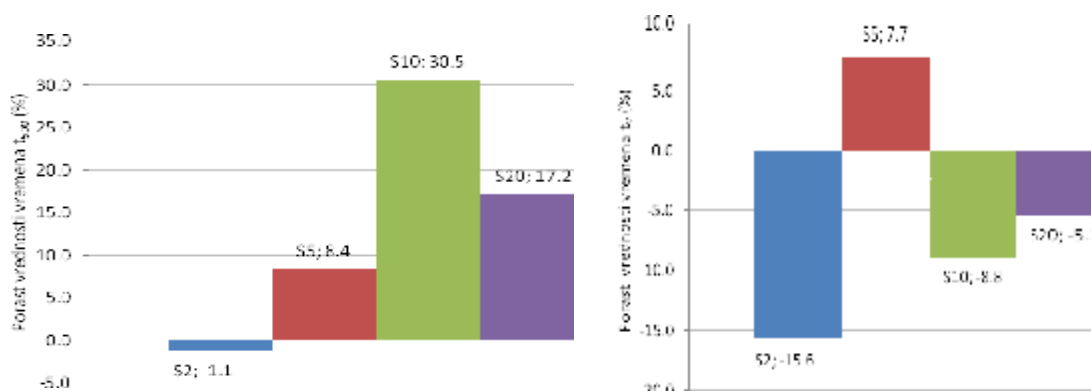
oznake E2). Pozitivan efekat na vrednosti rasprostiranja sleganjem se može povezati sa činjenicom da je sprášeni sumpor kompaktan (ne upija vodu), a takođe i manje zapreminske mase u odnosu na krečnjak. Činjenica da je površina zrna sprášenog sumpora zaobljenija nego u slučaju upotrebljenog krečnjačkog brašna (što je primećeno prilikom SEM analize) doprinosi pomenutom efektu.



Slika 8.11 Povećanje vrednosti rasprostiranja sleganjem u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog sumpora (mešavina oznake E2)

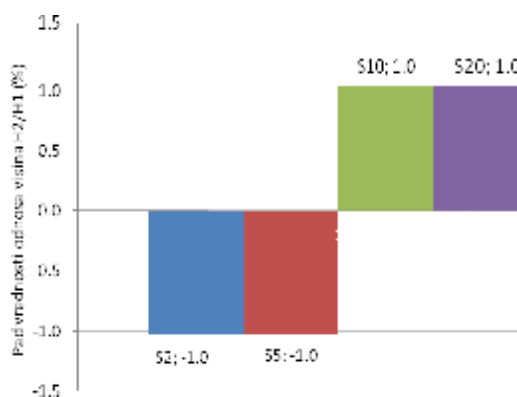
Što se tiče promene sposobnosti tečenja na osnovu merenja **vremena t_{500}** potrebnog za rasprostiranje i **vremena V-levka t_v** , može se primetiti da je došlo do različitih efekata usled promene količine sprášenog sumpora (2%, 5%, 10% i 20%). Generalno posmatrano, svi betoni spadaju u kategoriju VS2/VF2 sa >2 sec izmerenim vremenom t_{500} u granicama od 2.62 s do 3.42 s, odnosno sa >9 sec izmerenim vremenom t_v (izuzetak su SCC sa 2% i 10% sumpora, kod kojih su zabeležene vrednosti vremena t_v V-levka od 8.2s i 8.8s, respektivno). Na slici 8.12 je prikazan procentualni porast vrednosti vremena (t_{500}) i vremena V-levka (t_v) u odnosu na mešavinu bez sprášenog sumpora (mešavina oznake E2). Može se generalno primetiti da nema velike promene vremena t_{500} u funkciji od povećanja količine doziranog sprášenog sumpora, jer se svi rezultati ispitivanja kreću u rasponu manjem od 1 s. Interesantno je da se sve izmerene vrednosti vremena t_{500} kreću u rasponu reproduktivnosti koji bi važio za jednu mešavinu (ponovljivost je 0.66 s, a reproduktivnost kod ovog ispitivanja je 0.88 s). Slična analiza može se sprovesti i u slučaju kada se posmatra vreme t_v u funkciji od povećanja količine doziranog sprášenog sumpora, jer se svi rezultati ispitivanja kreću u rasponu manjem od

2.5 s, odnosno rasponu ponovljivosti koji bi važio za jednu mešavinu (ponovljivost je 2.6 s, a reproduktivnost kod ovog ispitivanja je 3.9 s za referentnu mešavinu).



Slika 8.12 Porast vrednosti vremena t_{500} i t_v u odnosu na referentnu mešavinu bez spraašenog sumpora

Na slici 8.13 je prikazana procentualna promena vrednosti **odnosa visina H2/H1** na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa, u odnosu na mešavinu bez spraašenog sumpora (mešavina oznake E2). Prema kriterijumu sa tri šipke armature na L-boksu, može se primetiti da su svi betoni postigli klasu PA2 (odnos visina na početku i kraju horizontalnog dela L-boksa: $H2/H1 > 0.8$) [82].

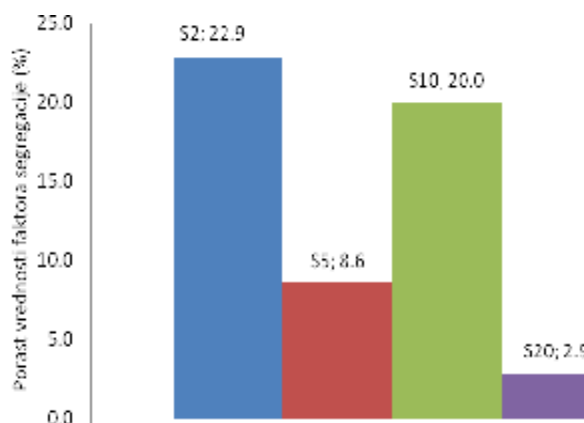


Slika 8.13 Pad vrednosti odnosa visina H2/H1 u odnosu na referentnu mešavinu bez spraašenog sumpora

U funkciji sadržaja spraašenog sumpora, može se reći da je došlo do porasta od 1% vrednosti odnosa visine H2/H1 kod SCC mešavina sa 2% i 5% spraašenog sumpora (vrednost H2/H1 kod ovih mešavina je iznosila 0.98) u odnosu na referentnu mešavinu bez spraašenog sumpora (mešavina E2, kod koje je vrednost H2/H1 iznosila 0.97). Kod mešavina sa 10% i 20% spraašenog sumpora u odnosu na referentnu mešavinu je došlo do pada vrednosti odnosa visina u iznosu od 1% (vrednost H2/H1 kod ovih mešavina je

iznosila 0.96 u odnosu na izmerenu vrednost od 0.97 kod referentne mešavine E2). Može se izvesti generalno opažanje da nema velike promene odnosa visina H2/H1 u funkciji od povećanja količine doziranog sprášenog sumpora, jer se svi rezultati ispitivanja (odnosi visina H2/H1) kreću u rasponu od 0.01, što označava veoma slično ponašanje svih mešavina.

Na slici 8.14 je prikazan procentualni pad **otpornosti prema segregaciji** (porast vrednosti faktora segregacije) merene testom pomoću sita, u odnosu na mešavinu bez sprášenog sumpora (mešavina oznake E2). Sa dijagrama se može videti da postoji izvesno povećanje faktora segregacije (smanjenje otpornosti prema segregaciji) u funkciji prisustva sprášenog sumpora, pri čemu ova vrednost ne raste sa povećanjem količine sprášenog sumpora.

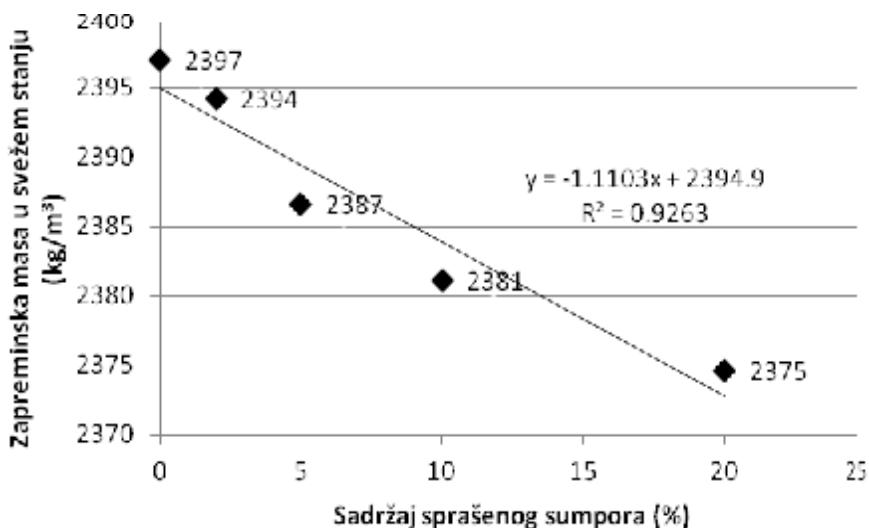


Slika 8.14 Smanjenje otpornosti prema segregaciji merene testom pomoću sita (faktor segregacije) u odnosu na referentnu mešavinu bez sprášenog sumpora

Što se tiče **zapreminske mase svežeg betona**, ona je niža kod SCC mešavina sa dodatkom sprášenog sumpora, i to u funkciji od povećanja sadržaja sprášenog sumpora (videti sliku 8.15). Ovaj pad može se objasniti povećanjem količine dodatog sprášenog sumpora, jer sprášeni sumpor ima manju zapreminsku masu od krečnjačkog brašna koje zamenjuje, pa povećanjem količine sprášenog sumpora u SCC dolazi do smanjenja zapreminske mase SCC mešavine. Ovaj pad je mali, i iznosi do 0.9% (za zamenu krečnjačkog brašna sprášenim sumporom do masenog iznosa od 20%). Na osnovu linearne interpolacije za vrednosti zapreminske mase SCC mešavina spravljenih sa sprášenim sumporom u iznosu od 2%, 5%, 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera, dobijena je zavisnost:

$$g = -1.11 \cdot p + 2388.9 \quad (r^2 = 0.926), \quad (8.4)$$

gde je: γ (kg/m^3) zapreminska masa svežeg betona, a p (%) procenat zamene krečnjačkog brašna spraešenim sumporom.

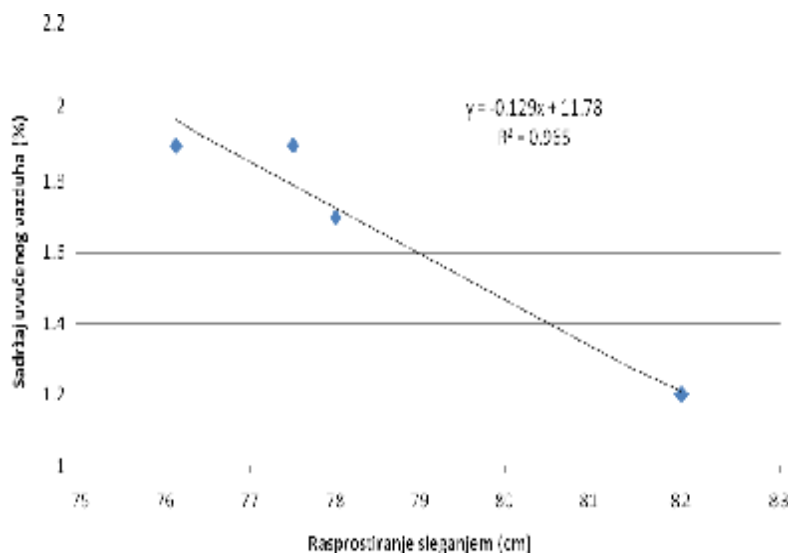


Slika 8.15 Pad zapreminske mase u funkciji procenta zamene krečnjačkog brašna spraešenim sumporom

Sadržaj uvučenog vazduha kod ispitivanih SCC mešavina, generalno posmatrano, nije se značajnije menjao sa povećanjem količine spraešenog sumpora u SCC mešavinama. Kod mešavina koje su sadržale 2%, 5%, 10% i 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (220 kg/m^3), izmerene vrednosti uvučenog vazduha iznosile su 1.2%, 1.2%, 1.7% i 1.9%, respektivno. Kod referentne SCC mešavine (oznake E2, koja nije sadržala spraešeni sumpor), izmeren je sadržaj uvučenog vazduha od 1.9%. Kod mešavina sa 2%, 5% i 10% spraešenog sumpora, dakle, radi se o smanjenju sadržaja uvučenog vazduha u iznosu od 36.8% u odnosu na referentnu mešavinu (za mešavine sa 2% i 5% spraešenog sumpora) i 10.5% (za mešavinu sa 10% spraešenog sumpora), dok je sadržaj uvučenog vazduha kod SCC mešavine sa 20% spraešenog sumpora bio isti kao kod referentne mešavine.

Može se uspostaviti korelacija između rasprostiranja i sadržaja uvučenog vazduha kod SCC mešavina sa spraešenim sumporom, prikazana na slici 8.16. Sa dobrim koeficijentom korelacije ($R^2=0.97$) dobijen je trend pada sadržaja uvučenog vazduha sa povećanjem rasprostiranja. Ovo je u saglasnosti sa generalnim stavom koji važi za

NVC, da se agitovanjem (mešanjem, vibriranjem) betona krućih konzistencija uvlači više vazduha nego kod betona tečnijih konzistencija.



Slika 8.16 Korelacija između rasprostiranja sleganjem i sadržaja uvučenog vazduha u SCC sa S

8.4 Uporedni prikaz SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata

Sastav SCC mešavina sa letećim pepelom, spraešenim recikliranim betonom i spraešenim sumporom po pitanju sadržaja osnovnih komponenti (agregata, cementa, vode) bio je isti, a po pitanju sadržaja drugih komponenti (filera, hemijskog dodatka) isti ili sličan. Ovakav pristup pri projektovanju je omogućio uporednu analizu svojstava SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima.

8.4.1. Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom

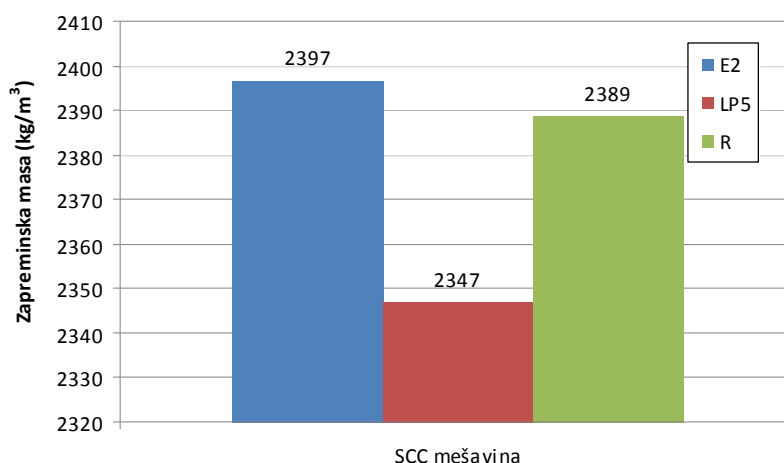
SCC mešavina oznake LP5, spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", po svom sastavu je bila slična kao SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom (SCC R0, SCC R50 i SCC R100 mešavine). Naime, količine cementa (380 kg/m^3), vode (183 kg/m^3) i agregata (1700 kg/m^3) u svim navedenim mešavinama bile su iste. Dalje, količina krečnjačkog brašna u svojstvu filera kod ovih mešavina je iznosila 110 kg/m^3 . Preostalih 110 kg/m^3 je kod SCC mešavine oznake LP5 bio leteći pepeo, poreklom iz

TE "Kolubara", a kod SCC mešavina sa recikliranim betonom, doziran je sprášeni reciklirani beton u istoj količini od 110 kg/m^3 . Razlika između ovih mešavina, osim u pomenutom upotrebljenom mineralnom dodatku na bazi industrijskog nusprodukta, bila je količina doziranog superplastifikatora. Kod mešavine oznake LP5 je dozirano 11.4 kg/m^3 hemijskog dodatka tipa superplastifikatora (3% u odnosu na masu cementa, odnosno 1.90% u odnosu na masu praškaste komponente koja je uključivala cement, krečnjačko brašno i leteći pepeo), a kod mešavina SCC sa sprášenim recikliranim betonom u svojstvu mineralnog dodatka dozirano je 7.6 kg/m^3 superplastifikatora (2% u odnosu na masu cementa, odnosno 1.27% u odnosu na masu praškaste komponente koja je uključivala cement, krečnjačko brašno i sprášeni reciklirani beton).

U daljoj analizi, na osnovu svega rečenog, treba imati na umu da između SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom postoji razlika u količini doziranog plastifikatora, koja je uticala na ponašanje SCC mešavina u svežem stanju, njihovu kompaktnost, a time i na niz svojstava u očvrslom stanju. Takođe, u daljoj analizi će rezultati ispitivanja SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom biti predstavljeni kao prosečna vrednost rezultata ispitivanja svih mešavina spravljenih sa recikliranim betonom, odnosno biće zanemaren efekat porekla sprášenog recikliranog betona. Postoji dva razloga za ovaj potez: prvi razlog je što su rezultati ispitivanja mešavina sa sprášenim recikliranim betonom bili veoma slični, a drugi razlog je što će na taj način ovakva uporedna analiza biti jednostavnija i očiglednija.

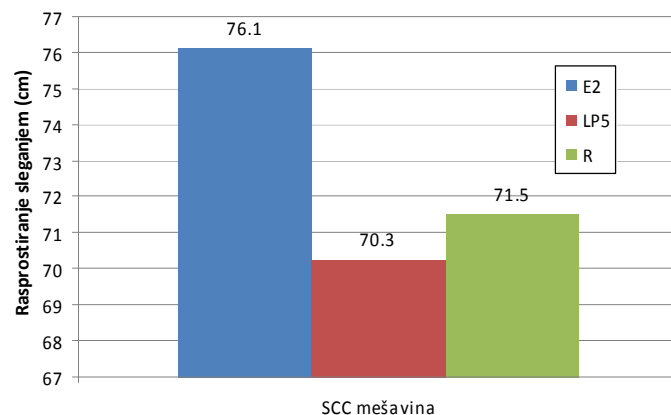
Uporedni prikaz vrednosti **zapreminske mase u svežem stanju** poređenih SCC mešavina dat je na slici 8.17. Na slici su date referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (E2), SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera (LP5) i SCC mešavina sa 50% sprášenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera (R), uz prethodno obrazloženo zanemarenje porekla sprášenog recikliranog betona. Kao što se to sa slike može videti, dok zapreminska masa sveže SCC mešavine može neznatno da opadne upotrebom sprášenog 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 sprášeni reciklirani beton, koji osim malterske komponente (manje poroznosti nego leteći pepeo) sadrži i čestice sprášenog 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 sprášenim recikliranim betonom u iznosu od 1.8% u odnosu na zapreminsku masu u svežem stanju SCC mešavine sa letećim pepelom.



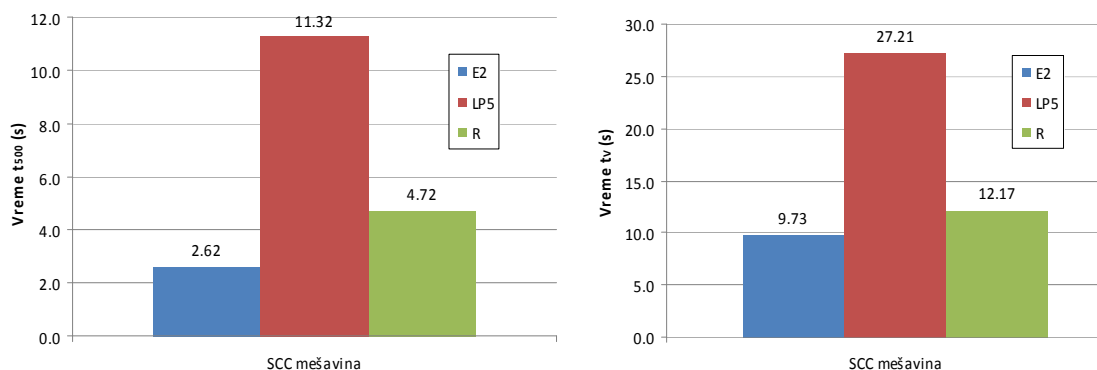
Slika 8.17 Uporedni prikaz vrednosti zapreminske mase svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim recikliranim betonom

Uporedni prikaz vrednosti **rasprostiranja sleganjem** dobijenih kod svežih SCC mešavina (referentna – E2, SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera – LP5 i mešavina sa 50% sprášenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera – R) dat je na slici 8.18. Oba mineralna dodatka na bazi industrijskih nusprodukata (leteći pepeo i sprášeni reciklirani beton) dovode do pada sposobnosti tečenja SCC mešavine merenog metodom rasprostiranja sleganjem. 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 sprášenim recikliranim betonom u iznosu od 1.8% u odnosu na rasprostiranje sleganjem SCC mešavine sa letećim pepelom.



Slika 8.18 Uporedni prikaz vrednosti rasprostiranja sleganjem svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom

Uporedni prikazi vrednosti vremena t_{500} i vremena t_v , dobijenih kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom (LP5) i sa sprašenim recikliranim betonom (R) prikazani su na slici 8.19. zajedno sa referentnom SCC mešavinom spravljenom sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (E2).



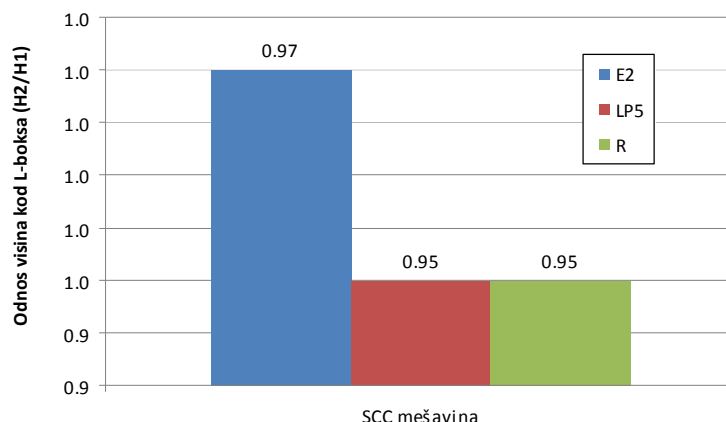
Slika 8.19 Uporedni prikaz vrednosti vremena t_{500} i t_v svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom

Kao što se to sa slike može videti, upotreba svakog od pomenuta dva mineralna dodatka, letećeg pepela i sprašenog 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 E2. Ova povećanja iznose 332.1% i 80.2% za upotrebu letećeg pepela i sprašenog 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 sprašenog recikliranog betona, respektivno. Povećanje viskoznosti, odnosno smanjenje pokretljivosti SCC mešavine

usled upotrebe ovih mineralnih dodataka, iako slabije izraženo kod primene sprašenog 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 sprašenim recikliranim betonom u iznosu od 58.3% i 55.3%, respektivno.

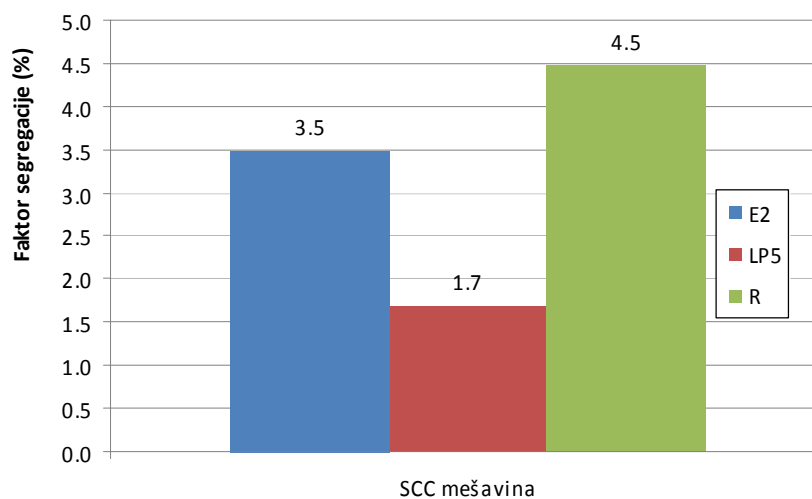
Poređenjem vrednosti rezultata ispitivanja metodom rasprostiranja sleganjem i metodom V-levka, može se uočiti da za sličnu sposobnost tečenja (merenu metodom rasprostiranja) ova dva betona imaju veoma različite sposobnosti prolaska. Naime, dok je sposobnost prolaska SCC mešavine sa sprašenim recikliranim 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 količinu filera mnogo manja. Ako se tome doda i činjenica da je kod ove mešavine upotrebljena veća količina superplastifikatora (3% u odnosu na masu cementa u mešavini, dok je kod referentne mešavine i mešavine sa sprašenim 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.

Uporedni prikaz vrednosti **odnosa visina H2/H1** dobijenih metodom L-boksa, kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom prikazan je na slici 8.20. 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% sprašenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera označene oznakama E2, LP5 i R, respektivno. Kao što se to sa pomenutog dijagrama vidi, odstupanje od referentne SCC mešavine kod primene oba mineralna dodatka iznosilo je 2.1%.



Slika 8.20 Uporedni prikaz vrednosti H2/H1 u metodi L-boksa kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim recikliranim betonom

Uporedni prikaz vrednosti **faktora segregacije** svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim recikliranim betonom prikazan je na slici 8.21. 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% spršenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera označene oznakama E2, LP5 i R, respektivno.

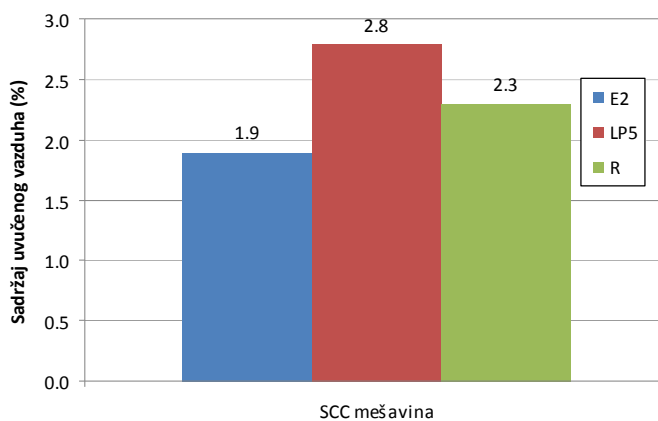


Slika 8.21 Uporedni prikaz vrednosti faktora segregacije svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim recikliranim betonom

Što se tiče faktora segregacije SCC mešavina kod kojih je izvršena zamena 50% krečnjačkog brašna istom masom letećeg pepela i spršenog 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 sprašenim recikliranim betonom došlo je do smanjenja otpornosti na segregaciju u iznosu od 27.6% u odnosu na referentnu SCC mešavinu. Međutim, ove vrednosti su u odnosu na graničnu vrednost faktora segregacije od 20% mnogo niže.

Uporedni prikaz vrednosti **sadržaja uvučenog vazduha** izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom prikazan je na slici 8.22. Na slici su: referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (E2), SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera (LP5) i SCC mešavina sa 50% sprašenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera (R). Kada se porede vrednosti sadržaja uvučenog vazduha izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom, može se uočiti da SCC mešavine spravljene sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", kao i SCC mešavine spravljene sa 50% sprašenog recikliranog betona imaju veći sadržaj uvučenog vazduha nego referentna SCC mešavina. Povećanje iznosi 47.4% i 27.1% za upotrebu letećeg pepela i sprašenog recikliranog betona, respektivno.



Slika 8.22 Uporedni prikaz sadržaja uvučenog vazduha izmerenog kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprašenim recikliranim betonom

8.4.2. Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprašenim sumporom

U daljoj diskusiji će biti dat uporedni prikaz svojstava SCC mešavina sa 10% letećeg pepela i 10% sprašenog sumpora, odnosno 20% letećeg pepela i 20% sprašenog sumpora. SCC mešavine oznake LP1 i LP2 spravljene su sa letećim pepelom poreklom

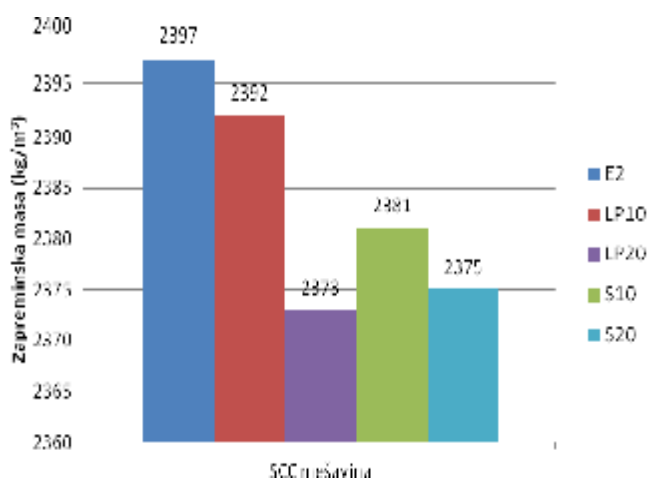
iz TE "Kostolac", a mešavine oznake LP3 i LP4 sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara". U mešavinama LP1 i LP3, osim krečnjačkog brašna, u svojstvu filera je upotrebljen leteći pepeo u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera (220 kg/m^3) a u mešavinama LP2 i LP4 u količini od 20%. Ostale komponente, količine cementa (380 kg/m^3), vode (183 kg/m^3) i agregata (1700 kg/m^3) u svim ovim mešavinama bile su iste. Kod svih mešavina je dozirano 7.6 kg/m^3 superplastifikatora (2% u odnosu na masu cementa, odnosno 1.27% u odnosu na masu praškaste komponente koja je uključivala cement, krečnjačko brašno i leteći pepeo).

Sa druge strane, u okviru istraživanja SCC mešavina sa spršenim sumporom u svojstvu mineralnog dodatka na bazi industrijskih nusprodukata, između ostalog, upravljane su i ispitivane mešavine oznake S10 i S20, koje su sadržale respektivno 10% i 20% spršenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (220 kg/m^3). Ostale komponente (cement, voda, agregat i superplastifikator) dozirane su u ove dve mešavine u istim količinama kao i kod svih prethodno pomenutih SCC mešavina sa letećim pepelom (LP1, LP2, LP3 i LP4).

Prilikom dalje analize će rezultati ispitivanja SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela biti predstavljeni kao prosečna vrednost rezultata ispitivanja, odnosno biće zanemaren efekat porekla letećeg pepela (TE "Kolubara" i TE "Kostolac"). Postoje dva razloga za ovaj potez: prvo, ovakva uporedna analiza (bazirana na vrsti upotrebljenog mineralnog dodatka) biće jednostavnija i očiglednija, drugo, poređenjem rezultata ispitivanja SCC mešavine upravljane sa spršenim sumporom sa svakom od SCC mešavina sa letećim pepelom određenog porekla ne bi imala značajnog efekta u smislu rezultata ovih poređenja. U tom smislu biće poređene mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela (označene sa LP10 i LP20) sa mešavinama koje sadrže iste količine spršenog sumpora (označene oznakama S10 i S20).

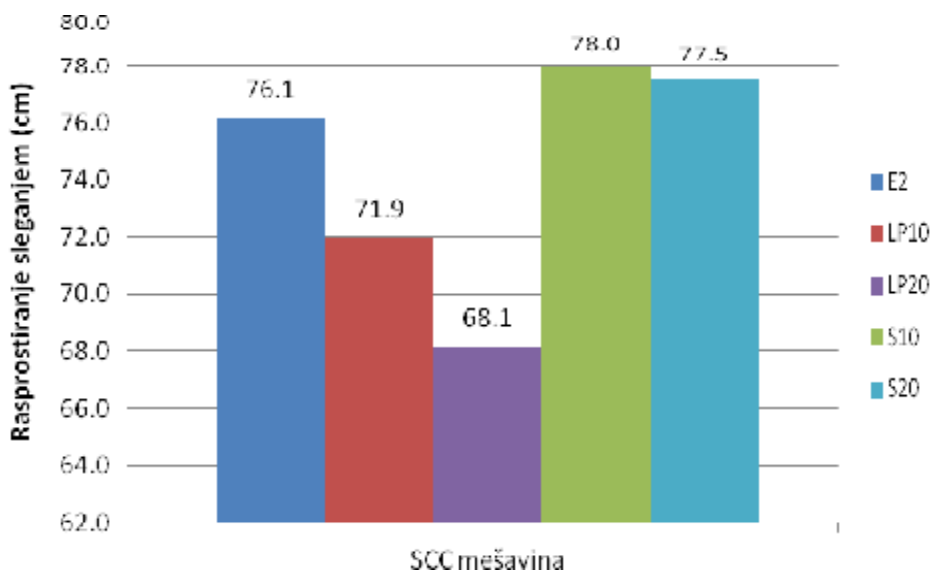
Uporedni prikaz vrednosti **zapreminske mase svežih SCC mešavina** prikazan je na slici 8.23. Na slici su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina upravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% spršenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene

oznakama S10 i S20). Kao što se to sa slike može videti, zapreminska masa mešavine opada u slučaju zamene dela mineralnog dodatka (krečnjačkog brašna) letećim pepelom ili spraešenim sumporom. U slučaju kada je dozirano 10% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada vrednosti zapreminske mase od 0.2%, a u slučaju kada je dozirano 10% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, taj pad iznosi 0.7% u odnosu na referentnu mešavinu (spravljen samo sa krečnjačkim brašnom). U slučaju kada je dozirano 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada vrednosti zapreminske mase od 1.0%, a u slučaju kada je dozirano 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada od 0.9%. Može se izvesti generalno opažanje da su u prikazanim slučajevima vrednosti pada zapreminske mase relativno male, nezavisno od stepena zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom ili spraešenim sumporom, pa ne može da se izvede pouzdan zaključak koja vrsta materijala (leteći pepeo ili spraešeni sumpor) dovodi do većeg pada vrednosti zapreminske mase.



Slika 8.23 Uporedni prikaz vrednosti zapreminske mase svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim sumporom

Uporedni prikaz vrednosti **rasprostiranja sleganjem** svežih SCC mešavina prikazan je na slici 8.24. Na ovom grafiku su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljen sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene oznakama S10 i S20).

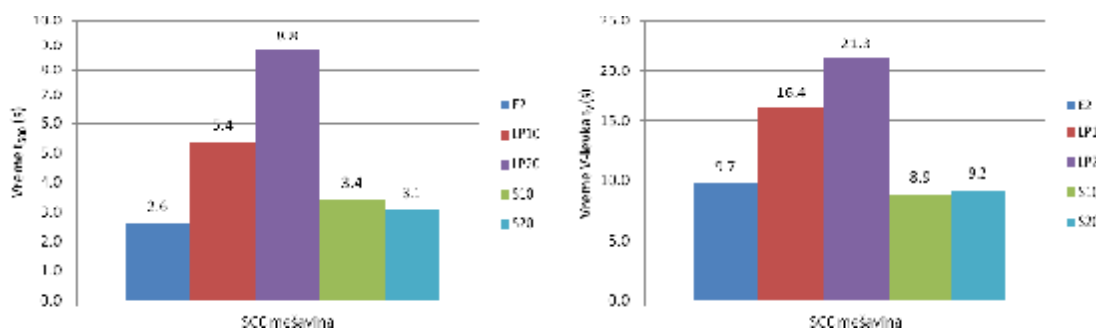


Slika 8.24 Uporedni prikaz vrednosti rasprostiranja sleganjem svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim sumporom

U slučaju kada je dozirano 10% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada vrednosti rasprostiranja sleganjem od 5.5%, a u slučaju kada je dozirano 10% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do porasta od 2.5% u odnosu na referentnu mešavinu (spravljenju samo sa krečnjačkim brašnom). U slučaju kada je dozirano 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada vrednosti rasprostiranja sleganjem od 10.5%, a u slučaju kada je dozirano 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do porasta od 1.8%. Na osnovu svega rečenog, može se izvesti generalno opažanje da je, kada je u pitanju rasprostiranje sleganjem SCC mešavina, efekat doziranja letećeg pepela suprotan efektu doziranja spraešenog sumpora. Naime, doziranje letećeg pepela u iznosu od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira padom sposobnosti tečenja merene pomoću metode rasprostiranja sleganjem, dok doziranje spraešenog sumpora u istim iznosima rezultira povećanjem sposobnosti tečenja.

Uporedni prikazi vrednosti **vremena t_{500} i t_v** svežih SCC mešavina prikazani su na slici 8.25. Na slici su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljenju sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC

mešavine sa 10% i 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene oznakama S10 i S20).



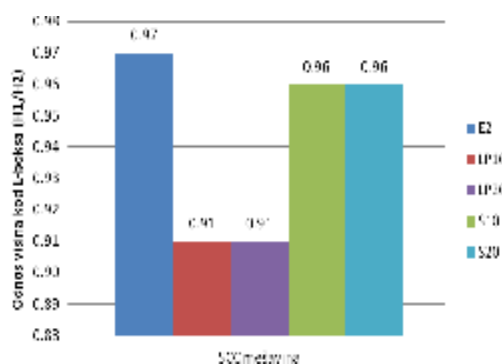
Slika 8.25 Uporedni prikaz vrednosti vremena t_{500} i t_v kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim sumporom

Doziranje letećeg pepela u iznosu od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira značajnijim padom svojstva sposobnosti punjenja merenog pomoću vremena t_{500} (porast vrednosti od 107.7% i 238.5%, respektivno) dok doziranje sprášenog sumpora u istim iznosima rezultira malim padom sposobnosti punjenja merenog pomoću vremena t_{500} (porast vrednosti od 30.5% i 17.2%, respektivno). Što se vrednosti vremena t_v tiče, pomenutim dozažama od 10% i 20% letećeg pepela odgovaraju porasti od 68.5% i 119.1%, respektivno, ali u slučaju upotrebe sprášenog sumpora evidentno je da je trend drugačiji. Naime, u ovom slučaju dolazi do pada vrednosti vremena t_v , i to u iznosu od 8.8% kod SCC mešavine sa 10% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera i 5.3% kod kod SCC mešavine sa 10% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera.

Uporedni prikaz vrednosti **odnosa visina H2/H1** na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa kod svežih SCC mešavina, prikazan je na slici 8.26. Na ovom grafiku su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene oznakama S10 i S20).

U slučaju kada je dozirano 10% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada sposobnosti prolaska merene na osnovu vrednosti odnosa visina H2/H1 od 6.2%, a u slučaju kada je dozirano 10% sprášenog sumpora u odnosu

na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada od 1.0% u odnosu na referentnu mešavinu (spravljenu samo sa krečnjačkim brašnom). U slučaju kada je dozirano 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada sposobnosti prolaska merene na osnovu vrednosti odnosa visina H2/H1 od 6.2%, a u slučaju kada je dozirano 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada od 1.0%. Na osnovu svega rečenog, može se izvesti generalno opažanje da je, kada je u pitanju sposobnost prolaska merena na osnovu vrednosti odnosa visina H2/H1 SCC mešavina, efekat doziranja letećeg pepela značajniji nego u slučaju doziranja spraćenog sumpora (rezultat je značajno veći pad vrednosti odnosa visina H2/H1 u odnosu na referentnu mešavinu).

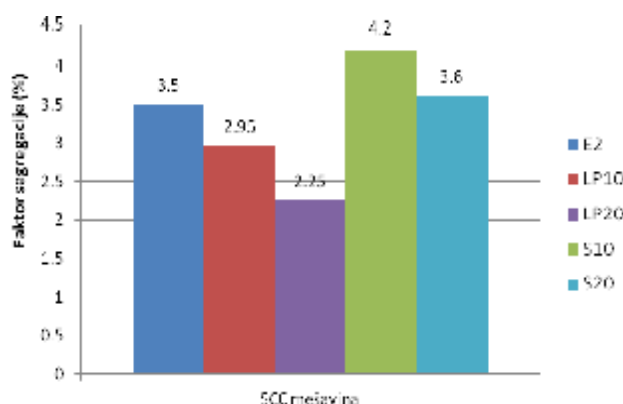


Slika 8.26 Uporedni prikaz vrednosti odnosa visina H2/H1 kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraćenim sumporom

Uporedni prikaz vrednosti **faktora segregacije** kod svežih SCC mešavina, prikazan je na slici 8.27. Na ovom grafiku su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene oznakama S10 i S20).

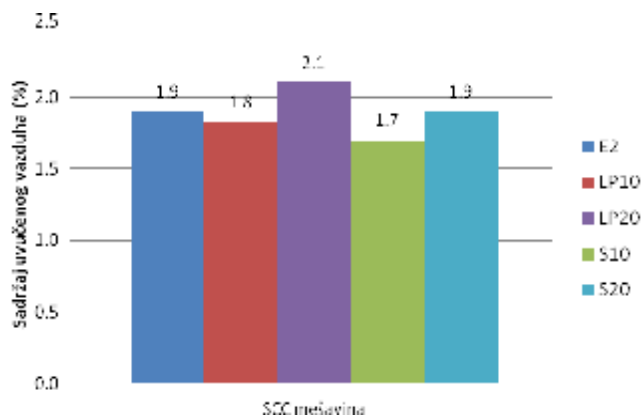
U slučaju kada je dozirano 10% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do povećanja otpornosti prema segregaciji merene na osnovu vrednosti faktora segregacije i to u iznosu od 15.7%, a u slučaju kada je dozirano 10% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada otpornosti prema segregaciji (došlo je do porasta faktora segregacije u iznosu od 20.0%) u odnosu na referentnu mešavinu (spravljenu samo sa krečnjačkim brašnom). U slučaju

kada je dozirano 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do povećanja otpornosti prema segregaciji merene na osnovu vrednosti faktora segregacije i to u iznosu od 35.7%, a u slučaju kada je dozirano 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada otpornosti prema segregaciji (došlo je do porasta faktora segregacije u iznosu od 2.9%) u odnosu na referentnu mešavinu (spravljenju samo sa krečnjačkim brašnom). Na osnovu svega rečenog, može se izvesti generalno opažanje da je, kada je u pitanju otpornost prema segregaciji merena na osnovu vrednosti faktora segregacije, ponašanje SCC mešavina sa letećim pepelom suprotno ponašanju SCC mešavina sa spraćenim sumporom. Ovaj efekat može se formulisati u vidu konstatacije da doziranje letećeg pepela dovodi do povećanja otpornosti prema segregaciji SCC mešavina, a da se efekat dodavanja spraćenog sumpora ogleda u smanjenju otpornosti prema segregaciji kod SCC mešavina. Pri tome, povećanje količine letećeg pepela sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira srazmernim povećanjem otpornosti prema segregaciji, dok za doziranje istih količina sumpora efekat u vidu trenda nije uočljiv.



Slika 8.27 Uporedni prikaz vrednosti faktora segregacije kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraćenim sumporom

Uporedni prikaz vrednosti **sadržaja uvučenog vazduha** kod svežih SCC mešavina, prikazan je na slici 8.28. Na ovom grafiku su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljenju sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene oznakama S10 i S20).



Slika 8.28 Uporedni prikaz vrednosti sadržaja uvučenog vazduha kod svežih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim sumporom

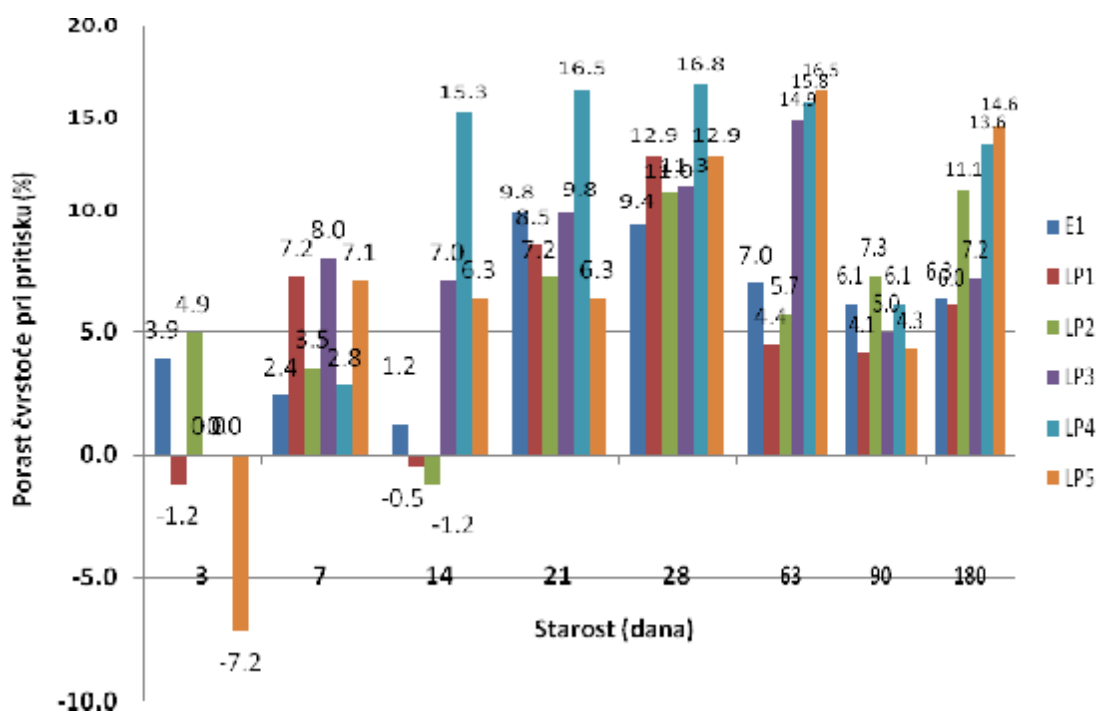
U slučaju kada je dozirano 10% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada vrednosti sadržaja uvučenog vazduha i to u iznosu od 3.9%, a u slučaju kada je dozirano 10% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do pada vrednosti sadržaja uvučenog vazduha u iznosu od 10.5% u odnosu na referentnu mešavinu (spravljenju samo sa krečnjačkim brašnom). U slučaju kada je dozirano 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, došlo je do povećanja vrednosti sadržaja uvučenog vazduha i to u iznosu od 10.5%, a u slučaju kada je dozirano 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, izmerena je jednaka vrednost sadržaja uvučenog vazduha kao kod referentne mešavine (spravljenju samo sa krečnjačkim brašnom). Što se tiče poređenja vrednosti sadržaja uvučenog vazduha u mešavinama sa letećim pepelom i sa spraešenim sumporom, može se reći da nije uočljiv trend promene sadržaja uvučenog vazduha u funkciji od upotrebljenog mineralnog dodatka.

9. Analiza i diskusija rezultata ispitivanja SCC mešavina u očvrslom stanju

9.1 Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava u očvrslom stanju SCC sa LP

U ovom delu će biti diskutovana svojstva spravljenih mešavina sa letećim pepelom (LP) u svežem i očvrslom stanju, koja su ispitivana eksperimentalnim putem i prikazana u ovom radu. U pitanju je sedam mešavina i to: dve referentne SCC mešavine (oznake E1 i E2, spravljene bez letećeg pepela), zatim SCC mešavine spravljene sa 10%, 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" (oznake LP1 i LP2) u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (filera), kao i SCC mešavine spravljene sa 10%, 20% i 50% letećeg pepela iz TE "Kolubara" (oznake LP3, LP4 i LP5), u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (filera). U pogledu sastava, količine cementa i agregata održavane su u svim mešavinama konstantnim (cement 380 kg/m^3 i agregat 1700 kg/m^3). Takođe, ukupan sadržaj filera (ukupna masa krečnjačkog brašna i letećeg pepela) održavan je konstantnim i iznosio je 220 kg/m^3 . Iz razloga bolje uporedne analize mešavina, spravljene su dve referentne mešavine SCC: jedna sa 10 kg/m^3 manje vode (mešavina označena sa E1, sa 173 kg/m^3 vode) uz uslov da čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana kod ove mešavine bude približno jednaka čvrstoći pri pritisku mešavina sa letećim pepelom ($70 \pm 3 \text{ MPa}$), i druga sa istom količinom vode (183 kg/m^3) kao kod svih mešavina sa LP (mešavina oznake E2). U mešavini sa 50% letećeg pepela (oznake LP5), da bi se dobila svojstva ugradljivosti za dati sadržaj LP i krečnjačkog brašna, povećana je količina superplastifikatora, sa 2% na 3% u odnosu na masu cementa (sa 7.6 kg/m^3 na 11.4 kg/m^3). Na SCC sa letećim pepelom ispitivana su sledeća svojstva u očvrslom stanju: čvrstoća pri pritisku (pri starosti od 3, 7, 14, 21, 28, 63, 90 i 180 dana), čvrstoća pri zatezanju cepanjem (ispitivanja pri starosti od 28, 63 i 180 dana), čvrstoća pri zatezanju savijanjem (ispitivanja pri starosti od 28 i 180 dana), atezija (čvrstoća veze) čeličnog pečata prečnika 20mm i 50mm na površini ispitivanog betona (ispitivanja pri starosti od 180 dana) - ispitivanje "pull-off" metodom, statički modul elastičnosti, dijagram σ - ϵ , brzina ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, dinamički Poasonov koeficijent, otpornost na dejstvo mraza, otpornost na dejstvo mraza i soli, otpornost na dejstvo vode pod pritiskom, deformacija skupljanja i SEM analiza poprečnog preseka betona.

Procentualne promene (porast) vrednosti čvrstoće pri pritisku kod SCC sa LP (mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" i mešavine sa 10%, 20% i 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera) u odnosu na SCC mešavinu E2 (referentna mešavina, odnosno mešavina spravljena bez letećeg pepela) prikazane su na slici 9.1.



Slika 9.1 Procentualni porast čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2, bez letećeg pepela

Generalno posmatrano, što se tiče **čvrstoće pri pritisku** ispitivanih serija SCC mešavina, može se reći da je u najvećem broju slučajeva došlo do porasta vrednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljaju samo sa krečnjačkim brašnom, bez letećeg pepela), pri čemu je najveći procentualni porast čvrstoće pri pritisku od 16.8% zabeležen kod mešavine LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) pri starosti od 28 dana. Pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljaju samo sa krečnjačkim brašnom, bez letećeg pepela) zabeležen je samo kod tri mešavine, i to pri starostima od 3 i 14 dana. Naime, pri starosti od 3 dana čvrstoća pri pritisku mešavine LP1 (SCC mešavina spravljena sa

letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u iznosu od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) bila je 1.2% manja od čvrstoće pri pritisku referentne mešavine E2, a čvrstoća pri pritisku mešavine LP5 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) bila je 7.2% manja od čvrstoće pri pritisku referentne mešavine E2. Takođe, pri starosti od 14 dana, čvrstoća pri pritisku mešavine LP1 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u iznosu od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) bila je 0.5% manja od čvrstoće pri pritisku referentne mešavine E2, a čvrstoća pri pritisku mešavine LP2 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) bila je 1.2% manja od čvrstoće pri pritisku referentne mešavine E2.

Vrednosti čvrstoće pri pritisku kod SCC sa LP u odnosu na SCC mešavinu E2 (mešavinu spravljenu bez letećeg pepela) su pri svim starostima, osim pri starosti od 3 dana, bile više, što se slaže sa rezultatima istraživanja koje je sproveo Siddique 2003. [244] za starosti od 7 do 180 dana, pri delimičnoj zameni 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.

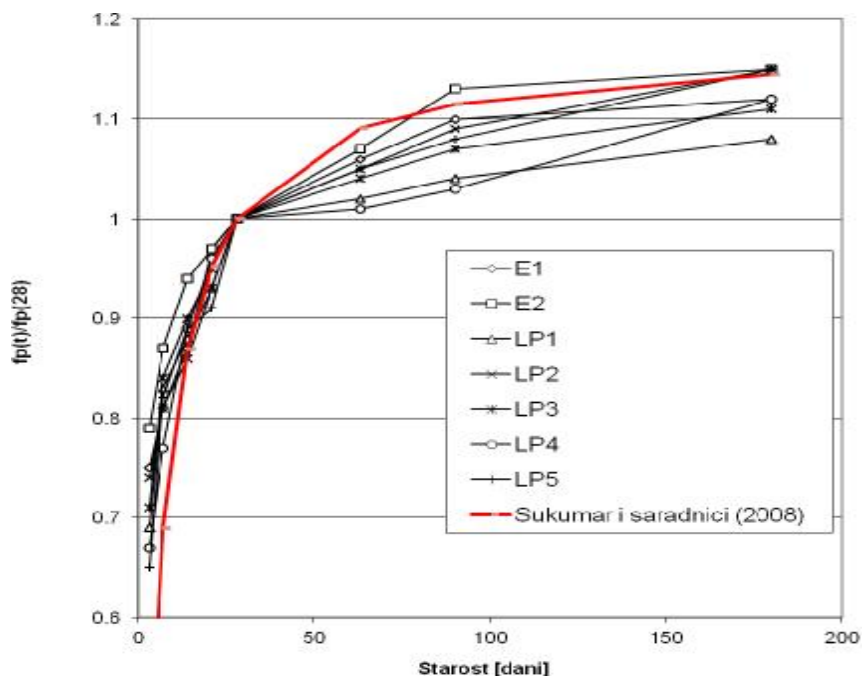
Sa aspekta povećanja količine doziranog letećeg pepela, mogu se porediti mešavine oznake LP1 i LP2 (SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" u odnosu na ukupnu količinu filera u mešavini), i analogno mešavine oznake LP3 i LP4 (SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu količinu filera u mešavini). Na osnovu predmetnog poređenja može se primetiti da je sa povećanjem količine letećeg pepela pri manjim starostima došlo do pada čvrstoće pri pritisku, a pri većim starostima došlo je do povećanja čvrstoće pri pritisku. Ovaj porast čvrstoće pri pritisku sa povećanjem količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini se može pripisati pucolanskom efektu, koji je izraženiji kod primene većih količina letećeg pepela i pri većim starostima betona. Povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini (mešavina oznake LP5) doveo je do suprotstavljenih efekata, odnosno porasta čvrstoće pri jednim i pada pri drugim starostima. Ovo se može objasniti činjenicom da se, osim već pomenutog pozitivnog

pucolanskog efekta, u mešavinama javlja i negativni efekat prisustva mehanički slabijih zrna letećeg pepela (naročito krupnijih zrna nehomogenog sastava). Ipak treba istaći da je pri svim starostima, osim pri starosti od 3 dana, SCC mešavina oznake LP5 pokazala 4.3% (pri starosti od 90 dana) do 16.5% (pri starosti od 63 dana) višu čvrstoću pri pritisku nego referentna mešavina spravljena bez letećeg pepela, oznake E2. U tom smislu može se opaziti da je evidentan pozitivan efekat upotrebe letećeg pepela u odnosu na SCC mešavinu bez letećeg pepela.

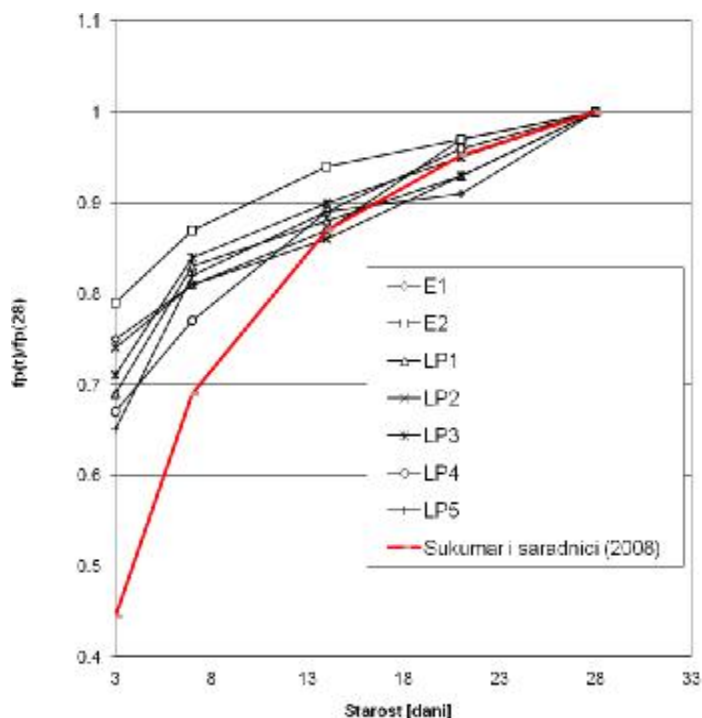
U slučaju da se porede efekti upotrebe letećeg pepela različitog porekla, u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, može se primetiti da je pri svim starostima, osim pri starosti od 28 dana, čvrstoća pri pritisku uzoraka SCC mešavine sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" bila 0.7-10% viša nego čvrstoća pri pritisku uzoraka SCC mešavine sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac". U slučaju da se porede efekti upotrebe letećeg pepela različitog porekla, u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini, može se primetiti da je pri svim starostima, osim pri starostima od 3, 7 i 90 dana, čvrstoća pri pritisku uzoraka SCC mešavine sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" bila 2.3-16.7% viša nego čvrstoća pri pritisku uzoraka SCC mešavine sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac".

Brzina prirasta čvrstoće pri pritisku betona sa letećim pepelom zavisi od velikog broja faktora. Kako se obe vrste upotrebljenih LP, sa preko 80% ukupne mase oksida $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, po sastavu svrstavaju u klasu F, očekivan je efekat kasnijeg prirasta čvrstoće betona, ali i sporijeg razvoja čvrstoće pri malim starostima. Međutim, kao što se sa slike 9.2 može videti, prirast čvrstoće pri pritisku svih ispitivanih SCC sa LP je bio relativno sličan. Napominje se da je kod mešavine E2 prirast čvrstoće pri pritisku bio najbrži (najviša zavisnost na grafiku). Slično važi za mešavinu E1, mada je taj efekat evidentniji pri starostima preko 28 dana. Odatle se može konstatovati da su brzine prirasta čvrstoće pri pritisku kod SCC mešavina sa LP (SCC mešavine oznake LP1, LP2, LP3, LP4 i LP5) bile niže nego kod mešavina spravljenih bez LP (mešavine oznake E1 i E2). U cilju boljeg uvida u vrednosti prirasta čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa LP u vremenskom intervalu od 28 dana, na slici 9.3 dat je dijagram za vremenski period od 3 do 28 dana. Poređenjem dobijenih vrednosti sa teorijskim

vrednostima dobijenim na osnovu zavisnosti (formula 2.9. u poglavlju 2) koju su dali Sukumar i saradnici 2008. [277] za SCC sa velikim količinama LP, vidi se dobra korelacija.



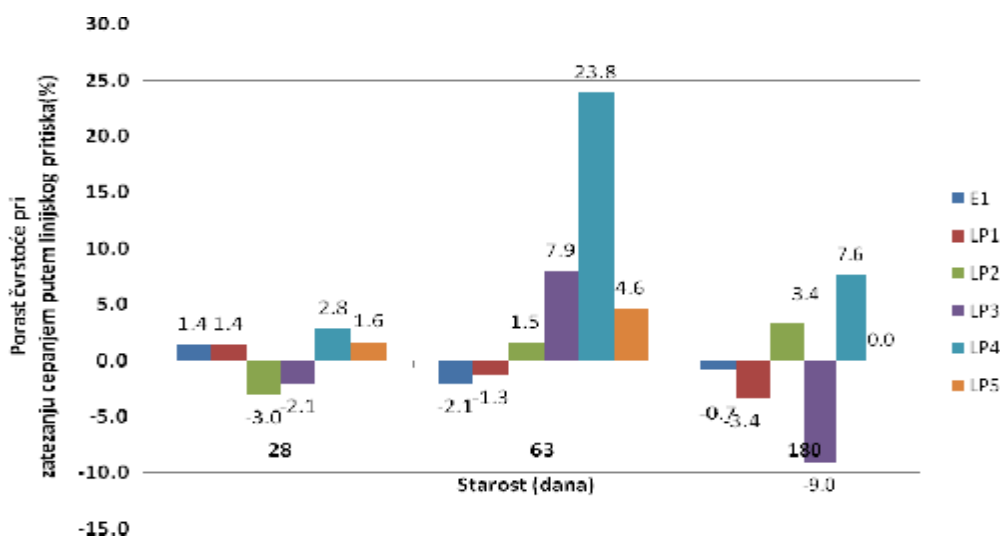
Slika 9.2 Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa LP



Slika 9.3 Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa LP u prvih 28 dana

Pri manjim starostima, vrednosti dobijene pomoću navedene formule su na strani sigurnosti (niže od stvarnih). Pri starostima većim od 28 dana vrednosti dobijene pomoću formule su više od stvarnih. Vrednosti dobijene na osnovu predložene formule niže su od svih stvarnih vrednosti dobijenih na osnovu ispitivanja u ovom radu pri starostima od 3 i 7 dana (u proseku oko 40% i oko 15%, respektivno). Pri starosti od 14 dana vrednost dobijena na osnovu predložene formule je viša samo od vrednosti za SCC mešavinu oznake LP2 (SCC mešavina spravljena sa 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" u odnosu na ukupnu masu filera), a pri starosti od 21 dan je bliska prosečnoj vrednosti rezultata ispitivanja za sve SCC mešavine sa LP.

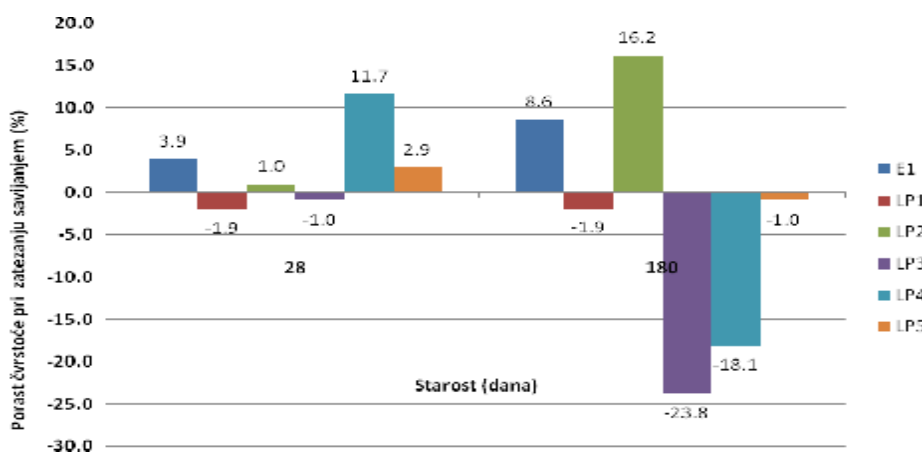
Dijagram koji prikazuje promenu (porast) **čvrstoće pri zatezanju** cepanjem putem linijskog pritiska svih SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.4. Što se tiče vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, vrednosti dobijene na SCC mešavinama oznaka E1, LP1, LP2, LP3, LP4 i LP5 u odnosu na SCC mešavinu oznake E2 kretale su se u granicama od -9.0% za mešavinu oznake LP3 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) pri starosti od 180 dana, do 23.8% za mešavinu oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu), pri starosti od 63 dana.



Slika 9.4 Procentualni porast vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenju bez letećeg pepela

U slučaju poređenja mešavina sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" (10% i 20% letećeg pepela), pri svim starostima je čvrstoća pri zatezanju cepanjem kod mešavine LP3 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) bila niža od čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod mešavine oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) i to u iznosu od 5.0%, 14.7% i 18.2%, pri starostima od 28, 63 i 180 dana. U slučaju poređenja mešavina sa 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" i poreklom iz TE "Kostolac" (uticaj porekla letećeg pepela), pri svim starostima je čvrstoća pri zatezanju cepanjem kod mešavine LP2 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) bila niža od čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod mešavine oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) i to u iznosu od 5.7%, 18.0% i 3.9%, pri starostima od 28, 63 i 180 dana. Na osnovu svega rečenog, može se primetiti da je mešavina oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) imala najviše vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem u odnosu na sve ispitivane SCC mešavine.

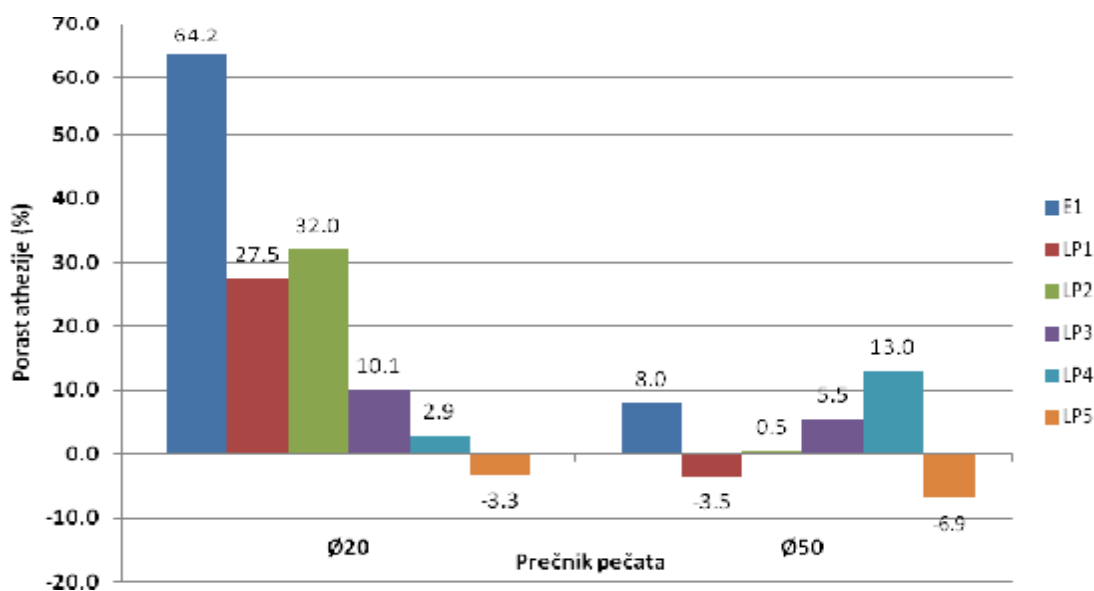
Dijagram koji prikazuje promenu (porast) **čvrstoće pri zatezanju savijanjem** svih SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.5.



Slika 9.5 Procentualni porast vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenju bez letećeg pepela

Što se tiče vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem, vrednosti dobijene na SCC mešavinama oznaka E1, LP1, LP2, LP3, LP4 i LP5 u odnosu na SCC mešavinu oznake E2 kretale su se u granicama od -23.8% za mešavinu oznake LP3 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) pri starosti od 180 dana, do 16.2% za mešavinu oznake LP2 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) pri starosti od 180 dana.

Dijagram koji prikazuje promenu (porast) **athezije** svih SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (ispitivanje obavljeno "pull-off" metodom) prikazan je na slici 9.6. Pri ispitivanju athezije "pull-off" metodom, upotrebljeni su pečati sa dva različita prečnika ($\varnothing 20\text{mm}$ i $\varnothing 50\text{mm}$), a ispitivanje je obavljeno pri starosti od 28 dana.



Slika 9.6 Procentualni porast vrednosti athezije ("pull-off" metoda) u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenju bez letećeg pepela, pri starosti od 28 dana

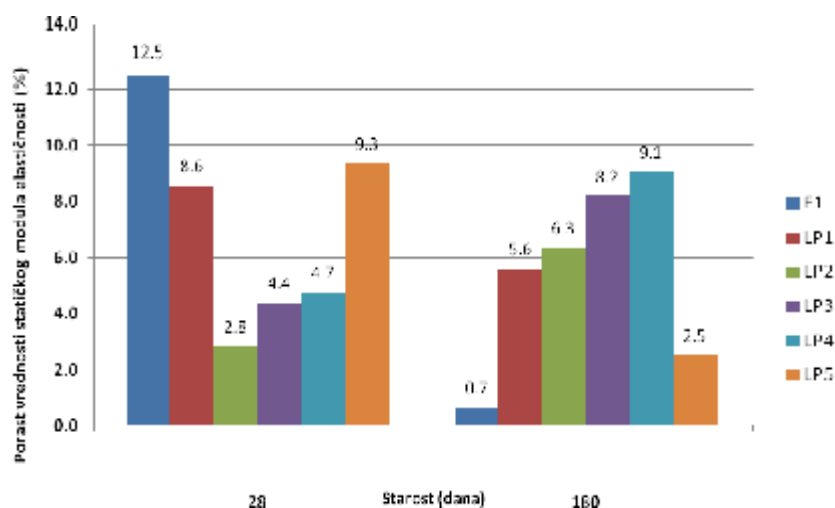
Nezavisno od prečnika upotrebljenog pečata, kod svih mešavina izuzev mešavine oznake LP5 athezija je bila veća nego kod referentne mešavine oznake E2. Kod pomenute mešavine LP5 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) athezija je bila 3.3% manja od athezije merene kod referentne mešavine oznake E2 pri upotrebi pečata prečnika $\varnothing 20\text{mm}$, odnosno 6.9% manja pri upotrebi pečata prečnika $\varnothing 50\text{mm}$.

Porast vrednosti athezije kod ostalih mešavina, u odnosu na referentnu mešavinu E2 kretao se u granicama od 2.9% za SCC mešavinu oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) do 64.2% za SCC mešavinu oznake E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m³ manje vode), pri upotrebi pečata prečnika Ø20mm. Pri upotrebi pečata prečnika Ø50mm, porast vrednosti athezije kod ostalih mešavina, u odnosu na referentnu mešavinu E2 kretalo se u granicama od 0.5% za SCC mešavinu oznake LP2 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) do 13.0% za SCC mešavinu oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu).

Generalno posmatrano može se reći da vrednosti **čvrstoće pri zatezanju** (pri zatezanju savijanjem, pri zatezanju cepanjem i athezija) SCC sa LP nisu značajnije odstupale od odgovarajućih vrednosti kod referentne mešavine E2. Međutim, kada se uporede rezultati ovih ispitivanja za slučaj da je u SCC mešavinama prisutno 10% letećeg pepela i rezultati za slučaj da je u SCC mešavinama prisutno 20% letećeg pepela, može se izvesti opažanje da je sa povećanjem sadržaja letećeg pepela sa 10% na 20% došlo do porasta vrednosti čvrstoće pri zatezanju (savijanjem, pri zatezanju cepanjem i athezije). Ovaj komentar važi i za leteći pepeo poreklom iz TE "Kostolac" i za leteći pepeo poreklom iz TE "Kolubara". Navodi iz literature (Siddique 2003. [244]) 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, ne mogu biti potvrđeni.

Dijagram koji prikazuje promenu (porast) **vrednosti statičkog modula elastičnosti** svih SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.7. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti obavljeno je pri starosti od 28 dana i pri starosti od 180 dana. Prilikom ispitivanja statičkog modula elastičnosti pri starosti od 28 dana, sve SCC mešavine (E1, LP1, LP2, LP3, LP4 i LP5) pokazale su više vrednosti ovog parametra u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2, u granicama od 2.8% kod mešavine LP2 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 20% u

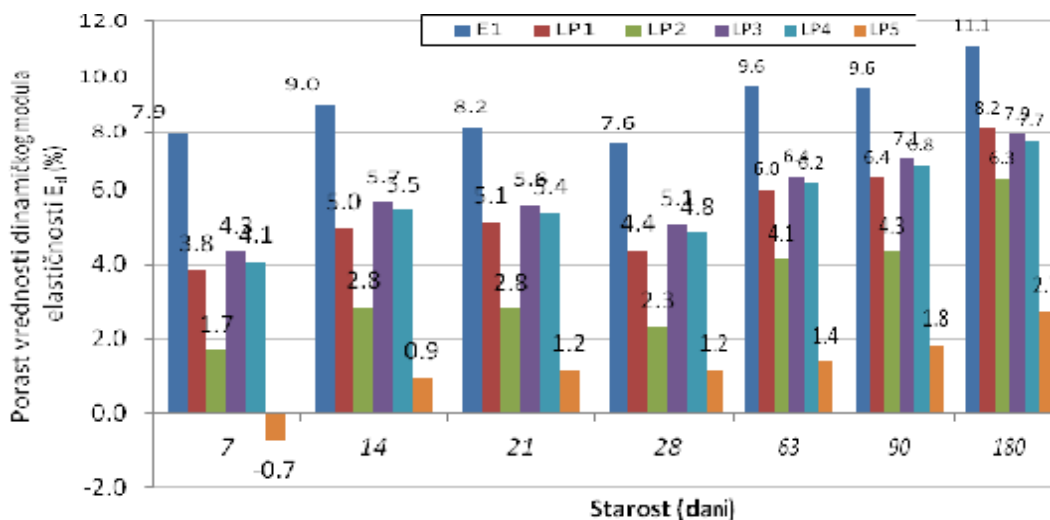
odnosu na ukupnu masu filera u mešavini, respektivno) do oko 9.3% kod SCC mešavine LP5 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini). Takođe, pri starosti od 180 dana, sve SCC mešavine (E1, LP1, LP2, LP3, LP4 i LP5) pokazale su više vrednosti ovog parametra u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2 u granicama od 0.7% za mešavinu E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m^3 manje vode) do oko 9.1% kod SCC mešavine LP4 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini).



Slika 9.7 Procentualni porast vrednosti statičkog modula elastičnosti u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenu bez letećeg pepela

Može se primetiti da su vrednosti **statičkog modula elastičnosti** kod SCC sa letećim pepelom bile više od odgovarajućih vrednosti kod referentne mešavine E2, pri starosti od 28 i 180 dana. Ovo je u saglasnosti sa rezultatima ispitivanja NVC koje je prikazao Siddique [244], odnosno da dodatak letećeg pepela rezultira porastom vrednosti statičkog modula elastičnosti.

Promena vrednosti **dinamičkog modula elastičnosti** E_d praćena je na uzorcima izrađenim od svih ispitivanih SCC mešavina, do starosti od 180 dana. Procentualna odstupanja (porast) vrednosti dinamičkog modula elastičnosti svih ispitivanih serija SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenu bez letećeg pepela, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) prikazana su na slici 9.8.



Slika 9.8 Procentualna odstupanja (porast) vrednosti dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih serija SCC mešavina sa letećim pepelom

Što se tiče dinamičkog modula elastičnosti E_d , sa izuzetkom pada od 0.7% zabeleženog kod mešavine oznake LP5 pri starosti od 3 dana, kod svih ispitivanih SCC mešavina zabeležene su više vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2 (spravljenu bez letećeg pepela, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) u granicama od 0.9% za mešavinu LP5 (spravljenu sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) pri starosti od 14 dana do 11.1% za mešavinu E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m^3 manje vode) pri starosti od 180 dana.

Kao što se to sa slike 9.8 može videti, relativni odnosi vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d pri svim starostima ostali su u najvećem broju slučajeva isti. Naime, najviša vrednost dinamičkog modula elastičnosti E_d uvek je zabeležena kod SCC mešavine oznake E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m^3 manje vode). Pri svim starostima je ova vrednost bila viša od vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d referentne SCC mešavine E2 u iznosu od 7.2% (za starost od 7 dana) do 11.1% (za starost od 180 dana). Dalje, vrednost dinamičkog modula elastičnosti E_d pri svim starostima kod SCC mešavine oznake LP5 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) je najbliža vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d

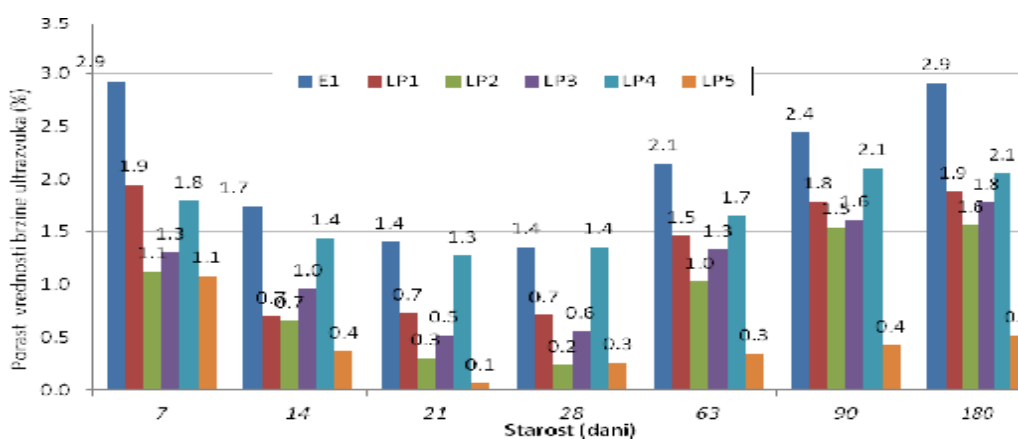
referentne SCC mešavine E2 (spravljene bez letećeg pepela, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) i to niža 0.7% (za starost od 7 dana) i viša za 0.9% (pri starosti od 14 dana), 1.2% (pri starostima od 21 i 28 dana), 1.4% (pri starosti od 63 dana), 1.8% (pri starosti od 90 dana) i 2.7% (pri starosti od 180 dana). Od SCC mešavina koje su sadržale leteći pepeo, najveći porast vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d u odnosu na referentnu SCC mešavinu E2 zabeležen je kod mešavine oznake LP3 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) i to u iznosu od 4.3% pri starosti od 7 dana do 7.9% pri starosti od 180 dana.

Kada je reč o povećanju količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac", na osnovu dijagrama se može primetiti da je povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera rezultiralo padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d u iznosu od 1.7-2.2% pri svim starostima. Kada se porede vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d kod SCC mešavina sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", može se primetiti da je porast količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" sa 10% na 20% i 50% u odnosu na ukupnu masu filera rezultirao padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d u iznosu od 0.2% (za povećanje sa 10% na 20%) i 3.7-4.9% (za porast sa 10% na 50%) pri svim starostima. Na osnovu svega iznetog, može se primetiti da povećanje količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera kod SCC mešavina rezultira padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d SCC mešavine, nezavisno od vrste upotrebljenog letećeg pepela i nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju.

Kada se pri istom stepenu zamene filera letećim pepelom (u iznosu od 10%) porede vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d , dobijene upotrebom letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" i TE "Kolubara" (uticaj porekla letećeg pepela), pri svim starostima osim pri starosti od 180 dana zabeležena je neznatno viša vrednost (od 0.4% za starost od 180 dana do 0.7% za starost od 28 dana) dinamičkog modula elastičnosti E_d kod SCC mešavine LP3 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) nego kod SCC mešavine oznake LP1 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini). Kada se pri istom stepenu zamene

filera letećim pepelom (u iznosu od 20%) poredе vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d , dobijene upotrebom letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" i TE "Kolubara" (uticaj porekla letećeg pepela), pri svim starostima zabeležena je viša vrednost (od 1.3% za starost od 180 dana do 2.5% za starost od 14 dana) dinamičkog modula elastičnosti E_d kod SCC mešavine LP4 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) nego kod SCC mešavine oznake LP2 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini). Na osnovu svega rečenog, može se izvesti opšti komentar da promena vrste (porekla) letećeg pepela kod SCC mešavina rezultira porastom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d SCC mešavine, ukoliko se umesto letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" upotrebi leteći pepeo poreklom iz TE "Kolubara", nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju. Ovaj porast je manji kod upotrebe letećeg pepela u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera i iznosi oko 0.4%, a veći kod upotrebe letećeg pepela u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera i iznosi u proseku oko 2.2%.

Promena vrednosti **brzine ultrazvučnog impulsa** praćena je na uzorcima izrađenim od svih ispitivanih SCC mešavina, do starosti od 180 dana. Procentualna odstupanja (porast) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod svih ispitivanih serija SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenu bez letećeg pepela, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) prikazana su na slici 9.9.



Slika 9.9 Procentualna odstupanja (porast) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa letećim pepelom

Kao što je to bilo slučaj kod ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d , a u skladu sa vrednostima prikazanim na dijagramu na slici 9.9, relativni odnosi vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa pri svim starostima ostali su isti. Naime, najviša vrednost brzine ultrazvučnog impulsa zabeležena je kod SCC mešavine oznake E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m^3 manje vode) pri svim starostima. Pri svim starostima je ova vrednost bila viša od vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa referentne mešavine E2, i to od 1.4% (za starost od 21 i 28 dana) do 2.9% (za starost od 7 i 180 dana). Dalje, vrednost brzine ultrazvučnog impulsa pri svim starostima kod SCC mešavine oznake LP5 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) je najbliža vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa referentne SCC mešavine E2 (spravljene bez letećeg pepela, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) i to od 0.1% (pri starosti od 21 dan) do 1.1% (pri starosti od 7 dana). Od SCC mešavina koje su sadržale leteći pepeo, najviši porast vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa u odnosu na referentnu SCC mešavinu E2 zabeležen je kod mešavine oznake LP4 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) i to u iznosu od 1.8% pri starosti od 7 dana do 2.1% pri starosti od 90 i 180 dana.

Kada se porede vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC mešavina sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", pri svim starostima je zabeležen efekat da je porast količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera rezultirao neznatnim padom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa pri svim starostima u iznosu do 0.8%. Kada se, pak, porede vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC mešavina sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", pri svim starostima je zabeležen isti efekat: porast količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" sa 10% na 20% i 50% u odnosu na ukupnu masu filera rezultirao je porastom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa u iznosu od 0.3-0.8% (za povećanje sa 10% na 20%) i padom od 0.2-1.2% (za dalje povećanje sa 20% na 50%) pri svim starostima. Na osnovu svega iznetog, može se primetiti da porast količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera kod SCC mešavina rezultira padom vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa SCC mešavine, nezavisno od vrste upotrebljenog letećeg pepela i nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju.

Kada se pri istom stepenu zamene filera letećim pepelom (u iznosu od 10%) porede vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa dobijene upotrebom letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" i TE "Kolubara" (uticaj porekla letećeg pepela), pri svim starostima osim pri starosti od 14 dana zabeležena je 0.1-0.6% niža vrednost brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC mešavine LP3 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) nego kod SCC mešavine oznake LP1 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini). Kada se pri istom stepenu zamene filera letećim pepelom (u iznosu od 20%) porede vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa, dobijene upotrebom letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" i TE "Kolubara" (uticaj porekla letećeg pepela), pri svim starostima zabeležena je 0.6-1.1% viša vrednost brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC mešavine LP4 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) nego kod SCC mešavine oznake LP2 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini). Na osnovu navedenih analiza SCC mešavina sa istim količinama letećeg pepela (10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera) različitog porekla (TE "Kostolac" i TE "Kolubara"), ne mogu se izvesti generalni komentari u vezi sa promenom upotrebljenog letećeg pepela. Generalno, mora se napomenuti da su sve analizirane vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa posmatranih mešavina međusobno veoma bliske i da se kreću u granicama do 2.9% u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2, odnosno u granicama do 1.2% u međusobnim uporednim analizama, što je tumačenje dobijenih rezultata učinilo dodatnim izazovom.

Što se tiče **dinamičkog Poasonovog koeficijenta**, sračunatog za sve starosti na osnovu vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d i brzine ultrazvučnog impulsa na ispitivanim serijama, ove vrednosti su se kretale u granicama od 0.220 kod mešavine oznake LP5 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) pri starosti od 180 dana, do 0.252 kod referentne mešavine oznake E2 pri starosti od 21 dan.

Kao što je poznato, **trajnost betona** zavisi od: veka upotrebljivosti konstrukcije, mogućeg budućeg načina korišćenja konstrukcije, primenjenih posebnih zaštitnih mera,

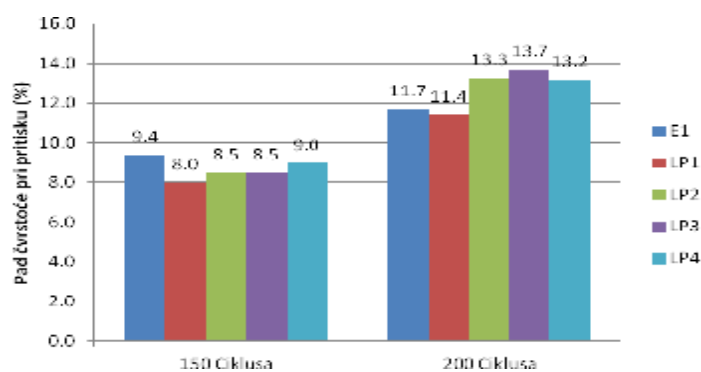
planiranog održavanja tokom upotrebe, kao i od eventualnog otkazivanja u posebnim lokalnim uslovima [109],[118]. Pojavom samozbijajućeg (samougrađujućeg) betona, eliminiše se uticaj "faktora čovek", tako da trajnost betonske konstrukcije zavisi samo od ostvarenog kvaliteta betonske mešavine [315]. Dobija se kvalitetno ujednačen zbijen beton, za koji se može dokazati (npr. ispitivanjem permeabilnosti za gasove i tečnosti, ili SEM analizom, naročito analizom prelazne zone) da je u pitanju beton visoke trajnosti [179],[211],[297]. Trajnost betona je takođe usko povezana sa vrstom oštećenja do kojih može doći u betonu. U tom smislu, na ispitivanim SCC sa LP analizirana su sledeća fizička oštećenja betona, sa aspekta trajnosti: otpornost na prodor vode pod pritiskom, otpornost betona na dejstvo mraza i otpornost betona na simultano dejstvo mraza i soli za odmrzavanje.

Što se tiče ispitivanja otpornosti SCC mešavina sa LP na **dejstvo vode pod pritiskom**, dobijene su maksimalne i prosečne dubine prodora vode u svakom od uzoraka ispitivanih serija LP. Maksimalne vrednosti prodora vode pod pritiskom kod ovih uzoraka kretale su se u granicama od 15.0 mm (za SCC mešavinu oznake E1) do 16.3 mm (za mešavinu oznake E2). Prosečne vrednosti prodora vode pod pritiskom kod ispitivanih uzoraka kretale su se u granicama od 9.3 mm kod mešavine E2 (SCC mešavina istog sastava kao mešavine sa LP, ali spravljena samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera), LP2 (spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) i LP3 (spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini) do 10.3 mm kod mešavine oznake LP1 (spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 10% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini).

Na osnovu rezultata ispitivanja vodonepropustljivosti navedenih SCC betona spravljenih bez letećeg pepela i sa letećim pepelom različitog porekla, može se izvesti konstatacija da su sve SCC mešavine sličnog stepena vodonepropustljivosti, i to visokog stepena vodonepropustljivosti. Pošto je pomenuto svojstvo vodonepropustljivosti u direktnoj vezi sa kompaktnošću, može se reći da su sve SCC mešavine ostvarile visok stepen kompaktnosti u očvrslom stanju (iako je tehnološka

operacija vibriranja pri ugrađivanju kod svih ispitivanih mešavina izostala), što predstavlja pokazatelj visoke trajnosti.

Što se tiče ispitivanja otpornosti SCC mešavina sa LP na dejstvo **mraza** (odnosno zamrzavanja i odmrzavanja), ovom ispitivanju su podvrgnute sledeće SCC mešavine: mešavina oznake E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m^3 manje vode), zatim mešavine LP1 i LP2 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini), i mešavine oznake LP3 i LP4 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini). Ispitivanje je obuhvatilo 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja. Kada je reč o otpornosti na dejstvo mraza nakon 150 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, dobijeni rezultati (pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentne uzorke od istog betona koji nisu izlagani dejstvu mraza) kretali su se od 8.0% kod SCC mešavine oznake LP1 do 9.4% kod SCC mešavine oznake E1. Kada je reč o otpornosti na dejstvo mraza nakon 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, dobijeni rezultati (pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentne uzorke od istog betona koji nisu izlagani dejstvu mraza) kretali su se od 11.4% kod SCC mešavine oznake LP1 do 13.7% kod SCC mešavine oznake LP3. Vrednosti pada čvrstoće u procentima nakon 150 i 200 ciklusa dejstva mraza prikazane su na slici 9.10.



Slika 9.10 Pad čvrstoće pri pritisku kod SCC mešavina sa LP, nakon 150 i 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, u odnosu na referentne uzorke

Što se tiče otpornosti na dejstvo mraza SCC mešavina sa LP poreklom iz TE "Kostolac", veću otpornost na dejstvo mraza imala je mešavina oznake LP1, nakon 150 i nakon 200 ciklusa. Ova razlika u otpornosti na dejstvo mraza veća je nakon 200

ciklusa i iznosi 2.9%. Može se izvesti generalni komentar da povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira padom otpornosti na dejstvo mraza. Što se tiče otpornosti na dejstvo mraza SCC mešavina sa LP poreklom iz TE "Kolubara", nakon 150 ciklusa veću otpornost na dejstvo mraza imala je mešavina oznake LP3, a nakon 200 ciklusa mešavina oznake LP4. Ova razlika u otpornosti na dejstvo mraza nakon 150 ciklusa, ali i nakon 200 ciklusa, iznosi 0.5%. Može se izvesti generalna konstatacija da povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini nema značajnog uticaja na promenu otpornosti na dejstvo mraza.

Poređenjem otpornosti na dejstvo mraza SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela od 10%, ali različitog porekla (poreklom iz TE "Kostolac" i iz TE "Kolubara"), zabeleženo je da je nakon 150 ciklusa dejstva mraza pad čvrstoće pri pritisku bio za 0.5% niži kod SCC mešavine oznake LP1 nego kod SCC mešavine oznake LP3 a nakon 200 ciklusa dejstva mraza, ovaj pad čvrstoće pri pritisku bio je za 2.3% niži. Poređenjem otpornosti na dejstvo mraza SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela od 20%, ali različitog porekla (poreklom iz TE "Kostolac" i iz TE "Kolubara"), zabeleženo je da je nakon 150 ciklusa dejstva mraza pad čvrstoće pri pritisku bio za 0.5% niži kod SCC mešavine oznake LP2 nego kod SCC mešavine oznake LP4, a nakon 200 ciklusa dejstva mraza, pad čvrstoće pri pritisku bio je za 0.1% viši kod SCC mešavine oznake LP2. Na osnovu pomenutog poređenja, može se reći da poreklo letećeg pepela nema veliki uticaj na otpornost na dejstvo mraza ispitivanih SCC mešavina.

Sve SCC mešavine spravljene bez letećeg pepela, kao i sa njim, podvrgnute su ispitivanju simultanog **dejstva mraza i soli** za odmrzavanje. Ispitivanje je obuhvatilo 25 ciklusa dejstva mraza i soli za odmrzavanje. Ovom ispitivanju su podvrgnute sledeće SCC mešavine: mešavina oznake E1 (SCC mešavina po sastavu ista kao referentna mešavina E2, ali sa 10 kg/m^3 manje vode), zatim mešavine LP1 i LP2 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", u količini od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini), i mešavine oznake LP3 i LP4 (spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u količini od 10% i 20% u odnosu na ukupnu

masu filera u mešavini), a ispitivanje je obuhvatilo 25 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja uzoraka koji su na gornjoj površini imali pričvršćen prsten sa 3% rastvorom NaCl. Na izloženoj površini ispitivanih uzoraka nije došlo do degradacije betona usled ovog kombinovanog dejstva mraza i soli za odmrzavanje. Vrednosti gubitka mase kretale su se od 0.08 mg/mm² kod SCC mešavine oznake LP2 do 0.11 mg/mm² kod mešavine oznake E1. Njima su odgovarale izmerene vrednosti dubine oštećenja, u iznosu od 0.3 mm kod SCC mešavine oznake LP1 do 0.5 mm kod SCC mešavine oznake E1.

Na osnovu sprovedena tri ispitivanja u vezi sa trajnošću SCC sa LP (otpornost na dejstvo mraza, otpornost na dejstvo mraza i soli, vodonepropustljivost) zbog relativno malih vrednosti oštećenja i relativno malih razlika izmerenih veličina kod različitih SCC mešavina sa LP, nisu utvrđene međusobne zavisnosti ponašanja različitih SCC mešavina, u smislu trajnosti.

Prema navodima dostupnim iz literature [246], za istu veličinu najkrupnijeg zrna agregata i za sve nivoe čvrstoće, deformacija **skupljanja** betona sa letećim pepelom manja je nego kod betona bez pepela, dok za manje količine pepela uticaj letećeg pepela nema značaja. U slučaju ispitivanih SCC to nije moglo biti potvrđeno, i zabeležen je trend da sa povećanjem količine letećeg pepela u SCC mešavinama dolazi do porasta vrednosti deformacije skupljanja. Ovo odstupanje od rezultata iz literature je verovatno posledica činjenice da nije vršena zamena cementa letećim pepelom, već zamena dela filera, odnosno krečnjačkog brašna. Može se pretpostaviti da je LP (kao znatno poroznija komponenta u odnosu na krečnjačko brašno) doprineo deformaciji skupljanja u sistemu u kome ostale komponente nisu menjane. Takođe, ako se uzme u obzir međusobni odnos dilatacija skupljanja SCC sa LP, primećeno je da su vrednosti veoma bliske, tako da se, generalno, radi o sličnom nivou veličine skupljanja.

Na osnovu poređenja se može reći da je skupljanje SCC sa letećim pepelom veće od skupljanja etalona u proseku 12%. Međusobni odnosi vrednosti skupljanja SCC sa letećim pepelom pri starosti od 180 dana su sledeći: SCC LP1 ima 3.3% više skupljanje nego SCC LP2 (sa duplo većim procentom zamene letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" - 20% zamene krečnjačkog filera letećim pepelom). SCC LP3 ima 2.2%

manja skupljanja nego beton sa duplo većim procentom zamene letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" (20% zamene krečnjačkog filera letećim pepelom).

Referentni beton E1 (koji sadrži 10 kg/m³ vode manje nego ostali betoni) je, saglasno svom sastavu, imao nižu vrednost deformacije skupljanja, pri svim starostima. Ova razlika je više izražena pri većim starostima.

Što se tiče **SEM analize** rasporeda i veličine pora kod SCC mešavina sa LP, obavljene uz pomoć SEM uređaja, kod mešavine E1 (koja sadrži 10 kg/m³ vode manje nego ostali betoni) oni vizuelno nisu odstupali od istih parametara kod betona E2 (takođe spravljenog sa istim komponentama, bez letećeg pepela, ali sa 10 kg/m³ više vode nego kod E1). Dalje, iako je, generalno posmatrano, sam kontakt zrna agregata i cementne matrice mogao da se okarakterise kao dobar kod svih ispitivanih SCC mešavina, treba napomenuti da je taj kontakt kod izvesnih zrna bio bolji (peščar, krečnjak) nego kod drugih (kvarcit), što je posledica porekla zrna, karaktera njegove površine i kompaktnosti (videti prilog - rezultati SEM analize SCC mešavina).

Na osnovu SEM analize SCC mešavina, može se primetiti da je kod svih mešavina ostvarena homogenost betona, dok je poroznost vizuelno posmatrano (kvalitativno) slična, bez obzira na činjenicu da je u recepturi betona oznake E1 količina vode bila manja za 10 kg/m³. Na osnovu iste analize, u okviru betona sa 50% letećeg pepela u svojstvu zamene dela mineralnog dodatka (SCC mešavina oznake LP5), može se izvesti opažanje da je poroznost manja, što se može pripisati efektu pucolanske reakcije, čiji produkti popunjavaju pore u betonu pri većim starostima.

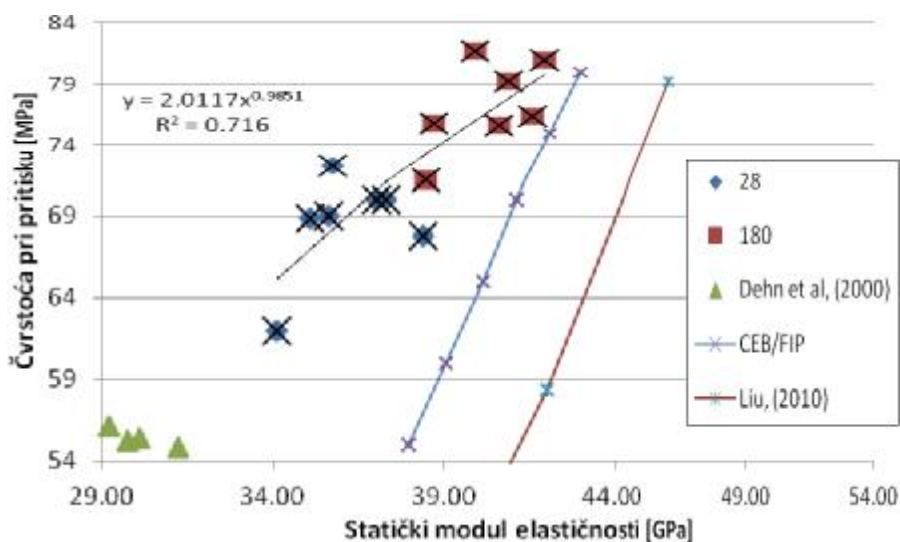
Što se tiče dimenzije prelazne zone (*Interfacial Transition Zone - ITZ*) između zrna agregata i paste, ona je varirala od 20 µm kod sitnijih zrna agregata, do 100 µm kod krupnijih. Može se takođe primetiti da se reprezentativne prelazne zone na kontaktu sa krupnim zrnom agregata kod SCC mešavina oznake E1, E2 i LP5 nisu značajno razlikovale, odnosno u tom smislu je osiguran visok stepen kompaktnosti svih ispitivanih vrsta SCC mešavina sa letećim pepelom. Na osnovu SEM analize može se primetiti da su sitnija zrna letećeg pepela (karakteristično sfernog oblika) reagovala sa matricom u većoj meri nego krupnija zrna, nepravilnijeg oblika i složenijeg hemijskog sastava.

Što se tiče disperzije zrna krečnjačkog brašna i zrna letećeg pepela, na osnovu mapiranja po elementima Si, Al, Fe, Ca, S (kvalitativna analiza) urađenog na nekoliko mesta kod svakog od uzoraka, nije uočeno grupisanje posmatranih zrna i može se primetiti da je došlo do dobre disperzije ovih sastojaka betona.

Na osnovu EDS analize može se opaziti da je kod svih analiziranih SCC mešavina sa letećim pepelom matrica sličnog sastava, bez obzira na selektovano mesto i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata (u pitanju su hidratizane faze cementa, C-S-H faza i C-H, kao i slični produkti pucolanske reakcije). Dalje, u prelaznoj zoni i na kontaktu uz zrna agregata nije zapažena veća koncentracija C-H faze nego u matrici, kao posledica guste i kompaktne strukture ove zone (što je onemogućilo rast C-H kristala u ovom području). Takođe, nisu primećene zone formiranja etringita, najverovatnije iz razloga što se radi o betonu veće starosti, u kome po pravilu prevladava silikatna struktura produkata hidratacije (videti prilog - rezultati SEM analize SCC mešavina).

9.2 Međusobne zavisnosti ispitivanih svojstava očvrsljih SCC sa letećim pepelom

Zavisnost između **čvrstoće pri pritisku i statičkog modula elastičnosti** ispitivanih betona prikazana je na slici 9.11, zajedno sa rezultatima drugih autora. Pomenuta svojstva su ispitivana na sedam serija SCC mešavina (dve bez letećeg pepela i pet mešavina sa letećim pepelom) pri starostima od 28 i 180 dana, što ukupno daje četrnaest parova vrednosti prikazanih na dijagramu. Vrednosti rezultata ispitivanja pri starosti od 180 dana su više nego pri starosti od 28 dana. Na dijagramu su prikazane i vrednosti dobijene u studiji Dehna i saradnika [69]. U poređenju sa zavisnošću dobijenom za SCC sa LP iz studije Liu 2009 [161], vrednosti dobijene u ovom istraživanju pomerene su na levo, odnosno istim čvrstoćama odgovaraju niže vrednosti statičkog modula elastičnosti. Isti komentar sledi i nakon poređenja sa modelom CEB/FIP razvijenim za NVC [49] (prikazan na istom dijagramu). U odnosu na ovaj model, dobijene vrednosti su više, a nagib funkcije je blaži.



Slika 9.11 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i statičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP

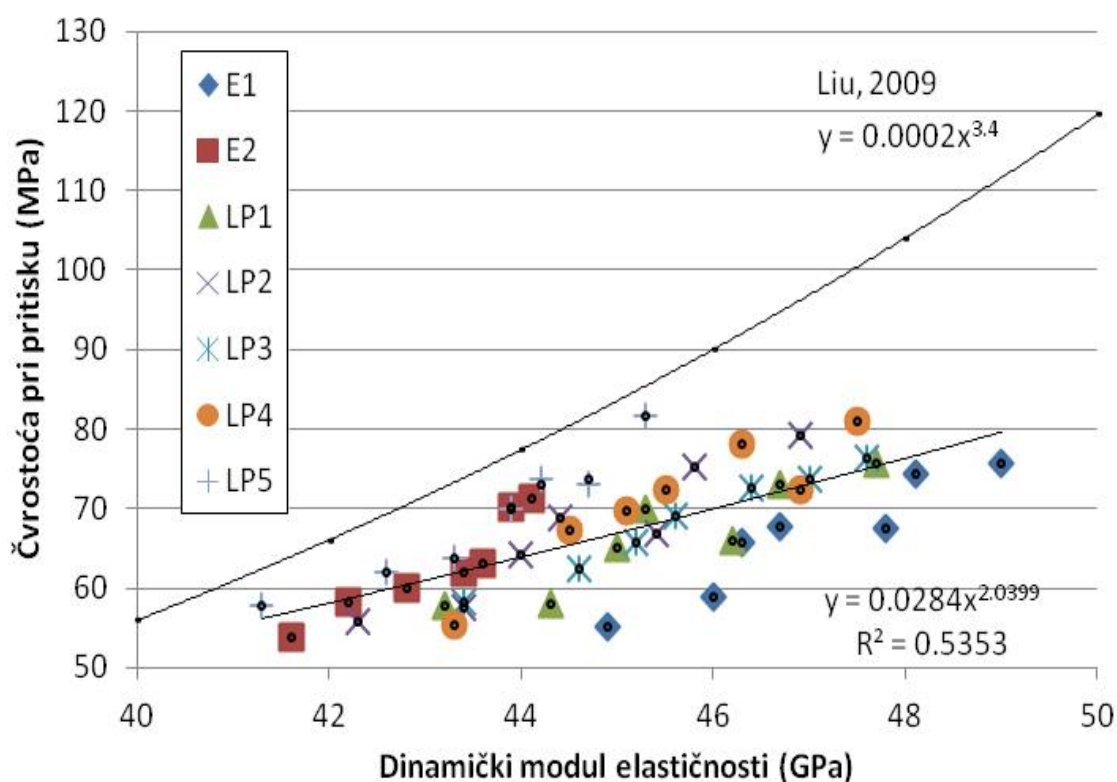
Zavisnost između **čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti** ispitivanih SCC sa LP prikazana je na slici 9.12. Na slici su prikazani parovi vrednosti pomenutih svojstava različitim bojama za različite SCC. Ovi parovi vrednosti (čvrstoća pri pritisku, dinamički modul elastičnosti) dobijeni su za po sedam starosti (7, 14, 21, 28, 63, 90 i 180 dana) svih ispitivanih SCC mešavina oznake E1, E2, LP1, LP2, LP3 i LP4 i LP5. Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti E_d za svaku od serija prikazane su u tabeli 9.1 zajedno sa koeficijentima korelacije za te serije.

Tabela 9.1 Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih SCC sa LP dobijene na osnovu regresione analize

Seriya	Dobijena funkcionalna zavisnost	r^2
E1	$0.00006 \cdot E_d^{3.6165}$	0.8854
E2	$0.00004 \cdot E_d^{4.3718}$	0.9007
LP1	$0.0011 \cdot E_d^{2.8875}$	0.8372
LP2	$0.0001 \cdot E_d^{3.515}$	0.9067
LP3	$0.0006 \cdot E_d^{3.04}$	0.9822
LP4	$0.00009 \cdot E_d^{3.5637}$	0.8408
LP5	$0.00006 \cdot E_d^{3.6985}$	0.9340

Ukoliko se zanemari uticaj količine letećeg pepela u SCC mešavinama na zavisnost između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti, dobija se formula sa

nižim stepenom korelacije (0.585) prikazana na slici 9.12. Ova zavisnost, nezavisna od sadržaja LP, usvojena je u cilju poređenja sa rezultatima drugih autora. Poređenjem sa rezultatima Liu 2009 [161] mogu se izvesti dva opažanja. Prvo opažanje je da je u pitanju slična, ali blaža zavisnost u odnosu na rezultate Liu iz 2009. Drugo opažanje je da je funkcionalna zavisnost dobijena na osnovu rezultata ispitivanja u ovom radu pomerena u desno u odnosu na rezultate Liu. To znači da su za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku dobijene vrednosti dinamičkog modula elastičnosti više nego kod Liu.



Slika 9.12 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP

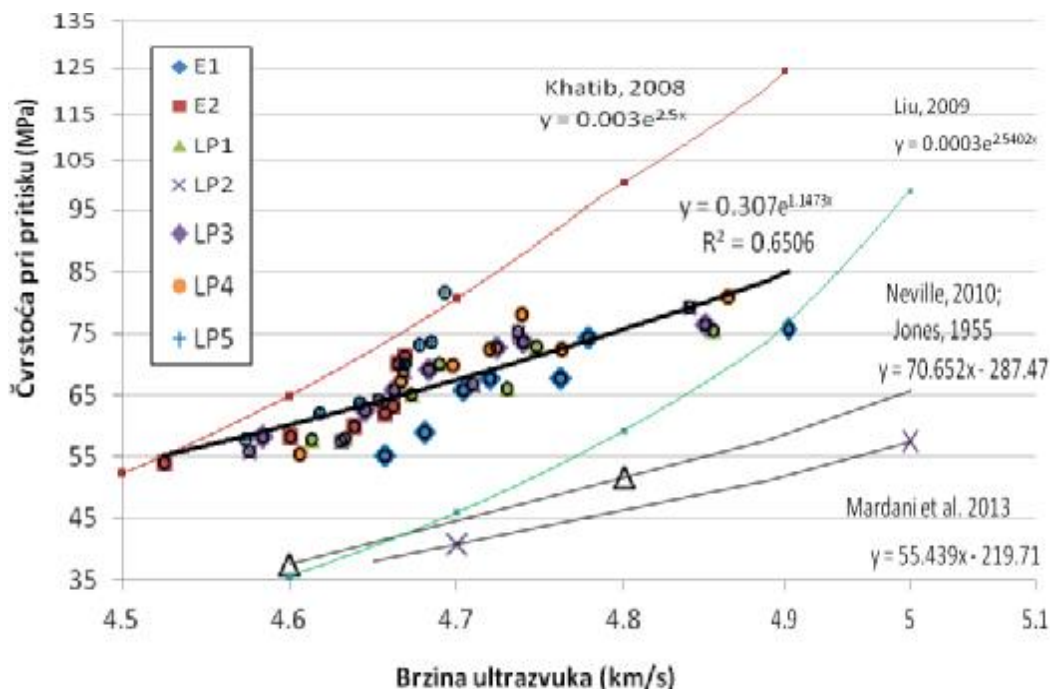
Na sličan način može se diskutovati **zavisnost čvrstoće pri pritisku SCC sa LP od brzine ultrazvučnog impulsa**. Na dijagramu (slika 9.13) su prikazani parovi vrednosti (čvrstoća pri pritisku, brzina ultrazvučnog impulsa kroz beton) za sedam različitih SCC mešavina. U pitanju su dve mešavine bez letećeg pepela, oznake E1 i E2, i pet mešavina spravljanih sa letećim pepelom (LP1, LP2, LP3, LP4 i LP5). Parovi vrednosti za svaku od pomenutih mešavina dati su na dijagramu za starosti od 7, 14, 21, 28, 63, 90 i 180 dana. Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa za svaku od serija prikazane su u tabeli 9.2 zajedno sa koeficijentima korelacije za te serije. Radi

bolje uporedljivosti sa funkcionalnim zavisnostima iz literature (Khatib 2008. [142] i Liu 2009. [82]), ove zavisnosti su formirane u obliku eksponencijalne krive, sa brzinom ultrazvučnog impulsa (UZV) u km/s.

Tabela 9.2 Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa ispitivanih SCC sa LP dobijene na osnovu regresione analize

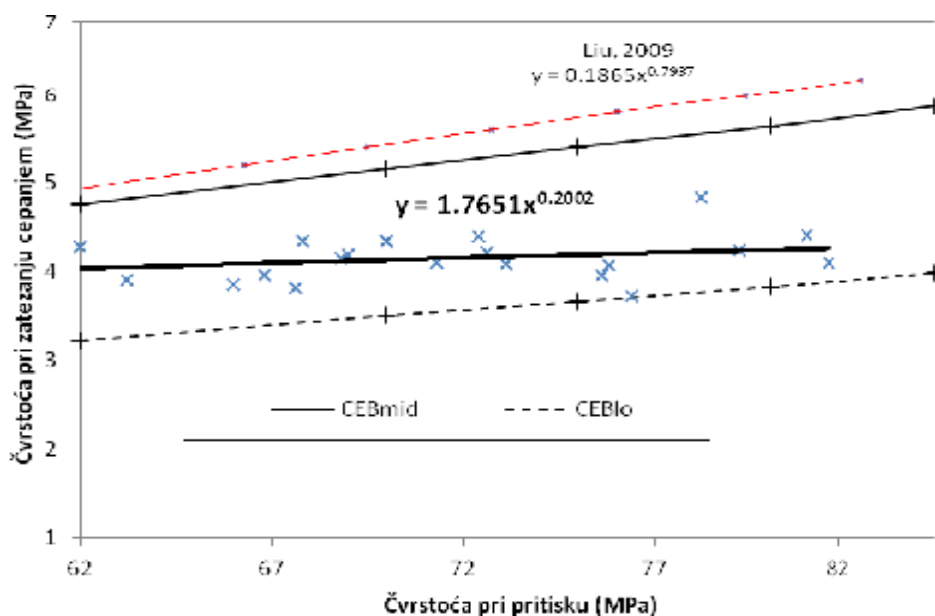
Seriya	Dobijena funkcionalna zavisnost	r^2
E1	$0.2211 \cdot e^{1.2018 \cdot \text{UZV}}$	0.7385
E2	$0.0359 \cdot e^{1.6113 \cdot \text{UZV}}$	0.7202
LP1	$0.2896 \cdot e^{1.1542 \cdot \text{UZV}}$	0.7921
LP2	$0.0882 \cdot e^{1.4129 \cdot \text{UZV}}$	0.8652
LP3	$0.4281 \cdot e^{1.0787 \cdot \text{UZV}}$	0.8674
LP4	$0.1073 \cdot e^{1.3738 \cdot \text{UZV}}$	0.7932
LP5	$0.0003 \cdot e^{2.6325 \cdot \text{UZV}}$	0.8969

Vrednosti rezultata ispitivanja prikazane u ovom radu su relativno bliske onim vrednostima koje bi se dobile na osnovu dve različite funkcionalne zavisnosti koje su predložili Khatib 2008. [142] i Liu 2009. [161] za SCC sa letećim pepelom. Zapravo, vrednosti rezultata dobijene ispitivanjima na SCC sa LP u ovom radu nalaze se između pomenutih korelacijskih zavisnosti i za iste vrednosti dobijenih čvrstoća pri pritisku vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa su više od brzina koje daje zavisnost Khatib-a i niže od onih koje daje zavisnost autora Liu. Međutim, na osnovu istraživanja u ovom radu linearna korelacija bi malo bolje opisivala dobijene rezultate nego eksponencijalna (u tom slučaju koeficijent korelacije bi bio $r^2=0.6538$). Sa druge strane, poređenjem sa rezultatima linearne korelacije, koju su dobili Mardani i saradnici 2013. [167] za SCC sa različitim vrstama superplastifikatora, uočava se sličan nagib teorijske zavisnosti, ali su vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod pomenutog autora više za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku. Na istom dijagramu date su i korelacije bazirane na istraživanjima na NVC autora Neville-a i Jones-a [135],[181]. Predmetne korelacije su takođe ispod one dobijene na bazi sopstvenih ispitivanja sprovedenih u okviru ovog rada.



Slika 9.13 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC sa LP

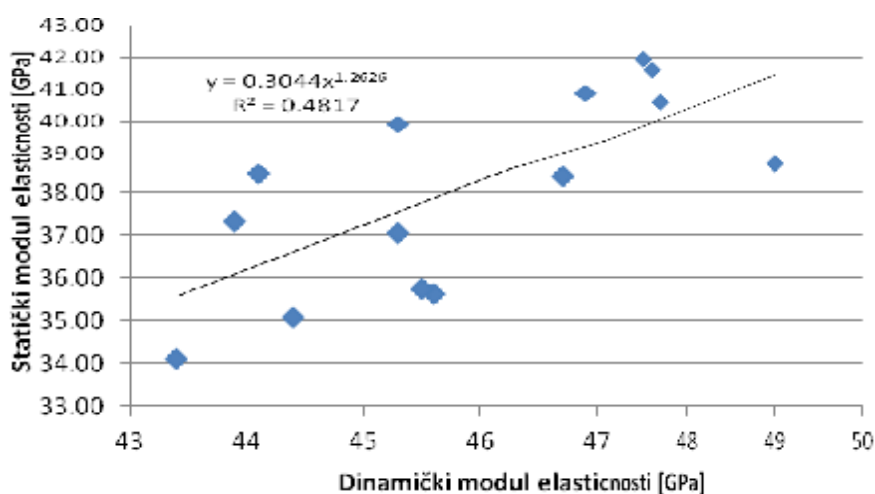
Na slici 9.14 prikazana je zavisnost čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod SCC sa LP dobijena na osnovu rezultata prikazanih u ovom radu, na bazi ispitivanja svih sedam SCC mešavina pri starostima od 28, 63 i 180 dana. Radi poređenja, ova zavisnost je na dijagramu prikazana zajedno sa korelativnim zavisnostima dobijenim na osnovu drugih modela zavisnosti.



Slika 9.14 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i pri zatezanju cepanjem kod SCC sa LP

U odnosu na ispitivanja SCC sa LP koja su sprovedena 2009. (Liu, [161]), rezultati su niži, odnosno za betone iste čvrstoće pri pritisku dobijene su niže vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem. Kada se rezultati ispitivanja prikazani u ovom radu porede sa modelom za NVC (CEB-FIP model, [49]), uočava se da dobijene vrednosti spadaju u niže vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem, jer se nalaze između donje (linija označena kao CEBlo na dijagramu) i prosečne zavisnosti (linija označena kao CEBmid na dijagramu).

Pri starostima od 28 i 180 dana određene su vrednosti statičkog modula elastičnosti E_s za svaku od sedam mešavina. Pri istim starostima, za svih sedam mešavina postoje rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti E_d . Parovi vrednosti (E_s , E_d) za svih sedam SCC mešavina, i za pomenute dve starosti prikazani su na slici 9.15.



Slika 9.15 Zavisnost statičkog i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP

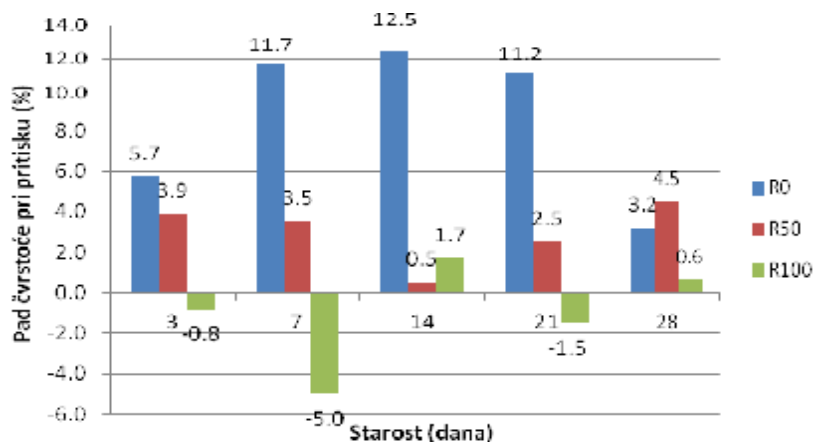
Kao što se sa prikazanog dijagrama može videti, utvrđena je nešto slabija korelacija (sa koeficijentom korelacije $r^2=0.4817$) između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa LP.

9.3 Analiza i diskusija rezultata ispitivanja svojstava očvrsllog SCC sa spršenim recikliranim betonom

Poređena su svojstva četiri mešavine; pored referentne mešavine oznake E2 (spravljene bez spršenog recikliranog betona) spravljene su tri mešavine sa spršenim recikliranim betonom, oznake R0, R50 i R100. Sve tri navedene mešavine sadržale su 50%

sprašenog recikliranog betona (R) u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavinama (tj. filer, ukupne količine od 220 kg/m^3 , sastojao se od 110 kg/m^3 krečnjačkog brašna i 110 m^3 spraašenog recikliranog betona). Razlika u ove tri mešavine ogledala se u poreklu upotrebljenog spraašenog recikliranog betona. U prvoj mešavini oznake R0, upotrebljen je spraašeni reciklirani beton oznake "A", poreklom od NVC, koji je spravljan sa prirodnim rečnim agregatom. U drugoj mešavini, oznake R50, upotrebljen je spraašeni reciklirani beton oznake "B", dobijen spraašivanjem normalno vibriranog betona koji je u svom sastavu sadržao reciklirani beton u svojstvu krupnog agregata (predmetni NVC sadržao je 50% krupnog recikliranog agregata u odnosu na ukupnu masu krupnog agregata). U trećoj mešavini, oznake R100, upotrebljen je spraašeni reciklirani beton oznake "C", dobijen spraašivanjem normalno vibriranog betona koji je u svom sastavu, u svojstvu krupnog agregata sadržao isključivo reciklirani beton. Uticaj sadržaja recikliranog agregata u polaznom betonu, osim generalne podobnosti upotrebe spraašenog recikliranog betona, na taj način mogao je biti istraživani, u kontrolisanim uslovima. Pri tome je masa cementa održavana konstantnom kod svih mešavina (380 kg/m^3), kao i količine filera (ukupno 220 kg/m^3), agregata (1700 kg/m^3), vode (183 kg/m^3) i superplastifikatora (7.6 kg/m^3). Na SCC sa spraašenim recikliranim betonom ispitivana su sledeća svojstva u očvrslom stanju: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, čvrstoća pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona, ispitivanje "pull-off" metodom, brzina ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, dinamički Poasonov koeficijent, ispitivanje dubine prodiranja vode pod pritiskom i SEM analiza.

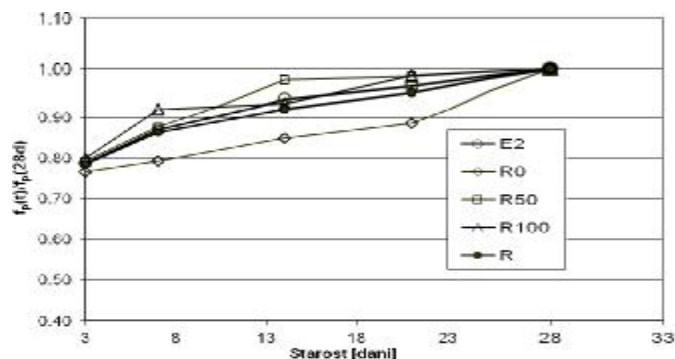
Procentualne promene (pad) vrednosti **čvrstoće pri pritisku** kod SCC mešavina sa spraašenim recikliranim betonom (mešavine sa 50% spraašenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera) u poređenju sa SCC mešavinom E2 (referentna mešavina, mešavina spravljen samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera, bez spraašenog recikliranog betona) prikazane su na slici 9.16. Kao što se vidi, vrednosti čvrstoće pri pritisku ispitivanih betona su praćene do starosti od 28 dana.



Slika 9.16 Procentualni pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2

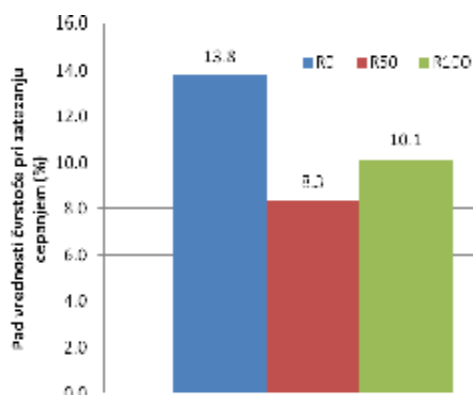
Generalno posmatrano, što se tiče čvrstoće pri pritisku ispitivanih serija SCC mešavina, može se reći da je u najvećem broju slučajeva došlo do pada vrednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljanu samo sa krečnjačkim brašnom, bez spraošenog recikliranog betona), pri čemu je najveći procentualni pad čvrstoće pri pritisku od 12.5% zabeležen kod mešavine R0 (SCC mešavina spravljena sa spraošenim recikliranim betonom poreklom od NVC sa prirodnim rečnim agregatom) pri starosti od 14 dana. Porast čvrstoće pri pritisku u odnosu na pomenutu mešavinu E2 primećen je kod mešavine oznake R100, i iznosio je 0.8%, 0.5% i 1.5% pri starostima od 3, 7 i 21 dan. U proseku, ukoliko se zanemari poreklo spraošenog recikliranog betona, vrednosti čvrstoće pri pritisku kod SCC sa spraošenim recikliranim betonom u odnosu na referentnu SCC mešavinu su pri svim starostima bile niže, i to odstupanje iznosi: 2.9% za starost od 3 dana, 3.4% za starost od 7 dana, 5.0% za starost od 14 dana, 4.1% za starost od 21 dan i 2.8% za starost od 28 dana.

Sa slike 9.17 se vidi da je **prirast čvrstoće pri pritisku** svih ispitivanih SCC sa R bio sličan. Sa dijagrama se može primetiti da je skoro 80% konačne vrednosti njihove čvrstoće dostignuto već pri starosti od 3 dana. U smislu poređenja prirasta čvrstoće pri pritisku SCC sa recikliranim betonom i referentne mešavine oznake E2, na dijagramu je prikazan i prosečan prirast čvrstoće pri pritisku za sva tri SCC sa recikliranim betonom. Može se izvesti konstatacija da je brzina prirasta čvrstoće pri pritisku SCC sa recikliranim betonom slična brzini prirasta čvrstoće pri pritisku SCC mešavine spravljenе bez spraošenog recikliranog betona (referentna mešavina oznake E2).



Slika 9.17 Prirast čvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa spraešenim recikliranim betonom

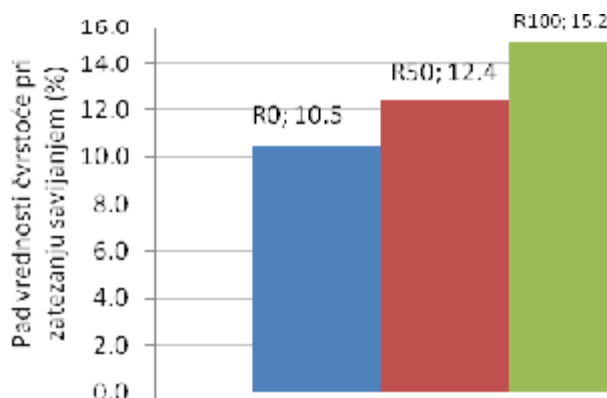
Dijagram koji prikazuje promenu (pad) čvrstoće pri **zatezanju cepanjem putem** linijskog pritiska svih SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.18. Ispitivanje je obavljeno pri starosti od 63 dana.



Slika 9.18 Procentualni pad vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem kod SCC sa spraešenim recikliranim betonom

Što se tiče vrednosti **čvrstoće pri zatezanju** cepanjem putem linijskog pritiska, pad vrednosti dobijen na SCC mešavinama oznaka R0, R50 i R100 u odnosu na SCC mešavinu oznake E2 (spravljen u bez spraešenog recikliranog betona, samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera) kretao se u granicama od 8.3% za mešavinu oznake R50 do 13.8% za mešavinu oznake R0, pri starosti od 63 dana. Kod SCC mešavine oznake R100 pad čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska iznosio je 10.1% u odnosu na referentnu mešavinu oznake E2. U proseku, kada se zanemari poreklo spraešenog recikliranog betona, taj pad iznosi 10.7%.

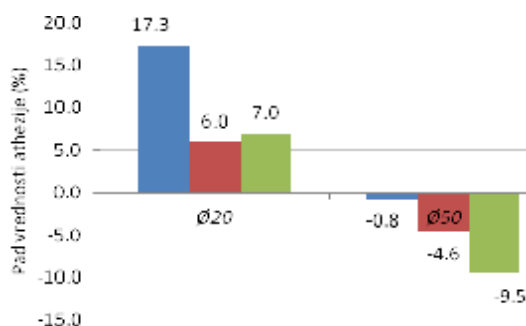
Dijagram koji prikazuje promenu (pad) čvrstoće pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona kod svih SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.19. Ispitivanje je obavljeno pri starosti od 180 dana.



Slika 9.19 Procentualni pad vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem kod SCC sa sprášenim recikliranim betonom

Što se tiče vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona, pad vrednosti dobijen na SCC mešavinama oznaka R0, R50 i R100 u odnosu na SCC mešavinu oznake E2 (spravljen u bez sprášenog recikliranog betona, samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera) kretao se u granicama od 10.5% za mešavinu oznake R0 do 15.2% za mešavinu oznake R100, pri starosti od 180 dana.

Dijagram koji prikazuje promenu **athezije** kod svih SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.20. Ispitivanje je obavljeno pomoću pečata dva različita prečnika (Ø20 mm i Ø50 mm), pri starosti od 180 dana.

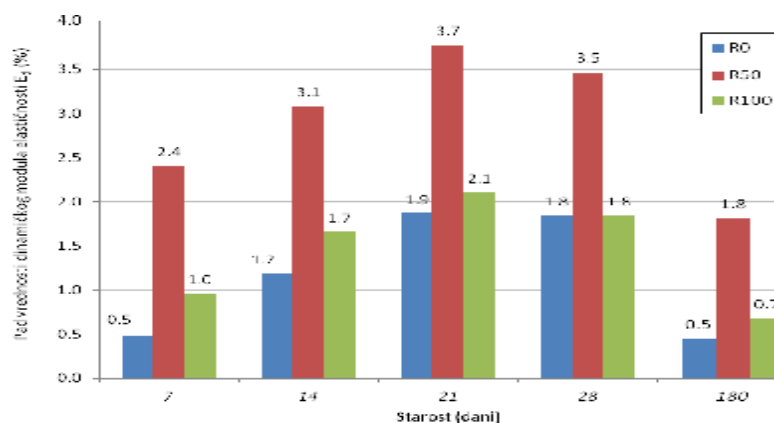


Slika 9.20 Procentualni pad vrednosti athezije kod SCC sa sprášenim recikliranim betonom

Kao što se to sa dijagrama vidi, prilikom upotrebe pečata prečnika Ø20 mm zabeležen je pad vrednosti athezije, dok je prilikom upotrebe pečata prečnika Ø50 mm zabeležen suprotan trend, odnosno porast athezije. Ovo se može objasniti mogućim varijacijama u vrednostima athezije u kombinaciji sa malom razlikom u vrednostima rezultata ispitivanja između serija. Pri konkretnim ispitivanjima karakteristično je da su vrednosti athezije međusobno malo odstupale pri poređenju po serijama.

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 spraćenim 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%).

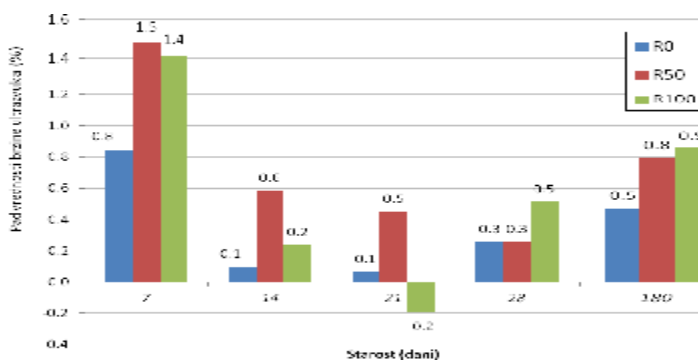
Promena vrednosti **dinamičkog modula elastičnosti** E_d praćena je na uzorcima izraćenim od svih ispitivanih SCC mešavina, do starosti od 180 dana. Procentualna odstupanja (pad) vrednosti dinamičkog modula elastičnosti svih ispitivanih serija SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenju bez spraćenog recikliranog betona, odnosno u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) prikazana su na slici 9.21.



Slika 9.21 Pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d ispitivanih serija SCC sa spraćenim recikliranim betonom

Kao što se to sa slike 9.21 može videti, relativni odnosi vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d pri svim starostima ostali su u najvećem broju slučajeva isti. Naime, najveći pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d uvek je zabeležen kod SCC mešavine oznake R50, u iznosu od 1.8% (za starost od 180 dana) do 3.7% (za starost od 21 dan). U međusobnom poređenju ovih vrednosti kod SCC mešavina spravljenih sa sprašenim recikliranim betonom, najveće odstupanje u iznosu od 1.9% je zabeleženo između vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d serija oznake R50 i R0 (pri starosti od 7 i 14 dana). Ukoliko se zanemari poreklo sprašenog recikliranog betona, dobijaju se prosečna odstupanja vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d SCC mešavina sa sprašenim recikliranim betonom u odnosu na referentnu mešavinu E2 u granicama od 1.0% do 2.6%.

Promena vrednosti **brzine ultrazvučnog impulsa** praćena je na uzorcima izrađenim od svih ispitivanih SCC mešavina, do starosti od 180 dana. Procentualna odstupanja (pad) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod svih ispitivanih serija SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenu bez sprašenog recikliranog betona, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) prikazana su na slici 9.22.



Slika 9.22 Procentualna odstupanja (porast) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa sprašenim recikliranim betonom

Kao što se to sa slike 9.22 može videti, najveći pad vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa od 1.5% zabeležen je pri starosti od 7 dana kod SCC mešavine oznake R50 (SCC mešavina spravljena sa sprašenim recikliranim betonom poreklom od NVC sa 50% recikliranog betona u svojstvu krupnog agregata; u SCC mešavini ovaj sprašeni dodatak doziran je u iznosu od 50% u odnosu na ukupnu masu filera). Takođe, može se

primetiti da su međusobna odstupanja vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom mala, jer su se kretala u relativno uskim granicama od -0.2% do 1.5% u odnosu na vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa referentne SCC mešavine oznake E2. Najveće odstupanje u iznosu od 0.6% je zabeleženo između vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa serija oznake R50 i R0 (pri starosti od 7 i 14 dana). Izračunavanjem prosečne vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom, odnosno ukoliko se u analizi zanemari vrsta (poreklo) sprášenog recikliranog betona, dobijaju se odstupanja prosečnih vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa (u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2) u granicama od 0.1% (pri starosti od 21 dan) do 1.2% (za starost od 7 dana).

Što se tiče **dinamičkog Poasonovog koeficijenta** (sračunatog za sve ispitivane starosti – 7, 14, 21, 28 i 180 dana, na osnovu vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d i brzine ultrazvučnog impulsa na ispitivanim serijama), njegove vrednosti su se kretale u granicama od 0.238 kod referentne mešavine oznake E2 pri starosti od 7 dana, do 0.252 kod referentne mešavine oznake E2 pri starosti od 21 dan. Drugim rečima, vrednosti dinamičkog Poasonovog koeficijenta kod SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom bile su veoma bliske vrednostima ove veličine izračunatim za referentnu SCC mešavinu.

Kada je reč o ispitivanju **vodonepropustljivosti** SCC mešavina sa R, maksimalne vrednosti prodora vode pod pritiskom kod ovih uzoraka kretale su se u granicama od 17.0 mm kod mešavine oznake R0 (SCC mešavina spravljená sa sprášenim recikliranim betonom poreklom od NVC, u iznosu od 50% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini) do 17.7 mm (za mešavinu oznake R100). Prosečne vrednosti prodora vode pod pritiskom kod ispitivanih uzoraka kretale su se u rasponu 10.7-11.0 mm.

Što se tiče **SEM analize** mikrostrukture očvrslih SCC sa sprášenim recikliranim betonom, analizirane pomoću SEM uređaja, u prvom redu se može primetiti da raspored i veličina pora kod SCC mešavine R100 vizuelno nisu odstupali od istih parametara kod referentne SCC mešavine oznake E2. Daljom analizom karakterisana je i prelazna zona

zrna agregata i cementne matrice, i u tom smislu može se izvesti opažanje da je ostvarena kompaktna veza sa zrnom agregata (videti prilog - rezultati SEM analize SCC mešavina).

U cilju karakterizacije raspodele produkata hidratacije cementa u matrici, na nekoliko mesta na uzorku urađena je EDS analiza, na osnovu koje se može komentarisati da je matrica sličnog sastava, bez obzira na selektovano mesto i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata. U pitanju su hidratirane faze cementa, C-S-H faza i C-H (videti prilog - rezultati SEM analize SCC mešavina). Na žalost, predmetnom analizom nije bilo moguće sa dovoljnom pouzdanošću prepoznati zrna spraćenog recikliranog betona. Mapiranje na nekoliko različitih mesta, obavljeno u cilju razlikovanja tačaka u matrici u kojima je eventualno moguće identifikovati sadržaj Si (osnovni element kvarca, kao dominantne komponente spraćenog betona), nije dalo pouzdane rezultate u smislu utvrđivanja lokacije zrna spraćenog recikliranog betona.

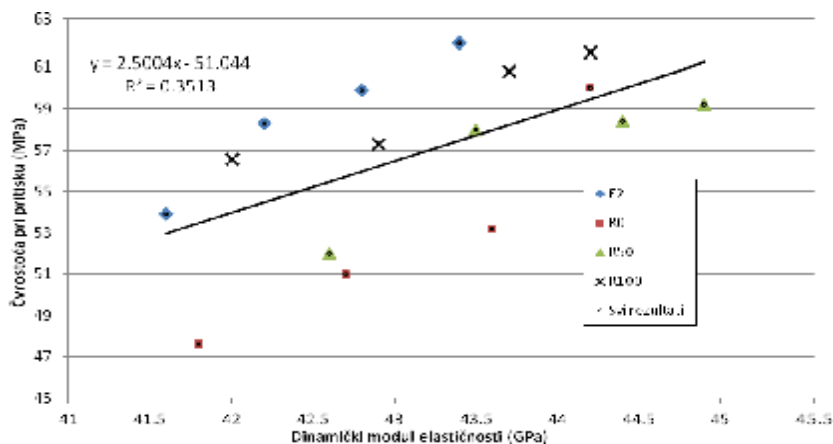
9.4 Međusobne zavisnosti ispitivanih svojstava očvrslilih SCC sa spraćenim recikliranim betonom

Zavisnost između **čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti** ispitivanih SCC sa R prikazana je na slici 9.23. U pitanju su, pored referentne SCC mešavine (spravljeni bez spraćenog recikliranog betona) označene sa E2, još tri mešavine, oznake R0, R50 i R100. Na slici su prikazani parovi vrednosti (čvrstoća pri pritisku, dinamički modul elastičnosti) različitim bojama za različite SCC pri starostima od 7, 14, 21 i 28 dana, što ukupno čini $4 \times 4 = 16$ parova vrednosti. Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i vrednosti dinamičkog modula elastičnosti za svaku od serija SCC sa spraćenim recikliranim betonom prikazane su u tabeli 9.3, zajedno sa koeficijentima korelacije za te serije.

Tabela 9.3 Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih serija SCC sa spraćenim recikliranim betonom dobijene na osnovu regresione analize

Seriya	Dobijena funkcionalna zavisnost	r^2
E2	$4.3167 \cdot E_d - 124.93$	0.9473
R0	$4.7211 \cdot E_d - 150.41$	0.8969
R50	$2.9061 \cdot E_d - 70.535$	0.7966
R100	$2.4784 \cdot E_d - 47.993$	0.9167

Kada se u obzir uzmu svi rezultati (za sve SCC mešavine sa sprášenim recikliranim betonom, uključujući i rezultate za referentnu SCC mešavinu), dobijena zavisnost ima značajno niži stepen korelacije ($r^2=0.3513$).



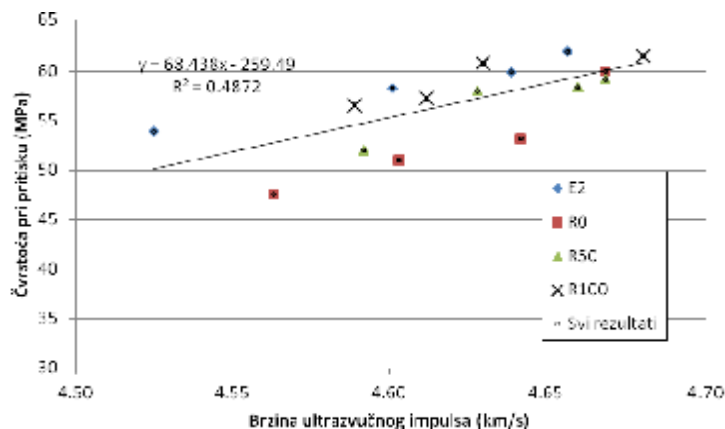
Slika 9.23 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa sprášenim recikliranim betonom

Zavisnost **čvrstoće pri pritisku SCC sa R od brzine ultrazvučnog impulsa** data je za sve ispitivane betone na slici 9.24. Na slici su prikazani parovi vrednosti (čvrstoća pri pritisku, brzina ultrazvučnog impulsa) različitim bojama za različite SCC pri starostima od 7, 14, 21 i 28 dana, što ukupno čini $4 \times 4 = 16$ parova vrednosti. Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa za svaku od serija SCC sa sprášenim recikliranim betonom prikazane su u tabeli 9.4 zajedno sa koeficijentima korelacije za te serije.

Tabela 9.4 Zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa ispitivanih serija SCC sa sa sprášenim recikliranim betonom dobijene na osnovu regresione analize

Seriya	Dobijena funkcionalna zavisnost	r^2
E2	$58.2 \cdot \text{UZV} - 209.7$	0.9841
R0	$107.3 \cdot \text{UZV} - 442.8$	0.8997
R50	$87.1 \cdot \text{UZV} - 347.0$	0.8474
R100	$57.1 \cdot \text{UZV} - 205.3$	0.8041

Kada se u obzir uzmu svi rezultati (za sve SCC mešavine sa sprášenim recikliranim betonom, uključujući i rezultate za referentnu SCC mešavinu), dobijena zavisnost ima značajno niži stepen korelacije ($r^2=0.4872$).



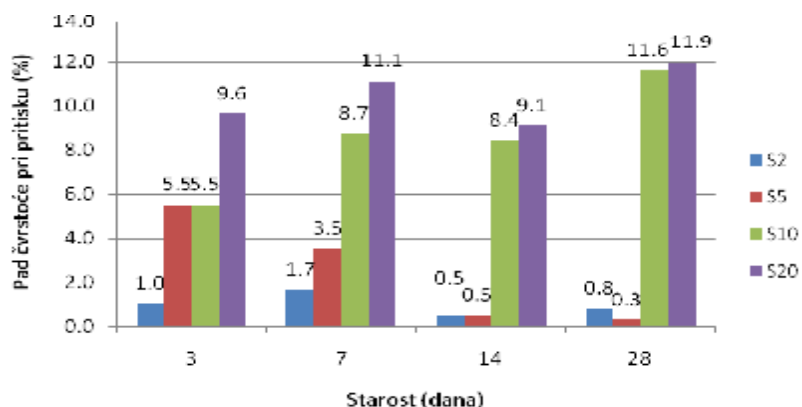
Slika 9.24 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC sa spraešenim recikliranim betonom

9.5 Diskusija rezultata ispitivanja svojstava očvrsllog SCC sa spraešenim sumporom

Kao što je već rečeno, na SCC sa spraešenim sumporom ispitivana su sledeća svojstva u očvrslom stanju: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona, athezija (čvrstoća veze) čeličnog pečata prečnika Ø20 mm i Ø50 mm na površini ispitivanog betona (ispitivanja pri starosti od 180 dana) - ispitivanje "pull-off" metodom, brzina ultrazvučnog impulsa, dinamički modul elastičnosti, dinamički Poasonov koeficijent i SEM analiza. Ova ispitivanja obavljena su na mešavinama sa 2%, 5%, 10% i 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini (mešavine oznake S2, S5, S10 i S20) i poređena sa rezultatima ispitivanja na referentnoj SCC mešavini koja nije sadržala sumpor (u ovoj mešavini, oznake E2, celokupna količina filera od 220 kg/m³ bila je krečnjačko brašno).

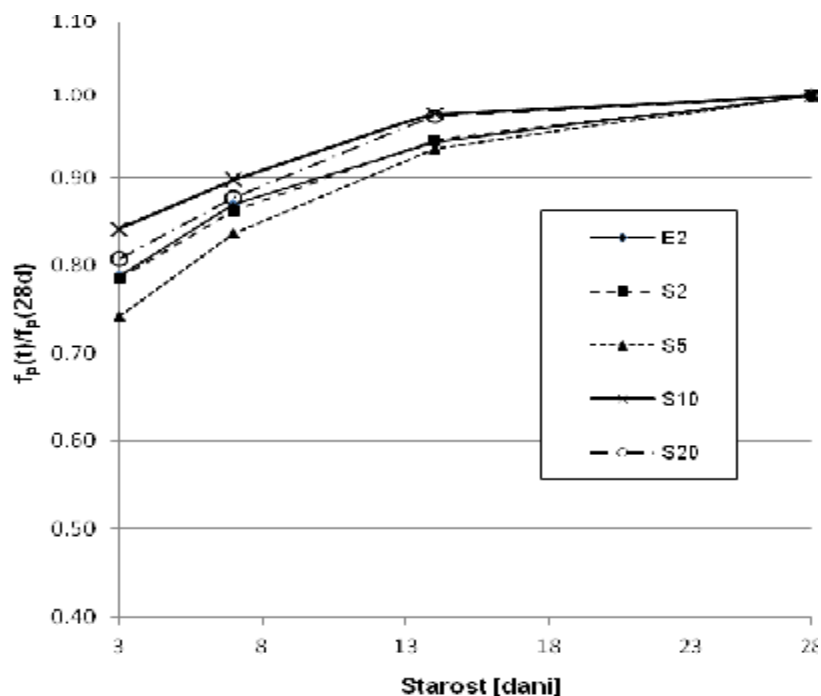
Vrednosti **čvrstoće pri pritisku** kod SCC sa S (mešavine sa 2%, 5%, 10% i 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera) u odnosu na SCC mešavinu E2 (mešavinu spravljenju bez sumpora) su pri svim starostima bile niže, slika 9.25. Na osnovu dobijenih vrednosti i pomenutog grafičkog prikaza može se izvesti konstatacija da se pad vrednosti čvrstoće pri pritisku SCC sa spraešenim sumporom u odnosu na čvrstoću pri pritisku referentne SCC mešavine kreće u granicama od 0.3% (za mešavinu sa 5% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC, pri starosti od 28 dana) do 11.9% (za mešavinu sa 20% spraešenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera u SCC, pri starosti od 28 dana). Takođe, može se konstatovati da je za SCC sa

manjim sadržajem spraćenog sumpora pad ćvrstoće pri pritisku manji nego za SCC sa većim sadržajem spraćenog sumpora, pri ćemu taj pad ne prati povećanje sadržaja spraćenog sumpora linearno. Pri tome, vrednosti pada ćvrstoće pri pritisku SCC sa 10% i 20% spraćenog sumpora su slične pri svim starostima, a sa povećanjem starosti razlike u procentualnom padu ćvrstoće pri pritisku se smanjuju.



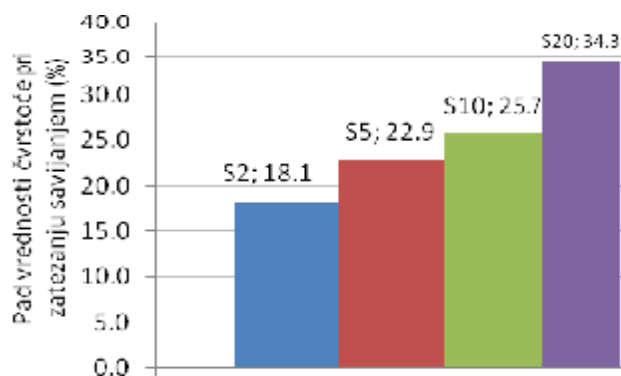
Slika 9.25 Procentualni pad ćvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu mešavinu bez spraćenog sumpora

Kao što se sa slike 9.26 može videti, **brzine prirasta ćvrstoće pri pritisku** svih ispitivanih SCC sa S bile su slične. Sa dijagrama se može zapaziti i da se pri starosti od 3 dana postiže 75-85% ćvrstoće pri pritisku koja odgovara starosti od 28 dana.



Slika 9.26 Prirast ćvrstoće pri pritisku ispitivanih SCC sa spraćenim sumporom

Dijagram koji prikazuje promenu (pad) čvrstoće pri **zatezanju savijanjem** svih SCC mešavina sa spršenim sumporom u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.27. Ispitivanje je obavljeno pri starosti od 180 dana.



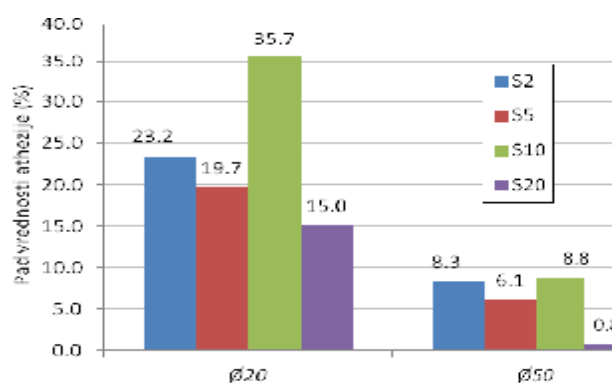
Slika 9.27 Procentualni pad vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenju bez spršenog sumpora

Što se tiče vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem, pad vrednosti dobijen na SCC mešavinama oznaka S2, S5, S10 i S20 u odnosu na SCC mešavinu oznake E2 (spravljenju bez spršenog sumpora, samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera) kretao se u granicama od 18.1% za mešavinu oznake S2 do 34.3% za mešavinu oznake S20, pri starosti od 180 dana. Na osnovu grafičkog prikaza, može se konstatovati da kod SCC mešavina sa povećanjem količine spršenog sumpora dolazi do pada čvrstoće pri zatezanju savijanjem i to gotovo linearno u funkciji od sadržaja spršenog sumpora. Pri tome treba dodati da je već pri malim količinama spršenog sumpora (2% u odnosu na ukupnu masu filera) evidentan pad čvrstoće pri zatezanju savijanjem od 18%.

Dijagram koji prikazuje promenu **athezije** kod svih SCC mešavina sa spršenim sumporom u odnosu na referentnu mešavinu E2 prikazan je na slici 9.28. Ispitivanje je obavljeno pomoću pečata dva različita prečnika ($\varnothing 20$ mm i $\varnothing 50$ mm), pri starosti od 180 dana. Prilikom ispitivanja vrednosti athezije "pull-off" metodom, uočen je pad vrednosti athezije za oba primenjena prečnika pečata.

U slučaju primene pečata prečnika $\varnothing 20$ mm, pad vrednosti athezije merene "pull-off" metodom, u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2 (spravljenju bez spršenog sumpora, samo sa krečnjačkim brašnom), kretao se u granicama od 15.0% za mešavinu oznake S20 do 35.7% za mešavinu oznake S10. U slučaju primene pečata prečnika $\varnothing 50$

mm, pad vrednosti athezije merene "pull-off" metodom, u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2 (spravljenu bez sprášenog sumpora, samo sa krečnjačkim brašnom), kretao se u granicama od 0.8% kod mešavine oznake S20 do 8.8% kod mešavine oznake S10. Na osnovu svega rečenog, može se primetiti da je upotreba sprášenog sumpora u mešavinama SCC imala negativan efekat na vrednosti athezije, merene pomoću "pull-off" metode, nezavisno od prečnika primenjenog pečata. Pri tome, primenom pečata prečnika $\varnothing 20$ mm zabeležen je pad vrednosti athezije u granicama od 15.0% do 35.7%, a primenom pečata prečnika $\varnothing 50$ mm zabeležen je pad vrednosti athezije u granicama od 0.8% do 8.8%.

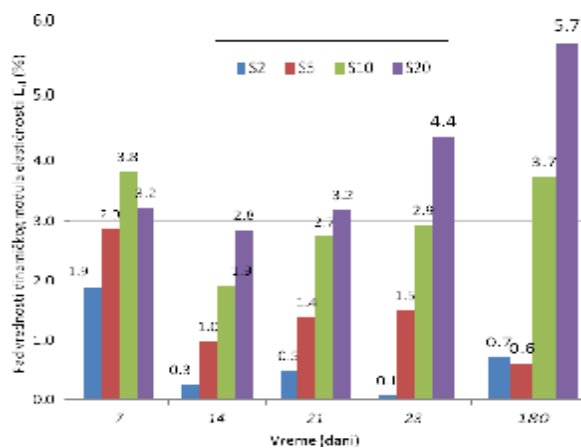


Slika 9.28 Procentualni pad vrednosti athezije u odnosu na referentnu mešavinu E2, spravljenu bez sprášenog sumpora

Promena vrednosti **dinamičkog modula elastičnosti** E_d praćena je na svim SCC mešavinama spravljanim sa sprášenim sumporom, do starosti od 180 dana. Procentualna odstupanja (pad) vrednosti dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih serija SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenu bez sprášenog sumpora, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) prikazana su na slici 9.29.

Kao što se to iz prethodnog teksta i sa slike 9.29 može videti, u pitanju je pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti (u odnosu na referentnu SCC mešavinu oznake E2) koji se kretao u granicama od 0.1% (kod SCC mešavine oznake S2 pri starosti od 28 dana) do 5.7% (kod SCC mešavine oznake S20 pri starosti od 180 dana). U zavisnosti od kolićine upotrebljenog sprášenog sumpora, najveći pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d (od 2.8% do 5.7% u odnosu na vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d referentne SCC mešavine oznake E2) u najvećem broju slučajeva je bio kod SCC

mešavine oznake S20, a najmanji (od 0.1% do 1.9% u odnosu na vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d referentne SCC mešavine oznake E2) kod mešavine oznake S2.



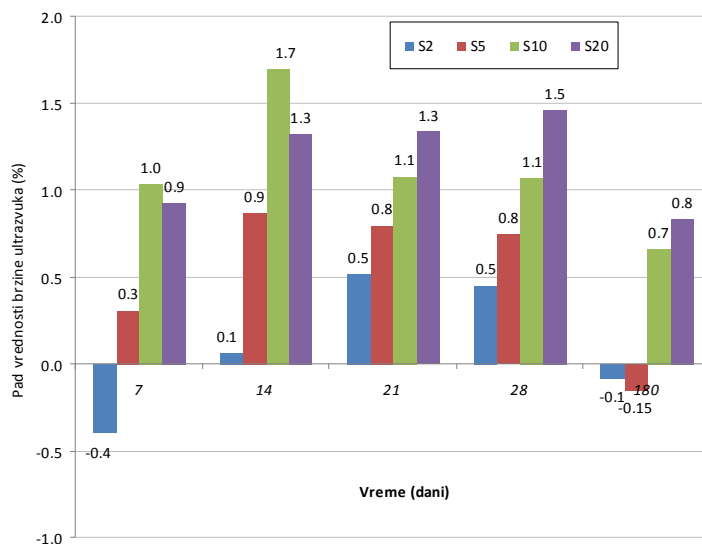
Slika 9.29 Pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d ispitivanih serija SCC mešavina sa spršenim sumporom

Relativni odnosi vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d pri svim starostima ostali su u najvećem broju slučajeva slični. Pri tome, međusobna odstupanja vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d kod ispitivanih serija SCC mešavina sa spršenim sumporom okarakterisana su kao relativno mala, jer su se kretala u granicama od 0.1% do 5.1% u odnosu na vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d referentne SCC mešavine oznake E2. U međusobnom poređenju ovih vrednosti kod SCC mešavina spravljenih sa spršenim sumporom, najveće odstupanje u iznosu od 5.1% je zabeleženo između vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d serija oznake S20 i S5 (pri starosti od 180 dana).

Promena vrednosti **brzine ultrazvučnog impulsa** praćena je na uzorcima izrađenim od svih ispitivanih SCC mešavina, do starosti od 180 dana. Procentualna odstupanja (pad) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod svih ispitivanih serija SCC mešavina u odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenu bez spršenog sumpora, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno) prikazana su na slici 9.30.

Kao što se to sa priložene grafičke predstave može videti, najveći pad vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa (1.7%) zabeležen je pri starosti od 14 dana kod SCC mešavine oznake S10. Takođe, može se konstatovati da su međusobna odstupanja vrednosti

brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa spršenim sumporom mala, jer su se kretala u relativno uskim granicama od -0.15% do 1.7% u odnosu na vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa referentne SCC mešavine oznake E2.



Slika 9.30 Procentualna odstupanja (pad) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija SCC mešavina sa spršenim sumporom

Što se tiče **dinamičkog Poasonovog koeficijenta**, sračunatog za sve starosti na osnovu vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d i brzine ultrazvuka na ispitivanim serijama, ove vrednosti su se kretale u granicama od 0.239 kod referentne mešavine oznake E2 pri starosti od 7 dana, do 0.257 kod SCC mešavine oznake S20 (SCC mešavina spravljena sa spršenim sumporom u iznosu od 20% ukupne mase filera u SCC mešavini) pri starosti od 180 dana. Drugim rečima, vrednosti dinamičkog Poasonovog koeficijenta kod SCC mešavina sa spršenim sumporom bile su veoma bliske vrednostima ove veličine izračunatim za referentnu SCC mešavinu.

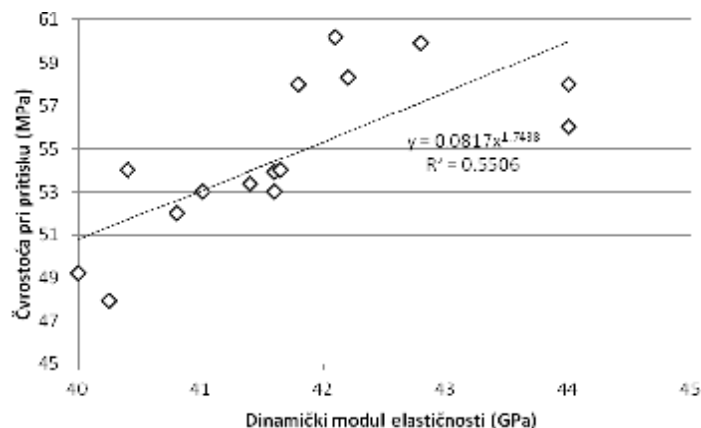
Kada je u pitanju kvalitativna i kvantitativna **SEM analiza** mikrostrukture SCC sa spršenim sumporom, ispitivana su tri reprezentativna uzorka, dva polirana i treći, takozvani "prelomljeni uzorak". U prvoj fazi su EDS analizom prepoznata zrna agregata (kvarc, kvarcit i slično), filera (krečnjačko brašno i spršeni sumpor) i cementne matrice. Dalje, može se konstatovati da poroznost SCC sa spršenim S nije odstupala od poroznosti referentne SCC mešavine, oznake E2 (spravljene bez spršenog sumpora, u svojstvu filera je u predmetnoj mešavini upotrebljeno samo krečnjačko brašno).

Što se tiče prelazne zone (*Interfacial Transition Zone – ITZ*) između zrna agregata i paste, ona je varirala u granicama od 20-100 μm . U slučaju kontaktne (prelazna) zone između zrna S i matrice, može se izvesti komentar da je ona ostala neizmenjena. EDS analiza obavljena na većem broju mesta na ovim područjima je potvrdila ovaj komentar.

U cilju karakterizacije raspodele produkata hidratacije cementa u matrici, na nekoliko mesta na uzorku urađena je EDS analiza, za sva tri uzorka. Na osnovu pomenute analize može se izvesti opažanje da je matrica sličnog sastava, bez obzira na selektovano mesto i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata: u pitanju su hidratirane faze cementa, C-S-H faza i u manjoj meri C-H. U okviru prelazne zone zrna agregata nije zabeležena veća koncentracija C-H faze uz zrna agregata, što svedoči o dobroj kompaktnosti ispitivanih SCC mešavina. Na mikrostrukturnom planu nije primećen negativan uticaj primene sprášenog sumpora u SCC. Što se tiče disperzije zrna krečnjačkog brašna i zrna sumpora, na osnovu mapiranja po elementima Si, Al, Fe, Ca, S (kvalitativna analiza) izvršenog na nekoliko mesta kod svakog od uzoraka, nije uočeno grupisanje posmatranih zrna i može se komentarisati da je došlo do dobre disperzije svih sastojaka betona. Svi relevantni podaci u vezi sa SEM i EDS analizom SCC mešavina dati su u prilogu.

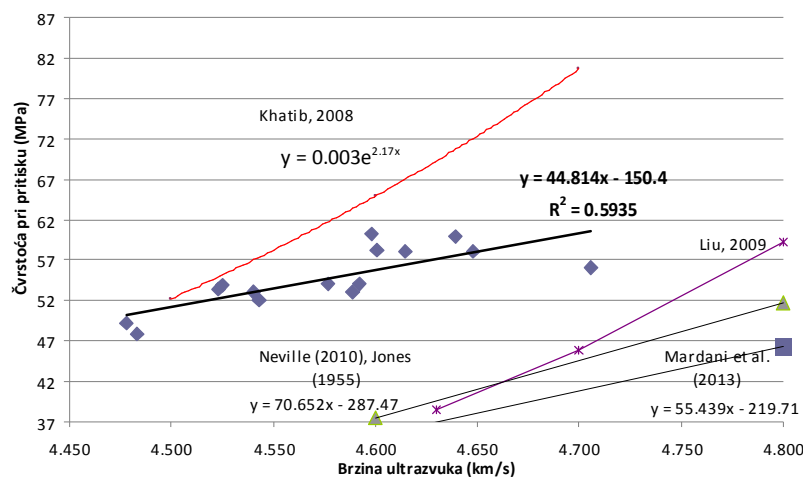
9.6 Međusobne zavisnosti ispitivanih svojstava očvrslilih SCC sa sprášenim sumporom

Zavisnost između **čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti** ispitivanih SCC sa S prikazana je na slici 9.31. Pošto su u pitanju parovi vrednosti (čvrstoća pri pritisku, dinamički modul elastičnosti) za svih pet mešavina (referentna mešavina E2, kao i mešavine sa 2%, 5%, 10% i 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, označene respektivno oznakama S2, S5, S10 i S20) pri starostima od 7, 14 i 28 dana, usvojena je korelacija sa ukupno $5 \times 3 = 15$ parova vrednosti i sa stepenom korelacije $R^2 = 0.55$.



Slika 9.31 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti kod SCC sa sa spršenim sumporom

Zavisnost čvrstoće pri pritisku SCC sa S i brzine ultrazvučnog impulsa data je na slici 9.32 na isti način kao i prethodno pomenuta zavisnost između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti ispitivanih SCC sa S. Usvojena je linearna korelacija sa ukupno $5 \times 3 = 15$ parova vrednosti i sa stepenom korelacije $R^2 = 0.59$.

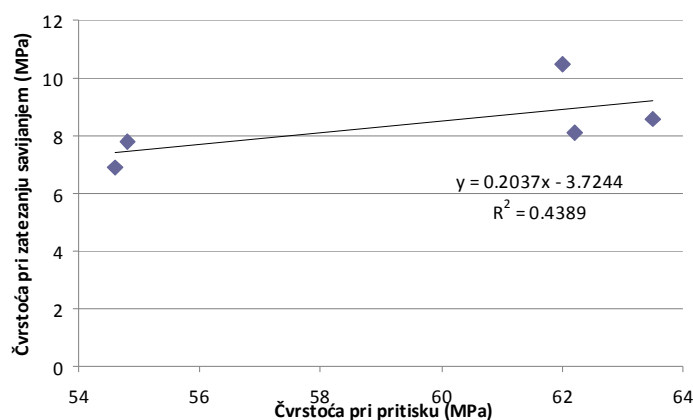


Slika 9.32 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvuka kod SCC sa spršenim sumporom

Vrednosti rezultata ispitivanja prikazane u ovom radu su relativno bliske vrednostima koje bi se dobile na osnovu predloženih funkcionalnih zavisnosti Khatiba 2008. [142] i Liu 2009. [161] za SCC sa letećim pepelom. Sa druge strane, poređenjem sa rezultatima linearne korelacije, koju su dobili Mardani i saradnici 2013. [167] za SCC sa različitim vrstama superplastifikatora, uočava se sličan nagib teorijske zavisnosti, ali su vrednosti brzine ultrazvuka kod pomenutog autora više za iste čvrstoće pri pritisku. Vrednosti

bazirane na korelacijama za NVC prikazane u radovima Neville-a i Jones-a [1],[142] su takođe više nego za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku kod SCC sa S. Ovde se napominje da nema rezultata sličnih ispitivanja SCC mešavina sa spršenim sumporom u dostupnoj literaturi, pa se ove zavisnosti prikazuju na istom dijagramu isključivo iz razloga utvrđivanja deskriptivnog, odnosno opisnog odnosa zavisnosti dobijenih na osnovu ispitivanja sprovedenih u ovom radu sa zavisnostima dostupnim iz literature.

Na slici 9.33 prikazana je **zavisnost čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri zatezanju savijanjem** kod SCC sa S dobijena na osnovu rezultata prikazanih u ovom radu. Generalno posmatrano, u pitanju je manje snažna korelacija ($0.3 < R^2 = 0.44 < 0.5$), što se može pripisati malom broju podataka koji su bili na raspolaganju pri izradi korelacije.



Slika 9.33 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i čvrstoće pri zatezanju savijanjem kod SCC sa spršenim sumporom

9.7 Uporedni prikaz SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata

Sastav SCC mešavina sa letećim pepelom, spršenim recikliranim betonom i spršenim sumporom po pitanju sadržaja komponenti (agregata, cementa, vode) bio je isti, a po pitanju sadržaja drugih komponenti (mineralnog dodatka, hemijskog dodatka) isti ili sličan. Ovakav pristup pri projektovanju je omogućio uporednu analizu svojstava SCC mešavina sa različitim mineralnim dodacima.

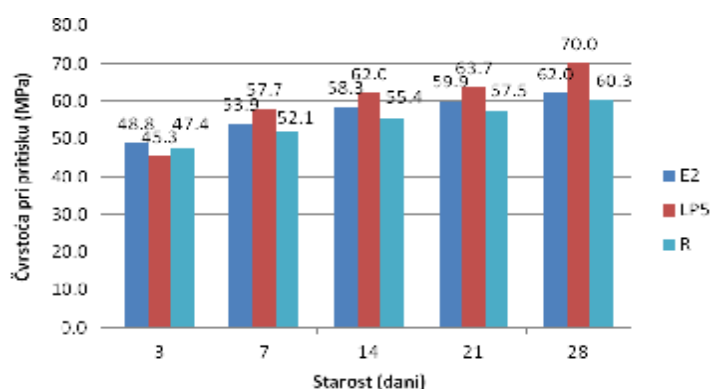
9.7.1 Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom

Količine cementa (380 kg/m^3), vode (183 kg/m^3) i agregata (1700 kg/m^3) u svim mešavinama sa spraešenim recikliranim agregatom bile su iste, kao i u mešavini LP5, spravljennoj sa letećim pepelom. Količina krečnjačkog brašna u svojstvu filera kod svih mešavina je iznosila 110 kg/m^3 . Preostalih 110 kg/m^3 je kod SCC mešavine oznake LP5 bio leteći pepeo, poreklom iz TE "Kolubara", a kod SCC mešavina sa recikliranim betonom, doziran je spraešeni reciklirani beton u istoj količini od 110 kg/m^3 . Razlika između ovih mešavina, osim u pomenutom upotrebljenom mineralnom dodatku na bazi industrijskog nusprodukta, bila je količina doziranog superplastifikatora. Kod mešavine oznake LP5 je dozirano 11.4 kg/m^3 hemijskog dodatka tipa superplastifikatora (3% u odnosu na masu cementa, odnosno 1.90% u odnosu na masu praškaste komponente koja je uključivala cement, krečnjačko brašno i ukupnu količinu letećeg pepela), a kod mešavina SCC sa spraešenim recikliranim betonom u svojstvu mineralnog dodatka dozirano je 7.6 kg/m^3 superplastifikatora (2% u odnosu na masu cementa, odnosno 1.27% u odnosu na masu praškaste komponente koja je uključivala cement, krečnjačko brašno i spraešeni reciklirani beton).

U daljoj analizi, na osnovu svega rečenog, treba imati na umu da između SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom postoji razlika u količini doziranog plastifikatora, koja je uticala na ponašanje SCC mešavina u svežem stanju, njihovu kompaktnost, a time i na niz svojstava u očvrslom stanju. Ovakva analiza već je obavljena u sklopu SCC mešavina sa LP, što se može smatrati korektnim ako se za parametar uzme ista kategorija ugradljivosti SCC betona na osnovu rasprostiranja sleganjem (kategorija SF2 prema SRPS 12350-8), koja je važila za sve mešavine iz ovog rada. Takođe, u daljoj analizi će rezultati ispitivanja SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom biti predstavljeni kao prosečna vrednost rezultata ispitivanja svih mešavina spravljenih sa recikliranim betonom, odnosno biće zanemaren efekat porekla spraešenog recikliranog betona. Postoji više razloga za ovaj potez: prvo, u najvećoj meri su rezultati ispitivanja mešavina sa spraešenim recikliranim betonom bili veoma slični, drugo, ovakva uporedna analiza biće jednostavnija i očiglednija.

Kada su u pitanju svojstva SCC mešavina u očvrslom stanju, mogu se porediti sledeća svojstva SCC mešavine LP5 (sa letećim pepelom) i SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom u svojstvu mineralnog dodatka: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju cepanjem, čvrstoća pri zatezanju savijanjem, athezija (čvrstoća veze) čeličnog pečata prečnika Ø20 mm i Ø50 mm na površini ispitivanog betona (ispitivanja pri starosti od 180 dana) - ispitivanje "pull-off" metodom, brzina ultrazvučnog impulsa, dinamički modul elastičnosti i dinamički Poasonov koeficijent.

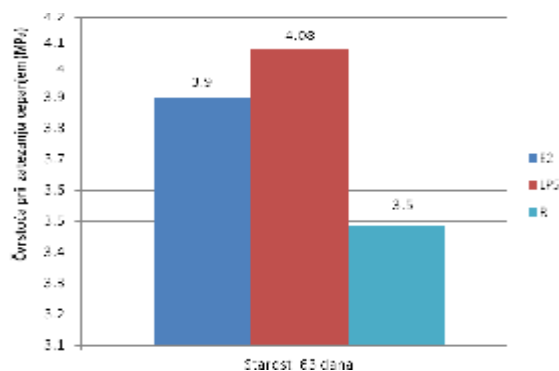
Uporedni prikaz vrednosti **čvrstoće pri pritisku** očvrslih SCC mešavina prikazan je na slici 9.34.



Slika 9.34 Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri pritisku izmerenih kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spršenim recikliranim betonom

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 spršenim 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 spršenim 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).

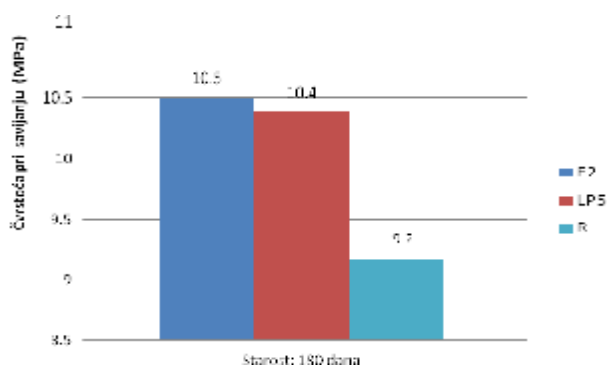
Čvrstoća pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska, ispitivana kod svih mešavina pri starosti od 63 dana, razlikovala se kod ispitivanih mešavina (sl. 9.35).



Slika 9.35 Uporedni prikaz čvrstoće pri zatezanju cepanjem putem linijskog pritiska kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom

Procentualna razlika vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem u odnosu na referentnu SCC mešavinu (spravljenu sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera) predstavlja povećanje od 4.6% u slučaju SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera i pad vrednosti od 11.1% u slučaju prosečne vrednosti SCC mešavina sa 50% spraešenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera.

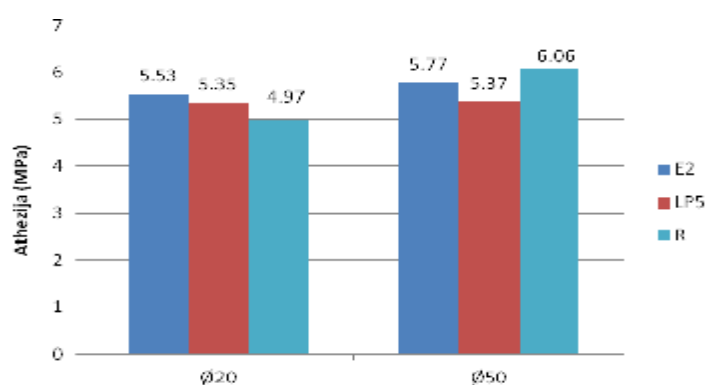
Čvrstoća pri zatezanju savijanjem jednom silom u sredini raspona ispitivana kod svih mešavina pri starosti od 180 dana, razlikovala se u zavisnosti od sastava mešavine. Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri savijanju očvrslih SCC mešavina prikazan je na slici 9.36.



Slika 9.36 Uporedni prikaz čvrstoće pri savijanju kod SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom

Poređenjem vrednosti rezultata ispitivanja čvrstoće pri savijanju kod analiziranih SCC mešavina 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 spraašenog recikliranog betona (u količini od 50% u odnosu na ukupnu masu filera) iznosio 18%.

Uporedni prikaz vrednosti **athezije** kod očvrslih SCC mešavina prikazan je na slici 9.37.

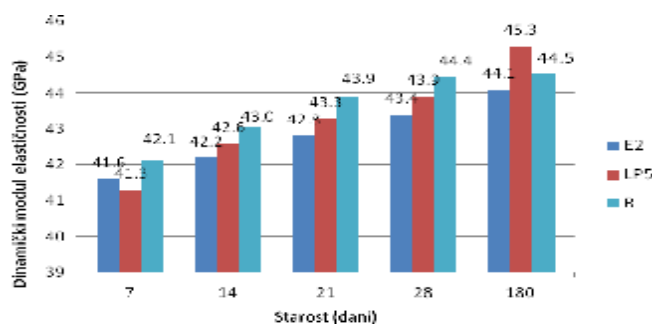


Slika 9.37 Uporedni prikaz athezije kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraašenim recikliranim betonom

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 spraašenim 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 spraašenim recikliranim betonom iste mase.

Vrednosti **dinamičkog modula elastičnosti** zabeležene pri starosti od 7, 14, 21, 28 i 180 dana kod poređenih SCC mešavina prikazane su na slici 9.38. Na slici su referentna SCC mešavina spravljenju sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera, SCC mešavina sa 50% letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" u odnosu na ukupnu masu filera i SCC

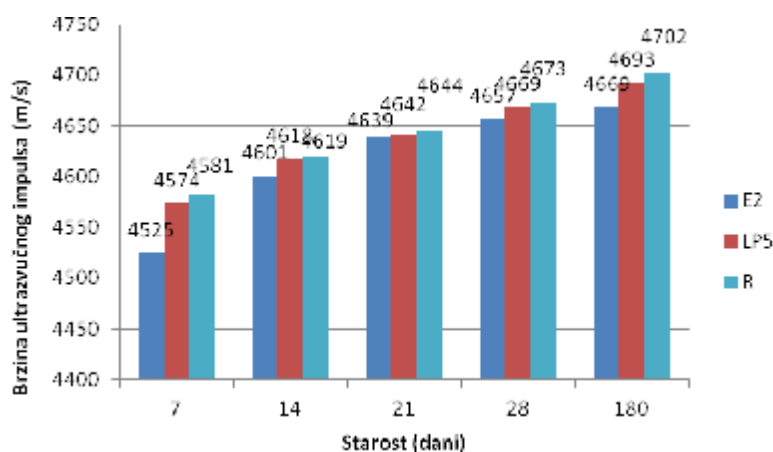
mešavina sa 50% spraešenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera označene oznakama E2, LP5 i R, respektivno.



Slika 9.38 Uporedni prikaz dinamičkog modula elastičnosti kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom

Na osnovu prikazane grafičke predstave može se primetiti da su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod mešavine LP5 (sa letećim pepelom u svojstvu 50% mase filera) uvek veće (od 0.7% do 2.7%) od odgovarajućih vrednosti kod referentne mešavine E2. Sličan je efekat i u slučaju upotrebe spraešenog recikliranog agregata, gde se porasti kreću u granicama od 1.0% do 2.6%. Takođe, može se reći da su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa spraešenim recikliranim agregatom po pravilu (od 1.0% do 2.0%) više od odgovarajućih vrednosti kod SCC sa letećim pepelom doziranim u istoj količini.

Vrednosti brzine **ultrazvučnog impulsa** zabeležene pri starostima od 7, 14, 21, 28 i 180 dana kod poređenih SCC mešavina prikazane su na slici 9.39.



Slika 9.39 Uporedni prikaz vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraešenim recikliranim betonom

Po pitanju vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod ispitivanih serija, može se izvesti generalni komentar da je odnos tih vrednosti kod svih poređenih serija ostao isti pri svim starostima, najniža vrednost brzine ultrazvučnog impulsa zabeležena je kod referentne SCC mešavine (spravljene samo sa krečnjačkim brašnom), viša vrednost brzine ultrazvučnog impulsa zabeležena je kod SCC mešavine spravljene sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara" u iznosu od 50% ukupne mase filera (porast 0.1-1.1% u odnosu na referentnu mešavinu E2), a najviša vrednost brzine ultrazvučnog impulsa zabeležena je kod SCC mešavine spravljene sa sprášenim recikliranim betonom u iznosu od 50% ukupne mase filera (porast 0.1-1.2% u odnosu na referentnu mešavinu E2). Takođe, može se konstatovati 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.

Što se tiče **dinamičkog Poasonovog koeficijenta**, kod SCC mešavina sa 50% sprášenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera, njegova vrednost je 0.1-9.2% viša nego kod SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara".

Kod svih poređenih SCC mešavina zabeležen je prodor vode pod pritiskom manji od 20 mm. Izmerene prosečne i maksimalne vrednosti prodora vode u uzorcima bile su bliske, pa se ne mogu izvesti pouzdani zaključci u smislu ponašanja poređenih SCC mešavina.

9.7.2 Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprášenim sumporom

U daljoj diskusiji će biti dat uporedni prikaz svojstava SCC mešavina sa 10% letećeg pepela (SCC mešavine oznake LP1 i LP3) i 10% sprášenog sumpora (mešavina oznake S10), odnosno 20% letećeg pepela (SCC mešavine oznake LP2 i LP4) i 20% sprášenog sumpora (mešavina oznake S20) u odnosu na ukupnu masu filera u mešavini (220 kg/m^3). SCC mešavine oznake LP1 i LP2 spravljene su sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac", a mešavine LP3 i LP4 sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara". Ostale komponente su u svim navedenim mešavinama dozirane u istim iznosima: količine cementa (380 kg/m^3), vode (183 kg/m^3), agregata (1700 kg/m^3) i

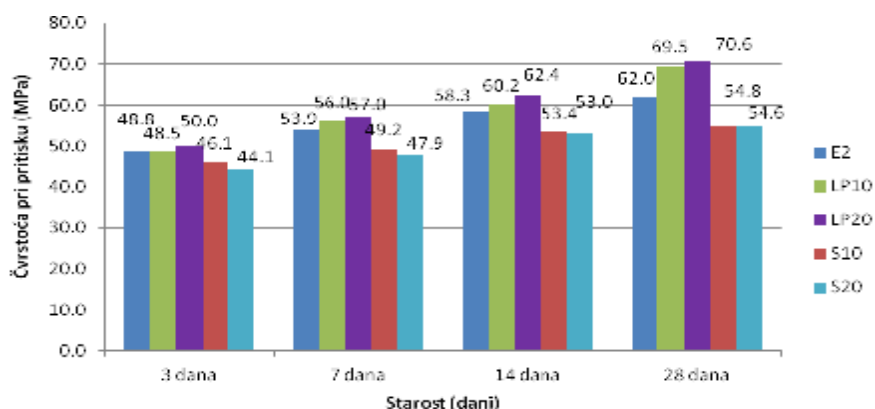
superplastifikatora (7.6 kg/m^3 , što iznosi 2% u odnosu na masu cementa, odnosno 1.27% u odnosu na masu praškaste komponente koja je uključivala cement, krečnjačko brašno i leteći pepeo). Prilikom dalje analize će rezultati ispitivanja SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela biti predstavljeni kao prosečna vrednost rezultata ispitivanja, odnosno biće zanemaren efekat porekla letećeg pepela (TE "Kolubara" i TE "Kostolac"). Postoji više razloga za ovaj potez: prvo, ovakva uporedna analiza (bazirana na vrsti upotrebljenog mineralnog dodatka) biće jednostavnija i očiglednija, drugo, poređenje rezultata ispitivanja SCC mešavine spravljene sa sprášenim sumporom sa svakom od SCC mešavina sa letećim pepelom određenog porekla ne bi imalo praktičnog značaja.

Kada su u pitanju svojstva SCC mešavina u očvrslom stanju, mogu se porediti sledeća svojstva SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprášenim sumporom u svojstvu mineralnog dodatka: čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju savijanjem sa jednom silom u sredini raspona, atezija (čvrstoća veze) čeličnog pečata prečnika $\text{Ø}20 \text{ mm}$ i $\text{Ø}50 \text{ mm}$ na površini ispitivanog betona (ispitivanja pri starosti od 180 dana) - ispitivanje "pull-off" metodom, brzina ultrazvučnog impulsa, dinamički modul elastičnosti i dinamički Poasonov koeficijent.

Uporedni prikaz vrednosti **čvrstoće pri pritisku** očvrslilih SCC mešavina prikazan je na slici 9.40. Na ovom grafiku su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljena sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (označene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (označene oznakama S10 i S20).

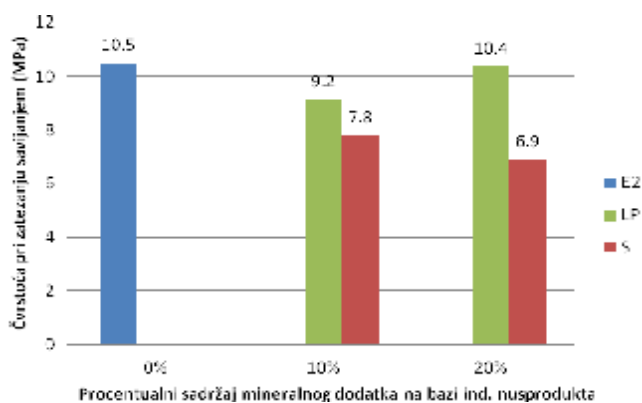
Na osnovu analize vrednosti rezultata ispitivanja prikazanih na predmetnom dijagramu, može se izvesti nekoliko opažanja. Naime, pri svim starostima osim pri starosti od 3 dana, čvrstoće pri pritisku mešavina sa letećim pepelom su više od čvrstoće pri pritisku referentne SCC mešavine, a u slučaju upotrebe sprášenog sumpora, čvrstoće pri pritisku su niže u odnosu na referentnu mešavinu. Generalno, čvrstoće pri pritisku mešavina sa sprášenim sumporom su niže od čvrstoće pri pritisku mešavina sa letećim pepelom i to u granicama od 4.9% (SCC mešavine sa 10% letećeg pepela i sprášenog sumpora pri

starosti od 3 dana) do 22.7% (SCC mešavine sa 20% letećeg pepela i prašenog sumpora pri starosti od 28 dana). Takođe, može se primetiti da ove razlike rastu sa porastom vremena i sa porastom količine upotrebljenog mineralnog dodatka (razlike u granicama od 4.9% i 21.2% pri poređenju SCC mešavina sa 10% prašenog sumpora i 10% letećeg pepela, odnosno u granicama od 11.8% do 22.7% pri poređenju SCC mešavina sa 20% prašenog sumpora i 20% letećeg pepela).



Slika 9.40 Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri pritisku kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa prašenim sumporom

Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem jednom silom u sredini raspona (čvrstoća pri savijanju) poređenih SCC mešavina, prikazan je na slici 9.41.

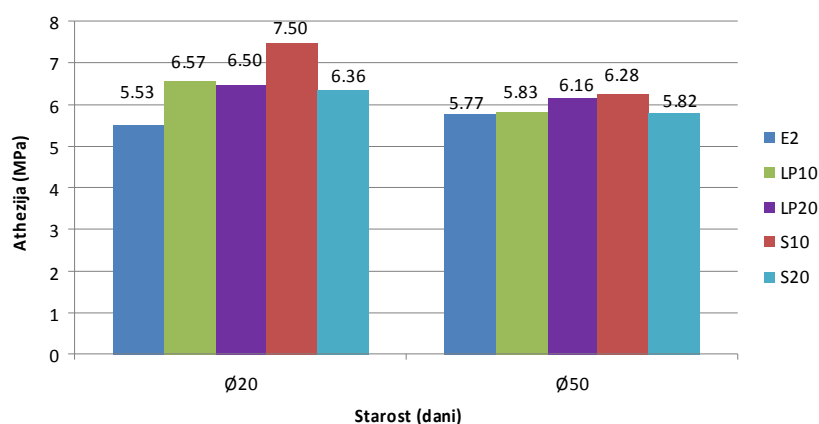


Slika 9.41 Uporedni prikaz vrednosti čvrstoće pri savijanju kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa prašenim sumporom

Poređenjem čvrstoće pri zatezanju savijanjem SCC mešavina sa 10% letećeg pepela i sa 10% prašenog sumpora može se uočiti da je vrednost čvrstoće pri zatezanju savijanjem dobijena ispitivanjem kod SCC mešavine sa 10% letećeg pepela 12.9% niža od

vrednosti dobijene ispitivanjem referentne SCC mešavine spravljene samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (mešavina oznake E2), dok je kod SCC mešavine sa 10% spraćenog sumpora dobijena čvrstoća pri zatezanju savijanjem niža 25.7% u odnosu na referentnu mešavinu oznake E2. Poređenjem čvrstoće pri zatezanju savijanjem SCC mešavina sa 20% letećeg pepela i sa 20% spraćenog sumpora može se uočiti da je vrednost čvrstoće pri zatezanju savijanjem dobijena ispitivanjem kod SCC mešavine sa 20% letećeg pepela 1.0% niža od vrednosti dobijene ispitivanjem referentne SCC mešavine spravljene samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera (mešavina oznake E2), dok je kod SCC mešavine sa 20% spraćenog sumpora dobijena čvrstoća pri zatezanju savijanjem niža 34.3% u odnosu na referentnu mešavinu oznake E2. Međusobnim poređenjem čvrstoće pri zatezanju savijanjem SCC mešavina sa 10% letećeg pepela i 10% spraćenog sumpora (pri starosti od 180 dana) može se primetiti da je čvrstoća pri zatezanju savijanjem kod mešavine sa 10% spraćenog sumpora niža 14.8% u odnosu na čvrstoću pri zatezanju savijanjem SCC mešavine sa 10% letećeg pepela. Međusobnim poređenjem čvrstoće pri zatezanju savijanjem SCC mešavina sa 20% letećeg pepela i 20% spraćenog sumpora (pri starosti od 180 dana) može se primetiti da je čvrstoća pri zatezanju savijanjem kod mešavine sa 20% spraćenog sumpora niža 33.7% u odnosu na čvrstoću pri zatezanju savijanjem dobijenu kod SCC mešavine sa 20% letećeg pepela.

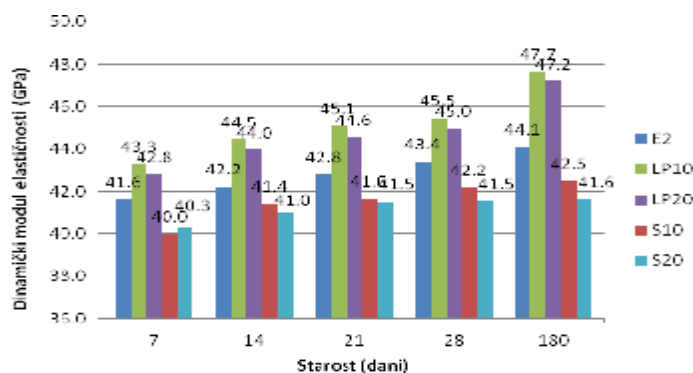
Uporedni prikaz vrednosti **athezije** ispitivane pomoću "pull-off" metode na uzorcima očvrslilih SCC mešavina, prikazan je na slici 9.42.



Slika 9.42 Uporedni prikaz vrednosti athezije ispitivane pomoću "pull-off" metode kod očvrslilih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraćenim sumporom

Može se, u slučaju ispitivanja athezije pečata prečnika Ø20 mm i Ø50 mm na površini očvrsljih SCC mešavina, obavljenog pomoću metode "pull-off", primetiti da je, za količinu od 10% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, athezija respektivno 14.2% i 7.7% viša nego u slučaju upotrebe 10% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini. Nasuprot tome, u slučaju ispitivanja athezije pečata prečnika Ø20 mm i Ø50 mm na površini očvrsljih SCC mešavina, obavljenog pomoću metode "pull-off", za količinu od 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera evidentno je da je athezija respektivno 2.1% i 5.6% niža nego u slučaju upotrebe 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini. Takođe, može se primetiti da su sve vrednosti athezije izmerene kod mešavina sa sprášenim sumporom i letećim pepelom više (u granicama od 0.8% do 35.7%) od vrednosti athezije izmerene kod referentne SCC mešavine.

Uporedni prikaz vrednosti **dinamičkog modula elastičnosti** očvrsljih SCC mešavina prikazan je na slici 9.43.

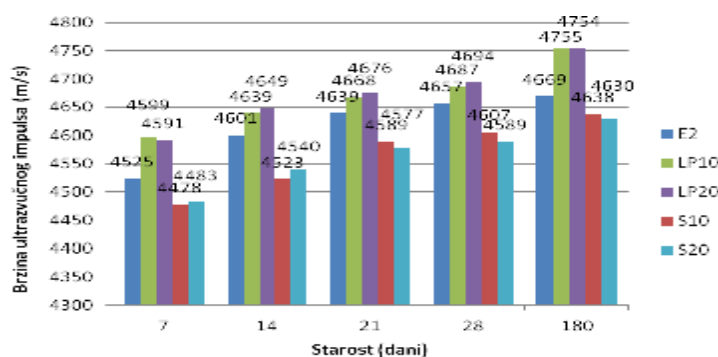


Slika 9.43 Uporedni prikaz vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod očvrsljih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa sprášenim sumporom

Na osnovu analize vrednosti predstavljenih na priloženom grafičkom prikazu, u vezi sa dinamičkim modulom elastičnosti kod SCC mešavina spravljenih sa 10% i 20% letećeg pepela i sa 10% i 20% sprášenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, može se primetiti da su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa letećim pepelom više od vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa sprášenim sumporom, u granicama od 6.3% do 13.4%, nezavisno od starosti pri ispitivanju. Efekat povećanja količine ne može da se utvrdi sa sigurnošću, pošto je pri određenim starostima ova razlika manja sa povećanjem količine mineralnog dodatka

(letećeg pepela ili spraćenog sumpora) sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera, a pri drugim starostima ova razlika je veća sa povećanjem količine mineralnog dodatka (letećeg pepela ili spraćenog sumpora) sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera.

Uporedni prikaz vrednosti **brzine ultrazvućnog impulsa** kod očvrslih SCC mešavina prikazan je na slici 9.44. Na ovom grafiku su date sledeće mešavine: referentna SCC mešavina spravljenjena sa krećnjaćkim brašnom u svojstvu filera (oznake E2), SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera (oznaćene sa LP10 i LP20) i SCC mešavine sa 10% i 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera (oznaćene oznakama S10 i S20).



Slika 9.44 Uporedni prikaz vrednosti brzine ultrazvućnog impulsa kod očvrslih SCC mešavina sa letećim pepelom i sa spraćenim sumporom

Na osnovu vrednosti prikazanih na grafićkom prikazu, u vezi sa brzinom ultrazvućnog impulsa kod SCC mešavina spravljenih sa 10% i 20% letećeg pepela i sa 10% i 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, moće se primetiti da su vrednosti brzine ultrazvućnog impulsa kod SCC mešavina sa letećim pepelom više od vrednosti brzine ultrazvućnog impulsa kod SCC mešavina sa spraćenim sumporom, u granicama od 1.7% do 2.7%, nezavisno od starosti pri ispitivanju. Efekat povećanja kolićine mineralnog dodatka ne moće da se utvrdi sa sigurnošću, pošto je pri starosti od 7 i 14 dana ova razlika manja sa povećanjem kolićine mineralnog dodatka (letećeg pepela ili spraćenog sumpora) sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera, a pri starosti od 21, 28 i 180 dana ova razlika je veća sa povećanjem kolićine mineralnog dodatka (letećeg pepela ili spraćenog sumpora) sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera.

Što se tiče **dinamičkog Poasonovog koeficijenta**, na osnovu ispitivanja pri starosti od 7, 14, 21, 28 i 180 dana, kod SCC mešavina sa 10% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, vrednost dinamičkog Poasonovog koeficijenta je 3.8% do 12.6% viša nego kod SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela. U slučaju kada je u mešavini upotrebljeno 20% spraćenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, vrednosti dinamičkog Poasonovog koeficijenta bile su 3.8% do 16.3% više nego kod SCC mešavina sa istom količinom letećeg pepela. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja može se primetiti da su vrednosti dinamičkog Poasonovog koeficijenta više kod SCC mešavina sa spraćenim sumporom nego kod SCC mešavina sa letećim pepelom.

9.7.3 Uporedni prikaz SCC mešavina sa letećim pepelom, SCC mešavina sa spraćenim recikliranim betonom i SCC mešavina sa spraćenim sumporom

U najvećem broju slučajeva, svojstva SCC mešavina koje su predmet ovog rada zavisila su od sadržaja komponentnih materijala, u prvom redu od porekla i sadržaja mineralnih dodataka na bazi industrijskih nusprodukata (letećeg pepela, spraćenog recikliranog betona i spraćenog sumpora).

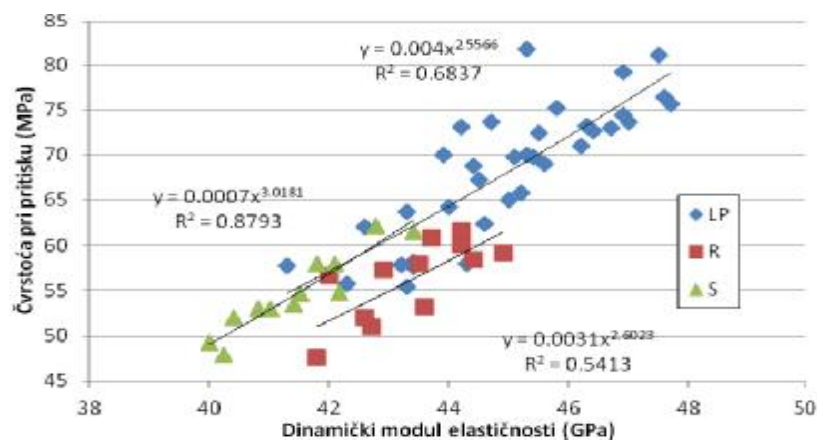
U izvesnom broju slučajeva (odnos statičkog i dinamičkog modula elastičnosti, odnos čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti, odnos čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa) iz razmatranja je mogao biti izuzet faktor uticaja sadržaja ili porekla komponente. U ovom delu će biti prikazana i diskutovana ova svojstva, sa aspekta vrste upotrebljenog mineralnog dodatka. Pri tome rezultati za mešavinu E2 (koja je kao referentna mešavina upotrebljena u analizi kod sve tri vrste mineralnih dodataka) neće biti uzeti u obzir, kako bi se dobila što bolja slika u smislu razlike efekata upotrebe mineralnih dodataka različitog porekla.

Na slici 9.45 je prikazana **zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti** za sve tri vrste upotrebljenih mineralnih dodataka (leteći pepeo, spraćeni reciklirani beton, spraćeni sumpor), ali, kao što je već rećeno, bez rezultata za referentnu mešavinu E2. Na dijagramu su prikazani parovi vrednosti (ćvrstoća pri pritisku, dinamićki modul elastičnosti) za sve SCC mešavine nezavisno od sadržaja i porekla

mineralnog dodatka i nezavisno od vremena kada je ispitivanje vršeno (3, 7, 14, 21, 28, 63, 90, 180 dana). Kao što se to sa dijagrama može videti, korelacija između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti data je u obliku stepene funkcije za osnovu koju predstavlja dinamički modul elastičnosti E_d . Funkcionalne zavisnosti između čvrstoće pri pritisku f_p (MPa) i dinamičkog modula elastičnosti E_d (GPa) prikazane su za sva tri upotrebljena filera u tabeli 9.5.

Tabela 9.5 Funkcionalne zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti

Mešavine	Dobijena funkcionalna zavisnost	r^2
SCC mešavine sa letećim pepelom	$f_p = 0.004 \cdot E_d^{2.5566}$	0.6837
SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom	$f_p = 0.0031 \cdot E_d^{2.6023}$	0.5413
SCC mešavine sa spraešenim sumporom	$f_p = 0.0007 \cdot E_d^{3.0181}$	0.8793



Slika 9.45 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti za sve tri vrste upotrebljenih dodataka

Sa slike 9.45 se može videti da je kod SCC mešavina sa sve tri vrste upotrebljenog dodatka dobijena slična zavisnost između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti. Ovo je posledica činjenice da su količina vode, količina cementa, količina i granulometrijski sastav agregata i količina upotrebljenog superplastifikatora kod svih mešavina isti. Stoga se razlike koje mogu da se vide na dijagramu mogu pripisati isključivo vrsti i količini upotrebljenog filera. Takođe, sa dijagrama se može uočiti da su odgovarajući parovi vrednosti za SCC mešavine sa spraešenim sumporom i za SCC mešavine sa spraešenim recikliranim agregatom dati uglavnom za niže vrednosti dinamičkog modula elastičnosti (niže od 45 GPa) kao i za niže vrednosti čvrstoće pri pritisku (niže od 65 MPa). Ovo je posledica činjenice da su rezultati ispitivanja za

pomenute SCC mešavine dati samo do starosti od 28 dana. Pri većim starostima i kod ovih mešavina bi se najverovatnije mogle očekivati vrednosti čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti slične onima za SCC mešavine spravljene sa letećim pepelom. Međusobnim poređenjem izračunatih funkcionalnih zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti prikazanih na dijagramu može se primetiti da su se za SCC mešavine sa letećim pepelom i za SCC mešavine sa sprášenim sumporom ove zavisnosti gotovo poklopile, dok je za SCC mešavine sa sprášenim recikliranim betonom dobijena funkcionalna zavisnost ispod pomenute dve. Ovaj efekat kod SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom može se pripisati većem sadržaju sprášenog recikliranog betona (50% u odnosu na ukupnu masu filera u svim slučajevima kod SCC sa sprášenim recikliranim betonom), pa se tako za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku dobijaju generalno više vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom. Takođe, treba napomenuti da je kod mešavina sa sprášenim sumporom (koji iznosi 2-20% u odnosu na ukupnu masu filera) efekat suprotan, odnosno za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku dobijaju se niže vrednosti dinamičkog modula elastičnosti, pa je efekat taj da su parovi vrednosti pomereni na dole i levo u odnosu na parove vrednosti kod SCC mešavina sa letećim pepelom (10-50%) u svojstvu filera. Konačno, kod mešavina sa letećim pepelom došlo je do pucolanskih reakcija koje su u izvesnoj meri uticale na povećanje oba svojstva (čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti) kod ovih SCC mešavina, pa je ta kriva, u odnosu na one dobijene za SCC sa sprášenim sumporom i SCC sa sprášenim recikliranim betonom pomeren na gore i u desno.

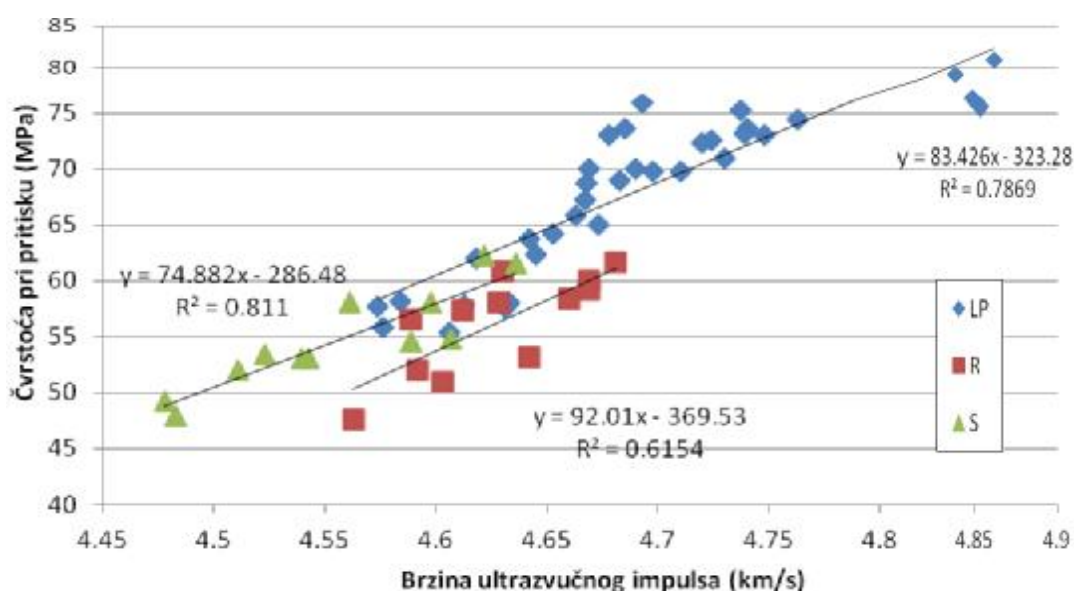
Na slici 9.46 je prikazana **zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa** za sve tri vrste upotrebljenih mineralnih dodataka (leteći pepeo, sprášeni reciklirani beton, sprášeni sumpor), ali, kao što je već rečeno, bez rezultata za referentnu mešavinu. Na dijagramu su prikazani parovi vrednosti (čvrstoća pri pritisku, brzina ultrazvučnog impulsa) za sve SCC mešavine nezavisno od sadržaja i porekla mineralnog dodatka i nezavisno od vremena kada je ispitivanje vršeno (3, 7, 14, 21, 28, 63, 90, 180 dana).

Kao što se to sa dijagrama može videti, korelacija između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa data je u obliku linearne zavisnosti. Funkcionalne zavisnosti

između čvrstoće pri pritisku f_p (MPa) i brzine ultrazvučnog impulsa UZV (km/s) prikazane su za sva tri upotrebljena filera u tabeli 9.6.

Tabela 9.6 Funkcionalne zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa

Mešavine	Dobijena funkcionalna zavisnost	r^2
SCC mešavine sa letećim pepelom	$f_p = 83.43 \cdot \text{UZV} - 323.3$	0.7869
SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom	$f_p = 92.01 \cdot \text{UZV} - 369.5$	0.6154
SCC mešavine sa spraešenim sumporom	$f_p = 74.88 \cdot \text{UZV} - 286.5$	0.8110



Slika 9.46 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa za sve tri vrste upotrebljenih dodataka

Sa slike 9.46 se može videti da je kod SCC mešavina sa sve tri vrste upotrebljenog dodatka dobijena slična zavisnost između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa. Ovo je posledica činjenice da su količina vode, količina cementa, količina i granulometrijski sastav agregata i količina upotrebljenog superplastifikatora kod svih mešavina isti. Stoga se razlike koje mogu da se vide na dijagramu mogu pripisati isključivo vrsti i količini upotrebljenog filera. Takođe, sa dijagrama se može uočiti da su odgovarajući parovi vrednosti za SCC mešavine sa spraešenim sumporom i za SCC mešavine sa spraešenim recikliranim agregatom dati uglavnom za niže vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa (niže od 4700 m/s) kao i za niže vrednosti čvrstoće pri pritisku (niže od 65 MPa). Ovo je posledica činjenice da su rezultati ispitivanja za pomenute

SCC mešavine dati samo do starosti od 28 dana. Pri većim starostima bi se najverovatnije i kod ovih mešavina mogle očekivati vrednosti čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa slične onima za SCC mešavine spravljene sa letećim pepelom.

Međusobnim poređenjem sračunatih funkcionalnih zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa datih na dijagramu može se primetiti da su u pitanju linearne funkcionalne zavisnosti sa sličnim koeficijentom pravca, ali sa različitim slobodnim članom. To znači da se, u principu, na osnovu ovih zavisnosti, za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku mogu očekivati najniže vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa u SCC mešavinama sa letećim pepelom, nešto više u SCC mešavinama sa spršenim sumporom i najviše vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa mogu se očekivati u SCC mešavinama sa spršenim recikliranim betonom. Na isti način, za istu vrednost brzine ultrazvučnog impulsa, na osnovu izračunatih funkcionalnih zavisnosti, može se očekivati najviša čvrstoća pri pritisku kod SCC mešavina sa letećim pepelom, nešto niža čvrstoća kod SCC mešavina sa spršenim sumporom (oko 4% u odnosu na čvrstoću pri pritisku kod SCC mešavine sa letećim pepelom) i najniža vrednost čvrstoće pri pritisku kod SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom (oko 10.4% u odnosu na čvrstoću pri pritisku kod SCC mešavine sa letećim pepelom). Primećeni efekat kod SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom može se pripisati većem sadržaju spršenog recikliranog betona (50% u odnosu na ukupnu masu filera u svim slučajevima kod SCC sa spršenim recikliranim betonom), pa se tako za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku dobijaju generalno više vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa kod SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom. Takođe, treba napomenuti da je kod mešavina sa spršenim sumporom (koji iznosi 2-20% u odnosu na ukupnu masu filera) efekat manje izražen, odnosno za iste vrednosti čvrstoće pri pritisku kod ovih mešavina se dobijaju generalno više vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa nego kod SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom, ali ipak niže nego kod SCC mešavina sa letećim pepelom. Naravno, kod mešavina sa letećim pepelom došlo je do pucolanskih reakcija koje su u izvesnoj meri uticale na povećanje rezultata ispitivanja oba svojstva (čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa) kod ovih SCC mešavina, pa je ta zavisnost, u odnosu na one dobijene za SCC sa spršenim sumporom i SCC sa spršenim recikliranim betonom najviša na grafičkoj predstavi.

10. Zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja

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, u cilju optimizacije 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 istraživana uticaj zamene dela filera na čvrstoću pri pritisku, čvrstoću pri zatezanju cepanjem, čvrstoću pri zatezanju savijanjem, atheziju, statički i dinamički modul elastičnosti, itd. Ispitivanja ovih betona su obuhvatila i procenu trajnosti na bazi ispitivanja otpornosti na dejstvo mraza, otpornosti na simultano dejstvo mraza i soli i vodonepropustljivost, u obimu utvrđenom na osnovu vrste i količine primenjenog mineralnog dodatka.

Za primenu u svojstvu mineralnog dodatka u sklopu sprovedenih ispitivanja su izabrani sledeći industrijski nusprodukti: leteći pepeo, sprášeni reciklirani beton i sprášeni otpadni sumpor. Pri tome je variran sadržaj i poreklo letećeg pepela u SCC mešavinama sa letećim pepelom, odnosno sadržaj sprášenog recikliranog betona u SCC mešavinama sa sprášenim recikliranim betonom i sprášenog otpadnog sumpora u odgovarajućim SCC mešavinama sa sumporom, pri konstantnim ostalim količinama materijala: cementa, vode, sitnog (rečnog peska) i krupnog agregata (druge i treće frakcije prirodnog rečnog agregata). U mešavinama je upotrebljen čist cement PC 42.5R i voda iz vodovoda, u konstantnim količinama.

10.1 Zaključci na osnovu rezultata ispitivanja SCC sa letećim pepelom u svežem i očvrslom stanju

Na osnovu kriterijuma aktuelnosti tematike, potrebe za ovakvim ispitivanjima, očekivanih rezultata ispitivanja i raspoloživosti materijala, ispitivanja SCC sa letećim

pepelom bila su najopsežnija, u smislu količina spravljenog betona, broja spravljenih mešavina, broja uzoraka i planiranog obima ispitivanja. U sklopu ovog rada spravljeno je sedam serija SCC sa letećim pepelom i bez njega, i to: dve referentne SCC mešavine (oznake E1 i E2, spravljene bez letećeg pepela, samo sa 220 kg/m^3 krečnjačkog brašna u svojstvu filera), zatim SCC mešavine spravljene sa 10%, 20% letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" (oznake LP1 i LP2) u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (filera), kao i SCC mešavine spravljene sa 10%, 20% i 50% letećeg pepela iz TE "Kolubara" (oznake LP3, LP4 i LP5), u odnosu na ukupnu masu mineralnog dodatka (filera). U pogledu sastava, količine cementa i agregata održavane su u svim mešavinama konstantnim (cement 380 kg/m^3 i agregat 1700 kg/m^3). Iz razloga bolje uporedne analize mešavina, spravljene su dve referentne mešavine SCC: jedna sa 10 kg/m^3 manje vode (mešavina označena sa E1, sa 173 kg/m^3 vode) i sa uslovom da čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28 dana kod ove mešavine bude približno jednaka čvrstoći pri pritisku mešavina sa letećim pepelom ($70 \pm 3 \text{ MPa}$) i druga, sa istom količinom vode (183 kg/m^3) kao kod svih mešavina sa LP (mešavina oznake E2). U mešavini sa 50% letećeg pepela (oznake LP5), povećana je količina superplastifikatora, sa 2% na 3% u odnosu na masu cementa (sa 7.6 kg/m^3 na 11.4 kg/m^3), da bi se dobila svojstva ugradljivosti za dati sadržaj LP i krečnjačkog brašna. Što se tiče rezultata ispitivanja SCC sa letećim pepelom, mogu se formulirati sledeći generalni zaključci:

1. Kod svih ispitivanih mešavina SCC sa LP (mešavine sa 10%, 20% LP poreklom iz TE "Kostolac", kao i mešavine sa 10%, 20% i 50% LP poreklom iz TE "Kolubara") sa povećanjem količine doziranog letećeg pepela **došlo je do pada obradljivosti** u odnosu na referentnu mešavinu, spravljenju sa istom količinom vode, što je u saglasnosti sa stavovima drugih autora [246]. Ovaj pad obradljivosti ogledao se u: **smanjenju sposobnosti tečenja, smanjenju sposobnosti prolaska i povećanju otpornosti prema segregaciji.**

2. Kada je reč o sposobnosti tečenja SCC mešavina, zamena određenog masenog procenta krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac" dovodi do pada **sposobnosti tečenja merene metodom rasprostiranja sleganjem** u prosečnom iznosu od 3.1% i 8.2% za zamenu 10% i 20%, respektivno. U slučaju primene letećeg

pepela poreklom iz TE "Kolubara", pomenuti pad vrednosti rasprostiranja sleganjem iznosi 7.9%, 12.8% i 7.7% za zamenu 10%, 20% i 50%, respektivno. Što se tiče poređenja **efekta upotrebe letećeg pepela različitog porekla, a iste količine** (uticaj porekla letećeg pepela) na rasprostiranje sleganjem SCC mešavina, može se zaključiti da upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" ima lošiji efekat na rasprostiranje sleganjem nego upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac", obzirom da je utvrđeno da je pad sposobnosti tečenja u smislu rasprostiranja sleganjem veći usled doziranja letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", nego usled doziranja letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac".

3. Zamena određenog masenog procenta krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac" dovodi do pada **sposobnosti tečenja merenog porastom vrednosti vremena rasprostiranja do prečnika od 500 mm**. Pri tome, porast vrednosti vremena t_{500} iznosi 90.8% i 156.5% za zamenu 10% i 20%, respektivno, a u slučaju vremena t_v porast iznosi 73.4% i 107% za zamenu 10% i 20%, respektivno. U slučaju upotrebe letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara", porast vrednosti vremena t_{500} iznosi 118%, 316% i 332% za zamenu 10%, 20% i 50%, respektivno, a porast vrednosti vremena t_v iznosi 63.6%, 130.8% i 179.6% za zamenu 10%, 20% i 50%, respektivno. Što se tiče poređenja **efekta upotrebe letećeg pepela različitog porekla, a iste količine** (uticaj porekla letećeg pepela) na vreme t_{500} , može se zaključiti da upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" ima lošiji efekat na vreme t_{500} nego upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac". U slučaju kada se vrši poređenje vremena t_v , može se zaključiti da upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" ima sličan ili lošiji efekat na vreme t_v nego upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac".

4. Zamena određenog masenog procenta krečnjačkog brašna letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac" dovodi do pada **sposobnosti prolaska merene pomoću vrednosti odnosa visina H2/H1** na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa sa povećanjem količine letećeg pepela u iznosu od 7.2% u oba slučaja (10% i 20%). U slučaju upotrebe pepela iz TE "Kolubara", ovaj pad iznosi 5.2%, 5.2% i 2.6% za zamenu 10%, 20% i 50%. Što se tiče poređenja **efekta upotrebe letećeg pepela različitog porekla, a iste količine** (uticaj porekla letećeg pepela), može se zaključiti da je sposobnost prolaska u

smislu odnosa visina H_2/H_1 na kraju i na početku horizontalnog dela L-boksa veća sa dodavanjem letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac", nego sa dodavanjem letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara".

5. Kada se radi o svojstvu **otpornosti prema segregaciji**, na bazi vrednosti faktora segregacije dobijenih prilikom predmetnih ispitivanja može se izvesti zaključak da povećanje količine letećeg pepela u mešavini, u svojstvu masene procentualne zamene dela krečnjačkog brašna, dovodi do povećanja otpornosti prema segregaciji (odnosno do pada faktora segregacije). Ovaj pad u slučaju upotrebe letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" iznosi 17.1% i 28.6% za zamenu 10% i 20%, respektivno, odnosno 14.3%, 42.9% i 51.4% za zamenu 10%, 20% i 50%, respektivno. Što se tiče poredenja efekta upotrebe letećeg pepela različitog porekla, a iste količine (uticaj porekla letećeg pepela) na faktor segregacije kod SCC mešavina, može se zaključiti da upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" ima sličan ili bolji efekat na faktor segregacije nego upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac".

6. Što se tiče **zapreminske mase svežeg betona**, došlo je do pada njene vrednosti sa dodatkom LP, u funkciji od povećanja sadržaja LP. Brži pad zapreminske mase u svežem stanju sa povećanjem količine letećeg pepela zabeležen je u slučaju upotrebe letećeg pepela poreklom iz TE "Kolubara" (0,9% sa povećanjem procenta zamene krečnjačkog brašna letećim pepelom sa 10% na 20%) nego u slučaju upotrebe letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" (0.7% pri istom povećanju).

7. Generalno, sve vrednosti **sadržaja uvučenog vazduha** u SCC sa LP kretale su se oko uobičajene vrednosti od 2%, što je postignuto bez ikakvog dodatnog kompaktiranja. Takođe, generalno posmatrano, sadržaj uvučenog vazduha kod ispitivanih SCC mešavina je varirao sa povećanjem količine dodatog LP.

8. Na osnovu ispitivanja **čvrstoće pri pritisku** pri starosti od 3, 7, 14, 21, 28, 63, 90 i 180 dana može se zaključiti da je zamena određenog masenog procenta krečnjačkog brašna letećim pepelom imala pozitivan efekat na čvrstoću pri pritisku SCC mešavina, nezavisno od porekla letećeg pepela (TE "Kostolac" i TE "Kolubara"). Ovaj efekat je приметniji 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 E2 (bez letećeg pepela). Ovaj porast čvrstoće pri pritisku sa povećanjem količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini se može pripisati pucolanskom efektu letećeg pepela, koji je izraženiji kod primene optimalnih količina letećeg pepela i pri većim starostima betona. 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 u SCC mešavini, naročito pri većim starostima. Sa aspekta porekla upotrebljenog letećeg pepela, ne može se sa sigurnošću izvesti generalni zaključak koji leteći pepeo daje betone viših čvrstoća pri pritisku, jer su dobijeni rezultati bliski.

9. Može se izvesti zaključak da vrednosti **čvrstoće pri zatezanju** (pri zatezanju savijanjem, pri zatezanju cepanjem i athezija) SCC sa LP nisu značajnije odstupale od odgovarajućih vrednosti kod referentne mešavine E2. Međutim, kada se uporede rezultati ovih ispitivanja za slučaj da je u SCC mešavinama prisutno 10% letećeg pepela i rezultati za slučaj da je u SCC mešavinama prisutno 20% letećeg pepela, može se izvesti zaključak da je sa povećanjem sadržaja letećeg pepela sa 10% na 20% došlo do porasta vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem, pri zatezanju cepanjem i athezije. Ovaj zaključak važi i za leteći pepeo poreklom iz TE "Kostolac" i za leteći pepeo poreklom iz TE "Kolubara". Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju cepanjem može se zaključiti da je mešavina oznake LP4 (SCC mešavina spravljena sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kolubara", u iznosu od 20% u odnosu na ukupnu masu filera u betonu) imala najviše vrednosti u odnosu na sve ispitivane SCC mešavine (u proseku do 10% pri starosti od 28 dana). Dalji porast količine letećeg pepela u SCC mešavini rezultirao je padom vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem.

10. Može se zaključiti da su vrednosti **statičkog modula elastičnosti** kod SCC sa letećim pepelom više (do 9.3%) od odgovarajućih vrednosti kod referentne mešavine E2, pri starosti od 28 i 180 dana. Ovo je u saglasnosti sa rezultatima ispitivanja NVC sa letećim pepelom iz literature [246].

11. Na osnovu ispitivanja **dinamičkog modula elastičnosti** kod SCC sa letećim pepelom, može se izvesti opšti zaključak da povećanje količine letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera kod SCC mešavina rezultira porastom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d SCC mešavine u odnosu na referentnu, nezavisno od vrste upotrebljenog letećeg pepela i nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju. Pri tome, povećanje količine letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera rezultiralo je padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d u iznosu od 1.7-2.2%, a 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.

12. Na osnovu rezultata sprovedenih ispitivanja može se izvesti opšti zaključak da 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.

13. Ispitivanja u vezi sa trajnošću pomenutih mešavina uključila su ispitivanja vodonepropustljivosti, otpornosti na dejstvo mraza i otpornosti na simultano dejstvo mraza i soli. Na osnovu rezultata ispitivanja **vodonepropustljivosti** navedenih SCC betona spravljenih bez letećeg pepela i sa letećim pepelom različitog porekla, može se izvesti zaključak da su sve SCC mešavine sličnog (visokog) stepena vodonepropustljivosti (a time i kompaktnosti). Visok stepen kompaktnosti predstavlja pokazatelj visoke trajnosti. U smislu **otpornosti na dejstvo mraza** ispitivanih mešavina SCC, može se zaključiti da su sve SCC mešavine spravljene bez letećeg pepela, kao i sa njim, nakon 200 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bile otporne na dejstvo mraza (pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentne uzorke ni kod jedne ispitivane SCC mešavine nije bio veći od 25%). Najveći pad čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentne uzorke (uzorke iste mešavine SCC koji nisu izlagani dejstvu mraza) iznosio je 13.7% (za mešavinu oznake LP3, koja je sadržala 20% letećeg pepela poreklom iz TE

"Kostolac" u odnosu na ukupnu masu filera). Pri tome, može se izvesti generalni zaključak da poreklo letećeg pepela nema veliki uticaj na otpornost na **dejstvo mraza** ispitivanih SCC mešavina. Što se tiče ispitivanja **otpornosti na dejstvo mraza i soli** SCC mešavina sa LP za odmrzavanje, može se zaključiti da su sve ispitivane mešavine otporne na pomenuto dejstvo, jer na izloženoj površini ispitivanih uzoraka nije došlo do degradacije betona usled kombinovanog dejstva mraza i soli za odmrzavanje.

14. Kada je ispitivanje **deformacija skupljanja** u pitanju, može se izvesti generalni zaključak da je skupljanje SCC sa letećim pepelom veće od skupljanja referentne mešavine E2, spravljene bez letećeg pepela. Pri starosti od 42 dana, skupljanje SCC sa letećim pepelom veće je od skupljanja referentne mešavine E2 u proseku 5.7% (od 2.1% do 8.9%).

15. Na osnovu **SEM analize** SCC mešavina, može se zaključiti da je kod svih mešavina ostvarena homogenost betona, dok je poroznost vizuelno posmatrano (kvalitativno) slična. Na osnovu iste analize može se zaključiti da se dimenzije prelazne zone na kontaktu sa krupnim zrnim agregata kod ispitivanih SCC mešavina nisu značajno razlikovale, odnosno da je u tom smislu osiguran visok stepen kompaktnosti svih ispitivanih SCC mešavina sa letećim pepelom. Takođe, se može zaključiti da su sitnija zrna letećeg pepela (karakterističnog sfernog oblika) reagovala sa matricom u većoj meri nego krupnija zrna, nepravilnijeg oblika i složenijeg hemijskog sastava. Što se tiče disperzije zrna krečnjačkog brašna i zrna letećeg pepela, mapiranjem po elementima Si, Al, Fe, Ca, S (kvalitativna analiza), nije uočeno grupisanje posmatranih zrna i može se zaključiti da je došlo do dobre disperzije sastojaka betona.

16. Na osnovu **EDS analize** može se zaključiti da je kod svih analiziranih SCC mešavina sa letećim pepelom matrica sličnog sastava, u svakoj ispitivanoj tački matrice i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata (u pitanju su hidratizane faze cementa: C-S-H faza i C-H, kao i slični produkti pucolanske reakcije). Konačno, na osnovu iste analize može se zaključiti da u prelaznoj zoni i na kontaktu uz zrna agregata nije zapažena veća koncentracija C-H faze nego u matrici, kao posledica guste i kompaktne strukture ove zone (što je onemogućilo rast C-H kristala u ovom području).

10.2 Zaključci na osnovu rezultata ispitivanja SCC sa spršenim recikliranim betonom u svežem i očvrslom stanju

U sklopu ovog dela izrade disertacije istraživana je uticaj spršenog recikliranog betona i njegovog porekla na svojstva mešavina SCC u kojima je upotrebljen u vidu filera. Kod svih mešavina SCC sa spršenim recikliranim betonom, izvršena je zamena 50% filera (krečnjačko brašno) istom masom spršenog recikliranog betona (110 kg/m^3). Ukupna masa filera održavana je kod svih mešavina konstantnom (220 kg/m^3) kao i ostale komponente, voda (183 kg/m^3), cement (380 kg/m^3), agregat (1700 kg/m^3) i superplastifikator (7.6 kg/m^3). Pored referentne mešavine E2 (spravljene bez spršenog recikliranog betona, samo sa krečnjačkim brašnom u svojstvu filera), spravljene su još tri mešavine SCC. U mešavini oznake R0 u svojstvu filera upotrebljen je spršen recikliran beton poreklom od običnog, normalno vibriranog betona (NVC) spravljenog sa prirodnim rečnim agregatom. U mešavini oznake R50 upotrebljen je spršen recikliran beton poreklom od običnog, normalno vibriranog betona (NVC) koji je u svom sastavu imao 50% krupnog recikliranog agregata (recikliranog betona). Konačno, u mešavini oznake R100 upotrebljen je spršen recikliran beton poreklom od običnog, normalno vibriranog betona (NVC) koji je u svom sastavu u svojstvu krupnog agregata imao isključivo reciklirani beton. U tom smislu, istraživanje efekta vrste upotrebljenog mineralnog dodatka (spršenog betona) na svojstva SCC mešavina može se smatrati ekvivalentom efekta porekla krupnog agregata u spršenom betonu na svojstva SCC mešavine u kojoj je taj spršeni beton upotrebljen. Što se tiče rezultata ispitivanja SCC sa spršenim recikliranim betonom mogu se formulisati sledeći generalni zaključci:

1. Kod svih ispitivanih mešavina SCC sa spršenim recikliranim betonom došlo je do pada obradljivosti u odnosu na referentnu mešavinu, spravljenu sa istom količinom vode. Ovaj pad obradljivosti ogledao se u smanjenju sposobnosti tečenja i smanjenju sposobnosti prolaska. Što se tiče smanjenja sposobnosti tečenja koja se meri testom **rasprostiranja sleganjem**, može se zaključiti da je došlo do pada (4.1-8.7%) ovog svojstva usled zamene 50% krečnjačkog brašna spršenim recikliranim betonom. Pri tome, pad vrednosti rasprostiranja sleganjem manji je za slučaj zamene veće količine krupnog agregata recikliranim betonom u spršenom recikliranom betonu.

2. Što se tiče smanjenja **sposobnosti tečenja** na osnovu merenja vremena potrebnog za rasprostiranje t_{500} i vremena V-levka t_v , može se zaključiti da je došlo do promene (pada) ovog svojstva (sposobnosti tečenja) u funkciji od porekla spraćenog recikliranog betona. Vrednosti vremena t_{500} veće su 72.9-85.1% za slučaj zamene 50% filera spraćenim recikliranim betonom. Takođe, vrednosti vremena t_v veće su 16.9-36.0% za slučaj zamene 50% filera spraćenim recikliranim betonom.

3. Po pitanju smanjenja **sposobnosti prolaska** merene testom L-boksa, može se zaključiti da je došlo do pada do 2.1% ovog svojstva usled dodavanja spraćenog recikliranog betona u iznosu od 50%, nezavisno od porekla spraćenog recikliranog betona.

4. Što se tiče promene **otpornosti prema segregaciji** merene testom pomoću sita (faktor segregacije), može se zaključiti da je došlo do pada (14.3-37.1%) ovog svojstva usled zamene 50% krečnjačkog brašna spraćenim recikliranim betonom.

5. Kada je u pitanju **zapreminska masa** svežeg SCC sa spraćenim recikliranim betonom, može se zaključiti da je došlo do malog pada (0.8%) njene vrednosti usled zamene 50% krečnjačkog brašna spraćenim recikliranim betonom, nezavisno od porekla spraćenog recikliranog betona. Ovaj pad može se objasniti (izmerenim) porastom sadržaja uvučenog vazduha, kao i prisustvom donekle lakših zrna malterske komponente u okviru spraćenog recikliranog betona.

6. **Sadržaj uvučenog vazduha** kod ispitivanih SCC mešavina, generalno posmatrano, porastao je usled zamene 50% krečnjačkog brašna spraćenim recikliranim betonom, nezavisno od porekla spraćenog recikliranog betona. U odnosu na referentnu mešavinu E2 (spravljenju bez spraćenog 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 slućajeve kada je spraćeni reciklirani beton vodio poreklo od obićnog betona, betona sa 50% krupnog recikliranog agregata i betona sa 100% krupnog recikliranog agregata, respektivno).

7. Generalno posmatrano, što se tiče **čvrstoće pri pritisku** ispitivanih serija SCC mešavina sa spršenim 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 E2 (spravljanu samo sa krečnjačkim brašnom, bez spršenog recikliranog betona), pri čemu je najveći procentualni pad čvrstoće pri pritisku od 12.5% zabeležen kod mešavine R0 (SCC mešavina spravljena sa spršenim recikliranim betonom poreklom od NVC sa prirodnim rečnim agregatom) pri starosti od 14 dana. Sa vremenom, u pitanju je sličan porast čvrstoće za sve mešavine.

8. Povodom rezultata ispitivanja **čvrstoće pri zatezanju cepanjem, savijanjem i vrednosti athezije**, može se izvesti generalni zaključak da njihove vrednosti načelno opadaju sa promenom vrste spršenog betona u SCC. Čvrstoća pri zatezanju cepanjem kod SCC sa spršenim recikliranim agregatom ostaje približno nezavisna od sadržaja krupnog agregata u spršenom betonu, a njen pad je iznosio 8.3-13.8%, nezavisno od starosti betona. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem ukazuje na pad (10.5-15.2% pri starosti od 180 dana) vrednosti ovog svojstva sa povećanjem sadržaja krupnog recikliranog agregata u spršenom betonu. Pri konkretnim ispitivanjima vrednosti **athezije** metodom "pull-off", karakteristično je da su vrednosti athezije međusobno malo odstupale pri poređenju po serijama.

9. Na osnovu rezultata ispitivanja **dinamičkog modula elastičnosti** E_d , može se izvesti opšti zaključak da upotreba spršenog recikliranog betona u svojstvu filera kod SCC mešavina (u iznosu od 50% u odnosu na ukupnu količinu filera) rezultira padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d SCC mešavine, nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju. Pri tome, u zavisnosti od porekla upotrebljenog spršenog recikliranog betona, najveći pad vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d (1.8-3.7%) uvek je bio kod SCC mešavine spravljene sa spršenim recikliranim betonom poreklom od NVC sa 50% recikliranog betona u svojstvu krupnog agregata, a najmanji (0.5-1.9%) kod SCC mešavine spravljene sa spršenim recikliranim betonom poreklom od NVC.

10. Što se tiče **brzine ultrazvučnog impulsa**, može se izvesti opšti zaključak da 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.

11. Na osnovu rezultata ispitivanja SCC betona sa spršenim recikliranim betonom različitog porekla, može se izvesti zaključak da su sve SCC mešavine visokog stepena **vodonepropustljivosti**.

12. Na osnovu rezultata strukturne **SEM analize**, u prvom redu se može zaključiti da raspored i veličina pora SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom vizuelno nisu odstupali od istih parametara kod referentne SCC mešavine oznake E2. Pomenutom analizom karakterisana je i prelazna zona zrna agregata i cementne matrice, i može se izvesti zaključak da je u toj zoni ostvarena kompaktna veza zrna i matrice.

10.3 Zaključci na osnovu rezultata ispitivanja SCC sa spršenim sumporom u svežem i očvrslom stanju

Istraživanje uticaja spršenog sumpora, u svojstvu industrijskog nusprodukta, na svojstva SCC mešavina je vršeno poređenjem ukupno pet SCC mešavina različitog sastava. U sastavu svih pomenutih SCC mešavina bio je konstantan sadržaj vode (183 kg/m^3), cementa (380 kg/m^3), superplastifikatora (7.6 kg/m^3), mineralnog dodatka (220 kg/m^3), kao i odnosi i ukupna količina sve tri upotrebljene frakcije agregata (1700 kg/m^3). Kod referentne SCC mešavine (mešavina oznake E2) u svojstvu filera upotrebljeno je krečnjačko brašno. Kod SCC mešavina (oznake S2, S5, S10 i S20) sa spršenim sumporom u svojstvu filera, upotrebljeno je 2% (4.4 kg/m^3), 5% (11 kg/m^3), 10% (22 kg/m^3) i 20% (44 kg/m^3) spršenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, dok je ostatak filera bilo krečnjačko brašno. U vezi sa rezultatima ispitivanja SCC sa spršenim sumporom mogu se formulirati sledeći generalni zaključci:

1. Kada je reč o promeni sposobnosti tečenja merenom testom **rasprostiranja sleganjem**, može se zaključiti da je došlo do povećanja ovog svojstva usled promene količine spršenog sumpora (1.8-7.7%). Povećanje vrednosti rasprostiranja sleganjem bilo je izraženije za manje procenatne zamene krečnjačkog brašna (2% i 5%), nego za veće procenatne zamene krečnjačkog brašna (10% i 20%) spršenim sumporom.

2. Kada su **vremena t_{500} i t_v** u pitanju, generalni zaključak je da nema velike promene njihovih vrednosti sa doziranjem spršenog sumpora, jer su svi rezultati u relativno malom rasponu od 1-2s. Slično tome, može se izvesti generalni zaključak da nema velike **promene odnosa visina H_2/H_1** u funkciji od povećanja količine doziranog spršenog sumpora, jer se svi rezultati ispitivanja kreću u rasponu od 0.01.

3. Može se izvesti generalni zaključak da postoji izvesno povećanje **faktora segregacije** (smanjenje otpornosti prema segregaciji) u funkciji prisustva spršenog sumpora, pri čemu ova vrednost ne raste linearno sa povećanjem količine spršenog sumpora.

4. Kada je reč o vrednostima **zapreminske mase** svežih SCC mešavina, može se zaključiti da postoji trend smanjenja zapreminske mase sa dodavanjem spršenog sumpora, do 0.9%. Ovo smanjenje može se objasniti povećanjem količine dodatog spršenog sumpora, koji ima manju specifičnu masu nego krečnjačko brašno.

5. **Sadržaj uvučenog vazduha** kod ispitivanih SCC mešavina generalno posmatrano nije se značajnije menjao sa povećanjem količine spršenog sumpora u SCC mešavinama.

6. Vrednosti **čvrstoće pri pritisku** kod SCC sa S su pri svim starostima bile niže (0.3-11.9%) nego kod referentne mešavine. Takođe, može se zaključiti da je za SCC sa manjim sadržajem spršenog sumpora pad čvrstoće pri pritisku manji nego za SCC sa većim sadržajem spršenog sumpora, pri čemu taj pad ne prati povećanje sadržaja spršenog sumpora linearno. Takođe, vrednosti pada čvrstoće pri pritisku SCC sa 10% i 20% spršenog sumpora su slične pri svim starostima, a sa povećanjem starosti razlike u procentualnom padu čvrstoće pri pritisku se smanjuju.

7. Kod SCC mešavina sa povećanjem količine spršenog sumpora dolazi do pada **čvrstoće pri zatezanju savijanjem** i to gotovo linearno u funkciji od sadržaja spršenog sumpora, okvirno 18-34% pri starosti od 180 dana. Pri tome treba dodati da je već pri malim količinama spršenog sumpora (2% u odnosu na ukupnu masu filera) evidentan pad **čvrstoće pri zatezanju savijanjem** od 18% pri pomenutoj starosti.

Prilikom ispitivanja vrednosti athezije "**pull-off**" **metodom**, uočen je pad vrednosti athezije od 15.0-35.7% primenom pečata prečnika Ø20 mm i 0.8-8.8% primenom pečata prečnika Ø50 mm, pri starosti od 180 dana.

8. Na osnovu obavljenih ispitivanja u vezi sa **dinamičkim modulom elastičnosti** E_d , može se izvesti opšti zaključak da upotreba spršenog sumpora u svojstvu filera kod SCC mešavina (u različitim iznosima u odnosu na ukupnu količinu filera) rezultira padom vrednosti dinamičkog modula elastičnosti E_d SCC mešavine, nezavisno od starosti uzoraka SCC mešavine pri ispitivanju. Pomenuti pad veći je sa povećanjem sadržaja spršenog sumpora i kreće se u granicama od 0.1-1.9% (za mešavinu sa 2% spršenog sumpora) do 2.8-5.7% (za mešavinu sa 20% spršenog sumpora), nezavisno od starosti betona.

9. Kada je u pitanju **brzina ultrazvučnog impulsa**, može se izvesti opšti zaključak da upotreba spršenog sumpora u svojstvu filera kod SCC mešavina rezultira padom (do 1.7%) vrednosti brzine ultrazvučnog impulsa SCC mešavine, nezavisno od sadržaja sumpora i starosti pri ispitivanju uzoraka SCC mešavine.

10. Na osnovu ispitivanja u pogledu strukture SCC mešavina u očvrsлом stanju, na bazi **SEM analize** može se zaključiti da poroznost SCC sa spršenim sumporom nije odstupala od poroznosti referentne SCC mešavine, oznake E2 (spravljene bez spršenog sumpora). U pogledu sastava, kontaktna zona zrna sumpora je ostala neizmenjena, odnosno slična kontaktnoj zoni kod zrna agregata. EDS analiza obavljena na većem broju mesta i uzoraka u ovim zonama je potvrdila ovaj zaključak. Na osnovu SEM analize može se izvesti zaključak da je matrica sličnog sastava, bez obzira na selektovano mesto i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata: u pitanju su hidratizane faze cementa, C-S-H faza i u manjoj meri C-H. U okviru prelazne zone zrna agregata nije zabeležena veća koncentracija C-H faze uz zrna agregata, što svedoči o dobroj kompaktnosti ispitivanih SCC mešavina. Na osnovu **mapiranja** po elementima Si, Al, Fe, Ca, S (kvalitativna analiza) urađenog na nekoliko mesta kod svakog od uzoraka, nije uočeno grupisanje posmatranih zrna i može se zaključiti da je došlo do dobre disperzije ovih sastojaka betona.

10.4 Zaključci na osnovu uporednog prikaza svojstava SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom u svežem i očvrslom stanju

Poređenje je vršeno između SCC mešavine sa 50% letećeg pepela u odnosu na ukupnu masu filera i prosečnih rezultata ispitivanja SCC mešavina sa 50% sprášenog recikliranog betona u svojstvu filera. Osim razlike u upotrebljenom fileru, sastav ovih mešavina se razlikuje i u količini doziranog superplastifikatora (3% u odnosu na masu cementa u mešavini kod SCC mešavina sa letećim pepelom, tj. 2% kod SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom). Na osnovu poređenja svojstava pomenutih SCC mešavina mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Na osnovu poređenja svojstava SCC mešavina u svežem stanju može se reći da bolju **spособnost tečenja** (mereno pomoću metode rasprostiranja sleganjem - 1.8% u odnosu na referentnu mešavinu E2, kao i pomoću vremena t_{500} i t_v , koje su oko 55% više kod SCC sa LP) ima mešavina sa sprášenim 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 E2) 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 LP.
2. Može se izvesti generalni zaključak da je upotreba sprášenog 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.
3. Prosečna vrednost **čvrstoće pri zatezanju** cepanjem SCC mešavina sa sprášenim 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 sprášenim recikliranim betonom u iznosu od 11.9% u odnosu na vrednost čvrstoće pri savijanju SCC mešavine sa letećim pepelom, pri starosti od 180 dana.

4. U slučaju ispitivanja **dinamičkog modula elastičnosti** u funkciji od vremena, 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 sprášenim recikliranim betonom.

5. 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% sprášenog recikliranog betona u odnosu na ukupnu masu filera.

6. Kada je reč o **vodonepropustljivosti**, može se izvesti generalni zaključak da je ona niža (dubina prodora vode oko 10% viša) kod SCC mešavina sa sprášenim recikliranim betonom.

10.5 Zaključci na osnovu uporednog prikaza svojstava SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprášenim sumporom u svežem i očvrslom stanju

U ovom delu će biti dati zaključci poređenja SCC mešavina sa letećim pepelom i SCC mešavina sa sprášenim sumporom u svežem i očvrslom stanju, na bazi iste količine od 10% i 20% mineralnog dodatka (letećeg pepela ili sprášenog sumpora) u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini. Na osnovu poređenja svojstava pomenutih SCC mešavina mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Kada je u pitanju **rasprostiranje sleganjem** SCC mešavina, efekat doziranja letećeg pepela suprotan efektu doziranja sprášenog sumpora. Naime, doziranje letećeg pepela u iznosu od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira padom sposobnosti tečenja merene pomoću metode rasprostiranja sleganjem, dok doziranje sprášenog sumpora u istim iznosima rezultira povećanjem sposobnosti tečenja.

2. Upotreba letećeg pepela u iznosu od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira značajnim padom (104.4-236.4%) svojstva **spособnosti tečenja** merene pomoću vremena t_{500} , dok doziranje spraćenog sumpora u istim iznosima rezultira malim padom (17.2-30.5%) sposobnosti tečenja merenog pomoću vremena t_{500} . Doziranje letećeg pepela u iznosu od 10% i 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira malim padom (68.5-119.1%) sposobnosti tečenja merene pomoću vremena t_v , dok doziranje spraćenog sumpora u istim iznosima rezultira malim porastom (5.3-8.8%) sposobnosti tečenja merene pomoću vremena t_v .

3. Može se izvesti generalni zaključak da je, kada je u pitanju **spособnost prolaska** merena na osnovu vrednosti odnosa visina H2/H1 SCC mešavina, efekat doziranja letećeg pepela u iznosu od 10% i 20% značajniji nego u slučaju doziranja iste količine spraćenog sumpora (rezultat je značajno veći pad vrednosti odnosa visina H2/H1 u odnosu na referentnu mešavinu).

4. Povećanje količine letećeg pepela sa 10% na 20% u odnosu na ukupnu masu filera u SCC mešavini rezultira srazmernim povećanjem **otpornosti prema segregaciji** dok za doziranje istih količina spraćenog sumpora efekat u vidu trenda nije uočljiv.

5. Što se tiče poređenja vrednosti **sadržaja uvučenog vazduha** u mešavinama sa letećim pepelom i sa spraćenim sumporom, može se reći da nije uočljiv trend promene sadržaja uvučenog vazduha u funkciji od vrste i količine upotrebljenog mineralnog dodatka. Nešto niže vrednosti sadržaja uvučenog vazduha dobijene su kod mešavina sa spraćenim sumporom.

6. Može se izvesti zaključak da su vrednosti **čvrstoće pri pritisku** mešavina sa spraćenim sumporom niže od vrednosti čvrstoće pri pritisku mešavina sa letećim pepelom i to u granicama do 22.7% (kada se porede SCC mešavine sa 20% letećeg pepela i spraćenog sumpora pri starosti od 28 dana). Takođe, može se zaključiti da ove razlike rastu sa porastom vremena i sa porastom količine upotrebljenog mineralnog dodatka (nezavisno od starosti, razlike reda veličine 4.9-21.2% pri poređenju SCC mešavina sa 10% spraćenog sumpora i 10% letećeg pepela, odnosno 11.8-22.7% pri poređenju SCC mešavina sa 20% spraćenog sumpora i 20% letećeg pepela).

7. Može se izvesti generalni zaključak da je **čvrstoća pri zatezanju savijanjem** (pri starosti od 180 dana) SCC mešavine sa 10% i 20% spršenog sumpora niža nego čvrstoća pri zatezanju savijanjem SCC mešavine sa 10% i 20% letećeg pepela (14.8% u slučaju doziranja 10%, a 33.7% u slučaju doziranja 20% mineralnog dodatka).

8. Na osnovu svega navedenog u vezi sa **dinamičkim modulom elastičnosti** kod SCC mešavina spravljenih sa 10% i 20% letećeg pepela i sa 10% i 20% spršenog sumpora u odnosu na ukupnu masu filera, može se izvesti generalni zaključak da su vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa letećim pepelom 6.3-13.4% više od vrednosti dinamičkog modula elastičnosti kod SCC mešavina sa spršenim sumporom, nezavisno od starosti pri ispitivanju.

9. Može se izvesti generalni zaključak da su vrednosti **brzine ultrazvučnog impulsa** kod SCC mešavina sa letećim pepelom više od odgovarajućih vrednosti kod SCC mešavina sa spršenim sumporom, u granicama od 1.7% do 2.7%, nezavisno od starosti pri ispitivanju.

10. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja može se izvesti generalni zaključak da su vrednosti **dinamičkog Poasonovog koeficijenta** 3.8-16.3% više kod SCC mešavina sa spršenim sumporom nego kod SCC mešavina sa letećim pepelom.

10.6 Zaključci na osnovu uporednog prikaza svojstava SCC mešavina sa letećim pepelom, SCC mešavina sa spršenim recikliranim betonom i SCC mešavina sa spršenim sumporom

Poređenje spravljenih SCC mešavina sa sve tri vrste dodataka ne može se izvršiti analogno prethodnom postupku, pošto nisu spravljanje mešavine u istom masenom odnosu količina materijala za sva tri mineralna dodatka. Međutim, u slučajevima kada je bilo moguće izostaviti iz razmatranja efekat količine dodatka, bilo je moguće izvršiti i uporednu analizu mešavina sa sva tri dodatka. To je bilo moguće u slučaju poređenja zavisnosti čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti, kao i zavisnosti

čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa. U tom smislu mogu se izvesti dva zaključka:

1. Međusobnim poređenjem sračunatih **funkcionalnih zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i dinamičkog modula elastičnosti** SCC mešavina sa letećim pepelom, SCC mešavina sa spraešenim recikliranim betonom i SCC mešavina sa spraešenim sumporom, može se zaključiti da su za SCC mešavine sa letećim pepelom i za SCC mešavine sa spraešenim sumporom ove zavisnosti veoma bliske, dok je za SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom dobijena funkcionalna zavisnost ispod pomenute dve.

2. Međusobnim poređenjem **funkcionalnih zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i brzine ultrazvučnog impulsa** SCC mešavina sa letećim pepelom, spraešenim recikliranim betonom i spraešenim sumporom, može se zaključiti da su u pitanju linearne funkcionalne zavisnosti sa sličnim koeficijentom pravca, ali sa različitim slobodnim članom, pri čemu je linearna zavisnost za SCC mešavine sa spraešenim sumporom ispod zavisnosti za SCC mešavine sa letećim pepelom, a linearna zavisnost za SCC mešavine sa spraešenim recikliranim betonom ispod pomenute dve.

10.7 Pravci daljih istraživanja SCC mešavina sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata

Istraživanja vršena na SCC mešavinama (u svežem i očvrslog stanju) sa letećim pepelom, spraešenim recikliranim betonom i spraešenim sumporom dala su detaljni uvid u svojstva ovih specifičnih betona u smislu: pokretljivosti i ugradljivosti svežih betonskih mešavina, sposobnosti prolaska između šipki armature, otpornosti prema segregaciji, o nizu fizičko-mehaničkih svojstava očvrslog kompozita (čvrstoća pri pritisku, zatezanju, pri savijanju, modul elastičnosti) i o aspektima trajnosti (vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza i simultano dejstvo mraza i soli za odmrzavanje). Međutim, ova ispitivanja i rezultati koji su iz njih proizašli otvaraju niz drugih pitanja, na koja bi u skorijoj ili daljoj budućnosti trebalo obratiti pažnju. Ova pitanja se odnose na tri aspekta od veoma velike važnosti za upotrebu SCC mešavina: komponentni materijali, svojstva SCC kompozita i mogućnost primene.

Što se komponentnih materijala tiče, jasno je da su pri spravljanju mešavina u okviru ovog ispitivanja morali biti primenjeni materijali dostupni u Srbiji. U pitanju su rečni agregat i krečnjačko brašno i voda iz vodovoda, koji se svakodnevno primenjuju pri spravljanju betonskih mešavina u savremenoj građevinskoj praksi u Srbiji. Od tog principa se odstupilo pri izboru cementa i hemijskog dodatka iz razumljivih razloga; što se cementa tiče, radi sticanja korektnog uvida u efekte primene pojedinih primenjenih mineralnih dodataka upotrebljen je čist cement (dobijen od cementnog klinkera, bez dodataka) i hemijski dodatak novije generacije pogodan za primenu kod transportovanih betona i preporučljiv (zbog svog snažnog dejstva redukcije vode i stabilnosti tokom vremena) za primenu kod SCC.

Dalje, jasno je da i se pri izboru mineralnih dodataka upotrebljenih u okviru ovih ispitivanja moralo, pre svega voditi računa o tome u kojoj meri su oni dostupni u Srbiji. Od upotrebe zgure visokih peći, silikatne prašine, pepela pirinčane ljuske (*rice husk ash*) i crvenog mulja (nusprodukta industrije aluminijuma – *red mud*) se iz tog razloga već na samom početku moralo odustati, bez obzira na eventualne pozitivne efekte koji se mogu ostvariti njihovom upotrebom, objavljene u savremenoj stručnoj literaturi [151],[234]. Sa druge strane, predanost primeni principa održivog razvoja u konkretnoj oblasti, u skladu sa aktuelnim trendovima u zemlji i svetu, dovela je do rezultata prikazanih u ovom radu, obavljenih na SCC mešavinama sa letećim pepelom poreklom iz dve termoelektrane, TE "Kostolac" i TE "Kolubara", zatim sa sprašenim recikliranim betonom dobijenim iz konstrukcije i drobljenjem kontrolnih betonskih kocki i sa sprašenim sumporom poreklom iz Rafinerije nafte u Pančevu.

U smislu daljih ispitivanja SCC mešavina sa letećim pepelom, veoma je logično obaviti ista ili slična ispitivanja sa letećim pepelom iz drugih termoelektrana, i dati ocenu upotrebljivosti ovih pepela, odnosno uporediti efekte primene ovih pepela sa dobijenim rezultatima sa letećim pepelom poreklom iz TE "Kostolac" i TE "Kolubara". Upotreba letećeg pepela poreklom iz TE "Kostolac" i TE "Kolubara" takođe se može proširiti razvojem novih receptura sa većim količinama pepela u svojstvu mineralnog dodatka, što bi utrošak pepela u mešavinama učinilo značajnijim. Ova aktivnost bi rezultirala neophodnom promenom sastava primenjenih SCC mešavina (promena količine vode i

hemijskog dodatka za postizanje istih svojstava u svežem stanju), što bi vodilo daljem sagledavanju ponašanja sličnih SCC mešavina.

U segmentu upotrebe spraćenog recikliranog betona u svojstvu mineralnog dodatka na bazi industrijskih nusprodukata, mogla bi se obaviti sistematična istraživanja sa uvođenjem različitih faktora uticaja na svojstva SCC mešavina, koji bi u prvom redu bili prirodno povezani sa svojstvima betona od kojih je filer napravljen (klasa čvrstoće, odnos paste i agregata, starost, poreklo betona i sl.).

Istraživanja u svežem stanju od posebnog su značaja kada su u pitanju SCC mešavine. Izvestan broj metoda ispitivanja SCC mešavina je standardizovan, ali je nesumnjivo da je pomenute metode potrebno kritički sagledati i postoji velika mogućnost da će one biti korigovane tokom godina, kao i da se izvestan broj drugih metoda razvije i standardizuje. Ono što bi iz tehničkih i operativnih razloga bilo veoma korisno istražiti u sklopu daljih ispitivanja kod već spravljenih SCC mešavina u svežem stanju su informacije u vezi sa vremenom vezivanja.

Takođe, informacije o brzinama prirasta čvrstoće pri pritisku kod betona malih starosti (npr. pri starosti od 12 sati, 1 i 2 dana) bile bi korisne pri predmetnim analizama i mogle bi dati korisne informacije o uporednom ponašanju različitih SCC mešavina.

Dalje, aspekt trajnosti betona postaje sve važniji u poslednjih nekoliko godina, kao posledica shvatanja da u izvesnim agresivnim sredinama betonske konstrukcije mogu izgubiti svoju funkcionalnost mnogo brže nego što se to moglo očekivati. Između ostalog, ovo je jedan od razloga iz kojih su samozbijajući betoni i počeli da se projektuju i upotrebljavaju. U tom smislu ispitivanja ubrzane karbonatizacije, kao i npr. hlodidne difuzije mogla bi biti korisna.

Kada su u pitanju reološka ispitivanja SCC mešavina koja su predmet ove disertacije, skupljanje je praćeno na SCC mešavinama sa letećim pepelom. Međutim, dalja ispitivanja trebalo bi da obuhvate sagledavanje skupljanja i tećenja mešavina sa svim primenjenim mineralnim dodacima u dužem vremenskom periodu, obzirom da rezultata takvih ispitivanja ima zaista malo u svetskim razmerama.

Istraživanje pomoću SEM analize predstavlja korisno komplementarno ispitivanje uobičajenim i već pomenutim fizičko-mehaničkim ispitivanjima. Polazeći od strukturalističkog principa, kao metoda koja se bazira na sagledavanju mikrostrukture i hemijskog sastava uzoraka betona (uz pomoć EDS analize), ova metoda može dati korisne podatke za sagledavanje kompleksnije slike o jednom betonu, ali može i objasniti neke efekte koji se na makroskopskom planu ne mogu sa sigurnošću utvrditi (na primer, SEM analizom može se odgovoriti na pitanje da li je došlo do reakcije između pojedinih komponenti u betonu, kao i kakva je struktura prelazne zone).

Ispitivanja SCC mešavina bi trebalo da se kreću u pravcu njihove praktične primene (na bazi receptura koje su projektovane tokom izrade ove disertacije). Ta praktična primena može, ali ne mora, da uključi ispitivanja konstruktivnih elemenata (greda i stubova) u laboratorijskim uslovima. Na osnovu ovakvih ispitivanja mogla bi da se uoče eventualna odstupanja od teorijskih postavki u smislu: čvrstoće pri savijanju i smicanju tih elemenata, granične nosivosti, efekta armiranja i sl, kao i odstupanja u poređenju sa ponašanjem NVC sa ili bez mineralnih dodataka upotrebljenih u okviru ove disertacije. Izrada konstruktivnih sistema na terenu i njihovo praćenje u sklopu studija izvodljivosti, odnosno studija u prirodnoj veličini (*full scale studies*) takođe bi mogla da bude koristan segment daljih ispitivanja. U tom smislu bi se došlo do čitavog spektra novih podataka, od samih problema koji se javljaju u realnim uslovima prilikom spravljanja, transporta i ugrađivanja novog materijala (SCC mešavine) u konstrukciju, do nege u realnim uslovima i praćenja svih aspekata stanja konstrukcije u realnim uslovima i u realnoj sredini. Ovakva ispitivanja se i u stručnim i u naučnim krugovima smatraju dobrodošlim, jer daju još realniju sliku svih aspekata primene novog materijala. Postoje indicije da će u sklopu budućih projekata moći da se realizuje ovakva jedna studija, u saradnji sa zainteresovanim kolegama iz prakse koji su spremni da, svako na svoj način, pomognu u implementaciji novih tehnologija i materijala i tako daju nesumnjiv doprinos unapređenju stanja u graditeljstvu.

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 stimulirana regulativama ili ne) značajno veća nego u Srbiji i iznosi oko 90%

proizvedenog letećeg pepela [111]. U tom smislu, rezultati predmetnih ispitivanja imaju tri cilja: demonstraciju primenljivosti SCC mešavina, uvid u pozitivna svojstva SCC mešavina sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata i aktuelizaciju primene ovih dodataka, naročito kada ta primena dovodi do pozitivnih efekata, što je u prvom redu slučaj kod letećeg pepela.

Literatura

-
- Aarre T., Domone P.: Reference concretes for evaluation of test methods for SCC, Proceedings of 3rd
1 RILEM international symposium on self compacting concrete, Reykjavik, Iceland; 2003. pp. 495-505.
-
- Aarre T., Domone P.L.J.: Testing-SCC: Summary report on work package 2: Development of mix
2 designs and material selection, (2004)
-
- ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete
3 Institute, pp. 20, (2007)
-
- ACI 238.1R-08: Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete, American
4 Concrete Institute, (2008)
-
- ACI 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American
5 Concrete Institute, pp.107, (2008)
-
- 6 Ačić M.: Beton na početku 21. veka, Naše građevinarstvo 4-5, Beograd, 2002.
-
- Ačić, M., Jevtić, D.: Trajnost betonskih konstrukcija u uslovima korozione sredine, Tehnika, Naše
7 građevinarstvo 62 (3), str. 1-14, (2008)
-
- Aiad I.: Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement
8 pastes, Cement and Concrete Research 33(8) pp. 1229-1234, (2003)
-
- Ali Emhemed Saed Al Malty: Parametric analysis of basic properties of concrete with high volume of
9 recycled aggregate and mineral admixtures, Doctoral dissertation, Univ. of Novi Sad, Faculty of
technical sciences, mentori: prof dr Mirjana Malešev, prof dr Miroslava Radeka, (2012)
-
- Al-Tamimi A.K., Sonebi M.: Assessment of self-compacting concrete immersed in acidic solutions,
10 Journal of Materials in Civil Engineering 15(4) pp. 354-357, (2003)
-
- Assie S., Escadeillas G., Waller V.: Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability,
11 Construction and Building Materials 21, pp. 1909-1917, (2007)
-
- ASTM C 1610/C 1610M: Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete
12 Using Column Technique, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, pp. 846-849, (2009)
-
- ASTM C 1611/C 1611M: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete,
13 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, pp. 850-855, (2009)
-
- ASTM C 1712/C 1712M: Standard Test Method for Rapid Assessment of Static Segregation
Resistance of Self-Consolidating Concrete Using Penetration Test, Annual Book of ASTM Standards,
14 Vol. 04.02, (2009)
-
- ASTM C 232/C 232M: Standard Test Methods for Bleeding of Concrete, Annual Book of ASTM
15 Standards, Vol. 04.02, pp. 156-170, (2009)
-
- ASTM C 618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in
16 concrete, (2003)
-
- ASTM C469 / C469M 10: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio
17 of Concrete in Compression, (2005)
-
- Atis C.D.: High-volume fly ash concrete with high strength and low drying shrinkage, Journal of
18 Materials in Civil Engineering 15(2), pp. 153-156, (2003)
-
- Aydin A. C.: Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete, Construction and
19 Building Materials 21, pp. 1149-1154, (2007)
-
- Bakhtiyari S. , Allahverdi A. Rais-Ghasemi M., Zarrabi B.A., Parhizkar T.: Self-compacting concrete
20 containing different powders at elevated temperatures - Mechanical properties and changes in the
phase composition of the paste, Thermochemica Acta 514, pp. 74-81, (2011)
-
- Barnes H.A.: Thixotropy - a review, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 70(1-2), pp. 1-33,
21 (1997)
-
- Barragan B., De La Cruz C., Gettu R., Bravo M., Zerbino R.: Development and application of fibre
22 reinforced self-compacting concrete, Thomas Telford, London, UK, pp. 165-172, (2005)
-
- Bartos P.: An Appraisal of the Orimet Test, International Workshop on Self-compacting Concrete, pp.
23 121-135, (1998)
-
- Bartos P.J.M.: Testing-SCC: towards new European standards for fresh SCC, SCC'2005 - China 1st
International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. Yu ZSC,
24 Khayat KH, Xie Y, editors, RILEM Publication SARL, Paris, pp. 25-44, (2005)
-
- Bennenk H.W.: SCC and the new era for the precast concrete industry, The 1st International RILEM
symposium on self-compacting concrete, Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications
25 S.A.R.L., France, pp. 695-704, (1999)
-

-
- 26 Bermejo G., Canovas M.: Influence Of The Mineral Addition On The Durability Of Medium Strength Self-Compacting Concrete, The 3rd FIB International Congress, (2010)
-
- 27 Beygi M.H.A., Kazemi M.T., Nikbin I.M., Amiri J.V.: The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete, *Materials and Design* 50, pp. 267-276, (2013)
-
- 28 Bignozzi M.C., Sandrolini F.: Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* 36(4), pp. 735-739, (2006)
-
- 29 Billberg P., Mix design model for self-compacting concrete, The 1st North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete, Skarendahl A., editor, Chicago, USA, pp. 65-70, (2002)
-
- 30 Billberg P., Petersson O., Westerholm M., Wustholz T., Reinhardt H.W. : Summary report on work package 3.2: Test methods for passing ability, (2004)
-
- 31 Billberg P.: Proceedings summaries and references, International Workshop on SCC, Stockholm, Sweden, (2012)
-
- 32 Billberg P., Roussel N., Amziane S., Beitzel M., Charitou G., Freund B., Gardner J., Grampeix G., Graubner C.A., Keller L., Khayat K., Lange D., Omran A., Perrot A., Proske T., Quattrocioni R., Vanhove Y.: Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC, *Cement and Concrete Composites*, Volume 54, pp. 70-79, Special Issue on Self-Consolidating Concrete, (2014)
-
- 33 Billberg P.: Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish experience, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, (1999)
-
- 34 Bojović D., Jevtić D., Knežević M.: Application of neural networks in determination of compressive strength of concrete, *Romanian Journal of Materials*, No1/2012, 42 (1), pp. 16-22, (2012)
-
- 35 Bonen D., Deshpande Y.S., Olek J., Shen L., Struble L.J., Lange D.A., Khayat K.H.: Robustness of SCC, Self-consolidating concrete - A white paper by researchers at the Center of Advanced Cement Based Materials (ACBM), Lange D.A., editor, pp. 4-22, (2007)
-
- 36 Bonen D., Sarkar S.L.: The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss, *Cement and Concrete Research* 25(7), pp. 1423-1434, (1995)
-
- 37 Bostrom L.: Self-compacting concrete exposed to fire, The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Wallevik O., Nielsson I., editors, RILEM Publications S.A.R.L., Bagnaux, France, pp. 863-869, (2003)
-
- 38 Boukendakdji O., Kadri E., Kenai S.: Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete, *Cement & Concrete Composites* 34, pp. 583-590, (2012)
-
- 39 Broćeta G.: Istraživanje komponentnih materijala samozbijajućeg betona sa metodama ispitivanja svježe betonske mase, Magistarski rad, Arhitektonsko-građevinski fakultet Univerziteta u Banjaluci, Banjaluka, 2010., Mentor: Prof. dr Dragica Jevtić, (2010)
-
- 40 Brošura "SEM Lab" Laboratorije za skenirajuću elektronsku mikroskopiju, Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, (2011)
-
- 41 Brouwers H.J.H., Radix H.J.: Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study, *Cement and Concrete Research* 35(11), pp. 2116-2136, (2005)
-
- 42 Bui V.K.: A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete, Asia Institute of Technology, Bangkok, Thailand, (1994)
-
- 43 Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P.: Rheological model for self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal* 99(6), pp. 549-559, (2002)
-
- 44 Bui V.K., Montgomery D.: Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume, The 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Skarendahl A., Petersson O., editors, France, pp. 373-384, (1999)
-
- 45 Busterud L., Johansen K., Dossland A.L.: Production of fibre reinforced SCC, Hanley Wood, Minneapolis, MN, USA, (2005)
-
- 46 Byun K.J., Kim J.K., Song H.W.: Self-compacting concrete in Korea, Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete, Kochi, Japan, pp. 23-33, (1998)
-
- 47 Carlswald J., Emborg M., Utsi S., Oberg P.: Effects of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete, The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L, Bagnaux, France, pp. 143-153, (2003)
-
- 48 Castel A., Vidal T., François R.: Bond and cracking properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 24, pp.1222–1231, (2010)
-
- 49 CEB-FIP Model Code 1990: design code, Comitee Euro-International du Beton, (1993)
-

-
- 50 Chan Y.W., Chen Y.S., Liu Y.S.: Development of bond strength of reinforcement steel in self-consolidating concrete, *ACI Structural Journal* 100(4), (2003)
-
- Choi Y.W., Kim Y.J., Shin H.C., Moon H.Y.: An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* 36(9), pp. 1595-1602, (2006)
-
- 51 Chopin D., De Larrard C.F., Cazacliu B.: Why do HPC and SCC require a longer mixing time?, *Cement and Concrete Research* 34(12), pp. 2237-2243, (2004)
-
- Chopin D., Francy O., Lebourgeois S., Rougeau P.: Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC), *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM Publications, O. Wallevik, I.Nielsson (Eds.), pp. 672-683, (2003)
-
- 53 Chris I.: Self-compacting concrete development, *Goodier Structures & Buildings* 156, Issue SB4, pp. 405-414, (2003)
-
- 54 Collepardi M.: Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete, *Cement and Concrete Composites* 20(2-3), pp. 103-112, (1998)
-
- 55 Collepardi M., Borsoi A., Collepardi S., Troli R.: Strength, shrinkage and creep of SCC and flowing concrete, *Proceedings of 2nd North American Conference on the Design And Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, S.P. Shah (Ed.), pp. 911-919, (2005)
-
- 56 Corinaldesi V., Moriconi G.: The role of industrial by-products in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 25, pp. 3181-3186, (2011)
-
- 57 Corinaldesi V., Moriconi G.: The use of recycled aggregates from building demolition in self-compacting concrete, *The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications, Bagnaux, France, pp. 251-260, (2003)
-
- 58 Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R.: Tailored properties of concrete to keep it attractive, *Symposium 'Keep concrete attractive'*, Budapest, str. 223-228, (2005)
-
- 59 Crouch L.K., Hewitt R., Btyard B.: High Volume Fly Ash Concrete, *World of Coal Ash (WOCA)*, May 7-10 2007., Covington, Kentucky, USA, (2007)
-
- 60 Cyr M., Legrand C., Mouret M.: Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cement and Concrete Research* 30(9), pp. 1477-1483, (2000)
-
- 61 Daczko J.A., Kurtz M.A.: Development of High Volume Coarse Aggregate Self-Compacting Concrete, *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, pp. 403-412, (2001)
-
- 62 Daczko J.A., Phillips S.: Self-Compacting Concrete in Underground and Mining Applications, *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, pp. 671-680, (2001)
-
- 63 Daczko J.A.: *Self-Consolidating Concrete: Applying what we know*, Spon Press, UK, (2012)
-
- 64 De Larrard C.F., Ferraris C.F., Sedran T.: Fresh concrete: a Herschel Bulkley material, *Materials and structures* 31(211), pp. 494-498, (1998)
-
- 65 De Nicolo B., Pani L., Mistretta F.: Profit of Medium-low Strength Self Compacting Concrete, *FIB Proceedings of the 2nd International Congress*, Naples, Italy, (2006)
-
- 66 De Schutter G., Bartos P.J.M., Domone P.L.J., Gibbs J.C.: *Self-compacting concrete*, Whittles Publishing, (2008)
-
- 67 De Schutter G.: Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, *European Research Project: "Measurement of properties of fresh Self-Compacting Concrete - TESTING-SCC"*, (2005)
-
- 68 Dehn F, Holschemacher K, Weibe D.: Self-compacting concrete (SCC) time development of the material properties and the bond behaviour, *LACER* 5, pp. 115-124, (2000)
-
- 69 Dinakar P., Kartik Reddy M., Sharma M.: Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash, *Materials and Design* 46, pp. 609-616, (2013)
-
- 70 Domone P.L.J., Chai H.W.: Testing of binders for high performance concrete, *Cement and Concrete Research* 27(8), pp.1141-1147, (1997)
-
- 71 Domone P.L.J.: Mortar tests for material selection and mix design of SCC, *Concrete International*, (2006)
-
- 72 Domone P.L.J.: A review of the hardened mechanical properties of selfcompacting concrete, *Cement and Concrete Composites* 29(1), pp. 1-12, (2007)
-
- 73 Domone P.L.: Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cement & Concrete Composites*, 28(2), p. 197-208, (2005)
-
- 74
-

-
- 75 Dukovski B., Ćirović M.: Primena samozbijajućeg betona pri izradi glavnih nosača mosta u Ovčar Banji, JDGK 12. kongres, Knjiga 2, Vrnjačka Banja, Jugoslovensko društvo građevinskih konstruktera, str. 137-142, (2006)
-
- Dunica Š., Bojović A., Životić B.: Projekat konstrukcije novog Avalskog tornja, Izgradnja (63) 3-4, Beograd, str. 169-172, (2009)
-
- 76 Edamatsu Y., Nishida N., Ouchi M.: A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles, The 1st International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 309-320, (1999)
-
- 77 Elinwa A.U., Ejeh S.P., Mamuda A.M.: Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash, Construction and Building Materials, pp. 1282-1287, (2008)
-
- 78 Emborg M.: Final report of task 8.1 Mixing and transport, Brite-EuRam, European Commission, (2000)
-
- Emborg M., Hedin C.: Production of self-compacting concrete for civil engineering - case studies, The 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete., Skarendahl A, Petersson O, editors, RILEM, Publications S.A.R.L., France, pp. 733-742, (1999)
-
- 79 Esping O.: Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 38, pp. 938-944, (2008)
-
- 80 European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, European Project Group, (2005)
-
- 81 Felekoglu B., Arikahya H.: Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, Volume 22, Issue 9, September 2008, Pages 1972-1980, (2008)
-
- 82 Feuerborn H.: Coal Combustion Products in Europe - an update on Production and Utilisation, Standardisation and Regulation, World of Coal Ash (WOCA) Conference, Denver, CO, USA, (2011)
-
- 83 Filho F.M.A., Barragán B.E., Casas J.R., El Debs A.L.H.C.: Hardened properties of self-compacting concrete - A statistical approach, Construction and Building Materials 24, pp. 1608-1615, (2010)
-
- 84 Filho F.M.A., de Nardin S., El Debs A.L.H.: Evaluation of the bond strength of self-compacting concrete in pull-out tests, Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, USA, pp. 953-958, (2005)
-
- 85 Gesoglu M., Güneyisi E., Kocabag M., Bayram V., Mermerdas K.: Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, Construction and Building Materials 37, pp. 160-170, (2012)
-
- 86 Ghezal A., Khayat K.H.: Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods, ACI Materials Journal 99(3), pp. 264-272, (2002)
-
- 87 Gibbs J.C., Zhu W.: Strength of hardened self compacting concrete, The 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Skarendahl.A., Petersson.O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 199-209, (1999)
-
- 88 Gram H.E., Pentti P.: Properties of SCC - especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance, The 1st RILEM International Symposium on Self-compacting Concrete, Skarendahl A, Petersson O, editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, pp. 211-225, (1999)
-
- 89 Grdić Z.J., Topličić-Ćurčić 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), pp. 1129-1133, (2010)
-
- 90 Guru Jawahar J., Sashidhar C., Ramana Reddy I.V., Annie Peter J.: Design of cost-effective M-25 grade of self compacting concrete, Materials and Design 49, pp. 687-692, (2013)
-
- 91 Hanehara S., Yamada K.: Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology, Cement and Concrete Research 29(8), pp. 1159-1165, (1999)
-
- 92 Heirman G., Vandewalle L., Van Gemert D.: Influence of Mineral Additions and Chemical Admixtures on Setting and Volumetric Autogenous Shrinkage of SCC Equivalent- Mortars, Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, De Schutter G., Boel V. (Eds.), pp. 553-558, (2007)
-
- 93 Ho D.W.S., Lewis R.K.: Carbonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture, ACI SP - 79, pp. 333-346, (1983)
-
- 94 Ho D.W.S., Shein A.M.M., Ng C.C., Tam C.T.: The use of quarry dust for SCC applications, Cement and Concrete Research 32(4), pp. 505-511, (2002)
-
- 95 Holschemacher K, Klug Y.: A database for the evaluation of hardened properties of SCC, LACER 7, pp. 124-134, (2002)
-
-

-
- 98 Ignjatović I.: Granična nosivost armiranobetonskih grednih nosača od betona sa recikliranim agregatom, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, mentor: prof. dr Snežana Marinković, (2013)
-
- 99 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), pp. 1045-1059, (2013)
-
- 100 Ignjatović I., Savić A., Marinković S.: Eksperimentalno ispitivanje betona od recikliranog agregata, *Građevinski kalendar 2011*, Vol. 43 Beograd, p. I-XX, 1-467, (2010)
-
- 101 Illston J.M., Domone P.L.J.: *Construction materials: Their Nature and behaviour*, Taylor & Francis, (2001)
-
- 102 Internet prezentacija Cementne Industrije Srbije, www.cis.org.rs (pristupljeno 15.12.2014.)
-
- 103 Internet prezentacija fabrike cementa Holcim Srbija, www.holcim.rs (pristupljeno 15.12.2014.)
-
- 104 Internet prezentacija fabrike cementa Lafarge Srbija, www.lafarge.rs (pristupljeno 15.12.2014.)
-
- 105 Internet prezentacija fabrike cementa Titan Srbija, www.titan.rs (pristupljeno 15.12.2014.)
-
- 106 Jacobs F., Hunkeler F.: Design of Self-compacting concrete for durable concrete structures, *The 1st RILEM International Symposium on Self- Compacting Concrete*. Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, pp. 397-407, (1999)
-
- 107 Janković K., Bojović D., Lončar Lj., Kačarević Z., Nikolić D.: Mix design of concrete for Avala tower, Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, *Zbornik radova* 16, str. 115-120, (2007)
-
- 108 Jevtić D.: Dodaci betonu, Naučno-stručni skup Harmonizacija domaće i evropske regulative u oblasti tehnologije betona saglasno standardu EN 206-1:2000, str. 113-128, (2004)
-
- 109 Jevtić D.: Mogućnost modeliranja svojstava betona u funkciji povećanja trajnosti, *Građevinski materijali i konstrukcije*, vol. 51 (1), str. 18-31, (2008)
-
- 110 Jevtić D., Savić A.: Impact strength evaluation of rubberized fiber reinforced SCC, *Proceedings of the RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability*, Proceeding PRO 89, Edited by Dubravka Bjegović, Hans Beushausen, Marijana Serdar, Zagreb, Croatia, 11-13. Publisher: RILEM Publications S.A.R.L., pp. 641-646, (2014)
-
- 111 Jevtić D., Savić A.: Investigation of fly ash influence on cement mortars properties, *Proceedings of the 1st International Academic Conference "Places and Technologies"*, Beograd, April 3-4. 2014, pp.701-708., editors Eva Vaništa Lazarević et. al, Publisher: University of Belgrade - Faculty of Architecture, (2014)
-
- 112 Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Application of recycled materials for production of sustainable cementitious composites, *Plenary and Invitation Paper, 11th International Conference RaDMI, "Research and Development in Mechanical Industry"* RaDMI, Soko Banja, Serbia, *Proceedings*, pp. 110-121., (2011)
-
- 113 Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Investigation of cement based composites made with recycled rubber aggregate, *Hemijaska Industrija* 66 (4), pp. 609-617, (2012)
-
- 114 Jevtić D., Zakić D., Savić A., Radević A.: Influence of the polypropylene fibers amount on properties of Fiber reinforced concrete, *Četvrti internacionalni naučno-stručni skup "Građevinarstvo – nauka i praksa"*, *Zbornik radova, Žabljak* str. 1103-1110, (2012)
-
- 115 Jevtić D., Zakić D., Savić A., Radević A.: The influence of fly ash on basic properties of mortar and concrete, *Scientific conference Planing, design, construction and building renewal*, Novi Sad, pp. 614-620, (2012)
-
- 116 Jevtić D., Markićević J., Savić A.: Fly Ash Influence on Certain Properties of Concrete Composites, *6th International Conference "Science and Higher Education in Function of Sustainable Development"* SED, Užice, Serbia, *Proceedings CD*, pp. 3-13 – 3-17, Publisher: High Business-Technical School (Užice), (2013)
-
- 117 Jevtić D., Mitrović A., Savić A.: Experimental investigation of fly ash content influence on cement mortars properties, *2nd International Symposium on Environmental and Material Flow Management*, Zenica, Bosnia and Hercegovina, *Proceedings*, pp. 83-88, (2012)
-
- 118 Jevtić, D.: *Monografija - Svojstva svežeg i očvrsllog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, (1996)
-
- 119 Jevtić, D., Savić, A.: Fiber reinforced Self-compacting concrete made with fly ash – a contribution to the sustainable civil engineering, *International Symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures*, Society for materials and structures testing of Serbia, XXVI Congress DIMK, Vrnjačka banja, *Proceedings*, pp. 183-190., Publisher: Society for materials and structures testing of Serbia, (2014)
-

-
- 120 Jevtić, D., Savić, A., Broćeta G.: Fiber reinforced self-compacting concrete - possibility of modeling properties, Sixth International Scientific Conference Contemporary materials 2013, Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Book of Abstracts, pp. 26., (2013)
-
- 121 Jevtić D., Savić A., Radević A.: Fly ash influence on concrete composites - Contribution to sustainable construction, 15. YuCorr, Tara, Knjiga radova, pp. 235-238, (2013)
-
- 122 Jevtić D., Zakić D., Markičević J., Savić, A.: Experimental Research of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete (FR SCC), 3rd International Conference "Science and Higher Education in Function of Sustainable Development" SED Užice, Serbia, pp. 1-7 - 1-13, (2010)
-
- 123 Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Achieving sustainability of concrete by recycling of solid waste materials, Mechanical Testing and Diagnosis, Volume 1, pp. 22-39., (2012)
-
- 124 Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Cementitious Composites Made With Fly Ash - A Contribution To The Sustainable Civil Engineering, 14th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI Topola, Serbia, Editor: Predrag V. Dašić, Publisher: SaTCIP (Scientific and Technical Center for Intellectual Property) Ltd., pp. 83-92, Invitation paper, (2014)
-
- 125 Jevtić D., Broćeta G.: Uticaj prelazne zone u betonu na trajnost betonskih konstrukcija, Deseti međunarodni naučno-stručni skup - "Savremena teorija i praksa u graditeljstvu", Zbornik radova, Banjaluka, str. 439-446, (2014)
-
- 126 Jevtić D., Zakić D., Savić A., Radević A.: Properties modeling of cement composites made with the use of fly ash, III International Congress Engineering, Environment and Materials in Processing Industry, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, Book of abstracts & CD, pp.967-974, (2013)
-
- 127 Jevtić D., Zakić D., Savić A., Radević A.: Properties modeling of cement composites of fly ash, Materials Protection, LV, pp. 39-44, (2014)
-
- 128 Jevtić D., Zakić D., Savić A., Radević A.: Properties of Composite Materials Made with the Addition of Recycled Rubber, Proceedings of Abstracts IConSSM 2011, The 3rd International Congress of Serbian Society of Mechanics, Vlasina Lake (Serbia), pp. 133, (2011)
-
- 129 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, pp. 115-124., (2011)
-
- 130 Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Relevantne statičke i dinamičke metode za ocenu žilavosti mikroarmiranih betona, Građevinski materijali i konstrukcije br.1/2011, str. 3-27, (2011)
-
- 131 Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Specifičnosti tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata, Materijali i konstrukcije 1, LII, str. 52-62., (2009)
-
- 132 Johansen K., Busterud L.: Low grade SCC with secondary natural sand rich in fines, The 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Ozawa K, Ouchi K, editors, pp. 303-308, (2001)
-
- 133 Johnson, Timothy Werner: Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using the Life Cycle Assessment method, Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, (2006)
-
- 134 Jolicoeur C., Simard M.A.: Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts, Cement and Concrete Composites 20(2-3), pp.87-101, (1998)
-
- 135 Jones R.: The non-destructive testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Volume 1, Issue 2(01), pp. 67-78, (1949)
-
- 136 Kadri E.H., Duval R.: Effect of Ultrafine Particles on Heat of Hydration of Cement Mortars, ACI Materials Journal 99(2), pp. 138-142, (2002)
-
- 137 Karamoozian A., Karamoozian M., Ashrafi H.: Effect of Nano Particles on Self Compacting Concrete: An Experimental Study, Life Science Journal, Vol. 10, Issue 2, pp. 95-101, (2013)
-
- 138 Kasai Y., Matsui I., Fukushima U., Kamohara H.: Air permeability of blended cement mortars, Proceedings of the 1st International Conference on the Use of Fly Ash, Silica-Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, ACI SP 29, pp. 435-451, (1983)
-
- 139 Kasemchaisiri R., Tangtermsirikul S.: Deformability prediction model for self-compacting concrete, Magazine of Concrete Research 60(2), pp. 93-108, (2008)
-
- 140 Kasemsamrarn N., Tangtermsirikul S.: A design approach for self-compacting concrete based on deformability, segregation resistance and passing ability models, SCC'2005 - China 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Yu Z., Shi C., Khayat K.H., Xie Y., editors, RILEM Publication s.a.r.l., France, pp. 47-54, (2005)
-
- 141 Keske S., Schindler A., Barnes R.: Assessment of Stability Test Methods for Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, V. 110, No. 4, pp.385-394, (2013)
-

-
- 142 Khatib J.M.: Performance of self-compacting concrete containing fly ash, *Construction and building materials*, Volume 22, Issue 9, Pages 1963-1971, (2008)
-
- Khayat K.H., Ghezal A., Hadriche M.S.: Utility of statistical models in proportioning self-
- 143 consolidating concrete, *Materials and structures* 33, pp. 338-344, (2000)
-
- Khayat K.H., Hu C., Monty H.: Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications, *The 1st RILEM International Symposium on Self-compacting Concrete*, Skarendahl A.,
- 144 Petersson O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, pp. 143-152, (1999)
-
- Khayat K.H., Omran A.F., D'Ambrosia M.: Prediction of SCC Formwork Pressure in Full-Scale Elements, Design, RILEM Conference on Production and Placement of Self-Consolidating Concrete,
- 145 K.H. Khayat and D. Feys (eds.), pp. 231-242, (2010)
-
- Khayat K.H.: Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete, *ACI Materials*
- 146 *Journal* 96(3), pp. 346-354, (1999)
-
- Khayat K.H., Guizani Z.: Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete,
- 147 *ACI Materials* 94(4), pp. 332-341, (1997)
-
- Khayat, K.H., Aïtcin, P.C.: Use of Self-Consolidating Concrete in Canada - Present Situation and Perspectives, *Proceedings of Workshop on Self-Compacting Concrete*, JSCE Concrete Engineering
- 148 *Series* 30, Kochi, Japan, Ed. Ozawa, K., Ouchi, M., pp. 11-22, (1998)
-
- Khayat, K.H., Roussel, Y.: Testing and Performance of Fiber-Reinforced, Self-Consolidating
- 149 *Concrete*, RILEM Materials and Structures 33, pp. 391-397, (2000)
-
- Koehler E.P., Fowler D.W., Ferraris C.F., Amziane S.: A new portable rheometer for fresh self-consolidating concrete, *The 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete and the 4th International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*.
- 150 Shan SP, editor, A Hanley Wood Publication, U.S.A., (2005)
-
- Kohono K.: Properties of Mortar and Concrete Using Red Mud and Finely Ground Silica, *Special*
- 151 *Publication* Vol. 153, (1995)
-
- Kou S.C., Poon C.S.: Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites* 31, pp. 622-627, (2009)
-
- Kovler, K., Roussel, N.: Properties of fresh and hardened concrete, *Cement and Concrete Research* 41,
- 153 775-792, (2011)
-
- Kuroda M, Watanabe T, Terashi N.: Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use
- 154 of fly ash, *Cement and Concrete Research* 30(2), pp. 253-258, (2000)
-
- Lachemi M., Hossain K.M.A., Lambros V., Nkinamubanzi P.C., Bouzoubaa N.: Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste, *Cement and*
- 155 *Concrete Research* 34(2), pp. 185-193, (2004)
-
- Lachemi M., Hossain K.M.A., Patel R., Shehata M., Bouzoubaa N.: Influence of paste/mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self-consolidating concrete, *Magazine of*
- 156 *Concrete Research* 59(7), pp. 517-528, (2007)
-
- Lars-Göran Tviksta: Final report from task 9: End product - Guidelines, Brite EuRam project BE 96-3801: "Rational production and improved working environment through using self compacting
- 157 concrete", (2000)
-
- Liao K., Chang P., Peng Y., Yang C.: A study on characteristics of interfacial transition zone in
- 158 concrete, *Cement and Concrete Research* 34 pp. 977-989, (2004)
-
- Libre N., Khoshnazar R., Shekarchi M.: Repeatability, responsiveness and relative cost analysis of
- 159 SCC workability test methods, *Materials and Structures* 45, pp.1087-1100, (2012)
-
- Liu M.: Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash, *Construction and*
- 160 *Building Materials* 24, pp. 1245-1252, (2010)
-
- Liu, M.: Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete, PhD thesis, Department of
- 161 Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, (2009)
-
- Loedolff G., van Zijl G.: A rational approach to determine the best packing of particles to enhance concrete quality, *The 6th International Congress Global Construction: Ultimate Concrete*
- 162 *Opportunities*, Thomas Telford Publishing, pp. 155-164, (2005)
-
- Loser R., Leemann A.: Effects of curing time and drying behaviour of SCC in case of restrained shrinkage deformations, *Proceedings of 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting*
- 163 *Concrete*, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, G. De Schutter, V. Boel (Eds.), pp. 539-544, (2007)
-
- Madandoust R., Mousavi S.Y.: Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing
- 164 metakaolin, *Construction and Building Materials* 35, pp. 752-760, (2012)
-
- Mahmoud E., Ibrahim A., El-Chabib H., Patibandla V. C.: Self-Consolidating Concrete Incorporating High Volume of Fly Ash, Slag and Recycled Asphalt Pavement, *International Journal of Concrete*
- 165 *Structures and Materials*, (2013)
-

-
- 166 Mahmoud M.K., Dawson A.R., Thom N.H.: Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler, *Construction and Building Materials* 49, pp. 84–92, (2013)
-
- 167 Mardani-Aghabaglou A., Tuyan M., Yilmaz G., Ariöz Ö., Ramyar K.: Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials* 47, pp. 1020-1025, (2013)
-
- 168 Marinković S.B.: Life cycle assessment aspects of concrete, Chapter 3 in Pacheco-Torgal F. et al (eds): *Eco-efficient concrete*, Woodhead Publishing Limited, pp. 45-80, (2013)
-
- 169 Marinković S.B., Radonjanin V.S., Ignjatović I.S.: Life cycle assessment (LCA) of concrete with recycled aggregates (RAs), Chapter 23 in Pacheco-Torgal F. et al (eds): *Handbook of recycled concrete and demolition waste*, Woodhead Publishing Limited, pp. 569-604, (2013)
-
- 170 Mnahoncakova E., Pavlikova M., Grzeszczyk S., Rovnanikova P., Cerry R.: Hydric, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers, *Construction and Building Materials* 22 (7), pp. 1594-1600, (2008)
-
- 171 Mohamed A.M.O., El Gamal M.M.: Sulfur concrete for the construction industry, a sustainable development approach, *J. Ross Publishing*, (2010)
-
- 172 Monk M.G.: Portland-Fly Ash Cement: A comparison between intergrinding and blending, *Concrete Research* 35, 124, pp. 131-141, (1983)
-
- 173 Mucteba U., Kemalettin Y., Metin I.: The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 27, pp. 263–270, (2012)
-
- 174 Muller H.S., Metcherine V., Haist M.: Development of self-compacting lightweight aggregate concrete, *The 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. COMS Engineering Corporation*, pp. 737-742, (2001)
-
- 175 Muravljov M., Jevtić D.: *Građevinski materijali 2*, Akademska misao, Beograd, (2003)
-
- 176 Muravljov, M.: *Osnovi teorije i tehnologije betona, 3 izdanje*, Beograd, Građevinski fakultet, (2005)
-
- 177 Nacionalna strategija održivog razvoja Republike Srbije, (Sl. Glasnik RS 57/08), (2008)
-
- 178 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*, pp. 160-190, (1998)
-
- 179 Nehdi ML, Pardhan M, Koshowski S.: Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements, *Cement and Concrete Research* 34(11), pp. 2103-2112, (2004)
-
- 180 Neville A.M.: *Properties of concrete*, Pearson Education Limited, (1996)
-
- 181 A.M.Neville, J.J.Brooks: *Concrete Technology*, Second edition, Pearson Education Limited, (2010)
-
- 182 Newman J., Seng Choo B.: *Advanced concrete technology*, Elsevier, (2003)
-
- 183 Nielsson, I., Wallevik, O.: Rheological Evaluation of Some Empirical Test Methods, Preliminary Results, *Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, pp. 59-68, (2003)
-
- 184 Noguchi T., Oh S.G., Tomosawa F.: Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete, *The 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Skarendahl A, Petersson O, editors, RILEM Publications S.A.R.L, France, pp. 59-70, (1999)
-
- 185 Noumowe A., Carre H., Daoud A., Toutanji H.: High-strength selfcompacting concrete exposed to fire test, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(6), pp. 754-758, (2006)
-
- 186 Oh S.G., Noguchi T., Tomosawa F.: Toward mix design for rheology of self-compacting concrete, *The 1st RILEM International Symposium on Self- Compacting Concrete*. Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, pp. 361-372, (1999)
-
- 187 Okamura H, Ouchi M.: Applications of self-compacting concrete in Japan, *The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L., Bagnaux, France, pp. 3-5, (2003)
-
- 188 Okamura H, Ozawa K.: Mix design for self-compacting concrete, *Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers* 25(6),107-120, (1995)
-
- 189 Okamura H., Maekawa K., Ozawa K.: *High performance concrete*, Giho-do Press, Tokyo, (1993)
-
- 190 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 pp. 3-14, (1999)
-
- 191 Okamura H., Ouchi M.: *Self-Compacting Concrete*, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vo 1.1, No.1, April 2003., pp. 5-15, (2003)
-

Literatura

-
- Okamura H., Ozawa K.: Self-compactable high-performance concrete in Japan, International
192 Workshop on High-performance Concrete, pp. 1-16, (1994)
- Okamura H.: Self-compacting high-performance concrete, Concrete International 19(7), pp. 50-54,
193 (1997)
- Okrajnov-Bajić R., Vasović D.: Self-compacting concrete and its application in contemporary
194 architectural practice, Spatium 20, Univerzitet u Beogradu, Arhitektonski fakultet, str. 28-34, (2009)
- Okrajnov-Bajić, R.: Visokovredni samozbijajući beton u elementima sa izraženim glavnim naponima
zatezanja, Mentor: Prof. dr Mihailo Muravljov, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu,
195 Građevinski fakultet, Beograd, (2008)
- Ouchi M.: History of Development and Applications of Self-Compacting Concrete in Japan,
196 International Workshop on Self-compacting Concrete, pp. 1-10, (1998)
- Ouchi M.: Self-Compacting Concrete - Development, Applications and Investigations, Koshi
197 University of Technology, Japan, (1999)
- Ouchi, M., Nakamura, S., Osterberg, T., Hallberg, S., Lwin, M.: Applications of Self-Compacting
198 Concrete in Japan, Europe and the United States, ISHPC, (2003)
- Our Common Future, World Commission on Environment and Development, Oxford University Press,
199 (1987)
- Ozawa K, Tangemsirikul S, Maekawa K.: Role of powder materials on the filling capacity of fresh
concrete, The 4th CANMET/ACI International Symposium on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural
200 Pozzolans in Concrete. ACI, Detroit, pp. 121-137, (1992)
- Ozawa K., Maekawa K., Okamura H.: Development of high performance concrete, Journal of the
201 Faculty of Engineering, The University of Tokyo XLI(3), (1992)
- Ozawa K.: Utilization of new concrete technology in construction project - Future prospects of self-
compacting concrete, The 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete,
202 Ozawa K, Ouchi M, editors, pp. 57-62, (2001)
- Ozbay E., Oztas A., Baykasoglu A., Ozbebek H.: Investigating mix proportions of high strength self
compacting concrete by using Taguchi method, Construction and Building Materials 23, pp. 694-702,
203 (2009)
- Panda, K.C., Parhi, P.S., Jena, T.: Scrap-Tyre-Rubber replacement for aggregate in cement concrete:
Experimental study, International Journal of Earth Sciences and Engineering, Volume 5, Issue 6
204 SPECIAL ISSUE 1, pp. 1692-1701, (2012)
- Panda K.C., Bal P.K.: Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate,
205 Procedia Engineering 51, pp. 159-164, (2013)
- Parra C., Valcuende M., Gómez F.: Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-
206 compacting concrete, Construction and Building Materials 25, pp.201-207, (2011)
- Pedersen B., Smelpass S.: The relationship between the rheological properties of SCC and the
corresponding matrix phase, Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L.,
207 Bagnaux, France, pp. 106-121, (2003)
- Pelova G.I., Takada K., Walraven J.C.: Aspects of the development of self-compacting concrete in the
Netherlands, Applying the Japanese mix design system, Fracture Mechanics and Physics of
Construction Materials and Structures, Andreikiv OY, Lcuhko J.J., editors, 3rd ed., The National
208 Academy of Sciences of Ukraine, Kamaniar, (1998)
- Persson B.: A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the
corresponding properties of normal concrete, Cement and Concrete Research 31 (2), pp. 193-198,
209 (2001)
- Persson B.: Consequence of cement constituents, mix composition and curing conditions for self-
210 desiccation in concrete, Materials and structures 33, pp. 352-362, (2000)
- Persson B.: Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete, Cement and
211 Concrete Research 33(3), pp. 373-379, (2003)
- Petersson O., Billberg P.: Investigation on blocking of self-compacting concrete with different
maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler, The 1st International RILEM
Symposium on Self-Compacting Concrete, Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications
212 S.A.R.L., France, pp. 333-344, (1999)
- Petersson O., Billberg P., Osterberg T.: Applications of self-compacting concrete for Bridge castings,
213 International Workshop on Self-compacting Concrete, pp. 318-327, (1998)
- Petersson O., Billberg P., Van B.K.: A model for self-compacting concrete, The International RILEM
Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Bartos P.J.M., Marrs D.L., Cleland
214 D.J., editors, E&FN Spon, London, pp. 484-492, (1996)
-

-
- 215 Petersson O., Brite EuRam Proposal No. BE96-3801: Final report of task 2: Workability, 41 pages, (1999)
-
- Piérard J., Dieryck V., Desmyter J.: Autogenous shrinkage of self-compacting concrete, Proceedings of 2nd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, S.P. Shah (Ed.), pp. 216 1013-1021, (2005)
-
- Pons G., Proust E., Assié S.: Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete: A Different Behaviour Compared with Vibrated Concrete?, Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publications S.A.R.L., Reykjavik, O. Wallevik, I. 217 Nielsson (Eds.), pp. 645–654, (2003)
-
- Poppe A.M., Schutter G.D.: Cement hydration in the presence of high filler contents, Cement and 218 Concrete Research 35(12) pp. 2290-2299, (2005)
-
- 219 Pravilnik o kvalitetu cementa („Službeni glasnik RS“, br. 34/2013), , (2013)
-
- 220 Pravilnik o tehničkim normativima za beton i armirani beton - Pravilnik BAB 87, , (1987)
-
- 221 Puntke, W.: Water Demand of Fine Granular Compositions, Beton, vol. 51, n. 5, pp. 242-248, (2002)
-
- Radeka, M.: Karakterizacija mikrostrukture tranzitne zone betona na bazi agregata od recikliranog 222 betona pomoću SEM-a, Građevinski materijali i konstrukcije, vol. 52, br. 1, str. 74-81, (2009)
-
- Radević, A.: Merenje deformacija pomoću instrumenata na bazi vibrirajuće žice, Seminarski rad iz 223 predmeta Merenje neelektričnih veličina u građevinarstvu, Doktorske studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, (2013)
-
- Ramge P., Lohaus L.: Robustness by Mix Design - A New Approach for Mixture Proportioning of 224 SCC, The 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Khayat K.H., Feys D., editors, RILEM Publications, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, pp. 37-70, (2010)
-
- Ranjbar M.M., Madandoust R., Mousavi S.Y., Yosefi S.: Effects of natural zeolite on the fresh and 225 hardened properties of self-compacted concrete, Construction and Building Materials 47 pp. 806–813, (2013)
-
- Recommendation for construction of self-compacting concrete, Japan Society of Civil Engineers, pp. 226 417-437, (1998)
-
- Reinhardt H.W., Wustholz T.: About the influence of the content and composition of the aggregates on 227 the rheological behaviour of self-compacting concrete, Materials and structures 39 pp. 683-693, (2006)
-
- Richardson, A., Coventry K., Ward, G.: Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber 228 crumb content, Journal of Cleaner Production, 23(1) pp. 96-103, (2012)
-
- RILEM TC 174 SCC, Self compacting concrete, State-of-the-art report of RILEM technical committee 229 174-SCC. Skarendahl A, Petersson O, editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, (2000)
-
- Rixom, M. R.: Development of an admixture to produce flowing or self-compacting concrete, 230 Precast concrete, Vol. 5, No. 11, November 1974, pp. 633-637, (1974)
-
- Roy R.L., Roussel N.: The Marsh cone as a viscometer: Theoretical analysis and practical limits, 231 Materials and structures 38 pp. 25-30, (2005)
-
- Roziere E., Granger S., Turcry Ph., Loukili A.: Influence of paste volume on shrinkage cracking and 232 fracture properties of self compacting concrete, Cement & Concrete Composites 29 pp. 626–636, (2007)
-
- Saak A.W., Jennings H.M., Shan S.P.: New methodology for designing self-compacting concrete, ACI 233 Materials Journal 98(6) pp. 429-439, (2001)
-
- Safiuddin, Md.: Development of Self-consolidating High Performance Concrete Incorporating Rice 234 Husk Ash, PhD thesis, Waterloo, Ontario, Canada, (2008)
-
- Savić, A.: Idejni projekat lučnog mosta sa projektom samozbijajućeg betona za gornji stroj 235 konstrukcije, Diplomski rad, decembar 2004., Mentor: Prof. dr Sekula Živković, (2004)
-
- Savić, A.: Samozbijajući betoni, Seminarski rad iz predmeta Savremeni građevinski materijali i 236 njihova primena, Doktorske studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, (2008)
-
- Schutter G.D.: State-of-the-Art of SCC after 20 Years of Research and Practice SCC Symposium, 237 Ibracon Congress, Maceio, (2012)
-
- Schwartzentruber L.D., Le Roy R., Cordin J.: Rheological behaviour of fresh cement pastes 238 formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), Cement and Concrete Research 36(7) pp. 1203-1213, (2006)
-
- Sedran T., De Larrard C.F.: Optimization of self compacting concrete - thanks to packing model, The 239 1st International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete, Skarendahl A., Petersson O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, pp. 321-332, (1999)
-

- 240 Sfikas I., Trezos K.: Effects of Composition Variations on Bond Properties of Self-compacting Concrete Specimen, *Construction and Building Materials* 41 pp. 252-262, (2013)
- 241 Shakhmenko G., Korjakins A., Bumanis G.: Concrete with microfiller obtained from recycled lamp glass, *Modern building materials, structures and techniques*, Vilnius, Lithuania, pp. 280-284, (2010)
- 242 Shi C., Yang X.: Design and application of self-compacting lightweight concretes, SCC'2005 - China 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Yu Z., Shi C., Khayat K.H., Xie Y., editors, RILEM Publication SARL, Paris, France, pp. 55-64, (2005)
- 243 Siddique R., Aggarwal P., Aggarwal Y.: Prediction of compressive strength of self-compacting concrete containing bottom ash using artificial neural networks, *Advances in Engineering Software* 42, pp. 780-786, (2011)
- 244 Siddique R.: Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (4), pp. 539-547, 2003, (2003)
- 245 Siddique R.: Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash, *Materials and Design* 32, pp. 1501-1507, (2011)
- 246 Siddique R.: *Waste Materials and By-Products in Concrete*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2008)
- 247 Şimşek B., Tansel İç I., H. Şimşek E.: A TOPSIS-based Taguchi optimization to determine optimal mixture proportions of the high strength self-compacting concrete, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 125, pp. 18-32, (2013)
- 248 Skarendahl A.: The present - The future, The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, pp. 6-14, (2003)
- 249 Skarendahl, A.: SCC is an Important Step Towards Industrialization of the Building Industry, *Proceedings of the First International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Sweden, pp. 15-21, (1999)
- 250 Sonebi M., Bartos P.J.M.: Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete, *Materials and structures* 35, pp. 462-469, (2002)
- 251 Sonebi M., Svermova L., Bartos P.J.M.: Factorial design of cement slurries containing limestone powder for self-compacting consolidating slurry-infiltrated fiber concrete, *ACI Materials Journal*, pp. 136-145, (2004)
- 252 Sonebi M., Zhu W., Gibbs J.C.: Bond of reinforcement in self-compacting concrete, *Concrete* 35(7), pp. 26-28, (2001)
- 253 Specification and guidelines for self-compacting concrete, European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, (2002)
- 254 SRPS B.B2.009 Prirodni agregat i kamen za proizvodnju agregata za beton. Tehnički uslovi, Institut za standardizaciju Srbije, (1986)
- 255 SRPS B.B3.100 Kameni agregat - Frakcionisani kameni agregat za beton i asfalt - Osnovni uslovi kvaliteta, Institut za standardizaciju Srbije, (1983)
- 256 SRPS B.B8.004 Kameni agregat - Ispitivanje mineraloško-petrografskog sastava, Institut za standardizaciju Srbije, (1987)
- 257 SRPS B.B8.010:1981 Ispitivanje prirodnog kamena - Određivanje upijanja vode, Institut za standardizaciju Srbije, (1981)
- 258 SRPS B.B8.036 Kameni agregat - Određivanje količine sitnih čestica metodom mokrog sejanja, Institut za standardizaciju Srbije, (1982)
- 259 SRPS EN 12390-3:2010 Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)
- 260 SRPS EN 12390-6:2010 Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 6: Čvrstoća pri zatezanju cepanjem uzoraka za ispitivanje, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)
- 261 SRPS EN 12390-7:2010 Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 7: Zapreminska masa očvrstlog betona, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)
- 262 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)
- 263 SRPS EN 206-1:2011 Beton - Deo 1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost, Institut za standardizaciju Srbije, (2011)
- 264 SRPS EN 206-9:2014 Beton – Deo 9: Dodatna pravila za samougrađujući beton (SCC), Institut za standardizaciju Srbije, (2014), standard u pripremi
- 265 SRPS EN 933-1:2009 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava - Metoda prosejavanja, Institut za standardizaciju Srbije, (2009)
- 266 SRPS EN 934-2:2010 Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi – Deo 2: Dodaci betonu: definicije, zahtevi, usaglašenost, označavanje i obeležavanje, Institut za standardizaciju Srbije, (2010)

-
- 267 SRPS ISO 4013:2000 - Beton. Određivanje čvrstoće epruveta pri savijanju, Institut za standardizaciju Srbije, (2000)
-
- 268 SRPS U.M1.015:1998 Beton – očvrslji beton - ispitivanje prodiranja vode pod pritiskom, Institut za standardizaciju Srbije, (1998)
-
- 269 SRPS U.M1.016:1992 Beton – Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza, Institut za standardizaciju Srbije, (1992)
-
- 270 SRPS U.M1.021:1997 Beton – Klasifikacija na osnovu čvrstoće pri pritisku, Institut za standardizaciju Srbije, (1997)
-
- 271 SRPS U.M1.026:1993 Beton - Određivanje dinamičkog modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta, Institut za standardizaciju Srbije, (1993)
-
- 272 SRPS U.M1.042:1998 Beton - određivanje brzine ultrazvučnog impulsa, Institut za standardizaciju Srbije, (1998)
-
- 273 SRPS U.M1.055:1984 Ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, Institut za standardizaciju Srbije, (1984)
-
- 274 SRPS U.M1.058:1985 Beton - Voda za spravljanje betona - Tehnički uslovi i metode ispitivanja, Institut za standardizaciju Srbije, (1985)
-
- 275 Su N., Hsu K.C., Chai H.W.: A simple mix design method for self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* 31(12), pp. 1799-1807, (2001)
-
- 276 Su N., Miao B.: A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, *Cement and Concrete Composites* 25(2), pp. 215-222, (2003)
-
- 277 Sukumar B., Nagamani K., Srinivasa R.: Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash, *Construction and Building Materials* 22, pp. 1394-1401, (2008)
-
- 278 Taguchi G.: System of experimental design, UNIBUB, White Plains, (1987)
-
- 279 Takada K., Pelva G., Walraven J.C.: The first trial of self-compacting concrete in the Netherlands according to the Japanese design method, *The 13th FIP Congress*, pp. 113-115, (1998)
-
- 280 Tang C.W., Yen T., Chang C.S., Chen K.H.: Optimizing mixture proportions for flowable high-performance concrete via rheology tests, *ACI Materials Journal* 98(6), pp. 493-502, (2001)
-
- 281 Tangernsirikul S., Bui V.K.: Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete, *Regional Symposium on Infrastructures Development in Civil Engineering* pp. 58-69, (1995)
-
- 282 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)
-
- 283 Terzić A., Volkov-Husović T., Jančić-Heineman R., Pavlović Lj.: Primena instrumentalnih metoda za ispitivanje svojstava i mikrostrukture konstrukcionih betona, *Metalurgija*, Vol. 14 (4), str. 253-270, (2008)
-
- 284 Thomas C., Cimentada A., Polanco J.A., Setién J., Méndez D., Rico J.: Influence of recycled aggregates containing sulphur on properties of recycled aggregate mortar and concrete, *Composites Part B: Engineering*, Volume 45, Issue 1, pp. 474-485, (2013)
-
- 285 Thomas J., Jennings H.: *The Science of Concrete*, Northwestern University, Evanston, IL, (2009)
-
- 286 Topcu I.B., Ugurlu A.: Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete, *Cement and Concrete Research* 33(7) pp. 1071-1075, (2003)
-
- 287 Tragardh J.: Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, *The 1st International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete*. Skarendahl.A., Petersson.O., editors, RILEM Publications S.A.R.L., France, pp. 175-186, (1999)
-
- 288 Tu T.Y., Jann Y.Y., Hwang C.L.: The application of recycled aggregates in SCC, SCC'2005 - China 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. Yu Z, Shi C, Khayat KH, Xie Y, editors, RILEM Publications, Paris, France, pp. 145-152, (2005)
-
- 289 Uchikawa H., Sawaki D., Anehara S.: Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research* 25(2):353-364, (1995)
-
- 290 Uebachs S., Brameshuber W.: Self-compacting concrete with carbon fibre reinforcement for industrial floor slabs, Hanley Wood, Minneapolis, MN, USA, (2005)
-
- 291 Umehara H., Hamada D., Yamamuro H., Oka S.: Development and usage of self-compacting concrete in precast field, *The 1st RILEM International Symposium on Self-compacting Concrete*. RILEM, Paris, France, pp. 705-717, (1999)
-
- 292 USGS Mineral Resources Program, Cement statistics and information, (2014)
-

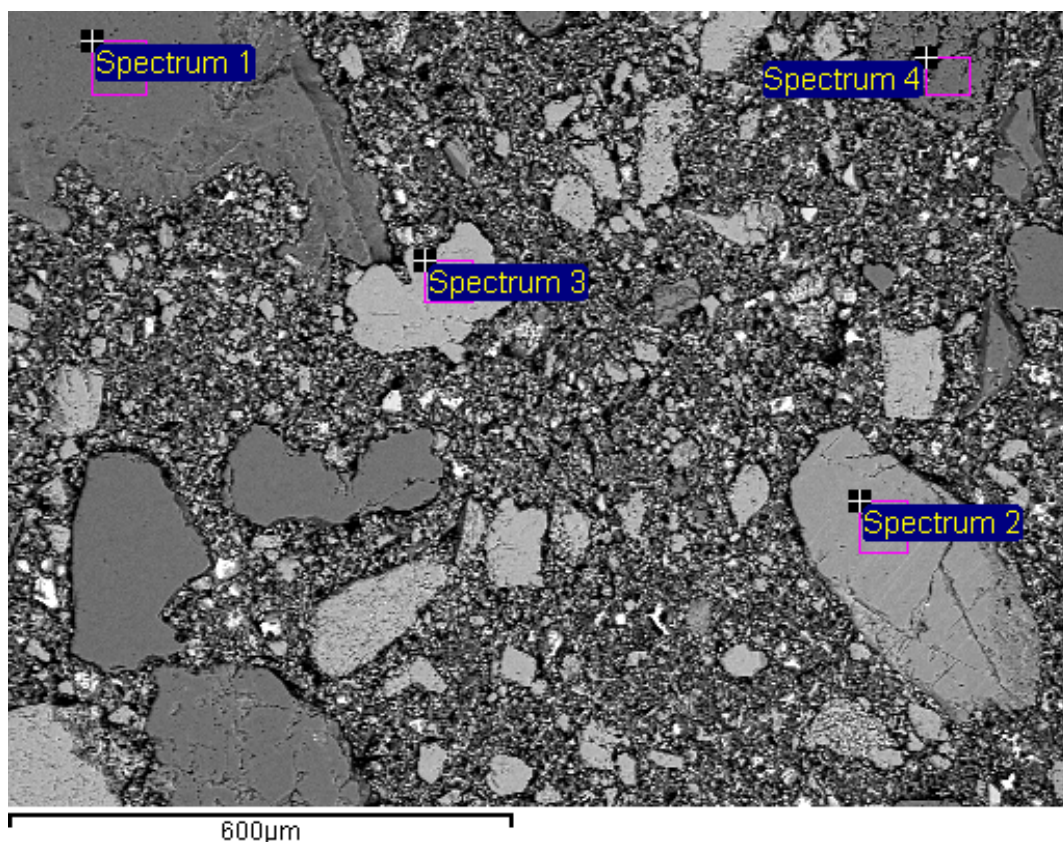
-
- 293 Utsi, S., Emborg, M., Carlswald, J.: Relation between Workability and Rheological Parameters, Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, pp. 154-164, (2003)
-
- Valcuende M., Parra C., Marco E., Garrido A., Martínez E., Cánoves J.: Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete, Construction and Building Materials 28 pp. 122-128, (2012)
-
- 294 Valcuende M., Parra C.: Natural carbonation of self-compacting concretes, Construction and Building Materials 24, pp. 848-853, (2010)
-
- Vanwalleghem H., Blontrock H., Taerwe L.: Spalling tests on self-compacting concrete, The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Wallevik O., Nielsson I., editors, 296 RILEM Publications S.A.R.L., Bagnex, France, pp. 855-862, (2003)
-
- Vasusmitha R., Srinivasa Rao P.: Strength and Durability Study of High Strength Self Compacting Concrete, International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME), Vol. 1, 297 Issue 1, pp. 18-26, (2013)
-
- Vlahović M., Martinović M., Boljanac T., Jovanić P., Volkov-Husović T.: Durability of sulfur concrete in various aggressive environments, Construction and building materials vol. 25 (10), pp. 298 3926-3934, (2011)
-
- Vlahović M., Savić M., Martinović S., Boljanac T., Volkov-Husović T.: Use of image analysis for durability testing of sulfur concrete and Portland cement concrete, Materials & design, vol. 34 pp. 346-299 354, (2012)
-
- Wallevik O.H., Nielsson I.: Self-compacting concrete - A rheological approach, International 300 Workshop on Self-compacting Concrete, pp. 136-159, (1998)
-
- Wallevik O.H.: Rheology - a scientific approach to develop self-compacting Concrete, The 3rd International Symposium on Self-compacting Concrete. Wallevik OH, Nielsson I, editors, RILEM 301 Publications S.A.R.L., Bagnex, France, pp. 23-31, (2003)
-
- Walraven J. C.: The development of self-compacting concrete in the Netherlands, International 302 Workshop on Self-compacting Concrete, pp. 87-96, (1998)
-
- Wesche K.: Fly Ash in Concrete: Properties and performance (Rilem Report 7), Report of Technical 303 Committee 67-FAB Use of Fly Ash in Building, Taylor & Francis e-Library, (2005)
-
- Westerholm M, Lagerblad B, Silfwerbrand J, Forssberg E.: Influence of fine aggregate characteristics 304 on the rheological properties of mortars, Cement and Concrete Composites 30(4), pp. 274-282, (2008)
-
- Wong Y.L., Lam L., Poon C.S., Zhou F.P.: Properties of fly ash modified cement mortar-aggregate 305 interfaces, Cement and Concrete Research 29(12), pp. 1905-1913, (1999)
-
- Xu S., Li H.: Self-compacting concrete for textile reinforced elements, Hanley wood, Minneapolis, 306 MN, USA, pp. 409-415, (2005)
-
- Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M.: Effects of the chemical structure on the 307 properties of polycarboxylate-type superplasticizer, Cement and Concrete Research 30(2), pp.197-207, (2000)
-
- Yammamuro H., Izumi T., Mizunuma T.: Study of non-adsorptive viscosity agents applied to self- 308 compacting concrete, ACI Materials 173, pp. 427-444, (1997)
-
- Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A.M., Taerwe L.: Influence of limestone powder used as filler in 309 SCC on hydration and microstructure of cement pastes, Cement and Concrete Composites 29(2), pp. 94-102, (2007)
-
- Zakić D.: Istraživanje parametara duktilnosti i udarne otpornosti sitnozrnih betona mikroarmiranih 310 sintetičkim vlaknima, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Mentor: prof. dr Sekula Živković, (2010)
-
- Zhang X., Han J.: The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, 311 Cement and Concrete Research 30(5), pp. 827-830, (2000)
-
- Zhu W., Bartos P.J.M.: Permeation properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete 312 Research 33(6), pp. 921-926, (2003)
-
- Zhu W., Gibbs J.C.: Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, 313 Cement and Concrete Research 35(8), pp. 1457-1462, (2005)
-
- Zhu W., Sonebi M., Bartos P.J.M.: Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting 314 concrete, Materials and structures 37(7), pp. 442-448, (2004)
-
- Živković S.: Samougradljivi betoni trajnije armiranobetonske konstrukcije, Građevinski materijali i 315 konstrukcije, vol. 46(3-4), str. 14-23, (2003)
-

- 316 Živković, S., Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A.: Neki rezultati istraživanja mikroarmiranih samozbijajućih betona, XXIII Kongres JUDIMK-e "Simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u našem građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija", Novi Sad, Zbornik radova, str. 63-73, (2005)
- 317 Živković, S., Kovačević, T.: Durability of Concrete and Concrete Structures in the Warm Sea Areas, 8th International symposium of MASE, Ohrid, (1999)
- 318 Živković, S., Kovačević, T., Kovačević, M.: Primer samozbijajućeg betona visokih performansi, JDGK 4. simpozijum, Knjiga 2, Vrnjačka Banja, Jugoslovensko društvo građevinskih konstruktera, Beograd, 2004., str. 351-356, (2004)
- 319 Živković, S.: Samozbijajući beton - svojstva i tehnologija, Građevinski kalendar, str. 234-304, (2007)
- 320 Živković, S., Zakić, D., Bojović, D.: Projektovanje sastava i svojstva jedne vrste samozbijajućeg betona, Deveti nacionalni i treći međunarodni naučni skup INDIS, str. 26-28 (2003)
-

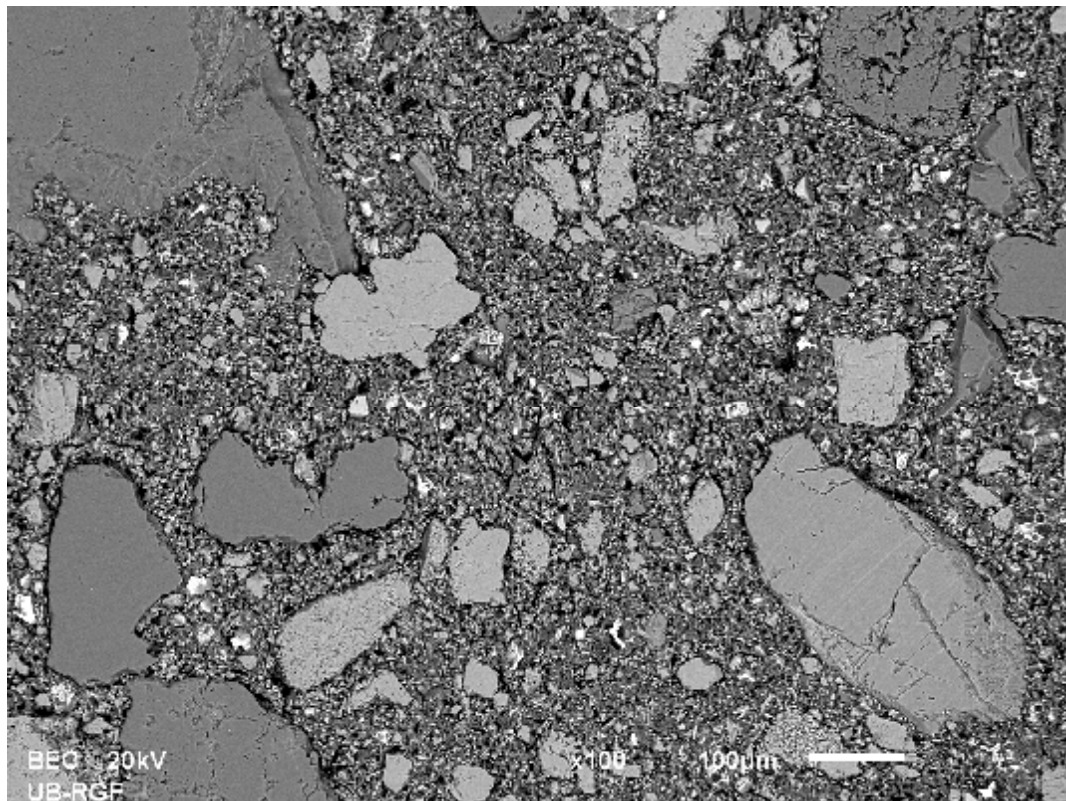
Prilog – Rezultati SEM analize reprezentativnih uzoraka SCC mešavina

P.1 SEM analiza uzoraka SCC sa letećim pepelom

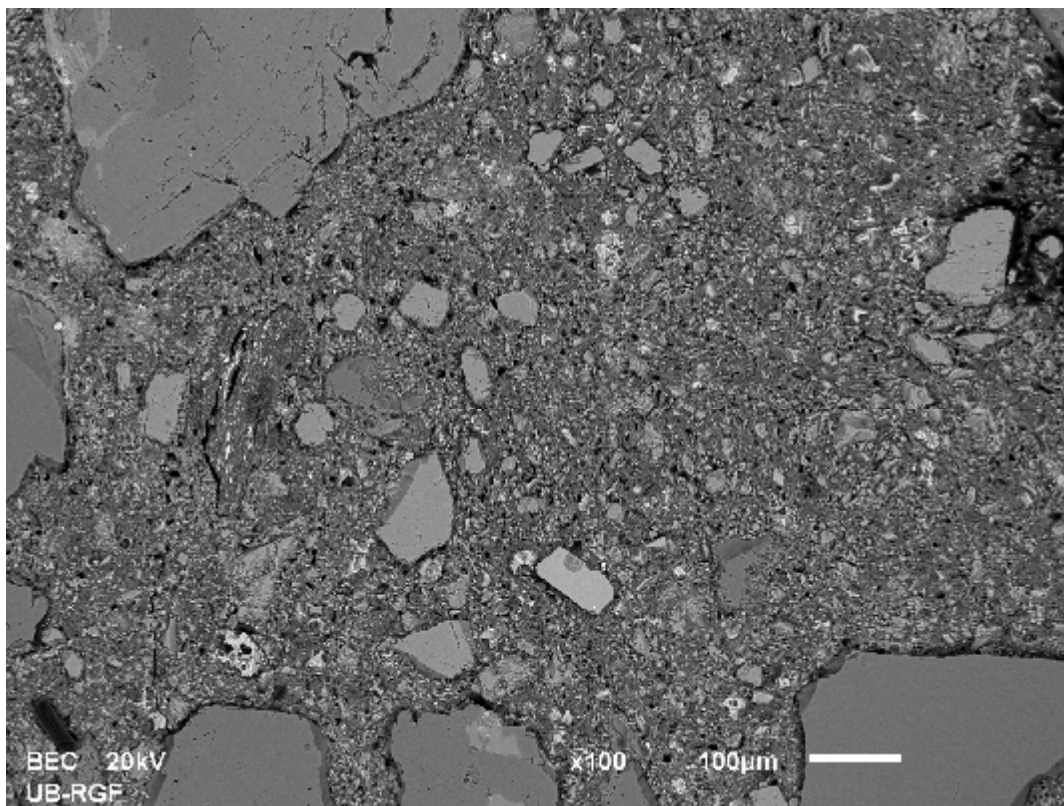
U okviru SEM analize posmatrana je površina pripremljenih uzoraka. U preseku su EDS analizom karakterisana zrna agregata (kvarcit, krečnjak, peščar, amfiboli i kvarc), mineralnog dodatka (krečnjačko brašno i leteći pepeo) i cementne matrice (slika P.1). Odgovarajuće EDS Analize date su na kraju ovog priloga. U prvom redu, raspored i veličina pora betona E1 vizuelno nisu odstupali od istih parametara kod betona E2, što može da se vidi sa preglednih slika P.2 i P.3. Daljom analizom karakterisana je i kontaktna (prelazna) zona zrna agregata i cementne matrice. Iako je, generalno posmatrano, sam kontakt zrna agregata i cementne matrice mogao da se okarakteriše kao dobar, treba napomenuti da je taj kontakt kod izvesnih zrna bio bolji (peščar, krečnjak) nego kod drugih (kvarcit), što je posledica karaktera površine i kompaktnosti samih zrna agregata. Na preglednoj slici P.4 može se uočiti i jedno krupnije zrno letećeg pepela koje je delimično reagovalo sa matricom. Što se tiče dimenzije prelazne zone (*Interfacial Transition Zone - ITZ*) između zrna agregata i paste, ona je varirala od 20 μm kod sitnijih zrna agregata, do 100 μm kod krupnijih. Na slici P.5 prikazan je kontakt dva krupnija zrna agregata sa matricom kod E1, kao i kod LP5 (slika P.7). Na slikama P.5, P.6 i P.7 su prikazane reprezentativne prelazne zone na kontaktu sa krupnim zrnom agregata kod betona oznake E1, E2 i LP5, respektivno. Jedno mesto sa karakterističnim pozicijama EDS analiza u matrici SCC sa letećim pepelom prikazano je na slici P.8. Mapiranje po elementima Si, Al, Fe, Ca, S (kvalitativna analiza) urađeno je na nekoliko mesta kod uzoraka, u prvom redu kao pomoćna metoda pri prepoznavanju zrna letećeg pepela, pošto je za leteći pepeo karakteristično prisustvo većih količina aluminijuma (glinovito-aluminatno poreklo uglja iz Kolubare). U cementnoj matrici procenjen je i stepen dispergovanja krečnjačkog brašna (mapa Ca) kao filera. Ova fizička disperzija (posledica mešanja svežeg betona) bila je dovoljna indikacija disperzije zrna letećeg pepela po matrici. Na slici P.9, osim disperzije po elementima, može da se vidi komplementarnost (negativna relacija) Ca i Al na mestu krupnijeg zrna letećeg pepela (centralna zona posmatranog mesta).



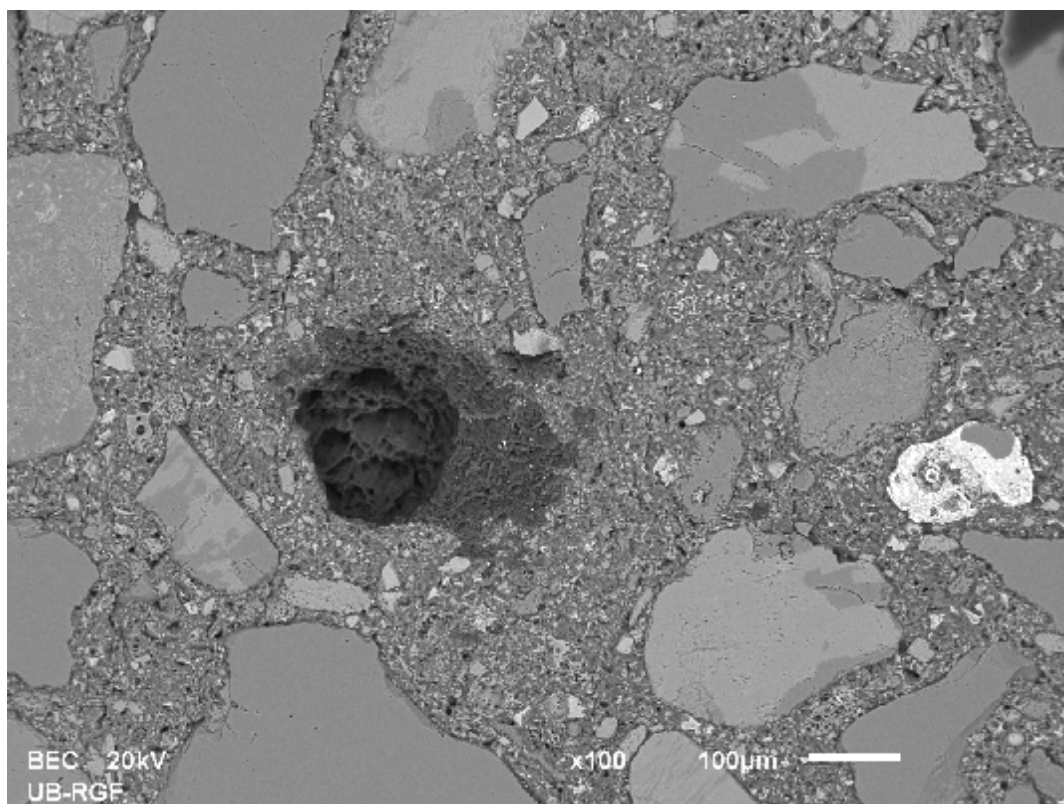
Slika P.1 Karakterizacija zrna agregata na primeru SCC E1



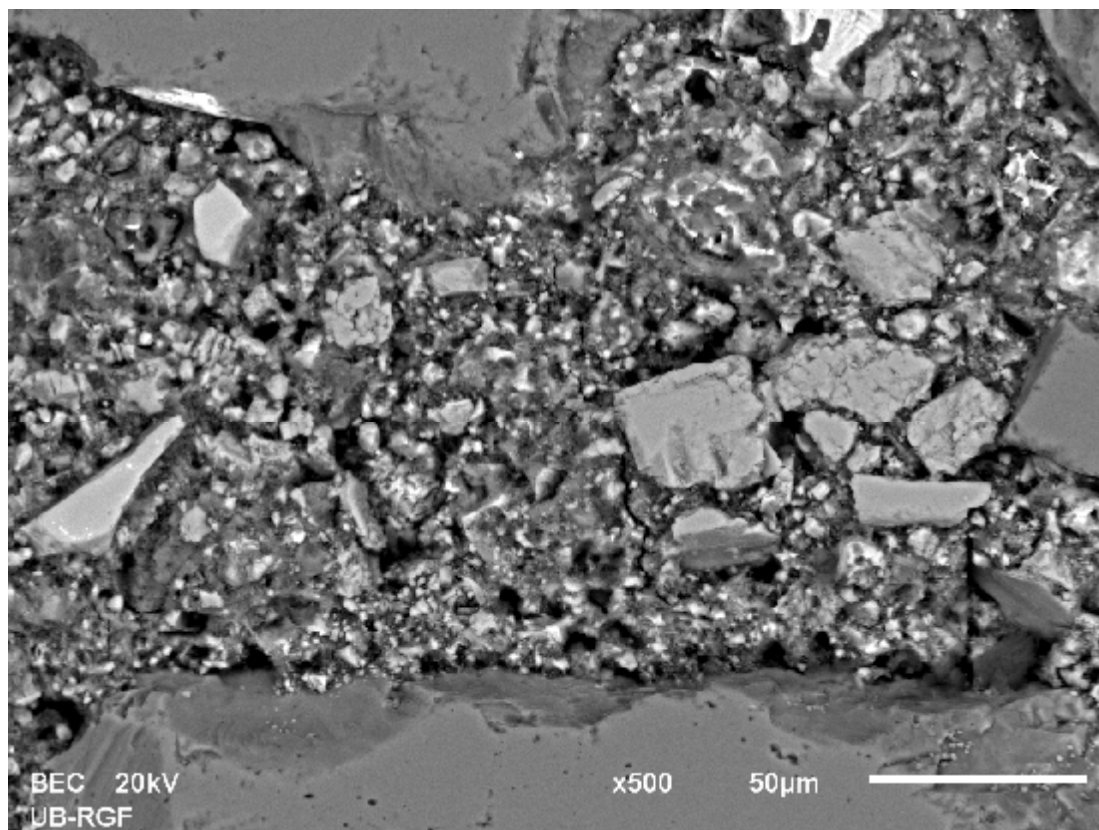
Slika P.2 Pregledna slika uzorka betona E1



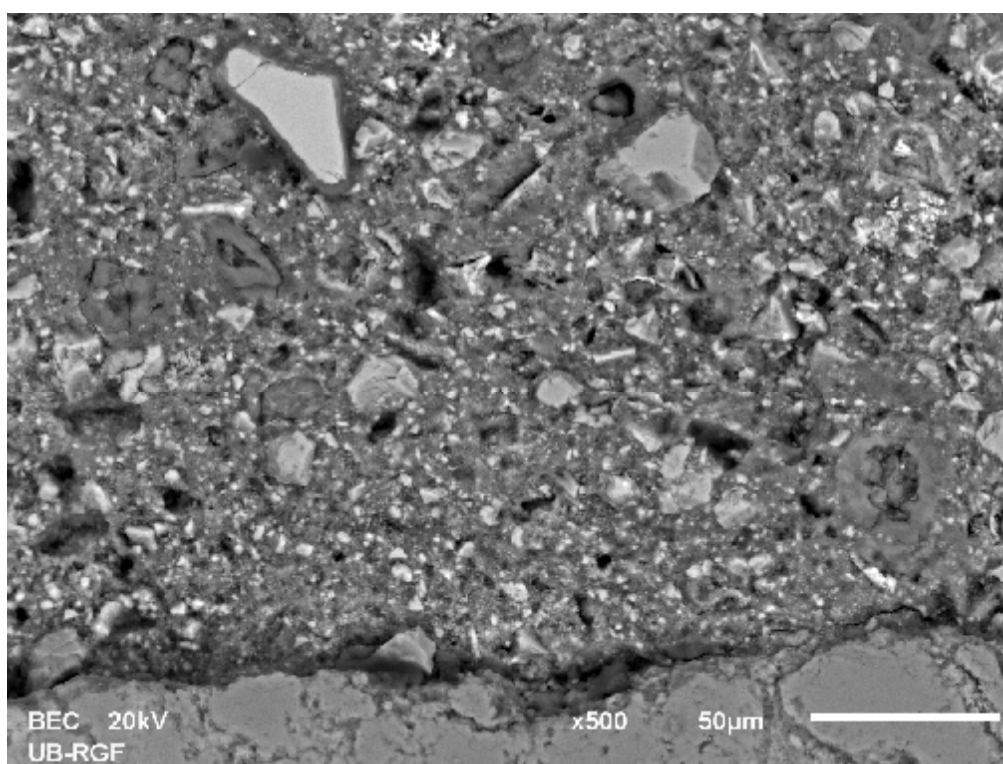
Slika P.3 Pregledna slika uzorka betona E2



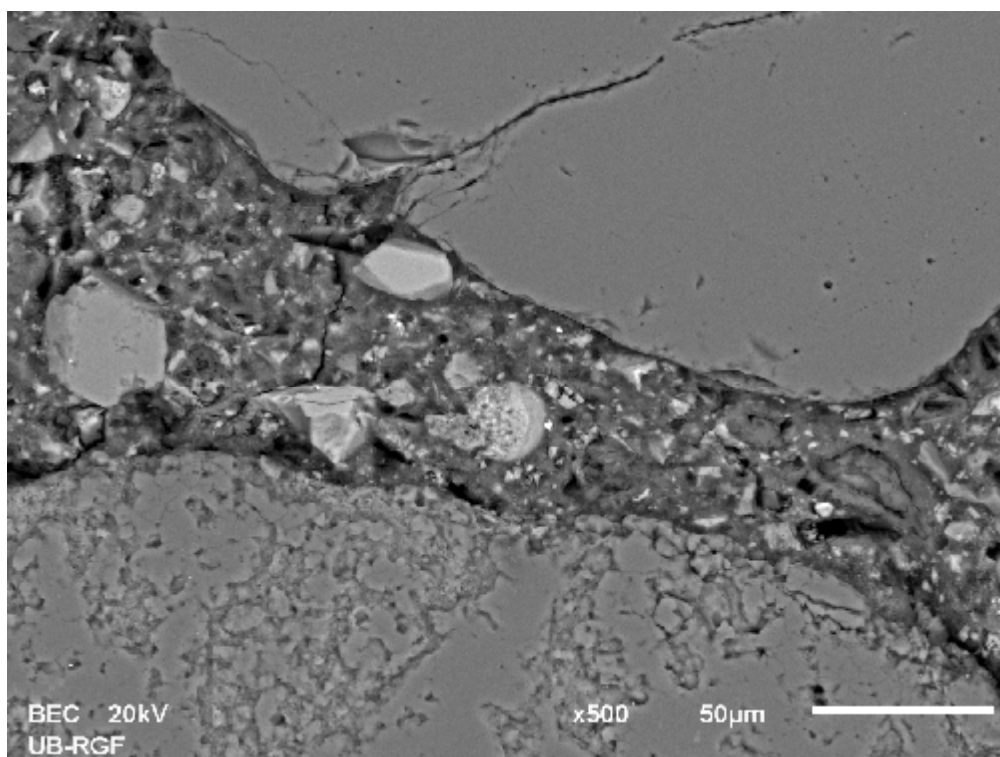
Slika P.4 Pregledna slika uzorka betona LP5



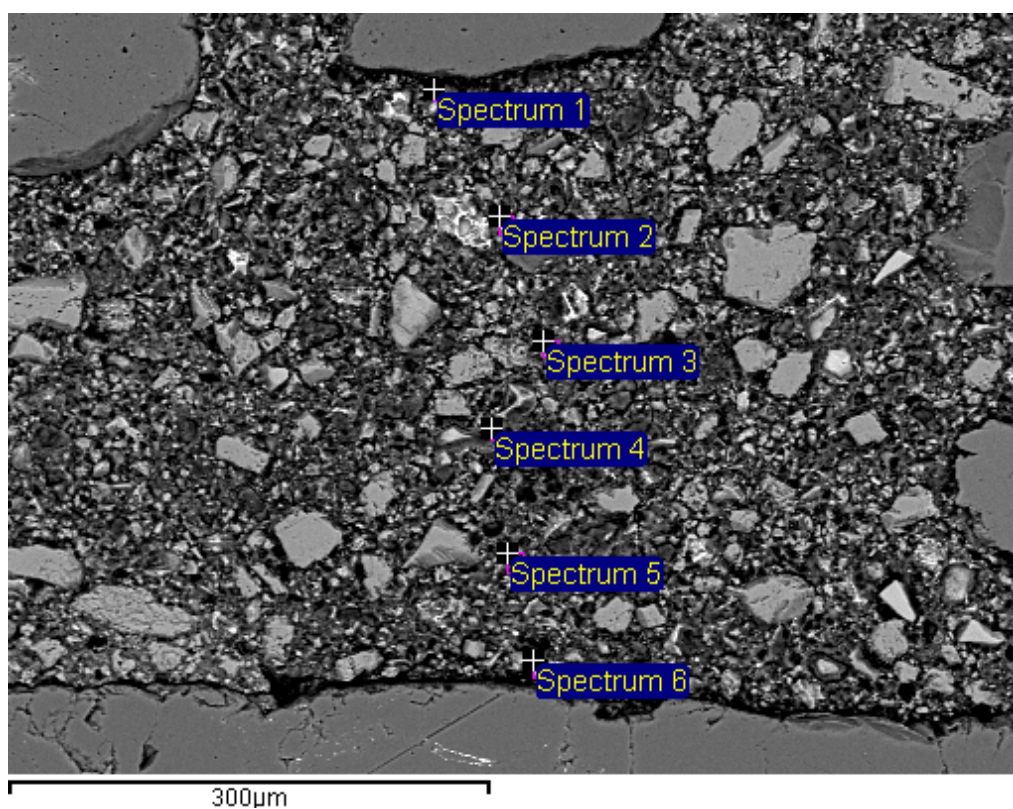
Slika P.5 ITZ kod uzorka betona E1



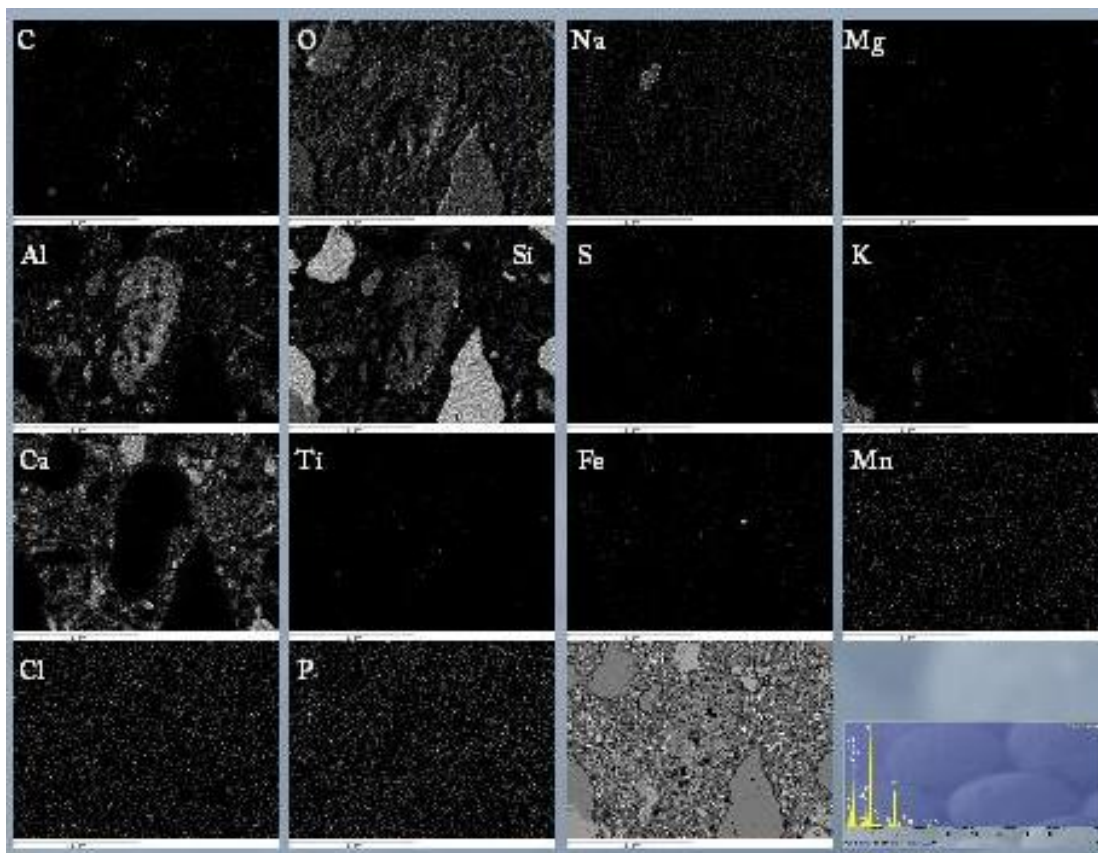
Slika P.6 ITZ kod uzorka betona E2



Slika P.7 ITZ kod uzorka betona LP5



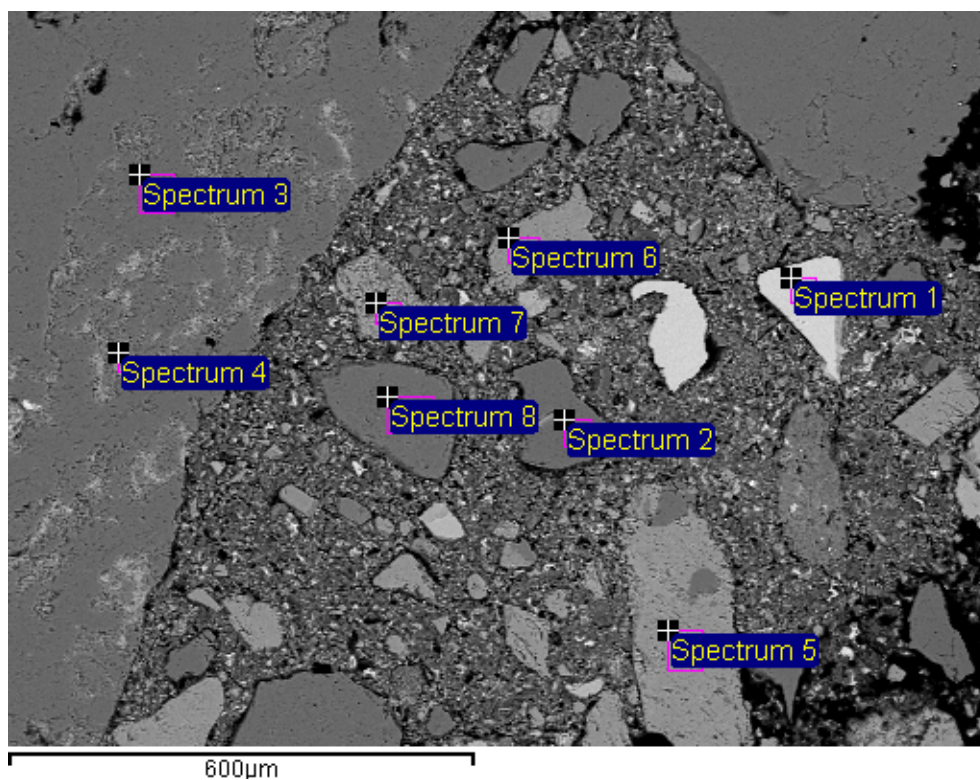
Slika P.8 Jedno mesto sa karakterističnim pozicijama EDS analiza u matrici SCC sa LP



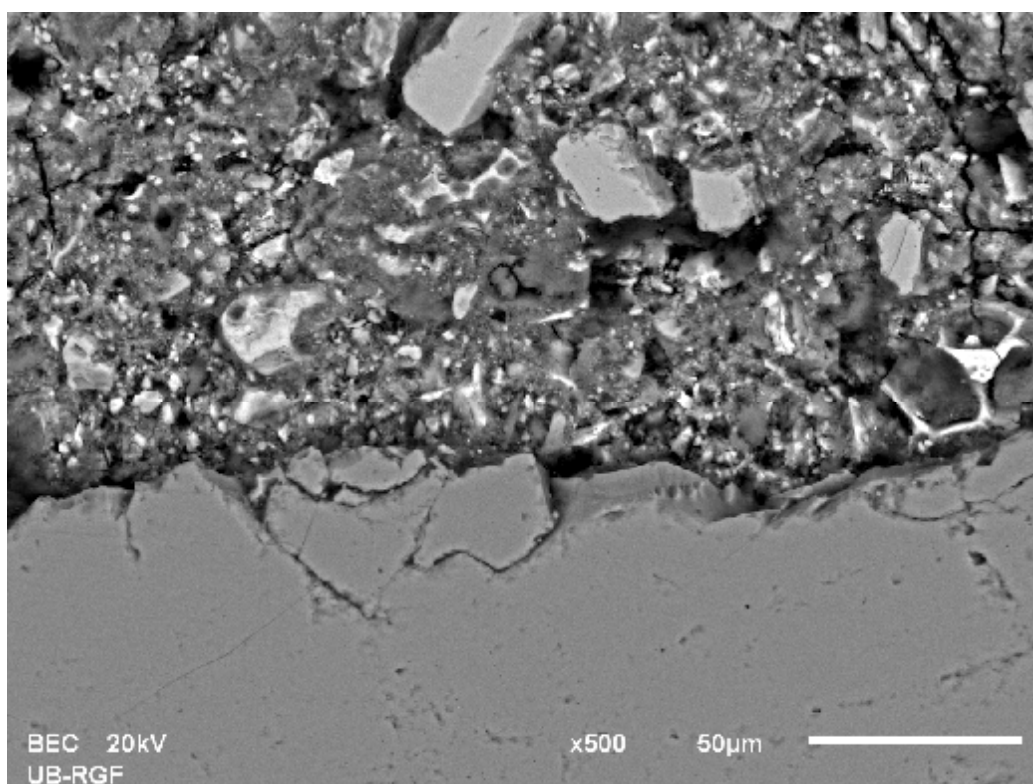
Slika P.9 Rezultat mapiranja na jednom mestu uzorka SCC LP5

P.2 SEM analiza uzoraka SCC sa spršenim recikliranim betonom

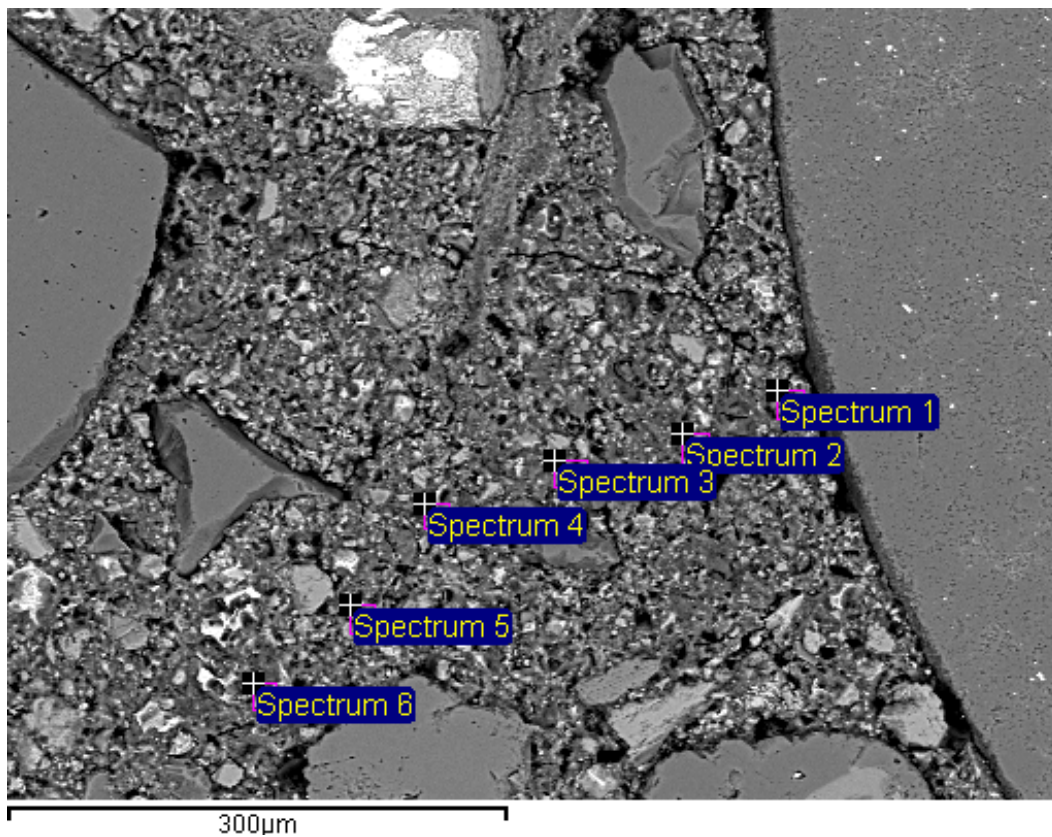
U okviru SEM analize posmatrana je površina pripremljenih uzoraka i u skladu sa programom ispitivanja izvučeni su odgovarajući zaključci. U preseku su EDS analizom karakterisana zrna agregata (u prvom redu to su kvarcit, krečnjak, peščar, amfiboli i kvarc), mineralnog dodatka (krečnjačko brašno i spršeni beton) i cementne matrice (slika P.10). U prvom redu, raspored i veličina pora betona R100 vizuelno nisu odstupali od istih parametara kod betona E2. Daljom analizom karakterisana je i prelazna zona zrna agregata i cementne matrice. Na slici P.11 prikazana je reprezentativna prelazna zona na kontaktu sa krupnim zrnom agregata kod betona oznake R100. Kao što se sa slike može zaključiti, ostvarena je kompaktna veza sa zrnom agregata. U cilju karakterizacije raspodele produkata hidratacije cementa u matrici, na nekoliko mesta po uzorku urađena je EDS analiza. Na slici P.12 prikazan je primenjen princip. Na osnovu EDS analize može se zaključiti da je matrica sličnog sastava, bez obzira na selektovano mesto i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata. U pitanju su hidratizane faze cementa, C-S-H faza i C-H. Mapiranje na nekoliko različitih mesta, obavljeno u cilju razlikovanja tačaka u matrici u kojima je eventualno moguće identifikovati sadržaj Si (osnovni element kvarca, kao dominantne komponente spršenog betona), nije dalo pouzdane rezultate u smislu utvrđivanja lokacije zrna spršenog recikliranog betona. Odgovarajuće EDS Analize date su na kraju ovog priloga.



Slika P.10 Karakterizacija zrna agregata na primeru SCC R100



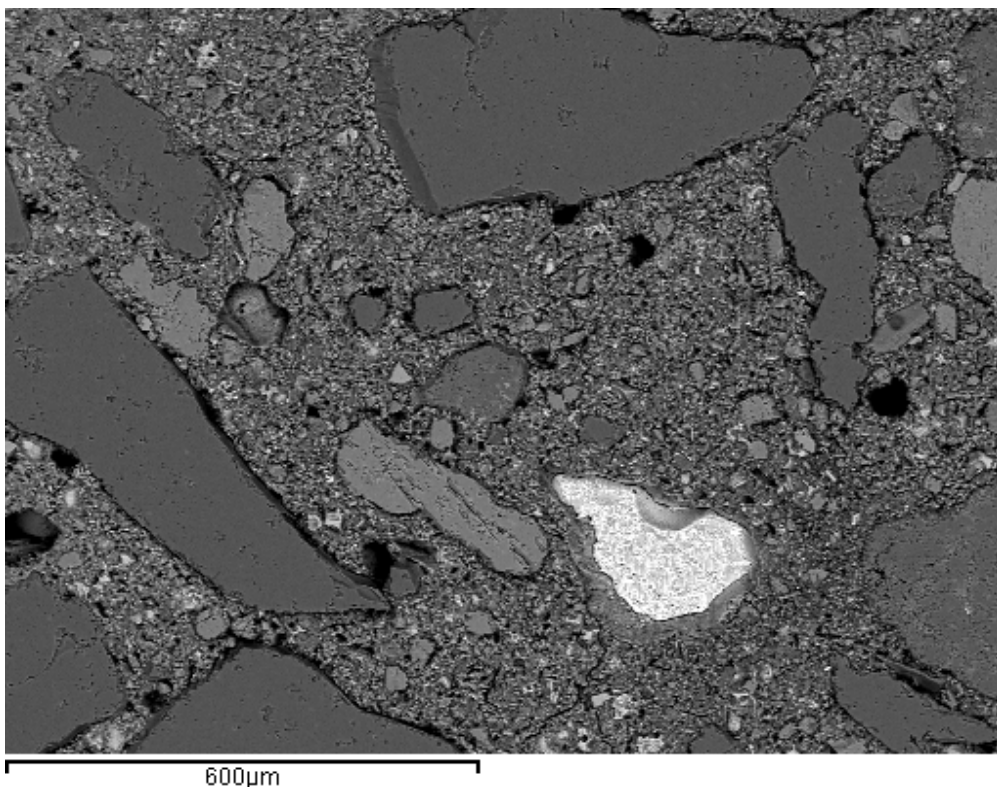
Slika P.11 ITZ kod uzorka betona R100



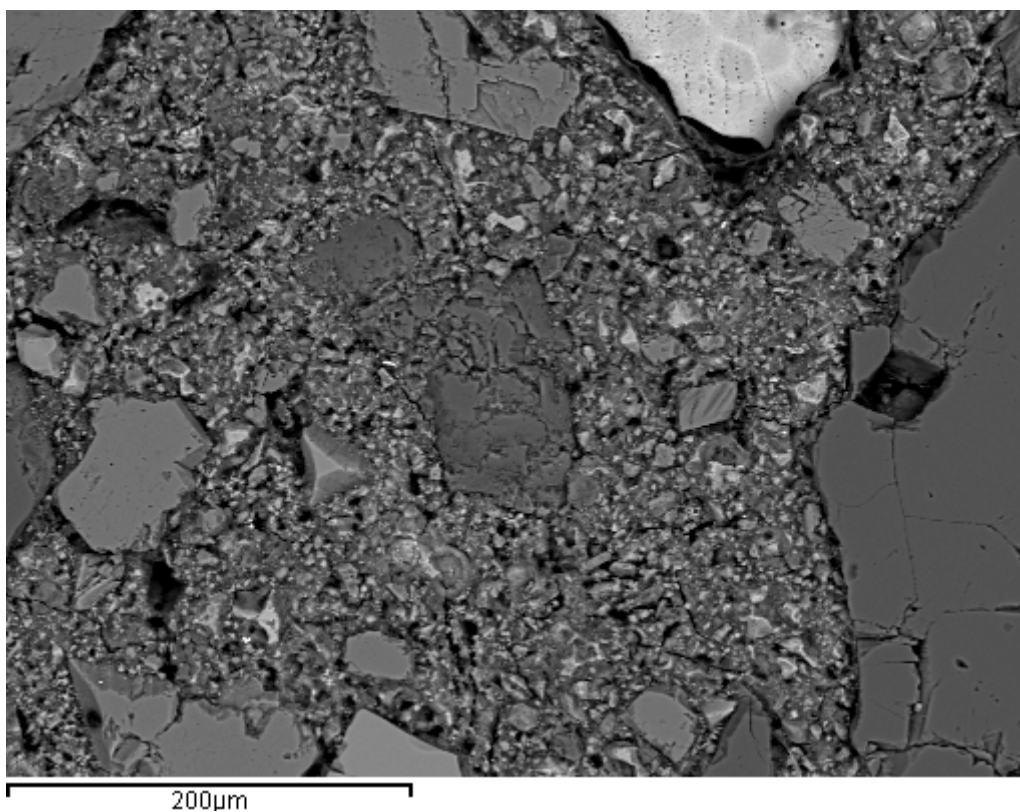
Slika P.12 Jedno mesto sa karakterističnim pozicijama EDS analiza u matrici betona oznake R100

P.3 SEM analiza uzoraka SCC sa sprášenim sumporom

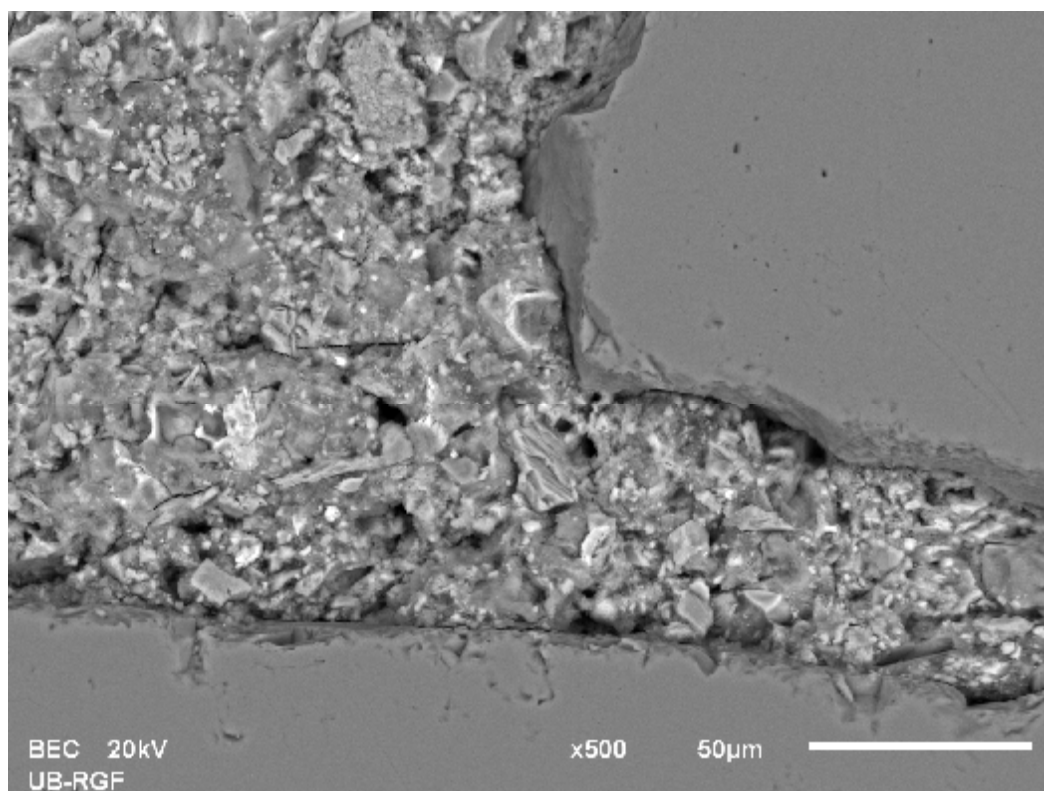
U okviru SEM analize posmatrana je površina tri pripremljena uzorka sa 20% sprášenog sumpora i u skladu sa programom ispitivanja izvedeni su odgovarajući zaključci. U preseku su EDS analizom karakterisana zrna agregata (kvarc, kvarcit i slično), mineralnog dodatka (krečnjačko brašno i sprášeni sumpor) i cementne matrice (slika P.13). Poroznost SCC sa sprášenim sumporom vizuelno nije odstupala od poroznosti na betonima oznake E1 i E2 (referentni betoni). Daljom analizom karakterisana je i prelazna zona zrna agregata i cementne matrice. Od posebnog interesa je bila karakterizacija prelazne zone kod zrna sprášenog sumpora. Na preglednoj slici P.14 može se uočiti i jedno krupnije zrno sprášenog sumpora (svetlije zrno u gornjem desnom uglu slike). Što se tiče prelazne zone (*Interfacial Transition Zone – ITZ*) između zrna agregata i paste, ona je varirala u granicama od 20-100 μm . Na slici P.15 je prikazana reprezentativna prelazna zona na kontaktu sa krupnim zrnim agregatom kod betona oznake S20. U cilju karakterizacije raspodele produkata hidratacije cementa u matrici, na nekoliko mesta po uzorku uraðena je EDS analiza, za sva tri uzorka (dva polirana i jedan prelomljen uzorak). Na slici P.16 prikazan je primenjen princip. Pokazalo se da je matrica sličnog sastava, bez obzira na selektovano mesto i bez obzira na udaljenost od krupnijih zrna agregata. U pitanju su hidratizane faze cementa, C-S-H faza i C-H. Na mikrostrukturnom planu nije primećen negativan uticaj primene sprášenog sumpora u SCC (slika P.17). EDS analiza na kontaktu je potvrdila ovaj zaključak. Sličan efekat je primećen i na uzorku koji nije posebno pripremljen poliranjem i zatapanjem u epoksid (takozvani "prelomljeni uzorak"), videti sliku P.18. Na prelomljenom uzorku, unutar šupljine nastale usled zaostalog vazduha primećene su karakteristične formacije CH kristala (prosečne veličine od oko 5 μm) i kristala etringita, videti sliku P.19. Mapiranje po elementima Si, Al, Fe, Ca, S (kvalitativna analiza) uraðeno je na nekoliko mesta na svakom od uzoraka. U cementnoj matrici procenjen je i stepen dispergovanja krečnjačkog brašna (mapa Ca) kao filera. Ova fizička disperzija (posledica mešanja svežeg betona) bila je dovoljna indikacija disperzije zrna sumpora po matrici. Nije uočeno grupisanje posmatranih zrna (slika P.20). Odgovarajuće EDS Analize date su na kraju ovog priloga.



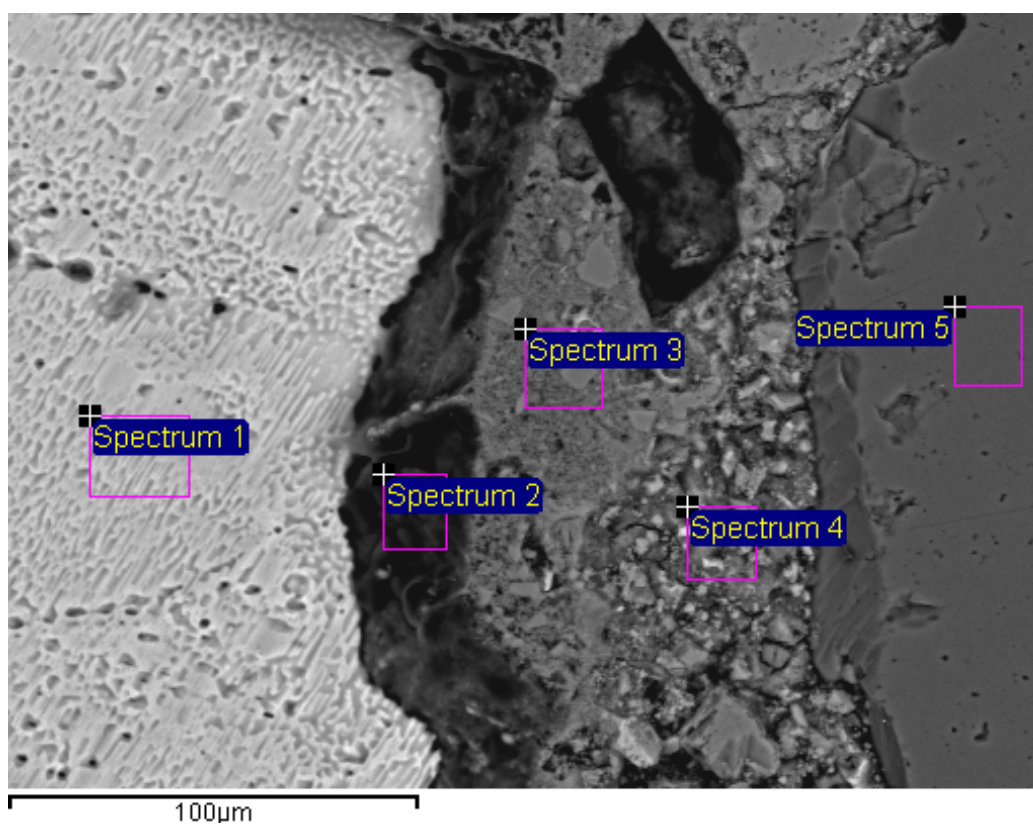
Slika P.13 Karakterizacija zrna agregata na primeru SCC S20



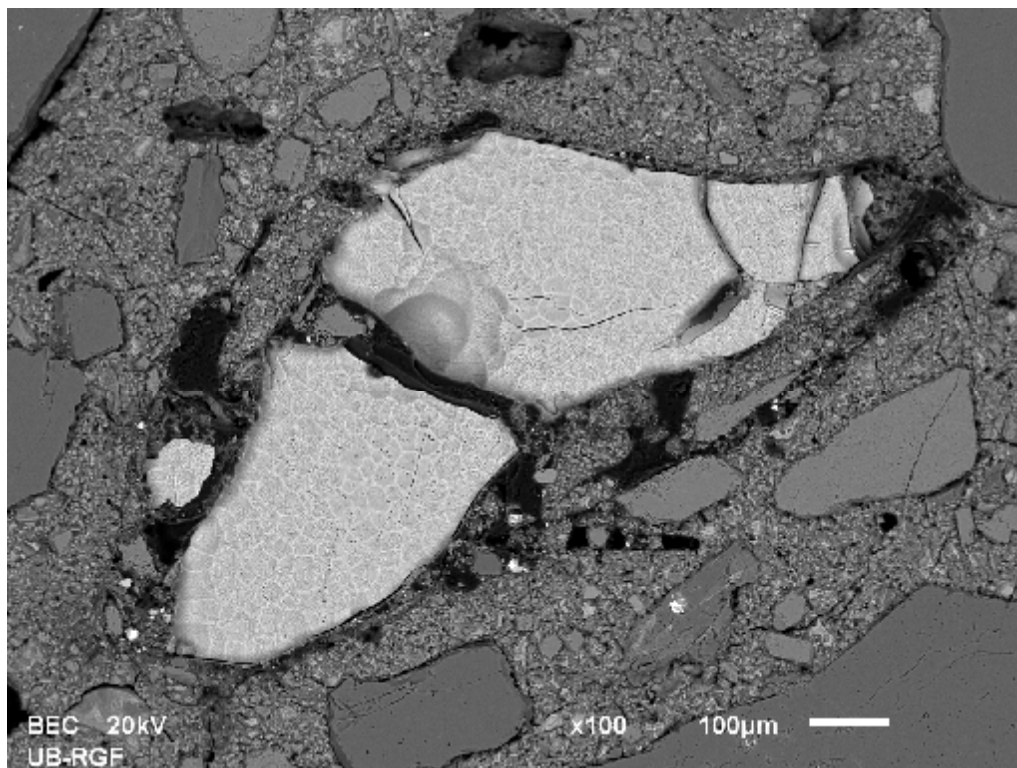
Slika P.14 Pregledna slika uzorka betona S20



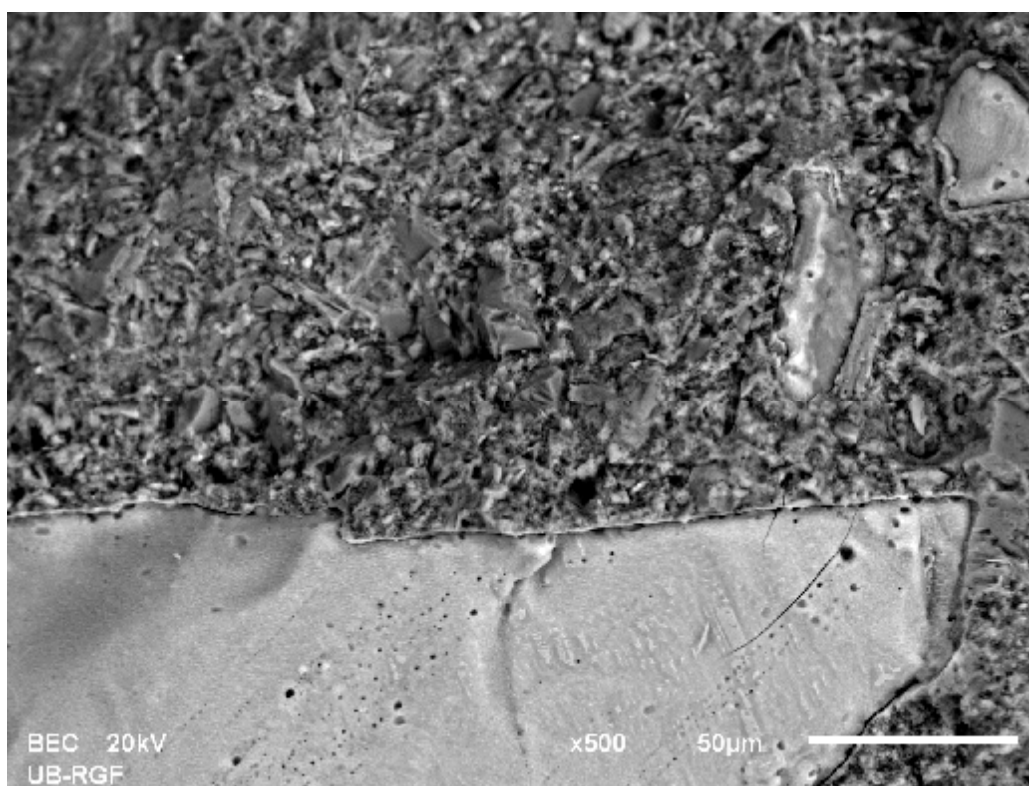
Slika P.15 ITZ zrna agregata kod uzorka betona S20



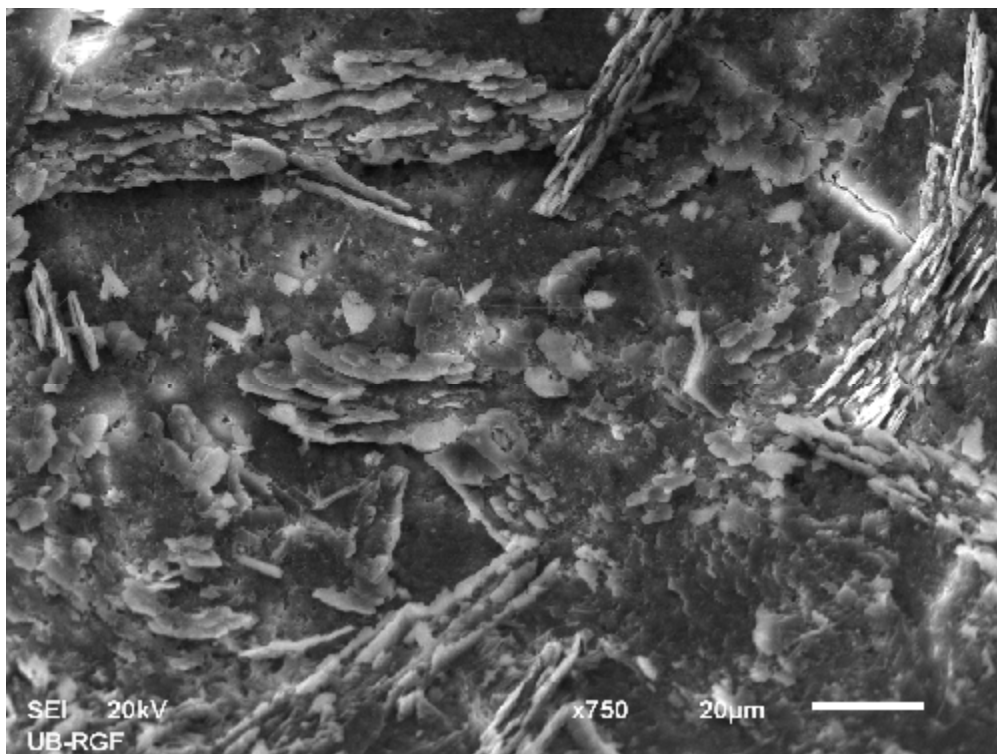
Slika P.16 Karakteristične pozicije EDS analiza u matrici SCC sa prašenim sumporom



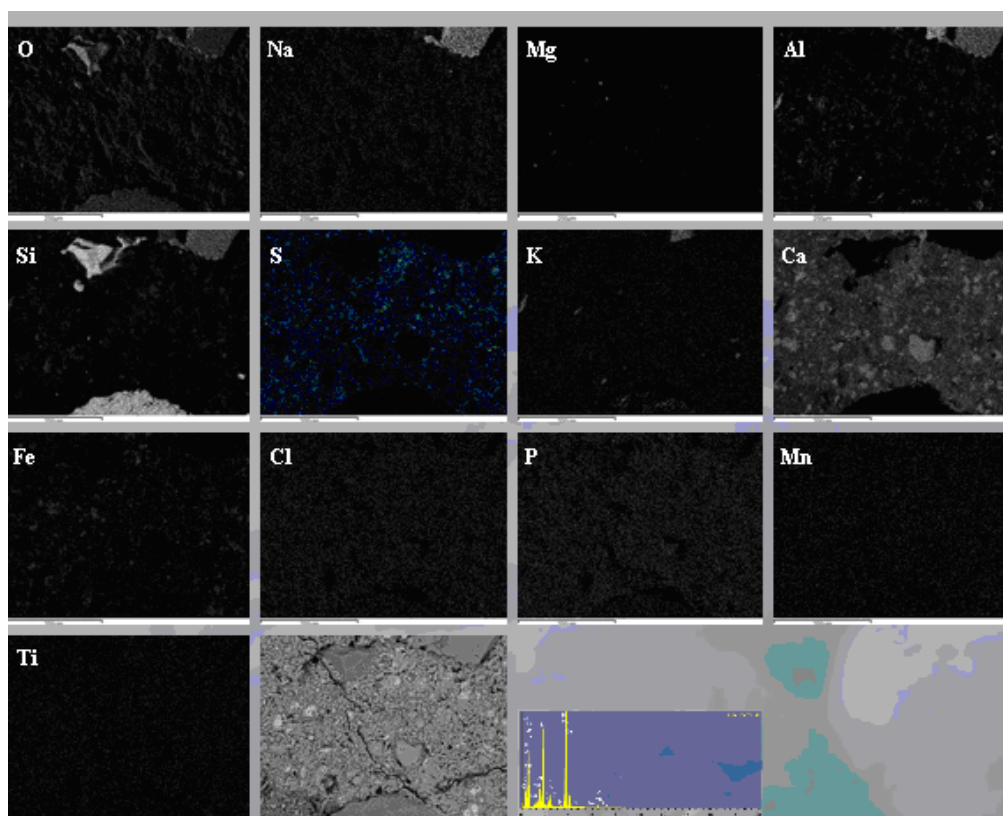
Slika P.17 Zrno sumpora u uzorku SCC sa spraešenim sumporom



Slika P.18 Izgled prelazne zone zrna sumpora na prelomljenom uzorku



Slika P.19 Mesto unutar šupljine zaostalog vazduha sa koncentrisanim CH kristalima i kristalima etringita



Slika P.20 Rezultat mapiranja na jednom mestu uzorka SCC S20

P.4 Rezultati EDS analiza uzoraka

Project: Betoni (**uz sliku P.1**)
 Owner: INCA
 Site: Site of Interest 1-1 (100x)

Sample: E1
 Type: Default
 ID:

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

All results in weight%

Spectrum	In stats.	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe	O	Total
Spectrum 1	Yes	0.00	0.00	46.74	0.00	0.00	0.00	53.26	100.00
Spectrum 2	Yes	18.44	2.82	25.44	1.60	0.62	4.56	46.51	100.00
Spectrum 3	Yes	0.46	0.00	0.00	70.92	0.00	0.00	28.61	100.00
Spectrum 4	Yes	24.12	0.00	0.55	42.05	0.00	0.00	33.28	100.00
Mean		10.75	0.71	18.18	28.64	0.15	1.14	40.42	100.00
Std. deviation		12.37	1.41	22.43	34.25	0.31	2.28	11.43	
Max.		24.12	2.82	46.74	70.92	0.62	4.56	53.26	
Min.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.61	

Project: Betoni (**uz sliku P.8**)
 Owner: INCA
 Site: Site of Interest 3-1 (200x)

Sample: E1
 Type: Default
 ID:

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

All results in weight%

Spectrum	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	O
Spec. 1	1.02	1.99	4.41	14.51	1.75	0.32	32.37	0.37	3.67	39.57
Spec. 2	Yes 0.99	1.21	4.10	8.28	0.73	0.53	46.81	0.00	2.28	35.08
Spec. 3	Yes 1.08	1.64	3.89	13.21	1.69	0.00	38.46	0.00	1.51	38.51
Spec. 4	Yes 1.67	3.59	3.85	20.96	1.08	0.60	24.22	0.00	1.66	42.37
Spec. 5	Yes 0.75	0.84	2.88	12.31	0.74	0.40	43.94	0.00	1.42	36.73
Spec. 6	Yes 1.20	1.76	2.85	11.47	0.78	0.00	40.36	0.00	4.96	36.60
Mean	1.12	1.84	3.66	13.46	1.13	0.31	37.69	0.06	2.58	38.14
Std. deviation	0.31	0.95	0.65	4.23	0.48	0.26	8.24	0.15	1.44	2.60
Max.	1.67	3.59	4.41	20.96	1.75	0.60	46.81	0.37	4.96	42.37
Min.	0.75	0.84	2.85	8.28	0.73	0.00	24.22	0.00	1.42	35.08

Project: Betoni (**uz sliku P.10**)
 Owner: INCA
 Site: Site of Interest 4-1 (100x)

Sample: RAC 100
 Type: Default
 ID:

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

All results in weight%

Spectrum	In stats.	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	O	Total
Spectrum 1	Yes	0.00	1.82	10.45	17.31	0.00	0.65	27.49	42.28	100.00
Spectrum 2	Yes	0.00	0.00	0.00	46.66	0.00	0.13	0.00	53.21	100.00
Spectrum 3	Yes	0.00	0.00	0.00	46.74	0.00	0.00	0.00	53.26	100.00
Spectrum 4	Yes	0.50	4.47	10.06	19.33	1.61	1.07	19.68	43.29	100.00
Spectrum 5	Yes	0.00	1.71	0.00	0.00	0.00	69.44	0.00	28.85	100.00
Spectrum 6	Yes	0.00	0.57	0.00	0.37	0.00	70.23	0.00	28.83	100.00
Spectrum 7	Yes	0.00	0.49	0.00	0.46	0.00	70.18	0.00	28.87	100.00
Spectrum 8	Yes	8.16	0.00	9.91	32.47	0.14	0.47	0.00	48.86	100.00
Mean		1.08	1.13	3.80	20.42	0.22	26.52	5.90	40.93	100.00
Std. deviation		2.86	1.54	5.25	19.84	0.56	35.97	11.12	10.76	
Max.		8.16	4.47	10.45	46.74	1.61	70.23	27.49	53.26	
Min.		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.83	

Project: Betoni (**uz sliku P.12**)
 Owner: INCA
 Site: Site of Interest 2-2 (200x)

Sample: RAC 100
 Type: Default
 ID:

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

All results in weight%

Spectrum.	Total	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	O
Spec. 1	0.81	2.06	3.02	16.38	1.28	0.00	34.82	0.00	1.98	39.65	100.00
Spec. 2	0.76	3.69	2.88	20.23	1.00	0.32	27.28	0.00	2.16	41.68	100.00
Spec. 3	0.56	1.42	2.59	16.71	0.59	0.37	36.01	0.00	2.76	38.99	100.00
Spec. 4	0.72	1.91	4.53	16.65	0.88	1.03	32.15	0.00	2.28	39.85	100.00
Spec. 5	0.00	1.50	4.87	13.03	0.88	0.00	39.28	0.00	2.29	38.15	100.00
Spec. 6	0.57	2.45	6.82	14.52	1.17	0.41	30.23	0.36	3.43	40.04	100.00
Mean	0.57	2.17	4.12	16.25	0.97	0.35	33.30	0.06	2.49	39.72	100.00
Std. Dev.	0.30	0.84	1.62	2.43	0.24	0.38	4.30	0.15	0.53	1.18	
Max.	0.81	3.69	6.82	20.23	1.28	1.03	39.28	0.36	3.43	41.68	
Min.	0.00	1.42	2.59	13.03	0.59	0.00	27.28	0.00	1.98	38.15	

Project: Betoni (**uz sliku P.16**)
Owner: INCA
Site: Site of Interest 1-1 (500x)

Sample: S2
Type: Default
ID:

Processing option : All elements analysed (Normalised)

All results in weight%

Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Total
Spectrum 1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Spectrum 2	57.20	0.00	0.69	5.19	8.78	0.75	0.49	26.90	0.00	100.00
Spectrum 3	55.30	0.64	1.55	5.30	3.14	0.17	0.54	32.48	0.88	100.00
Spectrum 4	54.40	1.64	3.05	8.20	3.50	0.00	0.00	27.51	1.70	100.00
Spectrum 5	54.31	0.00	0.00	45.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Mean	44.24	0.46	1.06	12.88	23.08	0.18	0.20	17.38	0.51	100.00
Std. deviation	24.76	0.72	1.28	18.58	43.11	0.33	0.28	16.01	0.76	
Max.	57.20	1.64	3.05	45.69	100.00	0.75	0.54	32.48	1.70	
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

BIOGRAFIJA AUTORA

Aleksandar Savić, dipl. građ. inž. rođen je 25.04.1978. godine, u Beogradu. Osnovnu školu je završio 1993. godine i kao nosilac Vukove diplome upisao srednju školu (Peta beogradska gimnazija – prirodnomatematički smer) koju je završio 1997. godine sa odličnim uspehom. Studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu započeo je u školskoj 1997/98. godini. Kao demonstrator na predmetu Građevinski materijali aktivno je učestvovao u pripremi i izvođenju vežbanja od školske 2003/2004. godine. Za zapažene rezultate tokom studija nagrađivan je od strane Građevinskog fakulteta 1999. godine, kao i Nagradom ambasade kraljevine Norveške, 2002. godine.

Aleksandar Savić je diplomirao 15.12.2004. godine na Odseku za konstrukcije sa prosečnom ocenom 8,70. Diplomski rad na temu "Idejni projekat lučnog mosta sa projektom samozbijajućeg betona za gornji stroj konstrukcije", odbranio je na Katedri za materijale i konstrukcije sa ocenom 10 (deset).

Od septembra 2005. godine, do juna 2006. godine služio je vojni rok u Službi nadzora Sektora za nadzor i investicije Beogradskog vodovoda i kanalizacije. Nakon služenja vojnog roka, radio je na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu kao asistent-pripravnik, a od januara 2013. kao asistent-student doktorskih studija.

Školske 2007/08. godine Aleksandar Savić upisao je doktorske studije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Građevinarstvo, i do kraja kalendarske 2009. godine položio sve ispite na doktorskim studijama sa prosečnom ocenom 10. Izradu doktorske disertacije sa temom "Istraživanje svojstava svežeg i očvrslog samozbijajućeg betona sa mineralnim dodacima na bazi industrijskih nusprodukata" prijavio je 08.11.2011. godine, a Nastavno-naučno veće Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu odobrilo je izradu predmetne disertacije 21. marta 2012. godine.

U okviru Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a pre svega u okviru Instituta za materijale i konstrukcije (IMK), Aleksandar Savić je aktivno učestvovao i u

obavljanju brojnih zadataka iz saradnje sa privredom. Ovo se, u prvom redu, odnosi na laboratorijska ispitivanja velikog broja građevinskih materijala; na tom području delatnosti u potpunosti je ovladao metodologijom ne samo standardnih, već i metodologijom ispitivanja sa naučno-istraživačkim karakterom. Kao deo tima, sa kolegama iz instituta dao je svoj doprinos u izradi zapaženih projekata, ekspertiza, stručnih mišljenja i projekata sanacije raznih građevinskih konstrukcija. U okviru akreditovane Laboratorije za materijale, od 2011. godine angažovan je u svojstvu Odgovornog inženjera Laboratorije, a od 2014. i u svojstvu Lica odgovornog za kvalitet.

U dosadašnjoj praksi, kandidat je imao više od 20 stručnih radova, uglavnom iz oblasti ispitivanja građevinskih materijala, ispitivanja i sanacije konstrukcija, kao i tehnologije betona. Kandidat poseduje projektantsku licencu broj 310 N748 09 i diplomu internog proveravača br. QEI K-01 1449.

Kandidat je kao koautor do sada publikovao više od 70 naučnih radova (od čega dva u časopisima sa SCI liste) vezanih za širu problematiku građevinskih materijala i tehnologije betona u okviru naučnih i stručnih časopisa, odnosno na domaćim i međunarodnim skupovima. Najvećim delom, ovi radovi predstavljaju rezultat realizacije brojnih i veoma raznovrsnih naučno-istraživačkih zadataka obavljanih u okviru aktivnosti Instituta za materijale i konstrukcije, odnosno tokom učešća u projektima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Do sada je učestvovao u četiri naučno-istraživačka i tehnološka projekta Ministarstva.

Kandidat koristi opšte i uže specijalizovane računarske aplikacije. Posедуje aktivno znanje engleskog jezika i služi se ruskim jezikom.

Aleksandar Savić je oženjen i otac jednog deteta.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Александар Савић

број уписа 901/07

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Истраживање својстава свежег и очврслог самозбијајућег бетона

са минералним додацима на бази индустријских нуспродуката

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 17.01.2015.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора _____ Александар Савић _____

Број индекса _____ 901/07 _____

Студијски програм _____ Грађевинарство _____

Наслов рада _____ Истраживање својстава свежег и очврслог самозбијајућег
бетона са минералним додацима на бази индустријских нуспродуката _____

Ментори Проф. др Драгица Јевтић, Проф. др Татјана Волков-Хусовић _____

Потписани/а _____ Александар Савић _____

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____ 17.01.2015. _____



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Истраживање својстава свежег и очврслог самозбијајућег бетона са минералним додацима на бази индустријских нуспродуката

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, ____17.01.2015.____



1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.