Metoda proračuna sastava SCC-a prema Su N., Hsu K. C. i Chai H. W. te ispitivanje utjecaja sastava betona na njegova svojstva

Radović, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:766739

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Radović

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Tomislav Radović

Metoda proračuna sastava SCC-a prema Su N., Hsu K.C. i Chai H.W. te ispitivanje utjecaja sastava betona na njegova svojstva

Diplomski rad

Split, 2015.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: TOMISLAV RADOVIĆ

BROJ INDEKSA: 451/2013

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali I

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Metoda proračuna sastava SCC-a prema Su N., Hsu K.C. i Chai H.W. te ispitivanje utjecaja sastava betona na njegova svojstva

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti postupak projektiranja i metode ispitivanja samozbijajućeg betona. Potrebno je proučiti metodu proračuna sastava SCC-a prema Su N., Hsu K.C. i Chai H.W.

Za eksperimentalni dio rada potrebno je projektirati i izraditi mješavine samozbijajućeg betona prema Su N., Hsu K.C. i Chai H.W. Proračun jedne recepture potrebno je napraviti prema CBI metodi te usporediti sa kriterijima EFNARC-a, kao i sa mješavinom dobivenom prema gore spomenutoj metodi. Na raspolaganju su dodaci od letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona te drobljeni agregat maksimalnog zrna od 16 i 22 mm. SCC betone je potrebno ispitati u svježem i očvrslom stanju. Metode mjerenja obradivosti u svježem stanju su: razastiranje, T500, vrijeme tečenja, J-ring, L-box te vizualna ocjena stabilnosti betona, a u očvrslom stanju se određuje dinamički modul elastičnosti i tlačna čvrstoća za starost od 7 i 28 dana. Eksperimentalno dobivene rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu, 10.03.2015.

Voditelj Diplomskog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

Prof.dr.sc. Ivica Boko

Metoda proračuna sastava SCC-a prema Su N., Hsu K.C. i Chai H.W. te ispitivanje utjecaja sastava betona na njegova svojstva

Sažetak:

Razvoj samozbijajućeg betona doveo je do povećanja njegove upotrebe, zamjenjujući tako sve više obični beton. Rad sadrži prikaze nekih od metoda za projektiranje recepture samozbijajućeg betona te analize rezultata provedenih ispitivanja na mješavinama sastavljenim prema tim metodama. U eksperimentalnom dijelu rada izrađeno je sedam mješavina čiji su sastavi određeni prema CBI metodi i metodi preporučenoj od Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai. Provedenim testovima u svježem i očvrslom stanju ispitan je utjecaj: upotrijebljenih metoda projektiranja sastava, lokalnih materijala, maksimalne veličine zrna agregata, sadržaja sitnog agregata i korištenih dodataka (letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona) na svojstva samozbijajućeg betona. Dobiveni rezultati su komentirani i međusobno uspoređeni.

Ključne riječi: samozbijajući beton, metode projektiranja sastava, svojstva SCC-a u svježem i očvrslom stanju,

Method of compositions calculation of SCC according to Su N., Hsu K.C. and Chai H.W. and examination of the impact of the concrete composition on its properties

Abstract:

Development of self-compacting concrete brought up to the increase of its usage, thus replacing more and more regular concrete. Work contains representations of some methods for designing recipes of self-compacting concrete and analyses of conducted tests results on mixtures composed according to this methods. In experimental part of work it was made seven mixtures which compositions were determined according to CBI method and method recommended by Nan Su, Kung-Chung Hsu and His-Wen Chai. With conducted tests in fresh and hardened state it was tested influece : used methods of mix desing, local material, the maximum size of aggregate, the content of fine aggregate and used additives (fly ash, silicant dust and filer of recycled concrete) on properties of self-compacting concrete. The results obtained are discussed and compared with each other.

Keywords: self-compacting concrete, methods of mix design, properties of SCC in fresh and hardened state

SADRŽAJ

1 UVOD 1

1.1 Općenito o samozbijajućem betonu 1

1.2 Razvoj samozbijajućeg betona kroz povijest 2

2 METODE ZA ISPITIVANJE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA 4

2.1 Metode za ispitivanje samozbijajućeg betona u svježem stanju 4

2.1.1 Metoda razastiranja (Slump-flow) 4

2.1.2 Ispitivanje V-lijevkom 6

2.1.3 Ispitivanje J-prstenom 8

2.1.4 Ispitivanje L-posudom 9

2.2 Ispitivanje samozbijajućeg betona u očvrsnulom stanju 11

2.2.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona 11

2.2.2 Ispitivanje betona mjerenjem brzine prolaska ultrazvučnih valova 12

3 METODE PROJEKTIRANJA SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA I DOSADAŠNJA ISPITIVANJA 14

3.1 Jednostavna metoda projektiranja mješavine samozbijajućeg betona (Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai) 14

3.1.1 Sažetak 14

3.1.2 Uvod 14

3.1.3 Postupak projektiranja mješavine predloženom metodom 15

3.1.3.1 Prvi korak: izračun sadržaja krupnog i sitnog agregata 15

3.1.3.2 Drugi korak: izračun sadržaja cementa 16

3.1.3.3 Treći korak: izračun sadržaja vode potrebne za cement 17

3.1.3.4 Četvrti korak: izračun sadržaja letećeg pepela (FA) i zgure (GGBS) 17

3.1.3.5 Peti korak: izračun sadržaja vode u mješavini potrebne za SCC 19

3.1.3.6 Šesti korak: izračun doziranja superplastifikatora(SP) 19

3.1.3.7 Sedmi korak: podešavanje sadržaja vode u mješavini za SCC 19

3.1.3.8 Osmi korak: pripraviti probnu mješavinu i provesti testove za ispitivanje svojstva SCC-a 19

3.1.3.9 Deveti korak: podešavanje omjera mješavine 20

3.1.4 Uzorci SCC-a proračunati predloženom metodom 20

3.1.5 Rezultati i analiza 21

3.1.6 Zaključci i prijedlozi 26
3.2 Projektiranje sastava samozbijajućeg betona koristeći Kinesku metodu (Su et al, Su and Miao) 27
3.2.1 Sažetak 27
3.2.2 Uvod 28
3.2.3 Teorija pakiranja 28
3.2.4 Ocjenjivanje 32
3.2.5 Ocjenjivanje betonske mješavine 34
3.2.6 Zaključak 38
3.3 Samozbijajući beton (SCC)-Usporedba metoda doziranja (B.F. Tutikian, M. Pacheco) 39
3.3.1 Sažetak 39
3.3.2 Uvod 39
3.3.3 Ciljevi istraživanja 41
3.3.4 Materijali i istraživački program 41
3.3.5 Pregled korištenih metoda doziranja 41
3.3.5.1 Metoda Nan Su et al 41
3.3.5.2 Repette-Melo metoda 42
3.3.5.3 Metoda Tutikian-Dal Molin 45
3.3.6 Testovi izvedeni u svježem stanju 47
3.3.7 Testovi izvedeni u očvrsnutom stanju 48
3.3.8 Korišteni materijali 48
3.3.8.1 Cement 48
3.3.8.2 Agregati 49
3.3.8.3 Dodatak superplastifikatora 49
3.3.8.4 Voda 49
3.3.9 Rezultati i rasprava 49
3.3.10 Rezultati testova u svježoj fazi 50
3.3.11 Usporedba svojstava betona u očvrsnutom stanju 50
3.3.11.1 Tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dan za isti jedinični tok 51
3.3.11.2 Troškovi mješavine za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dan 51
3.3.11.3 Modul elastičnost za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan 52
3.3.11.4 Širenje brzine ultrazvučnih valova za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan 53

3.3.11.5 Penetracija kloridnog iona za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan 54
3.3.12 Ne kvantitativni aspekti iskazani u izvršenju metoda doziranja 55
3.3.13 Finalni zaključak 56
3.4 CBI metoda 57
3.4.1 Određivanje minimalnog volumena paste 57
4 EKSPERIMENTALNI DIO RADA 61
4.1 Uvod u eksperimentalni dio 61
4.2 Korišteni materijali 62
4.2.1 Cement 63
4.2.2 Agregat (Klis-Kosa) 65
4.2.3 Superplastifikator 65
4.2.4 Silikatna prašina (MEYCO MS 610) 67
4.2.5 Filer od recikliranog betona 68
4.2.6 Leteći pepeo 70
4.3 Metode ispitivanja 71
4.4 Proračun sastava mješavina 71
4.4.1 Proračun sastava za prvu mješavinu SCC1 71
4.4.2 Proračun sastava za četvrtu mješavinu SCC4 75
4.4.3 Proračun sastava za sedmu mješavinu SCC7 78
4.5 Sastavi betonskih mješavina 83
4.6 Rezultati ispitivanja i analiza rezultata 85
4.6.1 Rezultati rasprostiranja slijeganjem 85
4.6.2 Rezultati ispitivanja V-lijevkom 91
4.6.3 Rezultati ispitivanja L-posudom 93
4.6.4 Rezultati ispitivanja J-prstenom 95
4.6.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona 99
4.6.6 Dinamički modul elastičnosti 101
5 ZAKLJUČAK 103
LITERATURA: 105

1 UVOD

1.1 Općenito o samozbijajućem betonu

Zbog relativno brze i jeftine gradnje beton je danas najviše korišteni građevinski materijal u svijetu. Beton je kompozitni građevinski materijal, koji se sastoji od agregata, cementa i vode, a često mu se zbog mnogih zahtijeva koje mora zadovoljiti dodaju i razni drugi dodatci. Kvaliteta betona u konstrukciji ovisi o svim korištenim materijalima pri njegovoj proizvodnji, pojedinim fazama u tehnološkom procesu proizvodnje (skladištenje komponenti, doziranje komponenti, miješanje, transport, ugradnja i njega betona) te na kraju o kontroli betona u svježem i očvrsnulom stanju. Današnji razvoj betona usmjeren je prema smanjenju troškova u proizvodnji betona, produljenju vijeka trajanja betonskih konstrukcija, smanjenju troškova održavanja betonskih konstrukcija tijekom vijeka trajanja te poboljšanju radnih uvjeta. Normalni beton nije mogao zadovoljiti sve zahtjeve u građevinarstvu, stoga su krenula istraživanja s ciljem dobivanja novih vrsta betona, jedan od takvih betona je i samozbijajući beton (eng. Self compacting concrete, SCC).

Samozbijajući beton se smatra jednim od najznačajnijih postignuća u tehnologiji betona u posljednjih nekoliko desetljeća. Za pretpostaviti je da će u budućnosti zamijeniti velik dio običnog betona koji je danas u upotrebi. Bez potrebe za vibriranjem i nabijanjem samozbijajući beton teče sam pod utjecajem vlastite težine ispunjavajući svako mjesto i svaki kut u oplati pritom zaobilazeći armaturu te na kraju zadržava horizontalnu završnu površinu bez segregacije i zarobljenih mjehurića zraka u betonu.

Sastav mješavine samozbijajućeg betona mora biti definiran tako da zadovolji brojne zahtjeve kao što su: poboljšana fluidnost, mogućnost samo-zbijanja, otpornost prema segregaciji te visoka čvrstoća i trajnost betona. Kako bi se odredio optimalni sastav za mješavinu samozbijajućeg betona potrebno je: odabrati kvalificirane materijale, izvršiti proračun sastava prema nekoj od metoda, provesti odgovarajuće testove u svježem i očvrsnulom stanju te na kraju na osnovu dobivenih rezultata izvršiti određene prilagodbe na sastavu. Pri projektiranju sastava samozbijajućeg betona osobito je važno postići optimalnu fluidnost i viskoznost betonske mješavine. Kako bi se postigla optimalna fluidnost i viskoznost betonske mješavine neophodna je uporaba superplastifikatora. Također je važan utjecaj i ostalih čimbenika kao što su: sadržaj vode, omjer vode i veziva, sadržaj cementa, vrsta i sadržaj dodataka, svojstva agregata te količina zraka u betonu.

U usporedbi s običnim betonom, kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer, povećan je udio paste te je povećan udio superplastifikatora , a prema potrebi može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoznosti. Preporučuje se uporaba najvećeg zrna D_{max} = 12 - 20 mm. Često se upotrebljavaju inertni i pucolanski, odnosno hidraulički dodaci. Dodaci za promjenu viskoznosti rabe se za smanjivanje utjecaja varijacije vlažnosti ili raspodjele zrna u ukupnom sastavu agregata, a beton je tada manje osjetljiv na male varijacije u omjeru sastojaka [6].

Zbog zahtjeva koje mora zadovoljiti prvenstveno u svježem stanju i korištenih sastojaka, proizvodnja samozbijajućeg betona je osjetljivija od proizvodnje normalnog betona, stoga se zahtjeva stalna kontrola svojstava i doziranja svih komponenti. Prednosti koje donosi primjena samozbijajućeg betona su: brža gradnja, zahtijeva manji broj kvalificiranih radnika, eliminacija buke od vibratora, manje oštećenje oplate, osiguranje dobrog stupnja zbijenosti na mjestima gdje je uporaba vibratora otežana. Samozbijajući beton je pogodan za: nove složene oblike betonskih konstrukcija, konstrukcije s gustom armaturom i konstrukcije s brojnim drugim preprekama. Unatoč svim prikazanim uštedama i prednostima, ukupna cijena gradnje samozbijajućim betonom uglavnom nije smanjena zbog velikog udjela skupih vezivnih materijala i dodataka. Smanjenje cijene je za sada dokazno samo pri proizvodnji velikih količina betona uz dobru organizaciju. Samozbijajući beton se smatrao zbog zahtjeva za visokim udjelom cementa štetnim po okoliš. Međutim u posljednje vrijeme došlo je do poboljšanja zbog upotrebe većih količina filer materijala kao što su: zgura, leteći pepeo, silikatna prašina, reciklirani betoni metakaolin. Zbog svojih svojstava samozbijajući beton je pogodan za ugradnju pumpanjem.

1.2 Razvoj samozbijajućeg betona kroz povijest

Smatra se da je samozbijajući beton razvijen u Japanu u kasnim 1980-ima, zbog uočenih problema trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Na mnogim uzorcima betona izvađenim iz konstrukcije uočene su pojave segregacije na makro razini, a na mikrorazini potpuna dezintegracija strukture. Ispočetka se smatralo da će postupak izrade samozbijajućih betona biti jednostavan jer se beton tekuće konzistencije već upotrebljavao za betoniranje pod vodom. No, takva vrsta betona nije se mogla primijeniti na zraku iz sljedećih razloga: nije bilo moguće eliminirati zahvaćene mjehuriće zraka zbog velike viskoznosti i nije se mogla postići željena zbijenost u području s gusto složenom armaturom. Krajem 90-tih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi [6].

Jedna od prvih metoda za projektiranje sastava samozbijajućeg betona nastala je na temelju opsežnih istraživanja provedenih na Sveučilištu u Tokiju, a razvili su je Okamura i Ozawa. Metoda je ograničena na uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata (C_2S) [6]. Svoju metodu zasnivali su na nekoliko principa:

- Volumen krupnog agregata je fiksiran i u betonu iznosi 50 %
- Sitne čestice agregata su fiksirane i čine 40 % volumen morta
- Sve čestice agregata veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom
- Vodocementni omjer izražen u volumenu iznosi od 0,9 do 1,0 ovisno o svojstvima cementa
- Količina superplastifikatora i konačni vodocementni omjer su određeni tako da osiguravaju samozbijanje
- Vodocementni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem morta pomoću V-lijevaka [5]

Postupak projektiranja kreće od ispitivanja na pasti gdje se ispituje kompatibilnost superplastifikatora, cementa, finih čestica i ostalih dodataka [5]. Na temelju ove metode nastale su mnogobrojne druge modificirane metode koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala. Edamatsu, Nishida i Ouchi razvili su metodu kojom se može odrediti potreban udio sitnog agregata u mortu za sitni agregat različitog oblika zrna i granulometrijskog sastava. Također su za ispitivanje upotrijebili V-lijevak, za koji se smatra da daje pouzdanije rezultate od ispitivanja s pomoću U-kalupa. Zatim je Ouchi predložio još racionalniju metodu određivanja zadovoljavajuće kombinacije vodovezivnog omjera i udjela superplastifikatora. Na Sveučilištu u Delftu provedena su istraživanja samozbijajućeg betona zasnovana na modelu Ozawe i Okamure, ali s nizozemskim materijalima. Na University College London također su provedena opsežna istraživanja samozbijajućeg betona, a glavne su se razlike odnosile na povećani udio pijeska u mortu i mogućnost variranja većeg raspona udjela agregata. Razvijene su i druge metode projektiranja sastava, kao što su CBI metoda, JSCE metoda, LCPC pristup [6].

Ključni sastojak za izradu samozbijajućih betona jest nova generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja [6].

Za primjenu samozbijajućih betona velik je napredak napravljen donošenjem Europskih smjernica koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju [6].

Osnovni zahtjevi za samozbijajući beton u skladu s Europskim smjernicama jesu:

- Razred tlačne čvrstoće (HRN EN 206-1)
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava
  - Maksimalni vodocementni omjer
  - Maksimalna količina cementa
- Najveća veličina zrna agregata, D_{max}

Dodatni su specifični zahtjevi samozbijajućeg betona:

- Vrijednost T_{500} (razastiranje slijeganjem) ili V-lijevak
- Ispitivanje L kutijom
- Otpornosti segregaciji
- Temperatura svježeg betona, ako se razlikuje od HRN EN 206-1
- Drugi tehnički zahtjevi [6].

2 METODE ZA ISPITIVANJE SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

2.1 Metode za ispitivanje samozbijajućeg betona u svježem stanju

Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju ispituju se u laboratorijskim uvjetima prema nizu europskih normi prihvaćenih u Hrvatskoj HRN EN 12350 8-12. Ispitivanjem svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju potrebno je provjeriti dali mješavina ispunjava osnovna svojstva kao što su: fluidnost, sposobnost popunjavanja, sposobnost zaobilaženja prepreka i otpornost prema segregaciji [9,10].

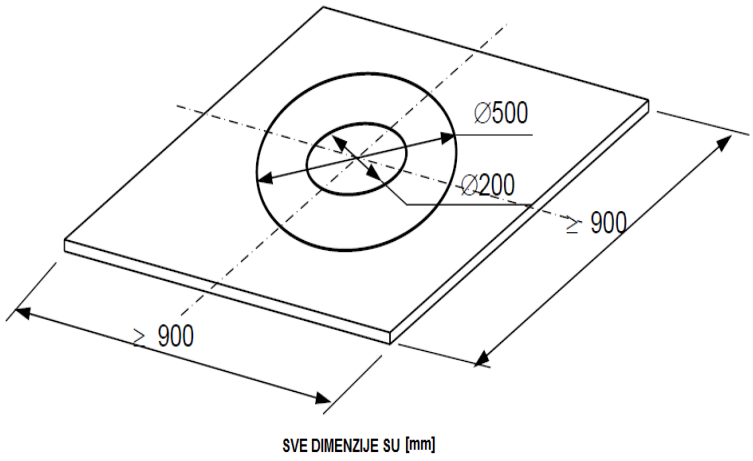
2.1.1 Metoda razastiranja (Slump-flow)

Metoda razastiranja slijeganjem provodi se prema normi HRN EN 12350-8. Potrebno je izmjeriti veličinu razastiranja i vrijeme razastiranja (T500). Ovom metodom utvrđuje se fluidnost i samozbijanje betona, odnosno njegova deformabilnost. Test je prikladan za beton s agregatom normalne težine i gustoće te s maksimalnim zrnom agregata od 40 mm. Potrebna oprema je: osnovna ploča (90x90 cm, minimalne debljine 2 cm s dvije kružnice opisane oko

centra ploče jedna promjera 20 cm i druga promjera 50 cm), kalup oblika krnjeg stošca (gornji promjer 10 cm, donji promjer 20 cm, visine 30 cm), mjerno ravnalo i štoperica [9,10].

Postupak ispitivanja

Osnovna ploča se postavi na horizontalnu i stabilnu površinu te se navlaži sa spužvom. Zatim se krnji stožac koji je prethodno navlažen s unutarnje strane postavi u centar ploče. Krnji stožac se puni sa svježim betonom bez mehaničkog zbijanja i vibriranja te se poravna gornja površina betona. Nakon počeka od otprilike 30 sekundi potrebno je podignuti stožac vertikalno na način da se svježi beton rasprostire po horizontalnoj ploči u svim smjerovima. Vrijeme razastiranja (T500) počinje se mjeriti od trenutka kad stožac otpust beton i završava kad beton dosegne krug promjera 500 mm. Test završava kad se beton prestane širiti tako da se izmjeri najduži promjer razasutog betona d_1 te promjer okomito na njega d_2. Što je razastiranje (SF) svježe betonske mješavine veće to je njena sposobnost popunjavanja bolja. Samozbijajući beton zahtijeva razastiranje od oko 700 mm. Smjesa bi morala biti stabilna bez segregacije krupnog agregata u sredini kruga i odvajanja vode na rubovima kruga [9,10].



Slika 2.1 Osnovna ploča [5]

Rasprostiranje-slijeganjem SF se definira kao srednja vrijednost dva izmjerena promjera d_1 i d_2 zaokružena na 10 mm, prikazano sljedećom formulom:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Gdje je:

SF - rasprostiranje slijeganjem (mm)

d_1 - najveći promjer razasutog betona (mm)

d_2 - promjer razasutog betona okomito u odnosu na d_1 (mm) [9,10]

Tablica 2.1 Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja [4]

Razred	Tečenje betona (mm)	Primjena
SF1	550-650	Nearmirani i lagano armirani elementi. Elementi koji nisu velikih dimenzija (širine i dužine) i ne zahtijevaju veliko tečenje betona
SF2	660-750	Prikladan za većinu radova (stupovi, zidovi)
SF3	760-850	Za elemente s gusto postavljenom armaturom, složenog oblika

Vrijeme razastiranja T500 je pokazatelj viskoznosti betonske mješavine. Obično je ovo vrijeme između 2-10 sekunde te ovisi i o primjeni, kao što se vidi u tablici 2.2 [9,10].

Tablica 2.2 Razredi viskoznosti samozbijajućeg betona [4]

Razred	t_{500} (s)	Primjena
VS1	<2,0	Elementi s gusto postavljenom armaturom, horizontalni elementi, elementi složenog poprečnog presjeka i oblika (velikih širina i dužina)
VS2	≥2,0	Prikladan za većinu radova (zidovi, stupovi)

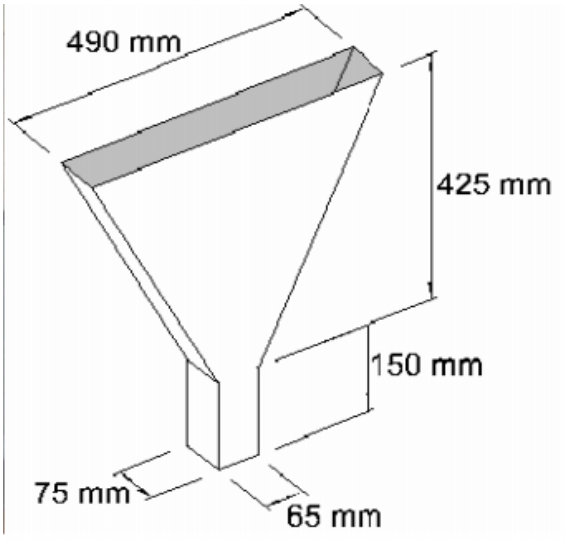
2.1.2 Ispitivanje V-lijevkom

Ispitivanje V-lijevkom provodi se prema normi HRN EN 12350-9. V-lijevak test se korist za određivanje viskoznosti i svojstava popunjavanja samozbijajućeg betona [9,10].

Postupak

V-lijevak je potrebno očistiti te navlažiti sa unutarnje strane uključujući i vrata. Lijevak je potrebno postaviti vertikalno sa horizontalnim gornjim otvorom. Zatvore se vrata na dnu

kalupa te se postavi kanta za primanje uzorka svježeg betona prilikom istjecanja. Svježi beton ulijeva se u lijevak bez ikakvog mehaničkog zbijanja te se nakraju poravna njegova gornja površina. Nakon počeka od desetak sekundi vrata se naglo otvore uz istodobno uključenje štoperice. Vrijeme na štoperici se zaustavlja u trenutku kad sva mješavina izađe iz lijevka to jest čim se ugleda otvor vertikalno kroz lijevak. Izmjereno vrijeme se definira kao vrijeme istjecanja betona. Nakon svakog testiranja instrument je potrebno očistiti [9,10].



Slika 2.2 Izgled i unutarnje dimenzije V-lijevka [4]

Tablica 2.3 Razredi viskoznosti samozbijajućeg betona (V-lijevak) [4]

Razred	Vrijeme tečenja [s]
VF1	<9,0
VF2	9,0 - 25,0

Rezultati

Vrijeme istjecanja iz V-lijevka trebalo bi iznositi od 2 do 12 sekundi. Kraće vrijeme istjecanja ukazuje na bolju fluidnost. Duže vrijeme istjecanja ukazuje na mogućnost „blokiranja“ u kontaktu s armaturom. Indeks viskoznost računa se prema formuli: $R_c = 10/t$ gdje je t vrijeme istjecanja kroz V-lijevak. Za manju vrijednost R_c viskoznost uzorka je veća [9, 10].

2.1.3 Ispitivanje J-prstenom

Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12350-12. Mogu se odrediti tri parametra: razastiranje, vrijeme razastiranja T_{500j} i stopa blokiranja. Ovim testom se utvrđuje svojstvo popunjavanja i prolaznosti samozbijajućeg betona. Može se koristiti i za utvrđivanje otpornosti prema segregaciji usporedbom dva uzorka. Oprema koja je potrebna kod ispitivanja J-prstenom je: osnovna ploča, J-prsten s uskim razmacima, kalup oblika krnjeg stošca (gornji promjer 10 cm, donji promjer 20 cm, visina 30 cm), ravna šipka duljine 40 mm, mjerno ravnalo i štoperica [9,10].

Postupak

Osnovnu ploču je potrebno postaviti na ravnu i stabilnu podlogu. Na navlaženu osnovnu ploču u njegov središnji krug od 200 mm postavi se krnji stožac koji je navlažen s unutarnje strane. Postavi se J-prsten oko krnjeg stošca. Nakon toga krnji stožac se puni samozbijajućim betonom bez ikakvog vibriranja ili mehaničkog zbijanja te se poravna gornja površina betona. Ako je dio betona pao na ploču prilikom punjenja potrebno ga je ukloniti prije podizanja stošca. Nakon otprilike 30 sekundi podigne se krnji stožac te se uključi štoperica. Štoperica se zaustavlja u trenutku kad beton dosegne krug od 500 mm. Izmjereno vrijeme se označava sa T_{500j} i izražava u sekundama s točnošću od desetinke sekunde. Nakon što beton prestane teći postavlja se ravna šipka na J-prsten te se mjeri relativna visinska razlika između donjeg dijela šipke i površine betona u sredini Δh_0 i na četiri mjesta van prstena u okomitim smjerovima: Δh_{x1}, Δh_{x2}, Δh_{y3}, Δh_{y4}. Izmjeri se najveći promjer razastiranja i promjer okomito na njega te se provjeri segregacija betona [9,10].



Slika 2.3 Oprema za ispitivanje J-prstenom

Rasprostiranje J-prstena SF_j se definira kao srednja vrijednost dva izmjerena promjera d_1 i d_2 zaokružena na 10 mm, prikazano sljedećom formulom:

$$SF_j = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Gdje je:

SF_j - rasprostiranje (mm)

d_1- najveći promjer razasutog betona (mm)

d_2 - promjer razasutog betona okomito u odnosu na d_1 (mm)

Stopa blokiranja izračuna se pomoću formule:

$$PJ = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y_1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0$$

Što je razlika između mjerene visine betona unutar i van prstena veća to beton ima slabije svojstvo zaobilaženja prepreka. Kako bi beton zadovoljio sposobnost popunjavanja, fluidnost i zaobilaženje prepreka potrebno je vrijednosti SF_j i PJ dovesti u ovisnost [9,10].

Tablica 2.4 Razredi ispitivanja J-prstenom [4]

Razred	Uvjet
PJ1	PJ≤10 12 šipki
PJ2	PJ≤10 16 šipki

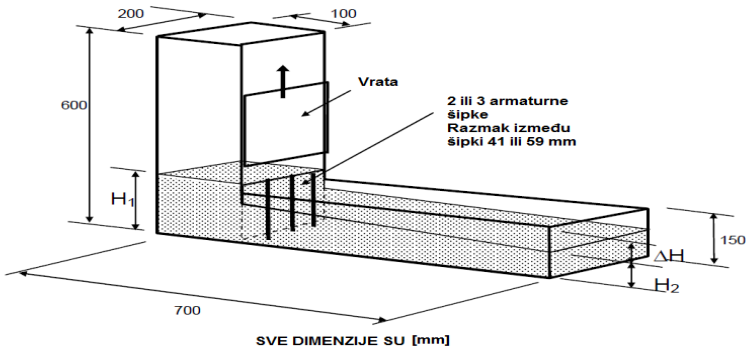
2.1.4 Ispitivanje L-posudom

Ispitivanje L-posudom se provodi prema normi HRN EN 12350-10. Ispituje se sposobnost prolaska svježeg betona kroz uske prostore između šipki armature. Ovisno o preprekama

postoje dva tipa L-posuda: jedna sa tri glatke šipke i druga sa dvije glatke šipke profila 12 mm. Šipke su međusobno razmaknute 41 mm odnosno 59 mm. Posuda oblika slova L najčešće je izrađena od čelika [9,10].

Postupak

L-posuda se postavi na horizontalnu stabilnu podlogu. Navlaže se sve površine koje će biti u kontaktu s betonom. Popuni se vertikalni dio uređaja sa svježim betonom. Otprilike 60 sekundi nakon što je vertikalni dio ispunjen betonom podignu se klizna vrata koja odvajaju vertikalni dio od horizontalnog što dovodi do istjecanja betona u horizontalni dio uređaja. Pričeka se dok se beton ne zaustavi prilikom tečenja iz vertikalnog dijela u horizontalni. Zatim se izmjeri visinska razlika na kraju horizontalnog dijela posude i u vertikalnom dijelu posude između površine betona i gornjeg dijela posude. Mjerenje se vrši na ukupno tri mjesta u vertikalnom dijelu posude i tri mjesta na kraju horizontalnog dijela posude, dva na krajevima i jedan u sredini te se izračuna njihova srednja vrijednost. Zatim se te srednje vrijednosti oduzmu od visine posude na kraju horizontalnog dijela i visine vertikalnog dijela posude te se dobiju vrijednosti H1 i H2 [9,10].



Slika 2.4 Dimenzije L-posude [5]

Sposobnost prolaska betona odredi se po formuli:

$$p_A = \frac{H_2}{H_1} \ ,$$

Gdje je:

p_A - omjer sposobnosti prolaska

H1 - srednja dubina betona u vertikalnom dijelu posude (mm)

H2 - srednja dubina betona na kraju horizontalnog dijela posude (mm) [9, 10]

Tablica 2.5 Razredi ispitivanja L-posudom [5]

RAZRED	Uvjet	Primjena
PA1	H2/H1≥0,80 2 šipke	Razmak 80- 100 mm
PA2	H2/H1≥0,80 3 šipke	Razmak 60- 80 mm

2.2 Ispitivanje samozbijajućeg betona u očvrsnulom stanju

2.2.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Za ispitivanje je potrebna preša podešena u skladu sa normom HRN EN 123390-4. Ispitivanje se provodi u skladu sa normom HRN EN 123390-3. Uzorci se izrađuju i njeguju do ispitivanja prema normi HRN EN 123390-2. Dimenzije uzoraka se određuju prema normi HRN EN 123390-1, mogu biti oblika kocke ili valjka [9,10].

Postupak

Prije ispitivanja potrebno je suhom krpom ukloniti vodu sa površine uzorka. Kako bi opterećenje koje će se nanositi bilo ujednačeno uzorci se postavljaju u sredinu preše. Opterećenje na uzorak se mora nanositi jednoliko i mora biti između 0,2 MPa/s i 1,0 MPa/s. Na kraju se očita maksimalno opterećenje pri kojem je došlo do sloma.

Tlačna čvrstoća betona se dobije iz izraza:

$$f_C = \frac{F}{A_c}\left[N/mm^2\right],$$

Gdje je:

f_c - tlačna čvrstoća betona (N/mm^2)

F - maksimalno opterećenje pri slomu (N)

A_c - površina uzorka (mm^2) [9, 10]

2.2.2 Ispitivanje betona mjerenjem brzine prolaska ultrazvučnih valova

Ispitivanje se provodi u skladu sa normom HRN EN 12504-4, nakon njege uzorka u vlažnoj komori. Određivanjem brzine prolaska ultrazvuka utvrđuje se kvaliteta betona, prati očvršćivanje betona te određuje dinamički modul elastičnosti. Kad se brzina ultrazvuka koristi za određivanje tlačne čvrstoće betona, mjerenje vremena prolaza ultrazvuka izvodi se samo direktnim prolazom impulsa. Mjerenje brzine omogućuje kalibracijska šipka.

Postupak

Površine uzorka betona na koje se postavljaju pretvarači moraju biti ravne, čiste i premazane gelom za bolji akustični spoj između betona i pretvarača. Uređaj zahtijeva unošenje podataka o duljini uzorka. Generator uređaja izaziva impuls napona 1000 V. Impuls pobudi titranje pretvarača u sondi. Rezonantna frekvencija titranja iznosi 54 kHz. Longitudinalno titranje se unosi u uzorak prislanjanjem sonde na sloj masti nanesen na uzorak. Poslije prolaska kroz uzorak betona, u drugoj sondi prijamniku longitudinalno titranje se pretvara u električni impuls. Vremenski interval od trenutka kada impuls napusti sondu odašiljač pa do trenutka prijema impulsa u sondu prijemnik predstavlja vrijeme prolaska impulsa.



Slika 2.5 Ultrazvučni uređaj CONTROLS UPV E48

Tablica 2.6 Razredi kvalitete betona prema brzini prolaska ultrazvučnih valova [4]

Brzina ultrazvučnog vala [m/s]	**Kvaliteta betona**
<1600	Vrlo slab
1600-2000	Slab
2000-2800	Zadovoljavajući
2800-3600	Dobar
3600-4400	Vrlo kvalitetan

Brzina širenja ultrazvučnih valova računa se prema izrazu:

$$v = \frac{L}{T}$$

Gdje je:

v – brzina ultrazvučnog vala (m/s)

L – duljina puta (m)

T – vrijeme potrebno da ultrazvučni val prijeđe put duljine L (s)

Dinamički modul elastičnosti računa se prema sljedećoj formuli:

$$E_{\dim} = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1+\mu) \cdot (1-2 \cdot \mu)}{(1-\mu)} [GPa]$$

Gdje je:

v - brzina ultrazvučnog vala (m/s)

ρ - gustoća betona (kg/m^3)

μ - poissonov koeficijent (μ=0.2) [9,10]

3 METODE PROJEKTIRANJA SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA I DOSADAŠNJA ISPITIVANJA

3.1 Jednostavna metoda projektiranja mješavine samozbijajućeg betona (Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai)

3.1.1 Sažetak

U ovom radu predložena je nova metoda sastavljanja mješavine za samozbijajući beton (SCC). Prvo se određuje iznos potrebnog sitnog i krupnog agregata, a zatim paste (veziva) koja ispunjava praznine između agregata tako osiguravajući fluidnost, sposobnost samozbijanja i druga svojstva samozbijajućeg betona. Iznos agregata (pojedinih frakcija agregata), veziva, vode za miješanje, kao i tip i doziranje superplastifikatora najviše utječu na svojstva samozbijajućeg betona. Provedeni testovi u svježem i očvrsnulom stanju pokazali su da predložena metoda može proizvest samozbijajući beton visoke kvalitete. U usporedbi s metodom Japanese Ready-Mixed Concrete Association (JRMCA) ova metoda je: jednostavnija, lakša za izvedbu, zahtjeva manje vremena, zahtjeva manji iznos veziva i manje košta [1].

3.1.2 Uvod

Smozbijajući beton (SCC) je nova vrsta betona visokih svojstava (HPC) s dobrom deformabilnošću i otpornosti prema segregaciji. HPC koji je razvijen u Sjevernoj Americi i Europi posjeduje visoku tlačnu čvrstoću, trajnost betona i fluidnost koja omogućuje lakšu ugradnju, ali ne može teći sam kako bi popunio svaki kut kalupa i sve praznine među armaturom, stoga zahtjeva vibraciju i zbijanje u procesu ugradnje. Usporedno SCC ima povoljnije karakteristike kao što je visoka fluidnost, otpornost prema segregaciji i mogućnost samozbijanja bez ikakve potrebe za vibriranjem tijekom procesa ugradnje. Sve te povoljne karakteristike smanjuju mogućnost stvaranja lokalnih segregacijskih gnijezda u betonu. Okamura metoda projektiranja mješavine SCC-a koja je predložena 1993. imala je za cilj prvo provesti ispitivanje na pasti i mortu kako bi ispitali svojstva i kompatibilnost superplasifikatora,cementa,sitnog agregata i pucolanskih materijala, zatim slijedi ispitivanje SCC-a. Glavna prednost ove metode je da se time izbjegava ponavljanje iste vrste kontrole kvalitete na betonu, što štedi vrijeme i rad. Nedostatak Okamura metode je taj da zahtjeva kontrolu kvalitete paste i morta za miješanje SCC-a koja je prekomplicirana za praktično izvršenje pa mnogi proizvođači betona nemaju potrebne sposobnosti za provođenje takvih testova. “Standardna metoda miješanog dizajna SCC-a“ predložena od JRMCA je

pojednostavljena verzija Okamura metode. Ova metoda može biti upotrijebljena za proizvodnju SCC-a s velikim udjelom materijala u prahu i vodom i vezivom u omjeru od< 0,30.

Kako bi se provjerilo dali SCC pripremljen prema predloženoj metodi u svježem stanju ispunjava zahtjeve određene od strane Japanskog društva inženjera građevinarstva (JSCE) proveden je niz laboratorijskih testova: metoda razastiranja (Slump-flow), V-lijevak, U-test, L-box test. Testovi su napravljeni koristeći lokalne materijale s Tajvana. U nastavku je dat detaljan opis proračuna sastava mješavine predloženom metodom i analiza rezultata provedenih testova [1].

3.1.3 Postupak projektiranja mješavine predloženom metodom

Osnova razmatranja predložene metode je popuniti pastom praznine između agregata koji je slobodno nasut. Omjer volumena agregata je oko 52 – 58% to znači da je 42 – 48% praznina u slobodno nasutom agregatu prema ASTM C29. Čvrstoća SCC-a je dana vezivanjem agregata s pastom u očvrsnutom stanju, dok je obradivost SCC-a pružena s vezivanjem paste u svježem stanju. Sadržaji krupnog i sitnog agregata, veziva, vode i superplastifikatora najviše utječu na svojstva SCC-a. Prema predloženoj metodi sve što treba napravit je odabrati kvalificirane materijale, izvršiti izračun, provesti odgovarajuće testove, učiniti neke prilagodbe i SCC s dobrom fluidnosti, otpornosti prema segregaciji i sposobnošću samozbijanja može se uspješno napraviti. Postupci predložene metode projektiranja sastava mješavine sažeti su u sljedećim koracima [1].

3.1.3.1 Prvi korak: izračun sadržaja krupnog i sitnog agregata

Kada su površinski suhi krupni i sitni agregat slobodno nasuti zajedno između njih postoje šupljine i trenje. Dodavanjem vode i veziva agregatima događa se razmicanje agregatnog skeleta, čineći gomilu agregata kompaktnijom. Obično omjer volumena agregata poslije podmazivanja i zbijanja u SCC-u iznosi oko 59 – 68%. Predložena metoda definira faktor pakiranja agregata PF kao omjer mase zbijenog agregata i mase slobodno nasutog agregata. Faktor pakiranja utječe na sadržaj krupnog i sitnog agregata u SCC-u. Viša vrijednost faktora pakiranja bi značila veći sadržaj krupnog i sitnog agregata,a manji sadržaj veziva u SCC-u. Veći sadržaj agregata znači slabiju fluidnost, slabiju mogućnost samozbijanja i manju tlačnu čvrstoću. Niska vrijednost faktora pakiranja znači veći sadržaj veziva samim time i veće skupljane betona sušenjem. Veći sadržaj veziva znači bolju obradivost i trajnost SCC-a,ali se povećavaju troškovi materijala. Važno je odrediti optimalnu vrijednost faktora pakiranja pri

projektiranju mješavine kako bi postigli željena svojstva SCC-a, vodeći računa i o ekonomskoj isplativosti.

Sadržaj krupnog i sitnog agregata može se računati prema formulama:

$$W_g = PF \cdot W_{gL}\left(1 - \frac{S}{a}\right)$$

$$W_s = PF \cdot W_{sL} \cdot \frac{S}{a}$$

Gdje je:

W_g - sadržaj krupnog agregata u SCC (kg/m^3)

W_s - sadržaj sitnog agregata u SCC (kg/m^3)

W_{gL}- volumna masa slobodno nasutog zasićenog površinski suhog krupnog agregata na zraku (kg/m^3),

W_{sL} - volumna masa slobodno nasutog zasićenog površinski suhog sitnog agregata na zraku (kg/m^3)

PF - faktor pakiranja definiran kao omjer mase zbijenog agregata i mase slobodno nasutog agregata

S/a - omjer volumena sitnog agregata i ukupnog agregata je u rasponu od 50 – 57 %

Japansko društvo arhitekata određuje tri kategorije maksimalne veličine agregata: 15, 20 i 25 mm. Najčešće korištena veličina je 20 mm. Još je preporučeno da sadržaj krupnog agregata mora biti oko 50 % volumena svih krutih tvari (JIS A1104, ASTM C29). Sadržaj zraka u betonu ovisi o: temperaturi zraka, načinu ugradnje, vrsti i doziranju superplastifikatora. Tijekom zime temperature u Japanu su ispod nule pa je iznos zraka u betonu oko 4,5 %. Nasuprot tome u Tajvanu nema problema sa zamrzavanjem i odmrzavanjem, stoga je sadržaj zraka u SCC-u oko 1,5 % [1].

3.1.3.2 Drugi korak: izračun sadržaja cementa

Sadržaj veziva ne bi smio biti previše nizak da se osigura fluidnost i otpornost prema segregaciji. Preporuka priručnika za konstrukciju betona visoke fluidnosti je da minimalni iznos cementa treba biti od 270 do 290 kg/m^3 za proizvodnju normalnog betona i betona

visoke trajnosti. Upotreba previše cementa povećala bi skupljanje sušenjem SCC-a. SCC s Tajvana promatran u ovom istraživanju pruža tlačnu čvrstoću od 20 psi(0,14 MPa)/kg cementa. Sadržaj cementa prema tome iznosi:

$$C = \frac{f_c'}{20}$$

Gdje je: C sadržaj cementa,f'_c tlačna čvrstoća(psi) [1].

3.1.3.3 Treći korak: izračun sadržaja vode potrebne za cement

Veza između tlačne čvrstoće i omjera vode/cementa kod samozbijajućeg betona slična je kao i kod normalnog betona. Omjer vode/cementa može se odrediti prema AC 318 ili nekim drugim metodama u prethodnim studijama. Sadržaj vode za mješavinu koju traži cement dobivamo prema izrazu:

$$W_{wc} = \left(\frac{W}{C}\right) \cdot C$$

Gdje je:

W_{wc} - sadržaj vode u mješavini koju traži cement (kg/m^3)

W/C - omjer vode/cementa od težine koja može biti određena tlačnom čvrstoćom [1]

3.1.3.4 Četvrti korak: izračun sadržaja letećeg pepela (FA) i zgure (GGBS)

Predložena metoda projektiranja mješavine koristi prikladan sadržaj cementa i omjera vode/cementa kako bi ispunila potrebnu tlačnu čvrstoću betona. Višak cementa povećava troškove materijala, skupljanje sušenjem, gubitak rasprostiranja postaje sve veći i tlačna čvrstoća betona je veća od zahtijevane. Kako bi povećali sadržaj veziva a time povećali fluidnost, olakšali samozbijanje i poboljšali otpornost prema segregaciji mješavini se dodaju praškasti materijali kao što su leteći pepeo i zgura. Fluidnost (ASTM C230) paste od letećeg pepela i zgure jednaka je fluidnost paste od cementa. W/F je omjer voda/leteći pepeo, dok je W/S omjer voda/zgura. Volumen paste letećeg pepela (V_{Pf}) i volumen paste zgure (V_{PB}) izračunavaju se prema izrazu:

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_g}{1000 \cdot G_g} - \frac{W_S}{1000 \cdot G_s} - \frac{C}{1000 \cdot G_c} - \frac{W_{WC}}{1000 \cdot G_w} - V_a$$

Gdje je:

G_g - specifična težina krupnih agregata,

G_s - specifična težina sitnih agregata,

G_c - specifična težina cementa,

G_w - specifična težina vode,

V_a - sadržaj zraka u SCC-u (%)

Ukupan iznos pucolanskih materijala (letećeg pepela i zgure) u SCC-u je W_{pm} (kg/m^3). Adekvatni omjer tih dvaju materijala može se odrediti prema svojstvima lokalnih materijala i iskustvima iz prijašnjih istraživanja. Postotak letećeg pepela označen je sa A% , a zgure sa B% od težine [1].

$$V_{Pf} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \cdot A\% \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_f} + \left(1 + \frac{W}{S}\right) \cdot B\% \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_B}$$

Koristeći ovaj izraz može se izračunati W_{pm}, ako je V_{pf} + V_{PB} poznat iz prethodnog izraza. G_f, G_B, G_C, W/F i W/S mogu biti dobiveni iz testova. W_f: sadržaj letećeg pepela u SCC-u (kg/m^3) i W_B: sadržaj zgure u SCC-u (kg/m^3) mogu biti izračunati prema izrazima:

$$W_f = A\% \cdot W_{pm}$$

$$W_B = B\% \cdot W_{pm}$$

Sadržaj vode u mješavini potreban za pastu letećeg pepela:

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) \cdot W_f$$

Sadržaj vode u mješavini potreban za pastu zgure:

$$W_{wB} = \left(\frac{W}{S}\right) \cdot W_B$$

3.1.3.5 Peti korak: izračun sadržaja vode u mješavini potrebne za SCC

Sadržaj vode u mješavini potrebne za SCC dobije se kao ukupan iznos vode potrebne za cement, leteći pepeo i zguru.

$$W_w = W_{wc} + W_{wf} + W_{wB}$$

Prema Japanskom društvu Arhitekata preporučeni sadržaj vode je: $W_w = 160 – 185$ kg/m^3 [1]

3.1.3.6 Šesti korak: izračun doziranja superplastifikatora(SP)

Dodavanjem primjerene doze SP-a može se povećati fluidnost, mogućnost samozbijanja i otpornost prema segregaciji svježeg SCC-a tako ispunjavajući postavljene zahtjeve. Ako je doziranje SP-a jednako n% količine veziva.

Doziranje SP-a iznosi: $W_{SP} = n\%(C + W_f + W_B)$ [1]

3.1.3.7 Sedmi korak: podešavanje sadržaja vode u mješavini za SCC

Sadržaj vode SP-a može biti smatran djelom vode za miješanje. Ako je čvrsti sadržaj SP-a m%, sadržaj vode u SP-u iznosi: $W_{wSP} = (1 - m\%)W_{SP}$

Podešeni sadržaj vode u mješavini za SCC iznosi: $W_w = W_{wc} + W_{wf} + W_{wB} - W_{wSP}$

Prema sadržaju vlage agregata na betonari ili gradilištu stvarna količina vode koja se koristi za miješanje mora biti podešena [1].

3.1.3.8 Osmi korak: pripraviti probnu mješavinu i provesti testove za ispitivanje svojstva SCC-a

Probna mješavina se napravi koristeći sadržaje prethodno izračunatih materijala. Provedeni testovi kontrole svojstava SCC-a moraju ispunjavati sljedeće zahtjeve:

1) Rezultati od rasprostiranja slijeganjem, U- kutije, L-kutije i V-lijevka moraju biti u skladu s specifikacijama JAS.
2) Razina segregacija agregata mora biti zadovoljavajuća.
3) Omjer vode/veziva mora zadovoljavati postavljene zahtjeve trajnosti i čvrstoće.
4) Sadržaj zraka u betonu mora biti u skladu s projektnim zahtjevima mješavine [1].

3.1.3.9 Deveti korak: podešavanje omjera mješavine

Ako provedeni testovi svježeg betona ne zadovoljavaju zahtjeve projekta moraju se izvršiti određena podešavanja. Na primjer ako svježi beton pokazuje lošu fluidnost smanjuje se vrijednost faktora pakiranja i povećava udio veziva tako poboljšavajući obradivost [1].

3.1.4 Uzorci SCC-a proračunati predloženom metodom

U nastavku su prikazani sastavi mješavina za samozbijajući beton koji su proračunati prema predloženoj metodi te pritom korišteni materijali. Maksimalna veličina zrna korištenog krupnog agregata je 25 mm, specifična težina krupnog agregata je 2,65, a gustoća rastresitog krupnog agregata je 1500 kg/m^3. Specifična težina sitnog agregata je 2,64, a gustoća rastresitog sitnog agregata je 1404 kg/m^3. Specifična težina korištenog cementa je 3,15, dok je specifična težina korištenog letećeg pepela 2,15 i troske 2,92. Omjer letećeg pepela i troske po težini je 7/3, a omjer volumena sitnog i krupnog agregata je 58/42. Korišteni superplastifikator je sulfat temeljen na naftalinu s specifičnom težinom od 1,064, a korišten je u dozi od 1,8 % sadržaja veziva. Sadržaj zraka u tako pripremljenom samozbijajućem betonu je oko 1,5 %. Napravljena su četiri uzorka samozbijajućeg betona koji se razlikuju po zahtijevanoj tlačnoj čvrstoći i faktoru pakiranja. Zbog toga su proračunom dobivene različite količine komponenata za svaku od mješavina [1].

Tablica 3.1 Sastavi mješavina izračunati koristeći priloženu metodu [1]

Assume PF = 1.18.

Table 2
Mix proportion of SCC (kg/m^3)

$f'c$ (MPa)	Coarse aggregates	Fine aggregates	Cement	FA[a]	GGBS[b]	Water	SP[c]
27.5	743	961	200	157	67	176	7.6
34.3	731	945	250	154	66	173	8.5
41.2	718	928	300	148	63	172	8.2
48.0	706	912	350	142	61	170	8.8

[a] FA: fly ash.
[b] GGBS: ground granular blast-furnace slag.
[c] SP: superplasticizer.

Tablica 3.2 Sastav i fizikalna svojstva korištenih veziva [1]

Composition and physical properties of binders

Binders	SiO_2[a]	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	LOI[b]	SSA (m^2/kg)[c]	SG[d]
Cement	20.49	6.57	3.27	62.40	1.91	1.57	305.4	3.14
FA	55.5	27.9	6.3	6.27	1.6	5.01	(86.95% <45 μm)	2.15
GGBS	34.81	13.63	0.32	40.51	6.96	0.40	422	2.92

[a] Percent by weight.
[b] LOI: loss on ignition.
[c] SSA: specific surface area.
[d] SG: specific gravity.

Korišteni materijali su:

1) Cement: Tipa 1 Portland cement proizveden u Tajvanu. 2) Krupni i sitni agregat: Šljunak iz Chuo-shuei rijeke u središnjem Tajvanu. 3) Leteći pepeo: Iz elektrane Hsin-Ta Taipower. 4) Troska: Iz Chung-Lien Resource. 5) Voda: Iz Tajvana. 6) Superplastifikator: Komercijalni superplastifikator na bazi naftalina (SNF) proizveden od Feng-Yo Chemical [1].

3.1.5 Rezultati i analiza

U nastavku su tablično i grafički prikazani i analizirani rezultati provedenih ispitivanja za uzorke samozbijajućeg betona proračunate po priloženoj metodi.

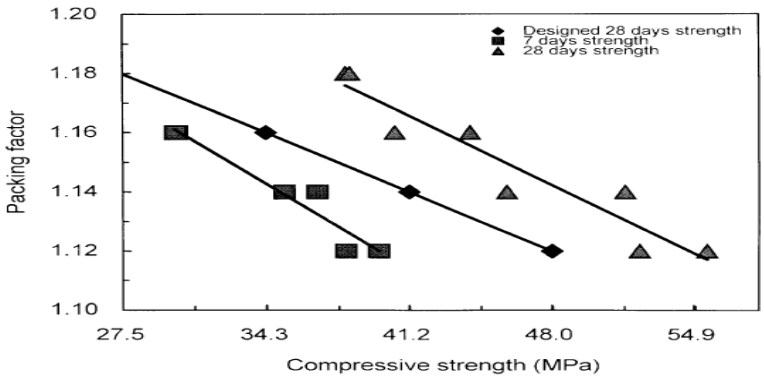


Fig. 1. Effect of aggregate packing factor on compressive strength of SCC.

Slika 3.1 Učinak faktora pakiranja agregata na tlačnu čvrstoću [1]

Dijagram pokazuje da se povećanjem vrijednosti faktora pakiranja agregata (PF) smanjuje tlačna čvrstoća SCC-a. Uzorci samozbijajućeg betona napravljeni po predloženoj metodi nakon njege od 7 dana pokazuju od 81 % do 90 % zahtijevane tlačne čvrstoće. Nakon 28 dana

postignuta je tlačna čvrstoća koja je bila od 6.1 MPa do 10.7 MPa veća od zahtijevane u projektu. Predloženom metodom projektiranja samozbijajućeg betona može se napraviti beton koji zadovoljava zahtijevanu tlačnu čvrstoću. Pošto je vrijednost faktora pakiranja agregata u velikoj mjeri povezana s tlačnom čvrstoćom, podešavanjem faktora pakiranja na 1,18, 1,16, 1,14 i 1,12 dobije se SCC koji može zadovoljiti zahtjeve tlačne čvrstoće od 27,5 MPa, 34,3 MPa, 41,2 MPa i 48 MPa.

Tablica 3.3 Učinak faktora pakiranja na fluidnost i sposobnost prolaza SCC-a [1]

1804 *N. Su et al. / Cement and Concrete Research 31 (2001) 1799–1807*

Table 5
Effect of packing factor on flowability and passing ability of SCC

Packing factor	Binders volume (1/1000 m^3)	Slump flow (cm × cm)	L-flow test (cm)	V-funnel flow time (s)	Segregation resistance
1.12	198	71 × 72	74	14	Excellent
1.14	186	70 × 71	72	12	Excellent
1.16	174	69 × 70	68	11	Good
1.18	160	60 × 60	57	7	Good

* The channel length of L-flow test is 75.5 cm.

Kad su vrijednosti faktora pakiranja agregata 1,12, 1,14 i 1,16 vrijednosti rasprostiranja slijeganjem su 71x72, 70x71 i 69x70 cm što ukazuje da SCC zadovoljava zahtjeve ranga R1. Kada je vrijednost faktora pakiranja 1,18 rasprostiranje slijeganjem je 60x60 cm koje zadovoljava zahtjeve ranga R2. Vrijeme protoka V-lijevka je 14, 12 i 11 sekundi koje zadovoljava zahtjeve ranga R1 kad je vrijednost faktor pakiranja 1,12, 1,14 i 1,16. Kad je vrijednost faktora pakiranja 1,18 vrijeme protoka u V-lijevku je 7 s što zadovoljava zahtjeve ranga R2. Također je vidljivo da kad su vrijednost faktora pakiranja 1,12, 1,14, 1,16 i 1,18 agregat u SCC-u se nije segregirao. Kada je vrijednost faktora pakiranja 1,12, 1,14 i 1,16 duljina protoka L-testa doseže od 68 do 72 cm što ukazuje na dobru protočnost SCC-a [1].

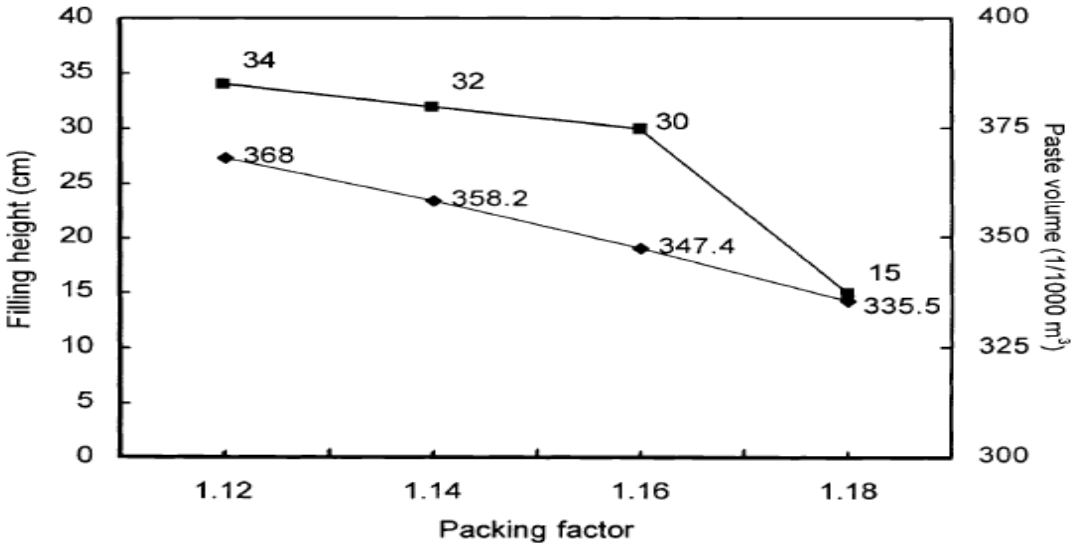


Fig. 2. Effect of packing factor on filling height of U-box and paste volume of SCC.

Slika 3.2 Utjecaj faktora pakiranja na visinu izdizanja betona kod U testa i volumen paste u SCC-u [1]

Kod vrijednosti faktora pakiranja agregata od 1,12, 1,14 i 1,16 visine izdizanja betona u drugoj komori kod U testa su 34, 32 i 30 cm, tako ispunjavajući zahtjev B_h>30cm, što znači da se dobiveni beton može smatrati samozbijajućim. Visina izdizanja betona kod U testa je 15 cm kada je vrijednost faktora pakiranja 1,18. Dijagram pokazuje da se smanjenjem vrijednosti faktora pakiranja agregata smanjuje sadržaj agregata u mješavini i povećava volumen paste u mješavini čime se poboljšava mogućnost prolaska prazninama između armaturu te otpornost prema segregaciji agregata. Prema tome možemo zaključiti da je visina izdizanja betona kod U testa obrnuto proporcionalan vrijednosti faktora pakiranja u izračunu omjera mješavine [1].

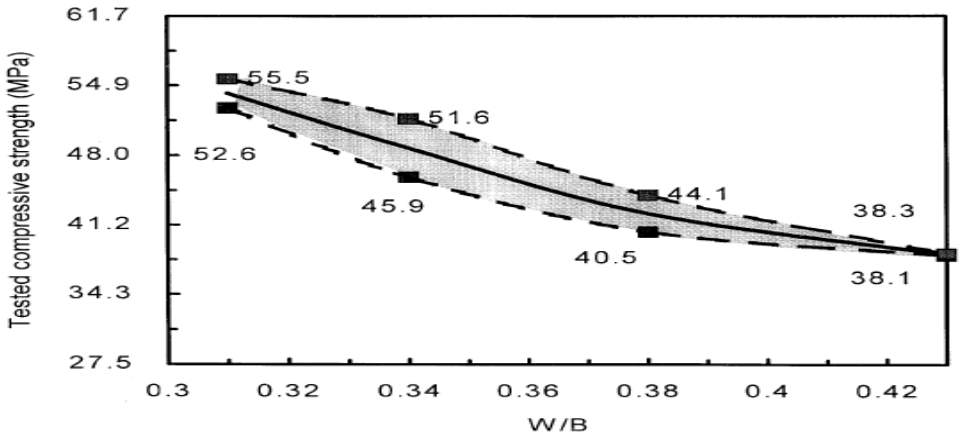


Fig. 3. Relationship between compressive strength and water to binder ratio of SCC.

Slika 3.3 Odnos između tlačne čvrstoće i omjera vode i veziva [1]

Na tlačnu čvrstoću utjecaj ima sadržaj sitnog i krupnog agregata, omjeri materijala, vrijeme njege i omjer vode i veziva. Od svih faktor koji utječu na tlačnu čvrstoću najveći utjecaj ima omjer vode i veziva po težini što se vidi iz prethodnog dijagrama. Iz dijagrama možemo zaključiti da je tlačna čvrstoća obrnuto proporcionalna vrijednosti omjera vode i veziva.

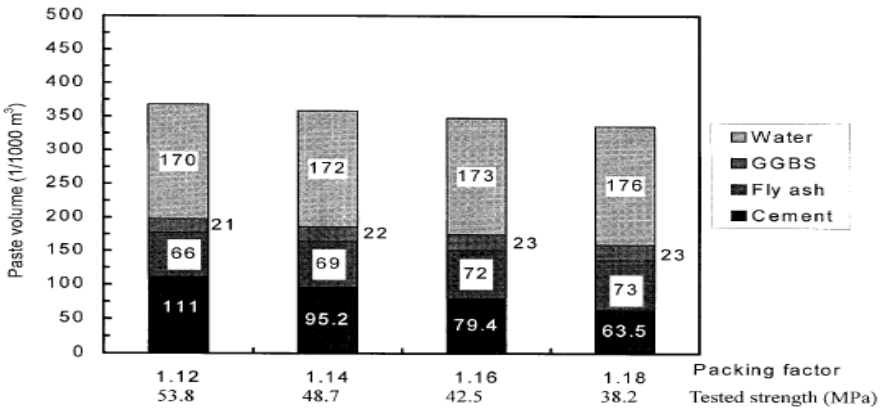


Fig. 4. Relationship between paste volume, compressive strength and packing factor.

Slika 3.4 Odnos između volumena paste,tlačne čvrstoće i faktora pakiranja [1]

Dijagram pokazuje da se smanjenjem faktora pakiranja povećava volumen paste u SCC-u. Kao rezultat toga tlačna čvrstoća SCC –a će biti veća.

Tablica 3.4 Sastav mješavina za SCC po volumenu (0.001 m^3/m^3) [1]

Table 6
Mix proportion of SCC by volume (0.001 m^3/m^3)

			Binders						
Designed strength (MPa)	Coarse aggregates	Fine aggregates	Cement	FA	GGBS	Water	SP	Total	Packing factor
27.5	281	364	63.5	73	23	176	7	987.5	1.18
34.3	276	358	79.4	72	23	173	8	989.4	1.16
41.1	271	351	95.2	69	22	172	8	988.2	1.14
48.0	266	345	111	66	21	170	8	987	1.12

Prema predloženoj metodi projektiranja mješavina za SCC potreban volumen vode u SCC-u je od 0.170 do 0.176 m^3/m^3, dok je veziva od 0.159 do 0.198 m^3/m^3. Volumen paste ima pozitivan utjecaj na tlačnu čvrstoću SCC-a. Tokom ovog istraživanja maksimalni sadržaj korištenog veziva je 424 kg/m^3 što je manje od 500 kg/m^3 praha koji je preporučen od strane Japanske metode projektiranja mješavine. Za dobivanje SCC-a s tlačnom čvrstoćom od 27,5 do 54,9 MPa sadržaj zahtijevanog cementa po predloženoj metodi projektiranja SCC-a je samo od 200 do 350 kg/m^3 čime se ostvaruje znatna ušteda na potrebnom cementu. Prema specifikacijama za SCC od JSCE preporuča se da apsolutni volumen krupnog agregata za SCC bude od 0,28 do 0,36 m^3/m^3, međutim apsolutni volumen krupnog agregata u SCC-u pripremljenom po predloženoj metodi je samo od 0.266 do 0.281 m^3/m^3. Metoda projektiranja mješavine SCC-a predložena od Okamure predlaže da je sadržaj krupnog agregata oko 50 % njene jedinične težine, međutim korištenjem ove metode projektiranja SCC-a može se smanjiti sadržaj potrebnog krupnog agregat na njegovu količinu od 706 do 743 kg/m^3 [1].

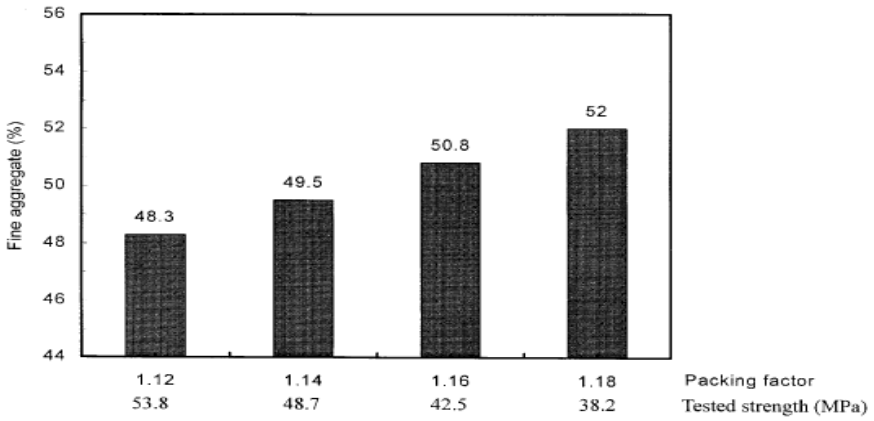


Fig. 5. Relationship between fine aggregate volume ratio, compressive strength and packing factor.

Slika 3.5 Odnos između sitnog agregata u omjeru volumena,tlačne čvrstoće i faktora pakiranja [1]

Dijagram prikazuje da omjer sitnog agregata i volumena morta iznosi od 48,3 % do 52 % što je veće od vrijednosti 40 % predstavljene po Okamuri. Sadržaj sitnog agregata u SCC-u pripremljenom prema ovoj metodi će biti viši kako bi se zadovoljilo zahtjeve fluidnost, sposobnosti samozbijanja, otpornosti prema segregaciji, kao i srednja tlačna čvrstoća (27,5 - 48 MPa). Veći sadržaj sitnog agregata ima također utjecaj i na modul elastičnosti SCC-a. Za tlačnu čvrstoću SCC-a je utvrđeno da je obrnuto proporcionalna sadržaju pijeska u mortu. Očito je da ova predložena metoda koristi puno manje veziva za SCC. Na primjer kod SCC-a tlačne čvrstoće 34,3 MPa količina veziva koji je upotrijebljen je samo 470 kg/m^3, dok je cementa samo 250 kg/m^3 [1]

3.1.6 Zaključci i prijedlozi

1. Vrijednost faktora pakiranja agregata određuje sadržaj agregata u mješavini te utječe na tlačnu čvrstoću, fluidnost i mogućnost samozbijanja.

2. Samozbijajući beton projektiran i proizveden predloženom metodom projektiranja mješavine sadrži više pijeska, ali manje krupnog agregata, tako mogućnost prolaska prostorom između armature može biti poboljšana.

3. U ovoj metodi projektiranja mješavine za samozbijajući beton volumen pijeska za mort kreće se u rasponu od 54 % do 60 %.

4. Sadržaj vode u SCC-u pripremljenom prema predloženoj metodi je od 170 kg/m^{3}do 176 kg/m^3 za srednju tlačnu čvrstoću.

5. Iznos veziva korištenih u predloženoj metodi može biti manji nego što je potrebno od strane drugih metoda projektiranja mješavina samozbijajućeg betona zbog povećanog sadržaja pijeska.

6. Ova nova metoda projektiranja mješavina samozbijajućeg betona je jednostavnija od drugih metoda, traži manju količinu veziva te su zbog toga i troškovi manji.

7. PF vrijednost je faktor kontrole za testove visine izdizanja betona kod U-kutije. Samozbijajući beton u svježem stanju s faktorom pakiranja od 1,12 do 1,16 može zadovoljiti zahtjeve ranga R1 određenog Japanskom metodom projektiranja mješavina.

8. Zbog toga što SCC proizveden ovom metodom sadrži manje krupnog agregata, daljnja istraživanja su potrebne za procjenu njegova učinka na modul elastičnosti betona.

9. Optimalna vrijednost faktora pakiranja za SCC s drugačijim karakteristikama zahtjeva daljnja istraživanja [1].

3.2 Projektiranje sastava samozbijajućeg betona koristeći Kinesku metodu (Su et al, Su and Miao)

3.2.1 Sažetak

Kineska metoda izvedena od Su et al i Su and Miao koja je prilagođena za Europske okolnosti služi kao baza za izvođenje novih mješavina samozbijajućeg betona. Ovaj članak sadrži teorijsku i eksperimentalnu analizu utjecaja raspodjele veličine čestica na svojstva samozbijajućeg betona. Razvijene su mješavine koje se sastoje od: cementa pomiješanog sa zgurom, šljunka (4 - 16 mm), tri vrste pijeska (0 - 1, 0 - 2, 0 - 4 mm) i superplastifikatora tipa polikarboxilnog etera. Mješavine su opsežno testirane u svježem i očvrsnulom stanju i ispunjavaju sve praktične i tehničke zahtjeve kao što su upotreba manje cementa i praškastog sadržaja, srednja tlačna čvrstoća i manji troškovi. Raspodjela veličine čestica svih krutih tvari u mješavini mora slijediti ocjenjivanu liniju modificiranog Andreasen i Andersen modela [2].

3.2.2 Uvod

Prvi rad u razvoju SCC-a je bio izveden od Okamure te od Okamure i Ouchi čija je metoda nazvana Japanskom metodom. Ta metoda se usmjerila na fluidnost paste i žbuke (pasta plus pijesak) što je rezultiralo samozbijajućim betonom s relativno visokim sadržaje paste. Stoga mnogi samozbijajući betoni napravljeni po toj metodi postižu veću tlačnu čvrstoću nego što se zapravo traži.

Su et al i Su and Miao razvili su alternativnu metodu projektiranja mješavine SCC-a nazvanu Kineska metoda. Kineska metoda započinje s pakiranjem agregata(šljunka i pijeska) i kasnije s punjenjem šupljina između agregata s pastom. Metoda je lakša za izvedbu i zahtjeva manje paste. Time se štedi najskuplje sastojke cement i punilo, a omogućuje dobivanje betona normalne tlačne čvrstoće. To će također pospješiti tehničko izvođenje betona, zbog toga što najveći mogući volumen agregata u SCC-u ima prednost u odnosu na njegovu tlačnu čvrstoću,propusnost, puzanje i skupljanje sušenje betona.

Iako se s obje metode može napraviti SCC, temeljita teorijska pozadina još uvijek nedostaje. Polazna točka ove analize je teorija pakiranja. SCC se tretira kao mješavina vode i čvrstih tvari pri čemu se krute tvari (od krupnih do sitnih) sastoje od: šljunka, pijeska, punjenja (kamena u prahu, letećeg pepela) i cementa. U pogledu pakiranja zrnatih materijala Andreasen i Andersen prezentirali su polu empirijsko istraživanje pakiranja kontinuirane raspodjele veličine čestica (PSD) i odredili PSD s najgušćim pakiranjem. Funk i Dinger modificirali su ovaj PSD za izračun najmanje veličine čestica(modificirani A&A model). To će pokazati da pakiranje agregata primijenjeno od Su et al i Su and Miao,čini se da slijedi krivulju ocjenjivanja modificiranog A&A modela.

U konačnici su mješavine sastavljene da slijede modificirani A&A modela uključujući sve čestice. Mješavine su sastavljene koristeći GGBS cement i šljunak istražujući ulogu od sva tri tipa pijeska. Čini se da je sitni pijesak korisna komponenta u optimiziranju PSD-a, time se povećava stabilnost i fluidnost mješavine betona. Također je glavni izvor smanjenja troškova mješavine [2].

3.2.3 Teorija pakiranja

Japanske i Kineske metode ne obraćaju pažnju na PSD agregata. Poznato je međutim da viskoznost žitke mase postaje minimalna (na konstantnom sadržaju vode), kada krute tvari imaju čvršće pakiranje. Kada su čestice bolje upakirane (manje šupljina ima) više je vode

dostupno kao sredstvo za podmazivanje između čestica. Gustoće i druga relativna svojstva materijala korištenih u ovom istraživanju prikazana su u tablici 3.5.

Tablica 3.5 Svojstva upotrijebljenih materijala [2]

Table 1: Properties of materials used

Material	Type	ρ [kg/m^3]	ρ_l [kg/m^3]	Blaine [cm^2/g]	S [cm^2/cm^3]
Cement	CEM III/B 42.5 N LH/HS	2950	1100	4700	13865
Filler	Limestone powder	2740	1110	4600	12604
Filler	Fly ash	2250	1000	3900	8775
Coarse sand	Rhine sand 0–4 mm	2650	1631	-	-
Medium sand	Rhine sand 0–2 mm	2650	1619	-	-
Fine sand	Sand 0–1 mm	2650	1511	-	-
Gravel	Rhine gravel 4–16 mm	2650	1604	-	-
Superplasticizer	Glenium 27	1045	-	-	-

Na slici 3.6 su prikazane raspodjele čestica(PSD) korištenih materijala(kumulativne sitnije frakcije). PSD od pijeska i šljunka su određeni prosijavanjem,PSD cementa i vapnenca u prahu laserskom granulometrijom. Za normalne betone većina propisa projektiranja mješavine zahtjeva kontinuirano ocjenjivanje kako bi se postiglo čvrsto pakiranje. Krivulje kontinuiranog ocjenjivanja rangiraju se od 250 μm do maksimalne veličine čestica te su S oblika u logaritamskom grafu (Fuller krivulja). Za modernije betone kao što je beton visoke čvrstoće i SCC Fuller krivulja je manje prikladna. Ova krivulja je primjenjiva materijalima s veličinom čestica većom od 500 μm. Primjena ove krivulje ocjenjivanja na materijale sa sitnim sastojcima dovodi do mješavina koje su siromašne sa cementom i manje su obradive. Standardi stoga zahtijevaju minimalan sadržaj sitnih materijala (<250 μm) u normalnom betonu. Kako sadržaj i PSD sitnih materijala (prah) ne može biti određen kako treba s Fuller krivuljom, ona je manje prigodna za SCC zbog zahtijevanog velikog udjela krutih tvari koji se sastoje od praha. Zapravo teorija pakiranja Fuller i Thompson predstavlja poseban slučaj unutar općenitijih jednadžbi pakiranja dobivenih od Andreasen i Andersen. Prema njihovoj teoriji optimalno pakiranje može se postići kada kumulativni PSD ispunjava sljedeću jednadžbu:

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^q$$

P je frakcija koja može proći kroz sito s otvorom D, D_{max} je maksimalna veličina čestica u mješavini. Parametar q ima vrijednost između 0 i 1, Andreasen i Andersen su utvrdili da se optimalno pakiranje dobije kad je q približno 0,37.

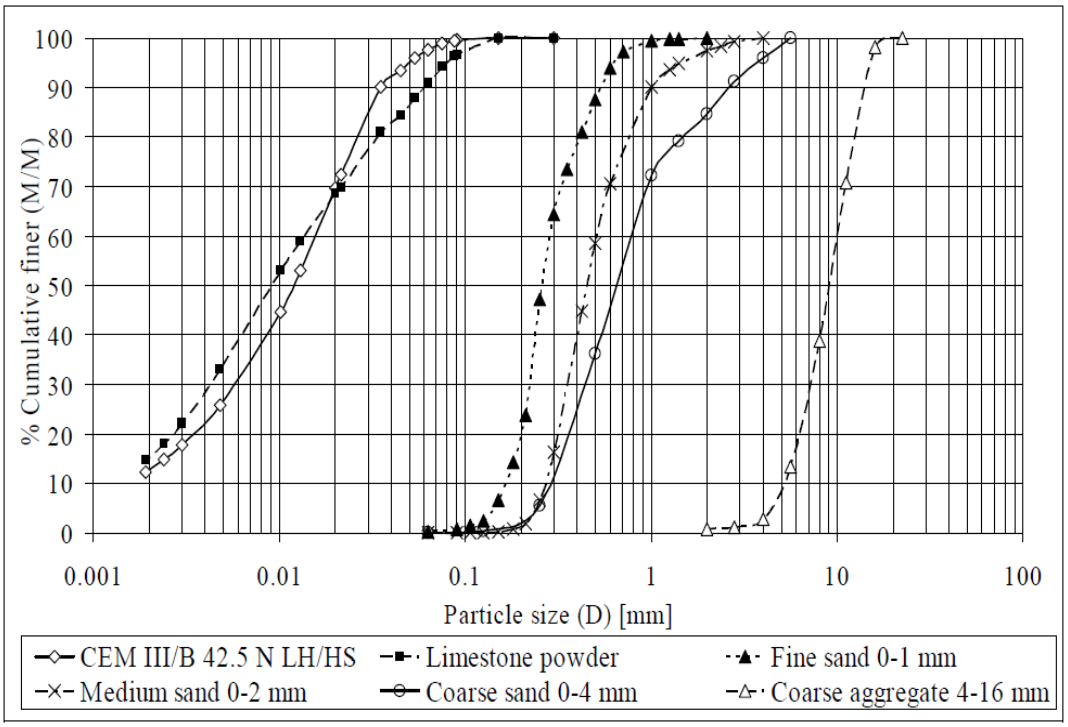


Figure 1: PSD of aggregates and powders used (cumulative finer mass fraction)

Slika 3.6 PSD korištenih agregata i prahova (kumulativno sitnije masene frakcije) [2]

Fullerovo ocjenjivanje se dobije kada je q= 0,5. Varijabla q čini A&A pogodnim modelom za veličinu čestica manju od 500 μm. Uglavnom, više praška (<250 μm) u mješavini znači manji q koji najbolje karakterizira PSD mješavine. Za provjeru hipoteze čvrstog pakiranja i primjene A&A model analiziran je PSD Kineske metode. Na slici 3.7 PSD-ovi od agregata su grafički prikazani na temelju podataka prosijavanja dobivenih od Su et al i Su and Miao. Podatke o predviđenom prosijanom prašku nije moguće prikazati PSD-om ispod 1 μm. Ali PSD cijele krute smjese je korigiran za ovaj sadržaj tog praha, koji je poznat. Na slici 3.7 također su prikazane ocjenjivane krivulje od Fullera i A&A (sa q= 0,3). Slika 3.7 prikazuje da Kineska metoda kao da slijedi krivulju ocjenjivanja od A&A teorije sa q= 0,30. Slika 3.7 potvrđuje da ocjenjivana krivulja od A&A model bolje računa za praškove nego krivulja ocjenjivanja od Fullera. Iz krivulje na slici 3.7 slijedi da je oko 20 % čestica sitnije od 75 μm, dok sudeći

prema Fulleru samo 5,5 % je sitnije od 75 μm. Kako je A&A model izračuna praškova (<250 μm) bolji, stoga je bolje prilagođen i za izradu SCC-a. Kontinuirano ocjenjivanje svih krutih tvari (agregata i praška) rezultira boljom obradivosti i stabilnosti mješavine betona.

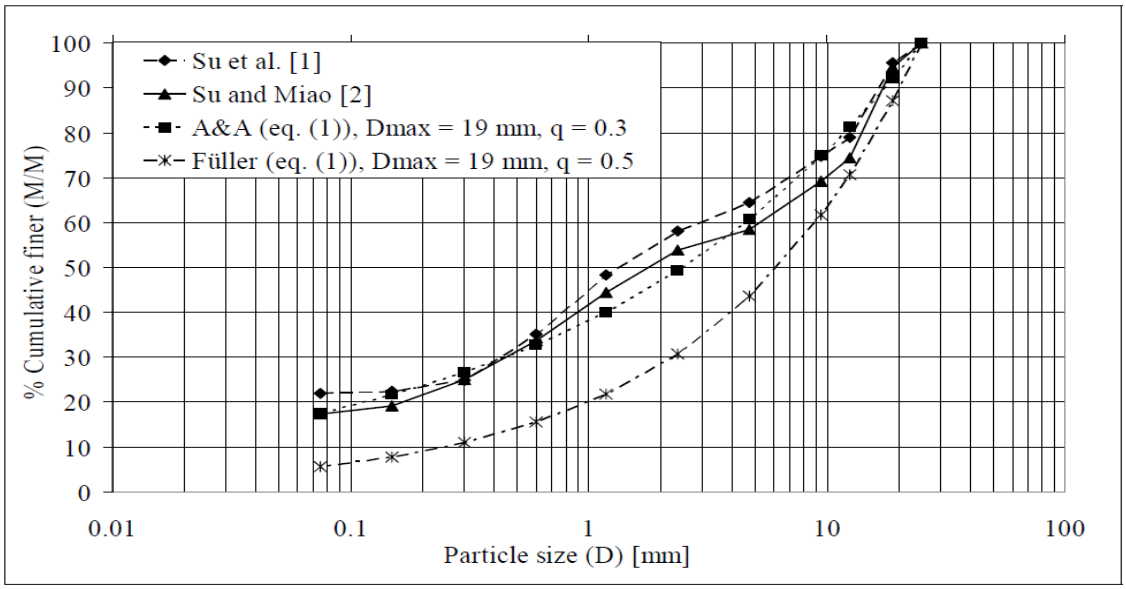


Figure 2: Analysis of actual PSD by Su et al. [1] and Su and Miao [2]

Slika 3.7 Analiza stvarnog PSD od strane Su et al. i Su and Miao [2]

A&A model propisuje ocjenjivanje s promjerom čestica od nule. U praksi biti će minimalan promjer u mješavini. Prema tome modificirana verzija modela se primjenjuje da računa minimalnu veličinu čestica u mješavini. Ovaj modificirani PSD (kumulativne sitnije frakcije) glasi:

$$P(D) = \frac{D_q - D_{q\min}}{D_{\max}^q - D_{\min}^q}$$

D_{min} je minimalna veličina čestica u mješavini. Godinama se ista jednadžba također koristila u rudnoj industriji za opisivanje PSD-a slomljenih stijena. U dvostruko logaritamskom grafu rezultati A&A modela su u ravnoj liniji, a modificirani rezultati A&A modela u krivulji su savijenoj prema dolje približavajući se minimalnom promjeru. U sljedećim odjeljcima za pripremanje mješavine SCC-a koristiti će se modificirani A&A model [2].

3.2.4 Ocjenjivanje

Tablica 3.6 Sastavi mješavina [2]

Table 2: Dosages of mixes

Material	Mix A [kg/m^3]	Mix B [kg/m^3]	Mix C [kg/m^3]
Cement	310	315	320
Limestone powder	189	164	153
Sand 0-1 mm	-	-	388
Sand 0–2 mm	-	306	-
Sand 0–4 mm	1018	719	628
Gravel 4–16 mm	667	673	687
Water	170	173	174
Superplasticizer	6.0	5.51	5.21
Water/cement ratio	0.55	0.55	0.55
Water/powder ratio	0.34	0.36	0.37
Mass fraction < 250 μm	554	538	687

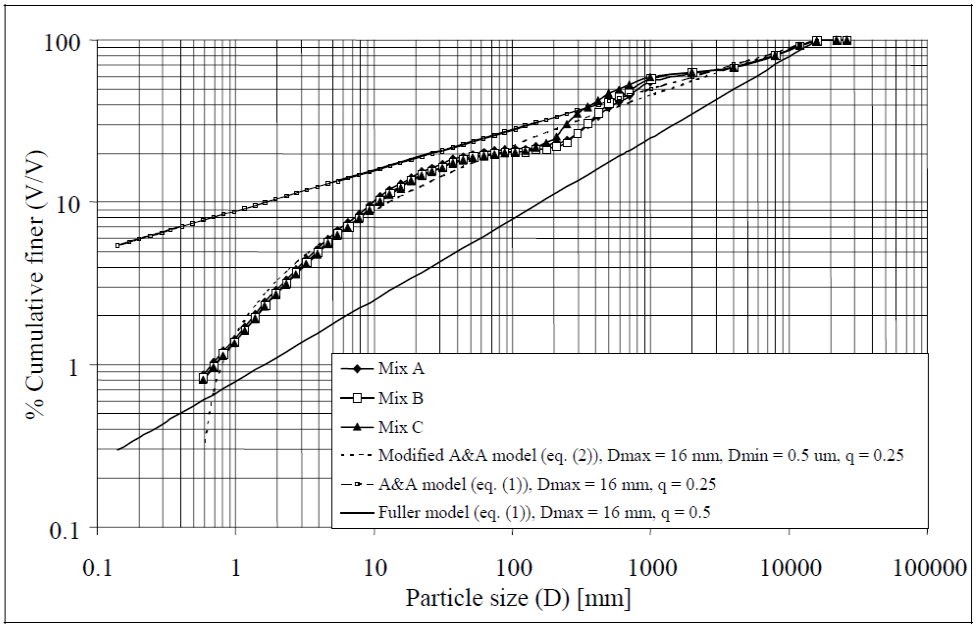


Figure 3: Cumulative finer mass fraction of Mixes A, B and C in double-logarithmic graph

Slika 3.8 Kumulativno sitnije masene frakcije mješavina A, B i C u dvostruko logaritamskom-grafu [2]

Tablica 3.6 sadrži konačne sastave mješavina razvijenog SCC-a temeljene na teoriji pakiranja i nekim ispitivanjima morta. Totalni udio praška (cement plus vapnenac u prahu) iznosi samo od 473 kg/m^3 do 499 kg/m^3. Na slikama 3.8 i 3.9 dati su PSD-ovi (kumulativno sitniji) od tri mješavine. Na objema slikama krivulje slijede A&A ocjenjivanje, modificirano A&A

ocjenjivanje i Fuller ocjenjivanje je uključeno. Slike 3.8 i 3.9otkrivaju da PSD-ovi od 3 mješavine ne slijede Fullerovu krivulju koja je korištena za normalne betone. Projektirane tri mješavine prate što je moguće više PSD iz modificiranog A&A ocjenjivanja (s q= 0,25). Međutim, PSD od tri mješavine ne može savršeno pratiti A&A krivulju kao što su PSD-ovi korištenih sastavnih dijelova koji su S-oblika (slika 3.6). Posebno između 100 μm i 4 mm može se vidjeti poremećaj, što može biti objašnjeno činjenicom da u ovom rasponu čestica pijesak značajno doprinosi PSD-u. S-oblik uzorka odgovara uzorku pijeska (slika 3.6). Kako bi se izbjegla ta odstupanja, treba koristiti više sastojaka s preklapanjem u veličini čestica. Treba koristiti pijesak 2 - 4 mm i šljunak 4 - 8 mm. Koristeći A&A krivulju ocjenjivanja udio sitnih materijala (<250 μm) je otprilike tri put veći nego s primjenom Fullrove krivulje.

Tablica 3.6 sadrži iznose sitnih materijala u tri mješavine. Tablica 3.6 pokazuje da mješavina C sadrži mnogo više sitnih materijala nego mješavine (A, B) i da je količina kamenog praha najmanja u mješavini C. Stoga s primjenom sitnog pijeska (0 - 1 mm) moguće je povećati udio sitnih materijala dok se u isto vrijeme smanjuje količina cementa i punila. Odgovarajući volumen sitnih materijala u mješavini C iznosi otprilike 0,245m^3 za m^3 betona, što je oko 2 puta maksimalan iznos propisan od NEN 5950 (1995) za beton s maksimalnom veličinom čestica od 16 mm. Smanjivanje praha i superplastifikatora u slučaju primjene sitnog pijeska još može biti objašnjena uspoređujući PSD-ove ovih triju mješavina. PSD od C mješavine najbolje slijedi modificiranu A&A krivulju, osobito između 100 μm i 1 mm (slike 3.8 i 3.9). U nastavku su testirane mješavine svježeg betona [2].

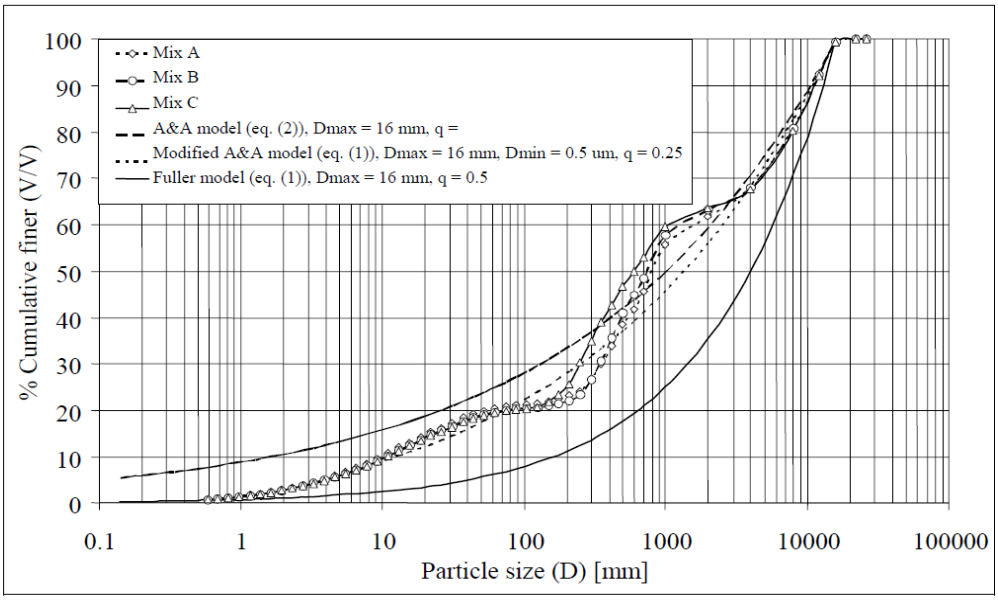


Figure 4: Cumulative finer mass fraction of Mixes A, B and C in single-logarithmic graph

Slika 3.9 Kumulativno sitnije masene frakcije mješavina A, B i C u logaritamskom grafu [2]

3.2.5 Ocjenjivanje betonske mješavine

Sve tri mješavine su detaljno ispitane prema međunarodnim metodama. Konzistencija mješavine betona je procijenjena razastiranjem i vremenom potrebnim da se postigne razastiranje od 500 mm (t_{500}) koristeći Abramsov stožac. Konačno razastiranje bi se trebao rangirati od 630 mm do 800 mm (CUR). Vrijeme toka t_{500} trebalo bi iznositi od 2 do 5sekundi (CUR). Stupanj segregacije je također provjeren vizualnim pregledom. Ispitivanje je izvršeno u skladu sa BMC I CUR.

Kod V-lijevka izmjerena su dva vremena protoka i određena je njihova aritmetička sredina. To vrijeme daje naznaku viskoznosti i vremena punjenja mješavine. Test V-lijevka je izvršen prema smjernicama od CUR-a. Veličine lijevka ovise o maksimalnoj veličini agregata, ovdje je maksimalna veličina agregata 16 mm. Prema CUR i BMC vrijeme protoka bi se trebalo rangirati od 5 do 15 sekundi. Otpornost prema segregaciji je određena mjerenjem vremena toka pet minuta nakon što je lijevak napunjen (t_5). Vrijeme stabilnosti (t_s) se definira kao:$t_s = t_5 - t$ gdje je $t_s = 0$ ako je $t_5 < t$. BMC propisuje da bi t_s trebao biti manji od 3 s. Pomoću J-prstena testirana je sposobnost prolaska mješavine.

J-prsten je otvoreni pravokutni čelični prsten, debljine 25 mm, unutarnjeg promjera 260 mm i vanjskog promjera 324 mm. Vertikalni otvori su izbušeni kako bi mogli prihvatiti okomite šipke koje mogu biti smještene na različitim razmacima. Promjer šipke je 16 mm, a njena visina je 100 mm. Broj i razmak šipki je u skladu s razmatranjem armature: kada je najveća veličina zrna agregata ispod 12 mm korištene su 24 šipke, kada je ispod 20 mm korišteno je 18 šipki i kada je najveća veličina agregata ispod 32 mm korišteno je 12 šipki (CUR). Kada je najveća veličina zrna agregata 16 mm koristi se 18 šipki. To podrazumijeva da je razmak među šipkama oko 37 mm, što je oko 2,3 puta veća vrijednost od najveće veličine zrna. J-prsten se koristi zajedno sa Abramsovim stožcem, koji je smješten centralno unutar J-prstena. Nakon što je beton prestao teći izmjeren je stupanj blokiranja (CUR). Faktor blokiranja (B) se izračunava prema izrazu: $B = 2(h_{in} - h_{ex}) - (h_c - h_{in})$. Gdje je: h_c - visina mješavine u sredini, h_{in} - visina mješavine samo unutar prstenai h_{ex} - visinamješavine samo izvan prstena, odnosno te vrijednosti su izmjerene na četiri mjesta te je izračunat njihov prosjek. Faktor blokiranja trebao bi biti manji od 15 mm (CUR). Beton je također pregledan vizualno kako bi procijenili segregaciju i blokiranje.

Poznato je da svojstva superplastifikatora opadaju s vremenom. Posebice, za industriju gotovog miješanog betona, obradivost ne bi smjela previše opadati s vremenom i konstantna (ili minimalno očuvana) obradivost je od velike važnosti. Kako bi se procijenila očuvanost obradivosti tokom vremena provedeni su testovi razastiranja i J-prstena, koji su vršeni 15, 30, 45, 60, 90 i 120 minuta nakon pripreme mješavine za SCC. Gotove betonske mješavine se polako miješaju tokom transporta u kamionu mikseru. Kako bi simulirali miješanje u kamionu mikseru beton je nakon svake 4 minute ili manje mirovanja rotiran jednu minutu u mikseru. Također je izmjeren sadržaj zraka u svježem betonu. Pripravljanjem tri mješavine pretpostavlja se da će udio zraka biti 1,5 % od volumena.

Tablica 3.7 Rezultati ispitivanja svježeg betona [2]

Table 3: Results of fresh concrete tests

Result	Mix A	Mix B	Mix C
Slump [mm]	720	745	730
Slump flow time t_{500} [s]	3	3	3
Blocking factor [mm]	14.50	4	12.50
Mean funnel time [s]	12	11.5	12
Funnel time after 5 minutes t_5 [s]	15	14	15
Air content [V/V %]	2.6	1.7	2.5
Density [kg/m^3]	2220	2200	2200

Tablica 3.7 pokazuje da sve tri mješavine zadovoljavaju postavljene uvijete. Slike 3.10 i 3.11 opisuju ponašanje razastiranja i faktora blokiranja tokom vremenom. Slika 3.10 pokazuje da se razastiranje smanjuje postepeno s vremenom nakon jednog porasta prvih 15 minuta. Moguće objašnjenje ovog rasta je da SP treba određeno vrijeme kako bi se aktivirao. Posebno pad razastiranja mješavine A je bio jako izražen s vremenom. Mješavine B i C prate sličnu liniju i nakon dva sata oni također imaju minimalno razastiranje od 650 mm.

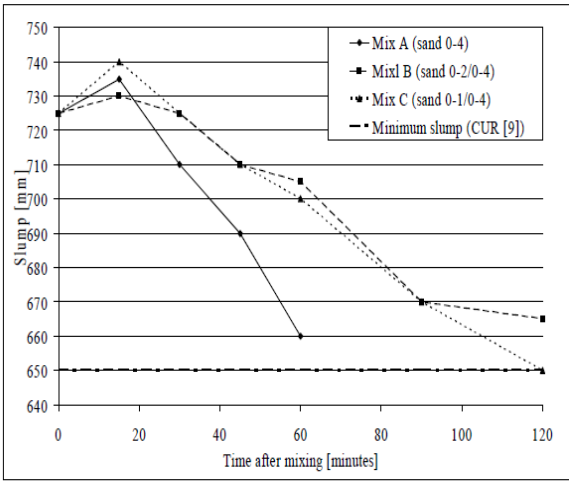


Figure 5: Slump flow reduction with time

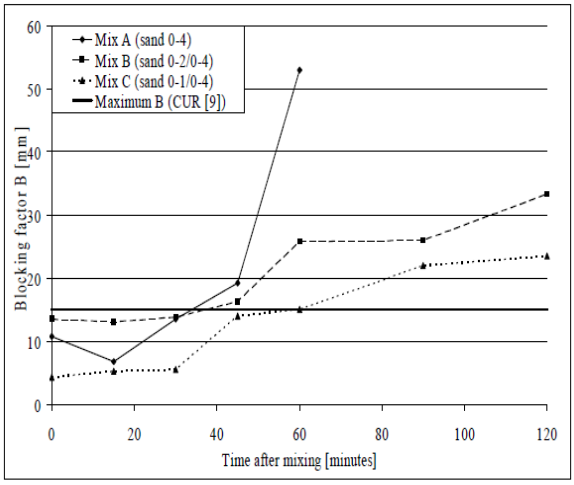


Figure 6: Blocking factor increase with time

Slika 3.10 Smanjenje razastiranja s vremenom [2] **Slika 3.11** Povećanje faktora blokiranja s vremenom [2]

Slika 3.11 pokazuje da nakon 45 minuta mješavina A prelazi maksimalni faktor blokiranja od 15 mm. Nakon 60 minuta mješavina A jasno pokazuje znatno blokiranje. Mješavina B ponaša se bolje od mješavine A, ali nakon 45 minuta ne zadovoljava maksimalni dopušteni faktor blokiranja. Mješavina C zadovoljava zahtjevima tokom 60 minuta i prelazi maksimalan faktor blokiranja samo neznatno. Treba napomenuti da su blokiranja mješavina B i C jako mala, samo mala razlika u visini je vidljiva preko J-prstena. Beton dalje teče lako uz rešetku i ne pokazuje nikakve znakove segregacije. Očekivalo se da će ocjenjivanje koje pobliže prati modificiranu A&A krivulju rezultirati u mješavini sa boljom obradivosti i stabilnošću. Mješavine betona otkrivaju da mješavina C pokazuje bolju otpornost prema segregaciji i bolju obradivost. Potrebna količina SP-a u mješavini C je niža nego u ostale dvije mješavine, dok je razastiranje i vrijeme toka kroz V-lijevak gotovo isto u sve tri mješavine. Dodatak sitnog pijeska (0 – 1 mm) je poboljšao sposobnost protoka mješavine tako da se udio praha i SP-a može smanjiti.

Zapravo pogreška očitavanja od oko 1 mm očitovati će se u faktoru blokiranja za koji je prevelika. Maksimalna vrijednost određena od CUR-a je vrlo teška, realna je samo onda kada visina mješavine može biti mjerena s preciznošću od 0,1 mm (na primjer s laserom). To je razlog što je u Njemačkoj razmatrano razastiranje sa i bez J-prstena, pri čemu bi razlika trebala biti manja od 50 mm. Ova razlika je lakša za mjerenje i sve tri mješavine zadovoljavaju ovaj uvjet. Visoko zadržavanje punjenja i fluidnost najvjerojatnije duguje tipu korištenog superplastifikatora. Hanehara i Yamada također su primijetili dužu obradivost kad se koriste polikarboksilatne vrste dodataka.

Tablica 3.7 sadrži izmjereni udio zraka i gustoće betona. Udio zraka je viši od 1,5 % što je pretpostavljeno tijekom računanja mješavina. Moguće objašnjenje je to da beton nije imao dovoljno vremena za osloboditi se zraka (5 minuta) nakon punjenja posude za ispitivanje sadržaja zraka. Ali sve su vrijednosti manje od maksimalno prihvatljivog udjela zraka od 3 % (NEN 5962 (1988)). Gustoće svih triju mješavina su približne. Mješavina A posjeduje malo veću gustoću jer sadrži više praška. Mješavine B i C imaju istu gustoću,iako mješavina C sadrži manje praška od mješavine B. Ali, mješavina C sadrži 5 kg/m^3 cementa više koji ima veću specifičnu gustoću od ostalih sastojaka.

Provedeni testovi mješavine betona stoga doprinose zaključku da PSD i sadržaj sitnih materijala (<250 μm) uvelike utječu na stabilnost i obradivost mješavine. Primjena sitnog pijeska pomaže optimizirati i sadržaj i PSD u sitnom rasponu čestica tako da se količina potrebnog SP-a može smanjiti. Također primjena sitnog pijeska smanjuje troškove sastojaka mješavine. Sitni pijesak je relativno jeftin, jeftiniji je od druga dva pijeska i šljunka te zamjenjuje najskuplje sastojke cement i kamen u prahu. Osim toga projektiranje mješavine s PSD-om da pozorno prati modificirani A&A model smanjuje upotrebu skupog sastojka kao što je superplastifikatora. Za očekivati je da ako bi optimizirali PSD u nanometarskom rasponu, obradivost i stabilnost mješavine mogli bi se održati uz dodatno smanjenje sadržaja superplastifikatora [2].

3.2.6 Zaključak

U ovom radu istražena je i primijenjena Kineska metoda. Teorijske analize otkrivaju da pakiranje svih krutih tvari (šljunak, pijesak, punjenje i cement) u mješavini je od glavne važnosti. Idealna krivulja ocjenjivanja svih tvari treba slijediti modificiranu Andreasen and Andersen krivulju. Slijedi da agregat korištene od Su et al i Su and Miao prati ovu krivulju (q= 0,30). Nadalje kombiniranjem krutih tvari količina paste (voda, cement i punjenje) trebala bi biti smanjena što je više moguće. Ovaj rad analizira koje su kombinacije 3 pijeska, šljunaka, superplastifikatora i cementa sa zgurom rezultirale s najmanjim sadržajem praškastih materijala (cement i vapnenac u prahu). Na temelju tih razmatranja tri mješavine su bile sastavljene i testirane.

Drugi cilj je bio zadovoljiti ove teorijske uvijete koristeći najekonomičnije sastojke. To je rezultiralo u tri mješavine s niskim udjelom praška od oko 480 kg/m^3 betona. Svježi beton je ocijenjen s testovima: razastiranja, V-lijevka, J-prstena i mjeren je njegov udio zraka. Sve mješavine zadovoljavaju kriterije ovih testova, čime upotreba superplastifikator može biti ograničena na 1 % sadržaja u prahu te se može izbjeći upotreba sredstva za promjenu viskoznosti. Koristeći teoriju pakiranja Andreasen i Andersente, njene izmjene od Funka i Dingera mogu se napraviti jeftine SCC mješavine tako da ispunjavaju standarde i zahtjeve u svježem stanju. Osim toga superplastifikator tipa karboksilnog polimera je jedina primjesa

mješavini, pomoćno sredstvo za povećanje viskoznost smjese nije potrebno kako bi se postigla tražena svojstva [2].

3.3 Samozbijajući beton (SCC)-Usporedba metoda doziranja (B.F. Tutikian, M. Pacheco)

3.3.1 Sažetak

Cilj ovog istraživanja je bio usporediti tri metode doziranja za samozbijajući beton primjenjujući lokalne materijale, kako bi se utvrdilo koja je najekonomičnija i najracionalnija, tako pomažući izvršitelju u donošenju odluke i omogućujući ekonomsku i tehničku izvodljivost u njihovoj primjeni. Metode korištene u eksperimentu su bile: Nan Su et al., koja je razvijena 2001.; Repette-Melo, koja je izvedena 2005. i Tutikian & Dal Molin, koja je izvedena 2007. Iz rezultata dobivenih u eksperimentu uočeno je da metoda koja predstavlja najniže troškove i najvišu tlačnu čvrstoću u razdoblju nakon 7, 28 i 91 dan jest metoda Tutikian & Dal Molin, dok ona koja predstavlja najnižu penetraciju klorida iona, najbolju kompaktnost i najviši modul elastičnosti je metoda Repette-Melo. Prema testovima provedenim u svježem stanju, sve testirane metode dale su mješavine koje zadovoljavaju razinu samozbijanja zahtijevanu od ABNT NBR 15823:2010 [3].

3.3.2 Uvod

Razvoj samozbijajućeg betona predstavlja velik korak prema poboljšanju učinkovitosti i uvjeta rada na gradilištima te u industriji montažnih zgrada. Takav materijal omogućuje kraće vrijeme betoniranja, bolju završnu površinu betona i bolje karakteristike u očvrsnulom stanju, tako stvarajući dugotrajniju konstrukciju (GRUNEWALD, 2004). Prednosti SCC-a nisu samo visoka trajnost i otpornost. Njegova upotreba smanjuje zagađenje bukom, jer ne zahtjeva korištenje vibratora, što također ima za posljedicu smanjenje potrošnje električne energije. Upotrebom SCC-a smanjuje se rizik od nesreća, jer zahtjeva manji broj radnika. Prema Tutikian (2007) upotreba SCC-a usmjerava građevinske usluge prema industrijaliziranoj proizvodnji smanjujući troškove radne snage, povećavajući kvalitetu, trajnost, povjerenje u strukturu i sigurnost radnika. Tutikian (2007) navodi da interes za SCC-om raste u Brazilu, korišten je u industriji montažnih zgrada kao i u posebnim konstrukcijama. Međutim, glavna istraživanja su fokusirana na njihova mehanička svojstva, trajnost i sposobnost korištenja s

specifičnim vrstama lokalnih materijala. Doziranje, koje je ključni aspekt ovog materijala, je dosad površno istraženo.

SCC se više koristi u Japanu i Europi. U Brazilu, međutim viša razina povjerenja je potrebna u metodu doziranja kako bi se SCC napravio što pouzdanijim i rasprostranjenijim, čime se omogućuje veća mogućnost za njegovu primjenu bilo gdje kako bi dokazali da može biti ekonomski prihvatljiv (TECHNE MAGAZINE, 2008). Nekoliko međunarodnih i nacionalnih postupaka ili preporuka za doziranje SCC-a su izvedene pošto su studije postale dosljednije. Takve se metode mogu razlikovati u kriteriju definiranja: granulometrijskog sastava, udjela sitnih materijala, postavljanja granice na omjer vode i cementa, volumena paste, udjela superplastifikatora u mješavini, upotrebi sredstva za promjenu viskoznosti, odvojenih istraživanja paste i morta. Neke metode se sastoje od sljedova izračuna koji daju granične intervale za svaki materijal u mješavini.

Ovo istraživanje uspoređuje tri postojeće metode doziranja za SCC s lokalnim materijalima da bi odredili koja je najekonomičnija i najracionalnija tako pomažući izvršitelju u donošenju odluke i dokazujući ekonomsku i tehničku izvodljivost za praktičnu primjenu, a također širi znanje o SCC-u kao i njegovu uporabu.

Izabrane metode doziranja bile su: metoda predložena od Nan su et al., iz 2001., jer se temelji na jednadžbama i empirijskim izračunima; metoda od Repette-Melo, razvijena 2005., zbog svog predlaganja niza testova za dodatke u pasti betona, radi poboljšanja komponenti u mješavini; izabrana metoda je bila i ona od Tutikian & Dal Molin, razvijena 2007., zbog njihovih istraživanja granulometrijskog sastava betona prije postizanja njihovog samozbijanja. Samozbijanje SCC-a u svježoj fazi je bilo uspoređeno u testovima kao što su: razastiranje, $t_{500,}$ L-kutija i V-lijevak temeljeni na granicama određenim od ABNT NBR 15823:2010. U očvrsnutoj fazi, analizirane karakteristike su bile tlačna čvrstoća nakon 7, 28, 91 dan, modul elastičnosti nakon 91 dan, brzina prolaska ultrazvučnih valova i penetracija kloridnog iona nakon 28 dana za sve mješavine. Ovo istraživanje također određuje trošak baziran na tržišnim vrijednostima komponenata betona [3].

3.3.3 Ciljevi istraživanja

Glavni cilj ovog istraživanja je napraviti tehničke i ekonomske usporedbe između metoda doziranja za SCC predloženih od Nan Su et al. iz 2001., Repette-Melo iz 2005. i Tutikian& Dal Molin iz 2007. kroz upotrebu materijala dostupnih u državi Rio Grande do Sul (RS), Brazil [3].

3.3.4 Materijali i istraživački program

S obzirom na ovdje izložene ciljeve, bio je stvoren i razvijen istraživački program što je definiralo testove provedene na različitim betonima kao i na materijalima korištenim u istraživanju. Istraživanje je provedeno u laboratoriju građevinskih materijala (CML) u Vale do Rio Sinos University (UNISINOS). Miješalica sa vertikalnim osima je korištena u proizvodnji svih betona te je u dodavanju materijala uspostavljen sljedeći red. Prvo je smješten krupni agregat, nakon čega slijedi 80 % vode, normalni pijesak, sitni pijesak, cement, aditiv i na kraju ostatak vode. Ukupno osam mješavina betona je testirano, napravljeno je 11 uzoraka s promjerom od 10 cm i visinom od 20 cm za ispitivanje svake od mješavina, što je ukupno 88 uzoraka. Ti uzorci su stajali na sobnoj temperaturi u kalupu 24 sata. Zatim su izvađeni iz kalupa i premješteni u vlažnu komoru, gdje su držani dok ne dosegnu zahtijevanu dob u kojoj će se testovi izvoditi [3].

3.3.5 Pregled korištenih metoda doziranja

3.3.5.1 Metoda Nan Su et al

Ova metoda je podijeljena u koracima: 1) određivanje količine krupnog i sitnog agregata, 2) omjer volumena sitnog i ukupnog agregata je (50% - 57%), 3) određivanje potrebnog cementa, 4) određivanje potrebne vode, 5) određivanje potrebnog sitnog agregata, 6) određivanje potrebne količine superplastifikatora, 7) dodavanje vode u mješavinu, 8) miješanje i testovi obradivosti, 9) finalno podešavanje u betonu. Detaljan postupak proračuna mješavine po ovoj metodi je prikazan u poglavlju 3.1 [3].

Tablica 3.8 Proporcije dobivene za svaku metodu [3]

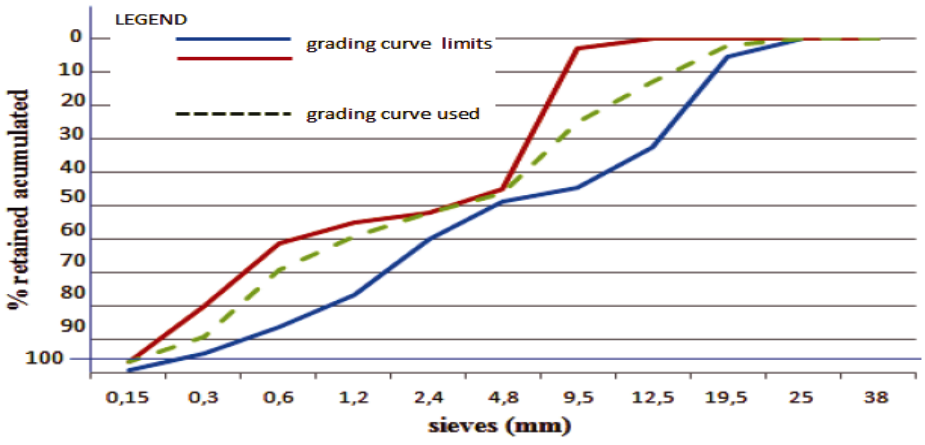
PARAMETER	METHODS							
	Tutikian				Nan Su et al.	Repette-Melo		
1:m	3	4	5	6	4,28	3,50	3,97	4,32
w/c (kg/kg)	0,35	0,47	0,56	0,68	0,50	0,39	0,48	0,56
α (%)	64	62	60	59	67	61	60	59
C (kg/m³)	538	421	350	297	393	490	432	398
TAF (%)	20	20	20	20	18	10	10	10
TG (%)	48	48	48	48	40	50	50	50
Adt (%)	0,62	0,62	0,62	0,62	0,85	0,75	0,75	0,75
R$	313,04	252,53	215,86	188,08	249,25	298,97	267,14	248,49

Gdje je: 1:m= jedinica za svaku skupinu, w/c= omjer voda/cement (kg/kg), α= udio morta (%), c= potrošnja cementa (kg/m^3), TAF= udio agregata sitnog pijeska u odnosu na ukupnu težinu u masi (%), TG= udio šljunčanog agregata u odnosu na ukupnu težinu u masi (%), Adt= udio dodatka (%) u odnosu na težinu cementa, R$= ukupni troškovi za dobivanje 1 m^3 betona [3].

3.3.5.2 Repette-Melo metoda

Postupak metode je sljedeći: određivanje omjera voda/cement, testiranje paste (podešavanje sadržaja cementa), testiranje morta (podešavanje udjela sitnog agregata i dodataka, vrijednost sitnog agregata u odnosu prema ukupnom mortu je između 35% - 55%), testiranje betona (podešavanje udjela krupnog agregata i dodataka, krupni agregat u odnosu prema ukupnom volumenu betona je između 27% - 33%).

Početni korak za izradu SCC mješavine je sastavljanje paste, određujući omjer voda/cement i udio sitnih dodataka.



Slika 3.12 Granulometrijska krivulja sastava agregata korištenih u Repette-Melo metodi [3]

Kako bi se odredio omjer voda/cement, polazna točka koja je utvrđena bila je tlačna čvrstoća prema udjelu vode i cementa korištenih u svakoj sastavnoj jedinici. Za definiciju skupine betona, tri vrijednosti su u početku određene za omjer vode i cementa: jedna za siromašan sastav jedinica (W/C: 0,56), jedna za bogati (W/C: 0,39) i jedna za srednji sastav jedinica (W/C: 0,48), na temelju prethodnog znanja o materijalima. Udio sitnih materijala je određen za svaki određeni omjer voda/cement i doziran je kako bi zamijenio cement u volumenu. Metoda je utvrdila da postotak punila koji prođe kroz sito otvora 0,075 mm treba biti korišten u ovoj fazi. Sitni pijesak je korišten kao sitni materijal kako bi se postigla mješavina za SCC. Budući da pijesak nema značajnu količinu čestica manju od 0,075 mm, ne može biti uključen u sastav paste.

U sljedećem koraku, pripremljen je mort za mješavinu, definiranjem udjela sitnog agregata u odnosu na ukupni volumen morta te zatim osnovni iznos superplastifikatora za mješavinu. Udio sitnog agregata je bio prilagođen samo za omjer vode i cementa, srednjim, s postotkom koji se koristi za druge. Kao osnovnu smjernicu, metoda utvrđuje da volumen sitnih agregata u odnosu prema ukupnom volumenu morta bi trebao biti ne manja od 35 % i ne veća od 55 %.

Sastav normalnog i sitnog pijeska je definiran kao sitni agregat. Izbor postotka za ove materijale je baziran na optimalnoj granulometrijskoj krivulji agregata. Odatle je zaključeno da udio sitnog agregata koji najbolje odgovara graničnim krivuljama utvrđenim za ovu metodu je sastavljen od 80 % normalnog pijeska i 20 % sitnog pijeska. Kako bi se utvrdio udio sitnog agregata, mortovi su ocijenjeni na temelju ispitivanja fluidnosti, koji je prilagođen za mort. Prema testu, idealan udio sitnog agregata u sastavu morta je bio 50 % u odnosu prema ukupnom volumenu, postižući zadovoljavajuće rezultate testa kad je udio dodatka bio 0,20 % (smatrajući samo udio krutih tvari), budući da je vrijeme istjecanja bilo 4 sekunde i razastiranje 240 mm. Prema metodi, idealan udio dodataka je taj koji rezultira promjerom razastiranja morta između 200 mm i 280 mm i vremenom pražnjenja u V-lijevku između 3,5 i 10 sekundi.

Mort sa srednjim omjerom vode i cementa je korišten kako bi se odredio udio krupnog agregata za pripremu početnog ispitivanja mješavine s 30 % krupnog agregata u odnosu

prema ukupnom volumenu betona. Metoda predlaže udio krupnog agregata između 27 % i 33 %, optimalna vrijednost biti će ona koja pokaže zadovoljavajuće rezultate ispitivanja obradivosti, dok dostiže postotak dodatka od 0,30 % (uzimajući u obzir samo udio krutih tvari). Tako je vrijednost od 30 % usvojena, što je bila središnja točka između predloženih granica. Koristeći taj postotak pokusna mješavina sa srednjim sastavom jedinica je napravljena kako bi utvrdili prihvatljivost usvojenog omjera, s obzirom na početni udio dodatka određenog tokom faze morta.

Mješavina napravljena od 50 % 25- milimetarskog šljunka i 50 % 19- milimetarskog šljunka je korištena kao krupni agregat. Ovi postotci su usvojeni bazirajući se na granulometrijskoj analizi šljunka. Slika 3.12 prikazuje granulometrijsku krivulju sitnog i krupnog agregata, prema postotcima koji su usvojeni i graničnim krivuljama nametnutim od metode za određivanje granulometrijskog sastava. Kao što se može vidjeti na slici 3.12, dobivena granulometrijska krivulja agregata korištena za mješavinu je u granicama preporučenim od metode. Gdje nije moguće staviti bilo koji od sastava agregata u graničnim krivuljama, biti će potrebno navesti druge materijale s drugačijim granulometrijskim karakteristikama koje će omogućiti izvodljivost mješavine.

Prema metodi, udio dodatka u mortu predstavlja dobar pokazatelj rezultata koji će biti postignuti u betonu. Općenito govoreći, potreban je porast od oko 0,1% u odnosu na optimalan udio morta. Sljedeći smjernice u pogledu udjela dodatka, probna mješavina sadržavala je početnih 0,2 % vrijednosti superplastifikatora. Test provjere fluidnosti pokazuje da mješavina nije dovoljno fluidna, što je dovelo do postupnog povećanja dodatka do maksimalne dopuštene količine, odnosno 0,3 % (uzimajući u obzir samo udio kruti tvari). U slučaju nezadovoljavajućih rezultata, udio krupnog agregata trebao bi biti promijenjen u odnosu prema ukupnom volumenu betona, dok bi mješavina trebala biti zamijenjena s drugačijim jedinicama sastavnih dijelova. Nakon rasta od 0,1 % u mješavini, testovi provjere fluidnosti (razastiranja) su izvedeni ponovno i potvrđeno je da su s dodanim superplastifikatorom dobiveni rezultati bili u skladu s utvrđenim vrijednostima.

Zatim su provedeni ostali testovi obradivosti: T_{500}, L-kutija, V-lijevak, kako bi se potvrdila usklađenost njihovih rezultata s vrijednostima od ABNT NBR 15823:2010. Nakon što su definirani testovi sastava jedinica, moguće je izračunati finalni sastav jedinica za SCC. Korištenih da bi izračunali udio vrijednosti materijala za 1 m^3 betona, koji je napravljen od 30 % krupnog agregata i 7 0% morta. Mort je sastavljen od 35 % sitnog agregata dok se ostalih 65 % sastoji od vode, cementa i dodataka.

Treba napomenuti da uslijed postupka određenih metoda doziranja, potrebno je održavati isti udio krupnog i sitnog agregata za sve omjere vode i cementa navedene u početnom koraku postupka miješanja. To je važno kad je preporučeno da udio morta treba biti prilagođen samo za omjer vode i cementa (srednje, u slučaju izgradnje krivulje skupine betona s tri prednosti). To podrazumijeva da jedini materijal koji će biti zamijenjen za svaki beton je količina cementa, što će prouzrokovati promjenu u potrošnji mješavine i udjelu vode. Međutim, iz jedne mješavine u drugu, voda će biti dodana te će cement i dodatak biti smanjeni, smatrajući za ovu skupinu konstantan udio od 0,35 m^3. Konačni udio superplastifikatora je bio 0,3 % (samo udio krutih tvari), što je ekvivalent od 0,75 % ako se smatra za udio krutih tvari i tekućina koje postoje u mješavini. Ovaj postotak je postavljen za druge sastave jedinica s istim omjerom agregat/cement u masi, podešavajući samo omjer voda/cement. Tablica 3.8 prikazuje sastav jedinica za ovu metodu [3].

3.3.5.3 Metoda Tutikian-Dal Molin

Prvi korak koji je poduzet kako bi se dobila mješavina je bio odrediti granulometrijski kostur. Materijali su pakirani, dva po dva, počevši s onim s najvećom granulometrijom spuštajući se do onih s najmanjom granulometrijom. Prvo pakiranje testom kompresije je bilo između 25-milimetarskog šljunka i 19- milimetarskog šljunka, zatim kompaktnost s redovitim pijeskom i na kraju sa sitnim pijeskom. Tablica 3.9 prikazuje rezultate pakiranja šljunaka od 25 mm i 19 mm. Uočeno je da je postotak mješavine koji dokazuje najmanji broj šupljina bio 60 % od 25-milimetarskog šljunka i 40 % šljunka od 19 mm, s 41,02 % šupljina. Trebalo bi napomenuti da jedinica mase ove mješavine nije veća od svih drugih, to jest idealan omjer je uvijek onaj koji rezultira najmanjim brojem šupljina. Zbijena jedinica mase je samo jedan pokazatelj, budući da nije dovoljan za doći do zaključka.

Tablica 3.9 Testovi pakiranja između šljunka od 25 mm i šljunka od 16 mm [3]

25 mm Gravel (%)	19 mm Gravel (%)	Unit massa of mixture (kg/m³)	Compacted bulk density (kg/m³)	Index of voids (%)
100	0	3065,00	1704,35	44,39
90	10	3044,50	1736,23	42,97
80	20	3024,00	1755,36	41,95
70	30	3003,50	1753,04	41,63
60	40	2983,00	1759,42	41,02
50	50	2962,50	1736,23	41,39
40	60	2942,00	1701,45	42,17
30	70	2921,50	1634,78	44,04
20	80	2901,00	1597,10	44,95
10	90	2880,50	1556,52	45,96
0	100	2860,00	1504,35	47,40

Drugi korak pakiranja za mješavine SCC-a je dobivanje kompaktnosti između prethodne mješavine, sa šljunkom (od 25 mm i 19 mm)i normalnog pijeska. Tablica 3.10 pokazuje rezultate pakiranja šljunka i normalnog pijeska. Na kraju, zadnje pakiranje je izvedeno, između sitnog pijeska i prethodno pakiranih agregata. Tablica 3.11 prikazuje rezultate dobivene iz testova kompaktnosti ovih materijala. Uočeno je da je optimalan sastav bio 80 % mješavine šljunka (od 25 mm i 16 mm) i normalnog pijeska s 20 % sitnog pijeska, što je rezultiralo sa 16,61 % vrijednosti šupljina. Testovi su pokrenuti sa zamjenama od 10 % i povećanom preciznosti do 5 % kad su se približili idealnoj konačnoj vrijednosti. Test kompaktnosti vrijednosti između materijala rezultirao je sa sljedećim proporcijama za mješavine SCC-a, u masi: 28,80 % šljunka od 25 mm, 19,20 % šljunka od 16 mm, 32 % normalnog pijeska i 20 % sitnog pijeska.

Tablica 3.10 Testovi pakiranja između šljunka (od 25 mm i od 16 mm) i normalnog pijeska [3]

25 mm and 19 mm Gravel (%)	Regular sand (%)	Unit massa of mixture (kg/m³)	Compacted bulk density (kg/m³)	Index of voids (%)
100	0	2983,00	1759,42	41,02
90	10	2918,70	1846,28	36,74
80	20	2854,40	1951,30	31,64
70	30	2790,10	2062,03	26,09
65	35	2757,95	2092,75	24,12
60	40	2725,80	2125,22	22,03
55	45	2693,65	2091,01	22,37
50	50	2661,50	2078,84	22,39
40	60	2597,20	2014,49	22,44
30	70	2532,90	1959,42	22,64
20	80	2468,60	1892,17	23,35
10	90	2404,30	1745,51	27,40
0	100	2340,00	1628,41	30,41

Tablica 3.11 Testovi pakiranja između šljunka (od 25 mm i od 16 mm), normalnog pijeska i sitnog pijeska [3]

25 mm, 19 mm gravel and regular sand (%)	Fine sand (%)	Unit massa of mixture (kg/m³)	Compacted bulk density (kg/m³)	Index of voids (%)
100	0	2725,80	2125,22	22,03
90	10	2686,22	2154,78	19,78
85	15	2657,29	2182,61	17,86
80	20	2646,64	2206,96	16,61
75	25	2626,85	2182,61	16,91
70	30	2607,06	2120,58	18,66
65	35	2587,27	2090,43	19,20
60	40	2567,48	2032,75	20,83
55	45	2547,69	1974,49	22,50
50	50	2527,90	1921,74	23,98
40	60	2488,32	1886,96	24,17
30	70	2448,74	1800,00	26,49
20	80	2409,16	1750,72	27,33
10	90	2369,58	1663,77	29,79
0	100	2330,00	1561,74	32,97

Nakon završenog testa kompaktnosti, sljedeći korak je bio odrediti omjer vode i cementa te udio dodanog superplastifikatora. Nakon toga, sastav jedinica (1:4) je bio korišten za napraviti podešavanje mješavine, kako bi potvrdili omjer voda/cement i najvažnije odredili eksperimentalno udio superplastifikatora u mješavini. Prvo je bila utvrđena vrijednost dodatka od 0,50 % (uzimajući u obzir udio krutih tvari i tekućina u mješavini) u odnosu na masu cementa i omjer voda/cement od 0,40. Nakon određenih ovih vrijednosti, započela je srednja mješavina i iz testova izvedenih u svježoj fazi definirani su finalni idealni udjeli superplastifikatora u mješavini te je određen omjer voda/cement. Iz dobivenih rezultata, konačni jedinični sastav za SCC je određen bez potrebe za izmjenama. Prema metodi, idealno je stvoriti četiri točke tako da jednadžbe ponašanja imaju viši koeficijent određivanja, dopuštajući krivuljama da budu bolje prilagođene. Tablica 3.8 prikazuje sastav jedinica za ovu metodu [3].

3.3.6 Testovi izvedeni u svježem stanju

U svježem stanju skupine SCC-a su testirane kako bi procijenili svojstva: fluidnosti, sposobnosti prolaska, otpornosti na segregaciju i vidljivu plastičnu viskoznost, sljedeći tehničke podatke određene od ABNT NBR 15823:2010. Ispitivanje uključuje testove: razastiranja (SF), vrijeme pražnjenja (VS), L-kutija (PL) i V-lijevak (VF) [3].

3.3.7 Testovi izvedeni u očvrsnutom stanju

Kako bi se usporedila svojstva dobivena u svakoj skupini SCC-a u očvrsnutom stanju, izvršena su ispitivanja:tlačne čvrstoće betona nakon 7, 28 i 91 dan, modula elastičnosti nakon 91 dan, brzine širenja ultrazvučnih valova nakon 91 dan i penetracije kloridnog iona nakon 28 dana. Test tlačne čvrstoće, izveden u skladu s ABNT NBR 5739:2007, je izveden zbog toga što je to najčešće korišteno svojstvo u istraživanju i u stvarnim primjenama, isto tako je najviše potrebno od strane projektanata i drugih stručnjaka. Testovi modula elastičnosti SCC-a, temeljeni na ABNT NBR 8522:2008, su izvedeni jer je to jedna važna karakteristika koja utječe na uklanjanje strukturalnih nedostataka u njihovom sastavu i to je razlog zašto neki stručnjaci ne koriste SCC, nakon što su suočeni s značajnim smanjenjem u njegovoj vrijednosti zbog materijala korištenih u njihovom sastavu. ABNT NBR 8802:1994 određuje izvršenja postupak širenja ultrazvučnih valova, koji je izabran da bude test koji se jako oslanja na kompaktnost mješavine, identificirajući pakiranje među svim komponentama. Testovi penetracije kloridnog iona su korišteni jer su bili reprezentativni za trajnost, bez obzira na njegovu primjenu. Ovaj test je bio prilagođen od norme ASTM 1202:2007. [3].

3.3.8 Korišteni materijali

Za izvršenje eksperimentalnog rada izabrani su materijali koji se nalaze u državi Rio Grande do Sul (RS), koji su ekonomični i već korišteni u gradnji za druge svrhe. Kako bi se utvrdile karakteristike agregata korištenih u eksperimentalnom radu usvojene procedure su bile u suglasnosti s sljedećim standardima: testovi specifične mase sitnih agregata (normalan pijesak i sitni pijesak) su izvedeni prema ABNT NBR NM 52:2009., dok su testovi specifične mase za krupne agregate izvedeni prema ABNT NBR NM 53:2009. Testovi mase čestica (jedinica) su izvedeni prema ABNT NBR NM 45:2006. i analize granulometrijskog sastava su napravljene prema procedurama ABNT NBR NM 248:2003. [3].

3.3.8.1 Cement

Korišteni cement je bio CPV-ARI (Portland cement s visokom početnom otpornošću). Izabran je zato što je najviše korišten u montažnoj industriji, koja je jedno od područja gdje SCC može biti upotrijebljen s najviše prednosti [3].

3.3.8.2 Agregati

Dva sastava bazalt šljunka su upotrijebljena kao krupni agregati. Normalni riječni pijesak je korišten kao sitni agregat, a nepucolanski materijal je korišten kao sitni materijal, odnosno sitni pijesak. Ovaj agregat je također korišten u nekim lokalnim tvrtkama, posebno u uslugama betoniranja s konvencionalnim betonom (CC) za njegov sastav te može biti skladišten vani u nadstrešnicama koje su relativno lake za izgrditi, bez potrebe za velikim sredstvima, koja su na primjer potrebna pri nabavi silosa. Svi agregati su komercijalno dostupni u južnom Brazilu [3].

3.3.8.3 Dodatak superplastifikatora

Kao doza za SCC, korištena je treća generacija dodatka superolastifikatora, baziranog na jednom lancu modificiranog polikarboksilnog etera koji djeluje kao raspršivač za cementni materijal, omogućavajući superplastifikaciju i veliko smanjenje vode, povoljno utječući na obradivost betona bez promjene u vremenu stvrdnjavanja [3].

3.3.8.4 Voda

Voda koja je korištena u proizvodnji betona je iz javne vodoopskrbe, prema ABNT NBR 15900:2009. [3].

3.3.9 Rezultati i rasprava

Tablica 3.8 prikazuje sastave jedinica dobivenih prema smjernicama nametnutih od svake metode doziranja provedene u eksperimentalnom programu. Vrijednosti jedinica za izračun ukupnih troškova SCC-a prikazanih u tablici 3.8, su citirani od strane dobavljača u lipnju 2011 godine, kada je osnovna cijena jedinice u Rio Grande do Sul (CUB-RS) za obiteljske kuće bila R$ 868,99, dok je tečaj dolara bio R$ 1,73. Cijena za ARI-RS cement bila je 0,44 R$/kg. Trošak pijeska je bio 0,013 R$/kg, trošak bazalt šljunka 0,022 R$/kg i trošak dodataka superplastifikatora 14,50 R$/kg [3].

3.3.10 Rezultati testova u svježoj fazi

Tablica 3.12 prikazuje rezultate za testove izvedene kako bi se ocijenilo ponašanje SCC-a u svježoj fazi.

Tablica 3.12 Rezultati ispitivanja svojstava u svježem stanju [3]

Method	Trace (1:m)	Spread		T_{500mm}		"L-Box"		"V-Funnel"	
		Result (mm)	Class NBR 15823	Result (s)	Class NBR 15823	Result (h2/h1)	Class NBR 15823	Result (s)	Class NBR 15823
Nan Su et al.	1:4,28	710	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	9	VF2
Repette-Melo	1:3,50	690	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	7	VF1
	1:3,97	660	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	6	VF1
	1:4,32	610	SF1	1	VS1	0,80	PJ1	5	VF1
Tutikian	1:3	710	SF2	2	VS1	0,90	PJ1	7	VF1
	1:4	690	SF2	2	VS1	0,85	PJ1	6	VF1
	1:5	640	SF1	1	VS1	0,85	PJ1	5	VF1
	1:6	590	SF1	1	VS1	0,80	PJ1	5	VF1

S obzirom na rezultate dobivene u svežem stanju, bilo je moguće zaključiti da su vrijednosti ostvarene u postupcima provedenim kako bi se ocijenilo samozbijanje SCC-a, bile zadovoljavajuće kao što je prikazano u tablici 3.12, jer odgovaraju standardu navedenom od ABNT NBR 15823:2010. U svakoj provedenoj skupini, utvrđeno je da je sastav jedinica za SCC koji pruža najveću koheziju, fluidnost i viskoznost bio onaj koji je pokazao najvišu potrošnju cementa, veći udio morta i zbog toga manju potrošnju šljunka po m^3, što omogućava betonu slobodno tečenje [3].

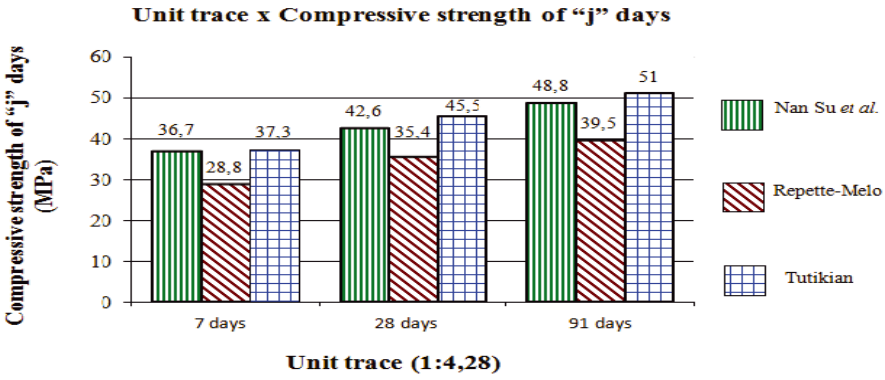
3.3.11 Usporedba svojstava betona u očvrsnutom stanju

Prvo postignute tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dan biti će uspoređene po istim pojedinačnim sastavima i zatim po troškovima mješavine, kao i po modulu elastičnosti, brzini rasprostiranja ultrazvučnih valova i penetraciji kloridnog iona za isti raspon tlačne čvrstoće. U Nan Su et al metodi nije bilo moguće ispitati ponašanje jednadžbi i dijagrama doziranja, jer je kroz nju određen samo jedan sastav jedinica. Stoga, da bi se mogle napraviti usporedbe, vrijednosti dobivene iz ove metode doziranja su upotrijebljene kao bazne vrijednosti. Za preostala dva eksperimenta, Repette-Mello, 2005. i Tutikian & Dal Molin, 2007., isti pojedinačni sastav jedinica i tlačne čvrstoće u izračunima jednadžbi će biti traženi i biti će određeni prema karakterističnim svojstvima ove metode. Treba napomenuti da je ova usporedba valjana,

budući da su rezultati dobiveni od Nan Su et al unutar granica podataka utvrđenih svojstvima u očvrsnutom stanju postignutih u Repette-Melo,2005., i Tutikian & Dal Molin,2007. [3].

3.3.11.1 Tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dan za isti jedinični tok

Za ovu usporedbu postavljen je pojedinačni sastav jedinica (1:m). Kroz ponašanje jednadžbe, istražena je tlačna čvrstoća nakon 7, 28 i 91 dana kao što je prikazano na slici 3.13 i bilo je moguće analizirati koji eksperiment je postigao najvišu tlačnu čvrstoću za isti pojedinačni sastav jedinica (1:4,28). Promatrajući sliku 3.13, može se zaključiti da je Tutikian & Dal Molin metoda, 2007., prezentirala tlačnu čvrstoću nakon 7 dana za 1 % veću nego što je prezentirano od Nan Su et al., 2001. i 29,5 % veću nego što je prezentirano od Repette-Melo, 2005. Također valja napomenuti da je nakon 28 dana Tutikian & Dal Molin metoda, 2007., opet postigla veću tlačnu čvrstoću nego druge dvije metode. Njena vrijednost je bila za 6,8 % veća nego ona dobivena od Nan Su et al., 2007. i za 28,5 % veća od tlačne čvrstoće dobivene od metode Repette-Melo, 2005. Na kraju je utvrđeno da je Tutikian & Dal Molin metoda, 2007. bila superiorna u vezi tlačne čvrstoće za isti pojedinačni sastav jedinica, u usporedbi sa ostalim dvjema metode. Nakon 91 dan dobiveni rezultati su bili za 4,5 % veći od onih od Nan Su et al., 2001. i za 29,1 % veći od onih dobivenih od metode Repette-Melo, 2005. [3].

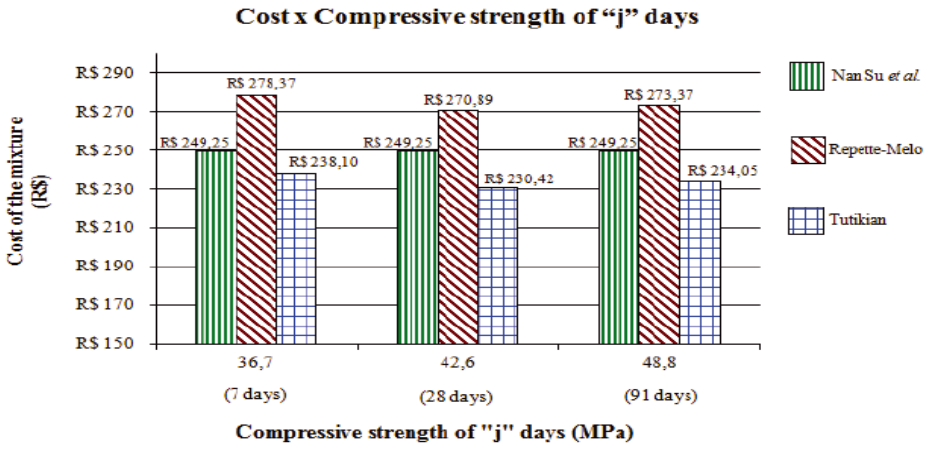


Slika 3.13 Tlačna čvrstoća "j" dana za istu jedinicu traga 1:4,28 [3]

3.3.11.2 Troškovi mješavine za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 7, 28 i 91 dan

Usporedbe troškova, imajući postavljene tlačne čvrstoće nakon 7 dana, za sve metode su prikazane na slici 3.14. Na temelju podataka prikazanih na slici 3.14, opaženo je da je za Tutikian & Dal Molin metodu, 2007., pri prikazu za iste tlačne čvrstoće nakon 7 dana, trošak

bio za 4,50 % niži od onog dobivenog od Nan Su et al. ,2001. i za 14,5 % niži od onog dobivenog od metode Repette-Melo, 2005. Za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 28 dana, Tutikian & Dal Molin metoda, 2007., prezentirala je procijenjen rezultat koji je za 7,6 % niži od onog koji je dobiven od Nan Su et al., 2001. i za 14,9 % niži od rezultata dobivenih od metode Repette-Melo, 2005. Na kraju je uočeno da se za tlačnu čvrstoću nakon 91 dan kod Tutikian & Dal Molin metode, 2007., ponovno dobije vrijednost za 6,1 % niža od one dobivene od Nan Su et al., 2001., a za 14,4 % niža od vrijednosti dobivene od metode Repette-Melo, 2005. Ovakvo ponašanje vjerojatno duguje boljem pakiranju materijala predloženog metodom doziranja i nižoj potrošnji dodataka u vezi sa udjelom cementa korištenom u smjesi. Bolje granulometrijsko pakiranje agregata omogućuje da mješavine imaju manje šupljina i tako dobivajući homogeniju strukturu. U betonima doziranim metodom Tutikian & Dal Molin, udio dodanog superplastifikatora je bio oko 27 % manji od onog korištenog kod Nan Su et al., 2001. i otprilike za 17,3 % manji nego kod metode Repette-Melo, 2005., tako favorizirajući usporedbu troškova [3].

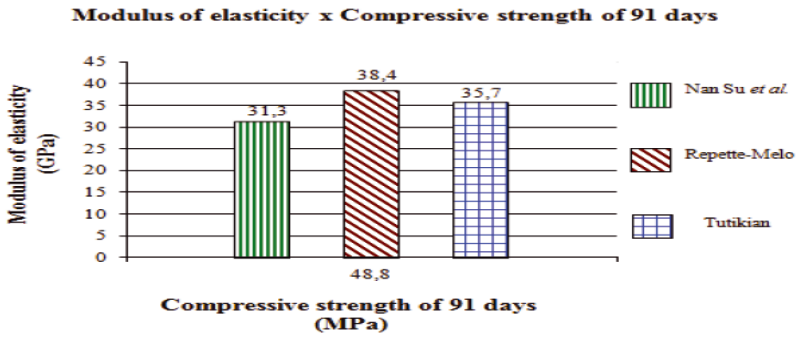


Slika 3.14 Usporedbe troškova za isti raspon tlačne čvrstoće "j" dana [3]

3.3.11.3 Modul elastičnost za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan

Učinjene analize performansi u svim metodama, koje se odnose na modul elastičnosti za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan su prikazane na slici 3.15. Prema podatcima prezentiranim na slici 3.15, uočeno je da je Repette-Melo metoda, 2005., prezentirala najveći modul elastičnosti, za čvrstoću od 48,8 MPa nakon 91 dan te je za 7,6 % veći nego onaj

dobiven od Tutikian & Dal Molin, 2007. i za 22,7 % veći od onog dobivenog od Nan Su et al., 2001. Razlog viših rezultati koji su ostvareni od metode Repette –Melo, 2005., za ovo svojstvo je vjerojatno taj što ima veći udio krupnog agregata dobivenog u sastavu mješavine i manji udio morta predložen metodom doziranja. Kad su uspoređeni dobiveni udjeli morta svih metoda, postavljena tlačna čvrstoća od 48,8 MPa nakon 28 dana, koja je postignuta od Nan Su et al., 2001., moguće je pokazati da je eksperiment proveden od Repette-Melo metode, 2005., prezentirao udio morta u mješavini od 59,9 %, dok je metoda Tutikian & Dal Molin, 2007., prezentirala 60,6 %, a Nan Su et al., 2001 je prezentirala 67,4 % morta u mješavini. Treba napomenuti da je u Repette-Melo metodi, 2005., udio korištenog krupnog agregata bio 50 % u odnosu prema ukupnom agregatu, u masi, usporedno s 48 % korištenom od Tutikian & Dal Molin, 2007. i 40 % korištenom od Nan Su et al., 2001. [3].

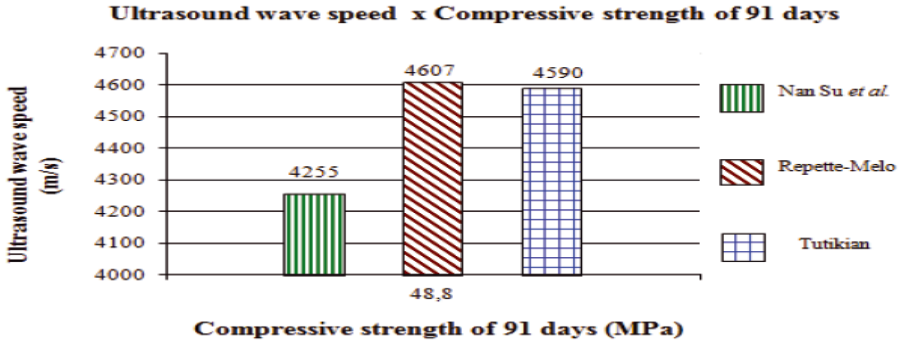


Slika 3.15 Usporedbe modula elastičnosti za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan za sve metode [3]

3.3.11.4 Širenje brzine ultrazvučnih valova za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan

Mjerenja brzine širenja ultrazvučnih valova su izvedena koristeći iste uzorke kao za testove modula elastičnosti, dakle definirani su isti rasponi tlačne čvrstoće za usporedbu, kao i dob za ispitivanje, nakon 91 dan. Slika 3.16 prikazuje usporedbe svih metoda doziranja, odnose brzina ultrazvučnih valova za isti raspon tlače čvrstoće nakon 91 dan. Kao što se može vidjeti na slici 3.16, metoda koja je pokazala najbolje rezultate je bila Repette-Melo, 2005. Važno je istaknuti da je razlika među rezultatima postignutim od metode Repette-Melo, 2005. i onima postignutim od metode Tutikian & Molin, 2007., mala, to jest 0,4 %, dok je od rezultata postignutih od metode Nan Su et al, 2001 bila za 8,3 % veća. Razlika među vrijednostima

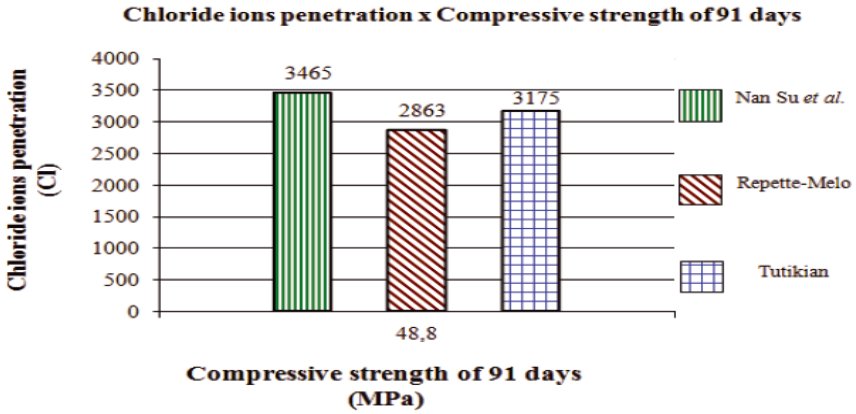
postignutim s ovim dvjema metodama za procjenu ovog svojstva je premala, stoga se može reći da su Tutikian & Dal Molin, 2007 i Repette-Melo metode, 2005, postigle slične vrijednosti za širenje brzine ultrazvučnih valova [3].



Slika 3.16 Širenje brzine ultrazvučnih valova za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan za sve metode [3]

3.3.11.5 Penetracija kloridnog iona za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan

Na kraju slika 3.17 prikazuje dobivene vrijednosti penetracijom kloridnog iona po svim betonima. Ovaj test je izveden nakon 28 dana i kako bi se održala dosljedna usporedba između svojstava izvedenih u dijagramu, isti rasponi tlačne čvrstoće su izabrani kao i za druge održane kategorije. Na temelju rezultata prikazanih na slici 3.17, može se zaključiti da Repette-Melo metoda, 2005., prezentira penetraciju kloridnog iona za 9,8 % nižu od one dobivene od Tutikian & Dal Molin, 2007. i za 17,4 % nižu od one dobivene prema Nan Su et al, 2001. Udio vode u vezi sa potrošnjom cementa u mješavini je važan faktor koji utječe na poroznost betona, što zauzvrat ima izravan utjecaj na penetraciju kloridnog iona. Treba napomenuti da Repette-Melo metoda, 2005., pruža omjer voda/cement od 0,46, nasuprot 0,51 od metode Tutikian & Dal Molin, 2007. i 0,50 od metode Nan Su et al., 2001. Ovi rezultati su postignuti postavljajući tlačnu čvrstoću nakon 91 dan na 48,8 MPa, što je vrijednost određena prema eksperimentima učinjenim od Nan Su et al. metode, 2001. Ta vrijednost je prilagođena kako bi odgovarala ponašanju jednadžbe utvrđenoj po Tutikian & Dal Molin, 2007. i Repette-Melo, 2005. [3].



Slika 3.17 Usporedbe penetracije kloridnog iona za isti raspon tlačne čvrstoće nakon 91 dan [3]

3.3.12 Ne kvantitativni aspekti iskazani u izvršenju metoda doziranja

Među ne kvantitativnim aspektima iskazanim tijekom postupaka za dobivanje SCC-a kroz metode izvedene tijekom eksperimentalnog programa, uočeno je da u postupcima određenim od Nan Su et al., 2001., izračun potrošnje cementa ovisi jedino o potrebnoj tlačnoj čvrstoći. Tijekom eksperimentalnog rada, kako bi se utvrdio udio cementa u mješavini za SCC, utvrđeno je da tlačna čvrstoća nakon 28 dana, prema formuli će biti 55 Mpa, što rezultira udjelom cementa u skladu s usvojeno čvrstoćom. Međutim, može se potvrditi da ovaj postupak ne funkcionira ispravno, budući da su rezultati za tlačnu čvrstoću nakon 28 dana kod ove metode bili 44,8 Mpa, što je za 18,5 % manje od vrijednosti definirane u predloženoj empirijskoj formuli.

Poznato je da postoji više vrsta cementa, agregata, veziva i dodataka koji utječu na konačnu čvrstoću te u slučaju namjere uspostavljanja univerzalne jednadžbe za izračun potrošnje cementa, sve ranije spomenute varijable trebaju biti uključene. Kako bi se odredio udio dodatka, što je važan faktor u sastavu troškova za SCC mješavine, Repette-Melo metoda, 2005., određuje utvrđivanje proporcija koje se trebaju koristiti, prvo tijekom faze s pastom, zatim tijekom faze s mortom i na kraju u betonu. Ranija ispitivanja kako bi se dobio najbolji učinak dodatka u mješavini, završila su stvarajući sporiju i mnogo nezgodniju proceduru za

doziranje betona. Utvrđeno je, kroz druge metode, da takvi eksperimenti imaju malen utjecaj na udio dodataka.

U metodi Tutikian & Dal Molin, 2007., na primjer, koja ne koristi upotrebu takvih postupaka kako bi se odredio udio superplastifikatora, dobiven je udio za 21 % manji u odnosu na materijale u mješavini dobivene od Repette-Melo, 2005.Iz toga se može zaključiti da idealan i optimalan sadržaj dodatka ovisi o međudjelovanju svih elemenata u sastavu jedinica, odnosno cementu, pijesku, šljunku i to je jedino moguće u fazi betona.

Repette-Melo metoda, 2005., kako bi odredila udio krupnog agregata, predlaže da se korištena vrijednost treba rangirati od 27 % do 33 % u odnosu na ukupni volumen betona. To je sasvim empirijski postupak, budući da će radnik zadužen za doziranje imati sedam alternativa za odabir udjela krupnog agregata u mješavini. To rađa sumnju tijekom izbora, kao što se dogodilo kod Nan Su et al, gdje je izabran srednji postotak [3].

3.3.13 Finalni zaključak

U ovom istraživanju, tri metode doziranja za proizvodnju SCC-a su uspoređene s tehničkog i ekonomskog stajališta, koristeći iste materijale. Imajući u vidu predložene ciljeve, nakon laboratorijskog rada, može se zaključiti sljedeće:

- Iz ovog istraživanja, dokazano je da, kako bi se dozirao SCC s agregatima pronađenim u južnom Brazilu, metoda koja je prezentirala najniži trošak i najvišu tlačnu čvrstoću nakon 7, 28 i 91 dan bila metoda Tutikian & Dal Molin, 2007., dok je ona koja je dosegla najvišu penetraciju kloridnim ionom i najvišu kompaktnost i modul elastičnosti bila metoda Repette-Melo, 2005. Tijekom testova izvedenih u svježoj fazi, sve metode su nastojale dobiti mješavine koje odgovaraju potrebnim zahtjevima za samozbijanje.
- Međutim, treba biti primijećeno da tijekom usporedbi napravljenih između Repette-Melo, 2005. i Tutkian & Dal Molin, 2007., karakteristike koje obuhvaćaju brzinu širenja ultrazvučnih valova postigle su jako slične rezultate, to jest rezultati se mogu shvatiti identičnima prema broju analiziranih uzoraka.

- U pogledu provjere obradivosti, dokazano je da vrijednosti postignute za svaku metodu doziranja mogu biti podešene, dok je u porastu proporcija dodanog superplastifikatora. To nije izvedeno u ovom istraživanju, jer je postavljen iznos kako bi se dobile vrijednosti za postizanje zahtjeva za samozbijanje.

Ova razmatranja vrijede samo za betone dozirane u ovom istraživanju, s materijalima iz južnog Brazila, određenim prema prikazanim proporcijama. Treba biti primijećeno da mehanička svojstva mogu trpjeti promjenu ako su, na primjer, upotrijebljeni drugi materijali ili ako su upotrijebljeni viši ili niži udjeli dodatka. Kriteriji i uspoređeni aspekti mogu biti korisni instrumenti u odabiru, među različitim metodama s potencijalno istim odgovorima, jedne koja najbolje odgovara stvarnosti ili specifičnim potrebama za primjenu [3].

3.4 CBI metoda

Najvažnija je razlika između ove i ostalih metoda u određivanju sadržaja agregata i paste. Prednost je ove metode što uzima u obzir granulometriju kombiniranog agregata (drobljenog i riječnog), primjenjiva je za bilo koju specificiranu veličinu krupnog i sitnog agregata i uzima u obzir uvjete ugradnje [6].

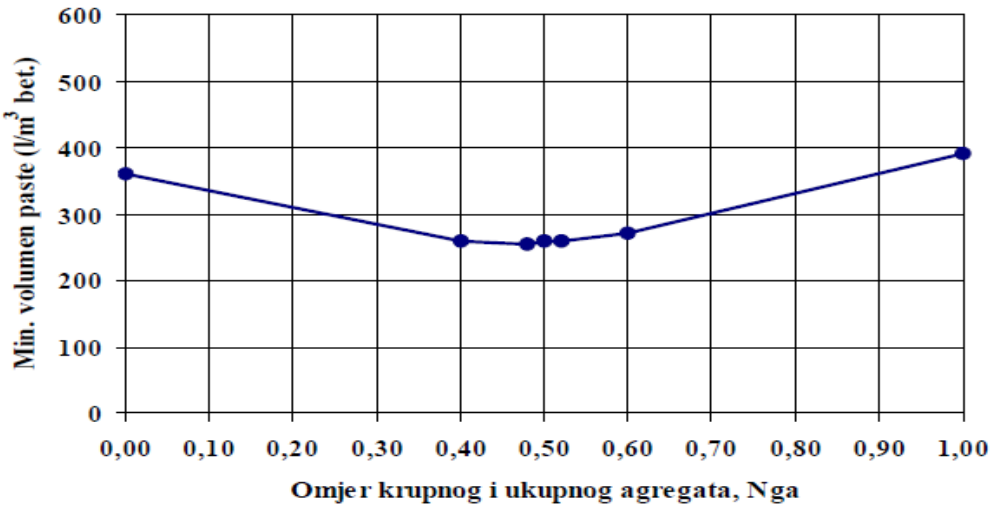
3.4.1 Određivanje minimalnog volumena paste

Princip projektiranja prema CBI metodi sastoji se u tome da se samozbijajući beton promatra kao zbroj tekuće faze, faze paste i krute faze-agregata. Pri projektiranju sastava potrebno je uzeti u obzir nekoliko kriterija:

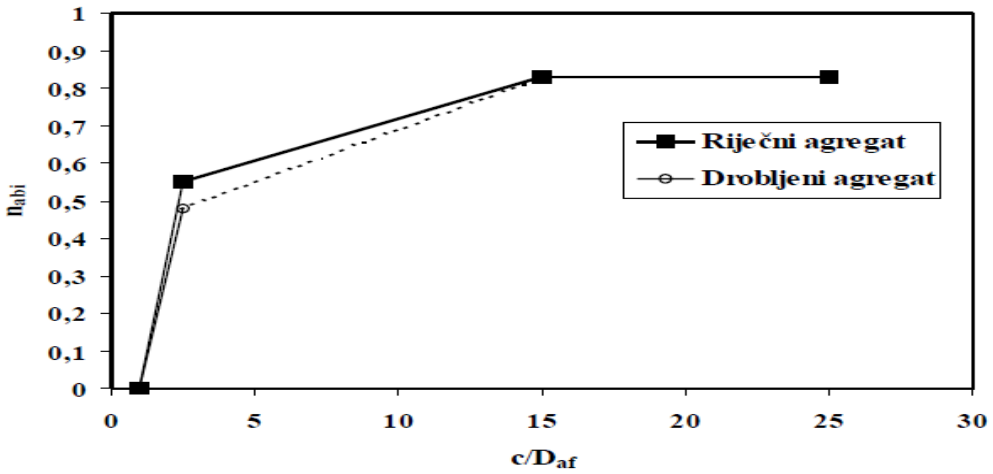
- **Projektni zahtjevi**, koji se temelje na specifičnim zahtjevima iz projekta, a odnose se na minimalnu tlačnu i vlačnu čvrstoću. Ovim kriterijem su obično uvjetovani v/c omjer i parametri trajnosti.
- **Kriterij detalja** odnosi se na razmještaj armature te oblik presjeka koji uvjetuju minimalni potrebni volumen paste kontroliranjem razmaka krupnih zrna agregata.
- **Kriterij sadržaja** šupljina odnosi se na određivanje minimalnog udjela paste prema omjeru količine krupnog agregata i ukupnog agregata (Nga). No, volumen potreban za ispunjavanje šupljina između zrna agregata nije dovoljan, s obzirom da volumen paste mora biti veći od sadržaja šupljina kako bi beton mogao teći, pa se ovaj kriterij

primjenjuje za određivanje optimalnog volumnog omjera između krupnog i ukupnog agregata. Na slici 3.18 prikazan je primjer za mješavinu riječnog agregata 0 - 8 mm i drobljenog agregata 8 - 16 mm.

- **Kriterij blokiranja** zasniva se na geometriji presjeka, a proračunom se dobiva minimalni potrebni volumen paste kako bi se izbjeglo blokiranje zrna agregata između armaturnih šipki. Povećanjem udjela paste povećava se unutrašnji razmak između zrna agregata. Na slici 3.19 prikazani su rezultati studije o riziku blokiranja agregata dobiveni ispitivanjima pri institutu CBI. Dvije krivulje na slici predstavljaju ovisnost između omjera blokiranja volumena agregata (n_{abi}) i između slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) za riječni i drobljeni agregat [6].



Slika 3.18 Primjer određivanja minimalnog volumena paste prema kriteriju sadržaja šupljina [6]



Slika 3.19 Ovisnost između volumena zaglavljenog agregata, n_{abi} i omjera slobodnog prostora i promjera zrna agregata, c/D_{af} [6]

$n_{abi} = V_{abi}/V_t$

V_{abi} – volumen zaglavljenog agregata

V_t – ukupni volumen betona

c – slobodni prostor između armaturnih šipki ili drugih prepreka

$D_{af} = M_{i-1} + 0{,}75(M_i - M_{i-1})$

M_i, M_{i-1} – najveća i najmanja veličina zrna agregata

Prema ovom modelu moguće je izračunati najveću količinu agregata (ili najmanji volumen paste) za izbjegavanje blokiranja agregata:

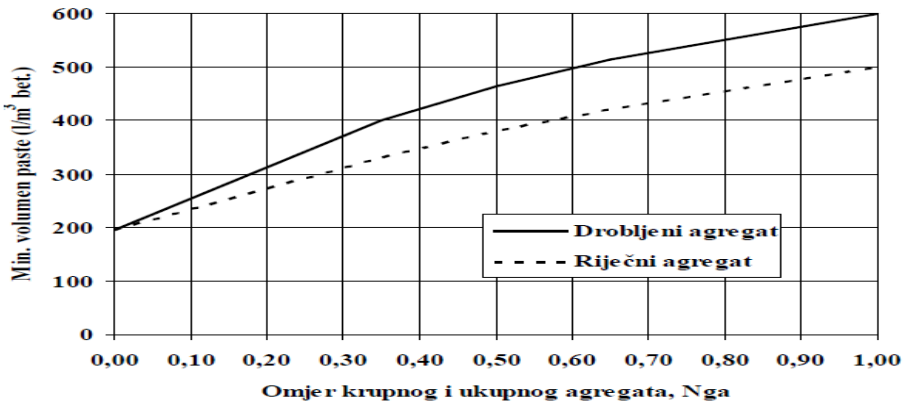
$$\text{Rizik blokiranja} = \sum_{i=1}^{n}\left(n_{ai}/n_{abi}\right) = \sum_{i=1}^{n}\frac{\left(V_{ai}/V_t\right)}{\left(V_{abi}/V_t\right)} = \sum_{i=1}^{n}\frac{V_{ai}}{V_{abi}} = 1$$

V_{ai} – volumen agregata

V_{abi} – volumen zaglavljenog agregata

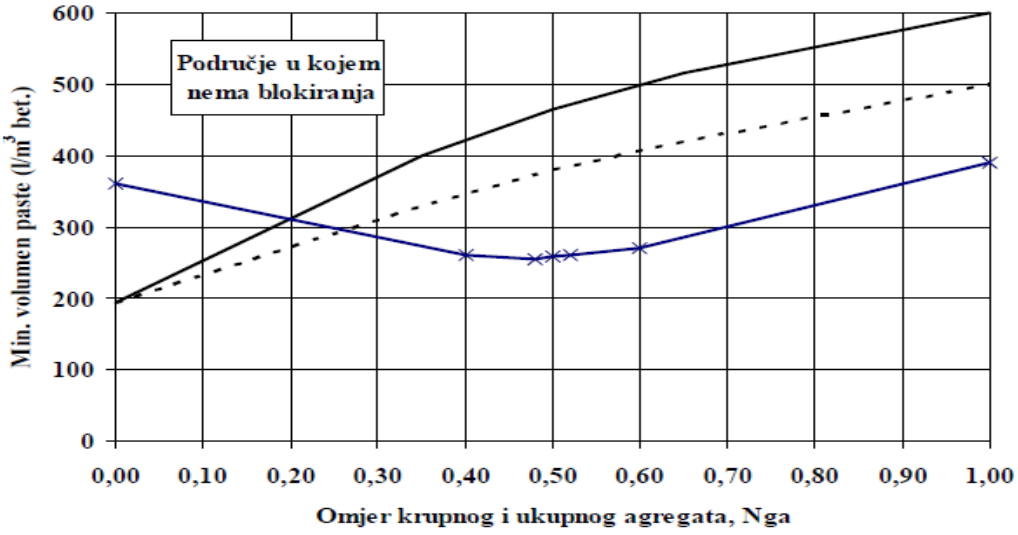
Primjenom ove jednadžbe, uz variranje količine krupnih zrna u odnosu na ukupnu količinu agregata (N_{ga}) i upotrebom stvarne granulometrije agregata iz preliminarnih istraživanja,

dobiva se dijagram kao na slici 3.20. Iz prikazanog se dijagrama za omjer krupnog agregata u ukupnom agregatu, N_{ga}, može odrediti minimalni potreban volumen paste [6].



Slika 3.20 Određivanje minimalnog volumena paste prema kriteriju blokiranja zrna agregata [6]

Iz sumarnog dijagrama, prikazanog na slici 3.21, vidljivo je da je za udio krupnog agregata do približno 20 % mjerodavan kriterij sadržaja šupljina, a kod većeg udjela agregata dominira kriterij blokiranja. Na dijagramu se također vidi da je minimalna količina paste potrebna za vrijednost N_{ga}=0,4-0,55. Proračun minimalne količine paste za izbjegavanje pojave blokiranja zrna agregata pretpostavlja razmak armature od 34 mm, vrijednost koja se uzima kao reprezentativna za građevine kao što su primjerice mostovi [6].



Slika 3.21 Minimalni volumen paste [6]

4 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

4.1 Uvod u eksperimentalni dio

Pri izradi betonske mješavine samozbijajućeg betona važno je postići visoku fluidnost, mogućnost samozbijanja i otpornost prema segregaciji. Upotrebom veziva s visokim sadržajem najsitnijih čestica postiže se visoka fluidnost i stabilnost paste. Zbog toga se pasti dodaju čestice sitnije od cementa kao što su leteći pepeo, silikatna prašina i reciklirani beton. Upotrebom sitnog agregata s dovoljnim sadržajem zrna sitnijih od 1 mm sprječava se segregacija između morta i paste. Premala viskoznost paste dovodi do problema segregacije, dok je kod prevelike viskoznosti paste smanjena obradivost mješavine. Fluidnost i viskoznost najviše ovise o omjeru vode i sitnih čestica. Upotreba superplastifikatora neophodna je za postizanje svojstva samozbijanja. Zahtijevanu visoku trajnost betona moguće je postići izborom niskog vodovezivnog faktora što omogućuje upotreba superplastifikatora.

Zadatak rada je eksperimentalno istražiti utjecaje: različitih dodataka, različitih metoda za proračun sastava mješavine, lokalnih materijala, maksimalne veličine zrna agregata i sadržaja sitnog agregata na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrsnulom stanju. Vlastita laboratorijska ispitivanja su napravljena na sedam različitih mješavina. Za potrebe ovog rada projektirani su sastavi samozbijajućeg betona s različitim dodacima i kombinacijama više dodataka za jednu mješavinu (leteći pepeo, silikatna prašina, filer od recikliranog betona). Pri projektiranju sastava samozbijajućeg betona korišteno je maksimalno zrno agregata od 16 mm i 22 mm te su projektirane mješavine s različitim sadržajem sitnog agregata. Sastavi za šest mješavina su proračunati prema jednostavnoj metodi projektiranja mješavina samozbijajućeg betona preporučenoj od Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai. Mješavine proračunate po toj metodi uspoređene su s jednom mješavinom čiji je proračun recepture napravljen prema CBI metodi, a zatim ocjenjene prema preporukama EFNARC-a.

Oznake i osnovne karakteristike testiranih samozbijajućih betona u ovom rad:

- SCC1 - samozbijajući beton sa: 53 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 16 mm, dodatkom letećeg pepela

- SCC2 - samozbijajući beton sa: 53 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 16 mm, dodatkom letećeg pepela i silikatne prašine
- SCC3 - samozbijajući beton sa: 53 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 1 6 mm, dodatkom letećeg pepela, silikatne prašine i recikliranog betona
- SCC4 - samozbijajući beton sa: 58 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 22 mm, dodatkom letećeg pepela
- SCC5 - samozbijajući beton sa: 58 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 22 mm, dodatkom letećeg pepela i silikatne prašine
- SCC6 - samozbijajući beton sa: 58 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 22 mm, dodatkom letećeg pepela,silikatne prašine i recikliranog betona
- SCC7 - samozbijajući beton sa: 58 % sitnog agregata,maksimalnim zrnom agregata od 22 mm, dodatkom letećeg pepela,silikatne prašine i recikliranog betona (mješavina čiji je sastav određen prema CBI metodi, sadrži nešto manji sadržaj vode i dodataka u usporedbi s prethodnim mješavinama)

Sve mješavine samozbijajućih betona koje su napravljene u ovom radu sadrže jednaku količinu cementa.

Izvršeno je ispitivanje mješavina samozbijajućeg betona u svježem stanju prema propisanim metodama. Nakon završetka ispitivanja betona u svježem stanju beton je ugrađen u kalupe oblika kocke, dimenzija 150x150x150 mm. Uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i njegovani u vlažnoj komori u vapnenačkoj vodi na temperaturi od 20 ± 2ºC do dana ispitivanja. Nakon 7 i 28 dana provedena su ispitivanja betona u očvrsnutom stanju.

4.2 Korišteni materijali

U eksperimentalnom dijelu rada korišteni su sljedeći materijali:

- Cement CEM II/A-S 42,5
- Agregat (Klis-kosa)
- Superplastifikator FTF
- Leteći pepeo
- Silikatna prašina
- Filer od recikliranog betona

4.2.1 Cement

Cement koji je korišten za mješavine je CEM II/A- S 42,5R, portlandski cement s dodatkom zgure sadrži 80% - 94% klinkera te 6% - 20% visoko kvalitetne zgure. Potvrda o sukladnosti prema zahtjevima HRN EN 197-1,HRN EN 197-2,BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2. Proizvođač cementa je Cemex, tvornica: Sv.Kajo [11].

Karakteristike:

- Visoka početna i konačna čvrstoća radi velikog udjela klinkera.
- Smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina, umjeren razvoj topline hidratacije.
- Izvrsna svojstva ugradivosti.
- Svijetla boja prikladnija za kombiniranje s pigmentima.
- Umjerena otpornost na agresivne medije zahvaljujući dodatku kvalitetne zgure [11].

Preporuke za primjenu:

- Radovi u cestogradnji cestovne građevine(tuneli,vijadukti,mostovi).
- Izgradnja poslovnih, stambenih i industrijskih objekata.
- Podzemni radovi temeljenja i podloga te stabilizacija tla.
- Izrada gotovih elemenata od betona,armiranog i prednapregnutog betona u normalnoj i termički tretiranoj proizvodnji.
- Transportni, pumpani beton.
- Izrada morta, žbuke i ljepila.
- Individualni radovi [11].

Osobito je prikladan:

- Za izradu vodonepropusnih betona,kao i onih otpornih na mraz i sol.
- Za korištenje u umjereno agresivnim sredinama.
- Za betonske konstrukcije većih presjeka [11].

Transport i skladištenje:

Transportirati u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage. Transportna sredstva prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa. Skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage. Pri skladištenju u silos osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima. Uz pravilan transport i skladištenje,cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke [11].

Tablica 4.1 Svojstva korištenog cementa [11]

TIPIČNA SVOJSTVA		**ZAHTJEV NORME**
Gubitak žarenjem	3,0 ± 0,5%	≤ 5,0
Netopivi ostatak	0,25 ± 0,05%	≤ 5,0
% SO_3	3,0 ± 0,2%	≤ 4,0
Kloridi	0,03+0,02%	≤ 0,1
Vrijeme vezivanja* (početak)	170 ± 30 min	≥ 60
Rana čvrstoća (2 dana)	27± 2 MPa	≥ 20
Normirana čvrstoća (28 dana)	53 ± 2 MPa	≥ 42,5; ≤ 62,5;
TIPIČAN SASTAV		**ZAHTJEV NORME**
Klinker (K) + gips (G)	85%	80-94
Zgura	11%	6-20
Ostalo	0-4%	0-5

*pri temperaturi od 20℃

4.2.2 Agregat (Klis-Kosa)

Kamenolom KLIS-KOSA jedan je od najvećih kamenoloma u Splitsko-dalmatinskoj županiji, a nalazi se na zapadnoj padini Mosora. Sama lokacija je vrlo pogodna za eksploataciju tehničkog kamena. Godišnja proizvodnja je cca. 200000 tona s tendencijom povećanja te količine [12].

Tablica 4.2 Granulometrija korištenog agregata [7]

FRAKCIJA		0-4			4-8			8-16			16-31,5		
SITO		OSTATAK	PROLAZ	PROLAZ	OSTATAK	PROLAZ	PROLAZ	OSTATAK	PROLAZ	PROLAZ	OSTATAK	PROLAZ	PROLAZ
PROLAZI	OSTAJE	gr	gr	%	gr	gr	%	gr	gr	%	gr	gr	%
	63												
63	31,5												
31,5	16							244,8	3044,1	100			
16	8				34,9	1969,4	100	2212,0	2799,3	92,0			
8	4	6,9	899,8	100	1748,5	1934,5	98,2	511,4	587,3	19,3			
4	2	156,1	892,9	99,2	178,9	186,0	9,4						
2	1	238,1	736,8	81,9									
1	0,5	186,0	498,7	55,4									
0,5	0,25	122,0	312,7	34,7									
0,25	0,125	75,7	190,7	21,2									
0,125	Tava	115,0	115	12,7	7,1	7,1	0,4	75,9	75,9	2,5			
UKUPNO		899,8			1969,4			3044,1					
POČETNA MASA		901,9			1969,5			3044,4					
MOKRO SIJANJE		gr			%								
MASA PRIJE ISPIRANJA													
OSTATAK NA SITU 0,09													
OSTATAK NA SITU 0,063													
UPIJANJE	Mz =												
	Ms =												
VLAŽNOST	Ml =												
	Ms =												

4.2.3 Superplastifikator

Zapis tehničkih podataka za Readyplast FTF1. Superplastifikator prema ONORM EN 934-2 / T3.1, T3.2. [7]

Područje primjene i svojstva

Readyplast FTF1 je superplastifikator za primarnu upotrebu u rasponu predgotovljenog betona. Optimizirana svojstva nude sljedeće prednosti za standard betona visokih performansi i samozbijajuće betone:

- protok se održava u periodu od 30 do 60 minuta
- optimizirana obradivost s ekstremnim tokom W/B-omjeri
- visoko početno tečenje s niskim doziranjem
- ekstremno visoka rana čvrstoća
- homogenost svježeg betona, također s visokim doziranjem [7]

Tablica 4.3 Specifikacija proizvoda [7]

Kemijski znak	Polycarboxylatether
Forma	Tekuća
Boja	Narančasta
Gustoća (20^0C)	1,07±0,02 g/cm^3
pH vrijednost	3,0-5,0
Udio klorida	≤ 0,1%

Tablica 4.4 Doziranje [7]

Preporučeno doziranje	0,2-1,0% ukupnog veziva
Maksimalno doziranje	1,2% ukupnog veziva

Tablica 4.5 Skladištenje [7]

Opće	Zaštićeno od zamrzavanja. Sve vrste spremnika trebale bi biti zatvorene na suhom mjestu.
Temperatura skladištenja	5-45 ^{0}C
Stabilnost skladištenja	Barem 6 mjeseci
Više detalja	Nakon 6 mjeseci skladištenja preporučena je homogenizacija, na primjer miješanjem proizvoda.

Informacije o ekološkim učincima.

Pravilnim rukovanjem slijedi manji utjecaj. Potrebno je pažljivo proučiti sve sigurnosne obavijesti na tehničkim listovima i naljepnicama [7].

4.2.4 Silikatna prašina (MEYCO MS 610)

Opis proizvoda

Meyco MS 610 (zgusnuta mikrosilika) je mineralni dodatak koji se koristi u normalnom i prskanom betonu te poboljšava svojstva betona kao što su tlačna čvrstoća, otpornost na savijanje, mehanička oštećenja i nepropusnost poboljšanjem mikro strukture smjese betona. Usklađen je s ASTM C 618, ASTM C1240/95 AASHTO M 307 CAN/CSA 23,5-M86 [7].

Područja primjene:

- U sistemu mokrog prskanja i primjenama tradicionalnog betona,
- U proizvodnji betona normalne i male težine,
- U betonima s visokom otpornošću,
- U betonima s niskim dozama cementa,
- Koristi se i u betonima pod vodom [7].

Prednost:

- Smanjuje doziranje ubrzivača očvršćivanja u prskanom betonu,
- Smanjuje omjer odskakanja u primjeni prskanog betona,
- Povećava otpornost prema mehaničkim i kemijskim efektima,
- Povećava nepropusnost vode kroz beton,
- Sprječava odvajanje vode i segregaciju u svježem stanju,
- Smanjuje propusnost klora [7].

Doziranje

Meyco MS 610 se koristi u omjeru od 5-10 kg na 100 kg cementa. Doziranje u uporabi se može mijenjati prema laboratorijskim testovima. BASF–MEYCO Grupa bi se trebala konzultirati za detaljne informacije. Meyco se dodaje u betonari nakon cementa. Meyco MS 610 mora se koristiti zajedno s dodatkom superplastifikatora betonu [7].

Skladištenje

Mora biti čuvan u svom neotvorenom izvornom pakiranju na hladnom i suhom mjestu zaštićenom od zamrzavanja. Rok trajanja je 12 mjeseci nakon datuma proizvodnje pod odgovarajućim uvjetima skladištenja. Otvoreni paketi se moraju skladištiti u odgovarajućim uvjetima pohrane i moraju se iskoristiti u roku od tjedan dana [7].

Tablica 4.6 Tehničke specifikacije [7]

Struktura materijala	Zgusnuta microsilica
Boja	Siva
Gustoća	0,55-0,70 kg/litra
Količina klora (EN 480-10)	<0,1 %
Blain (Finoća)	>15000 m^2/kg
SiO_2 omjer	>%85
CaO omjer	<%1
SO_3 omjer	<%2
0,045<odnos čestica	<%40
Indeks aktivnosti	>%95
Specifična težina	2300 kg/m^3

Gore dane vrijednosti su dane za + 23ºC i 50% relativne vlage.

4.2.5 Filer od recikliranog betona

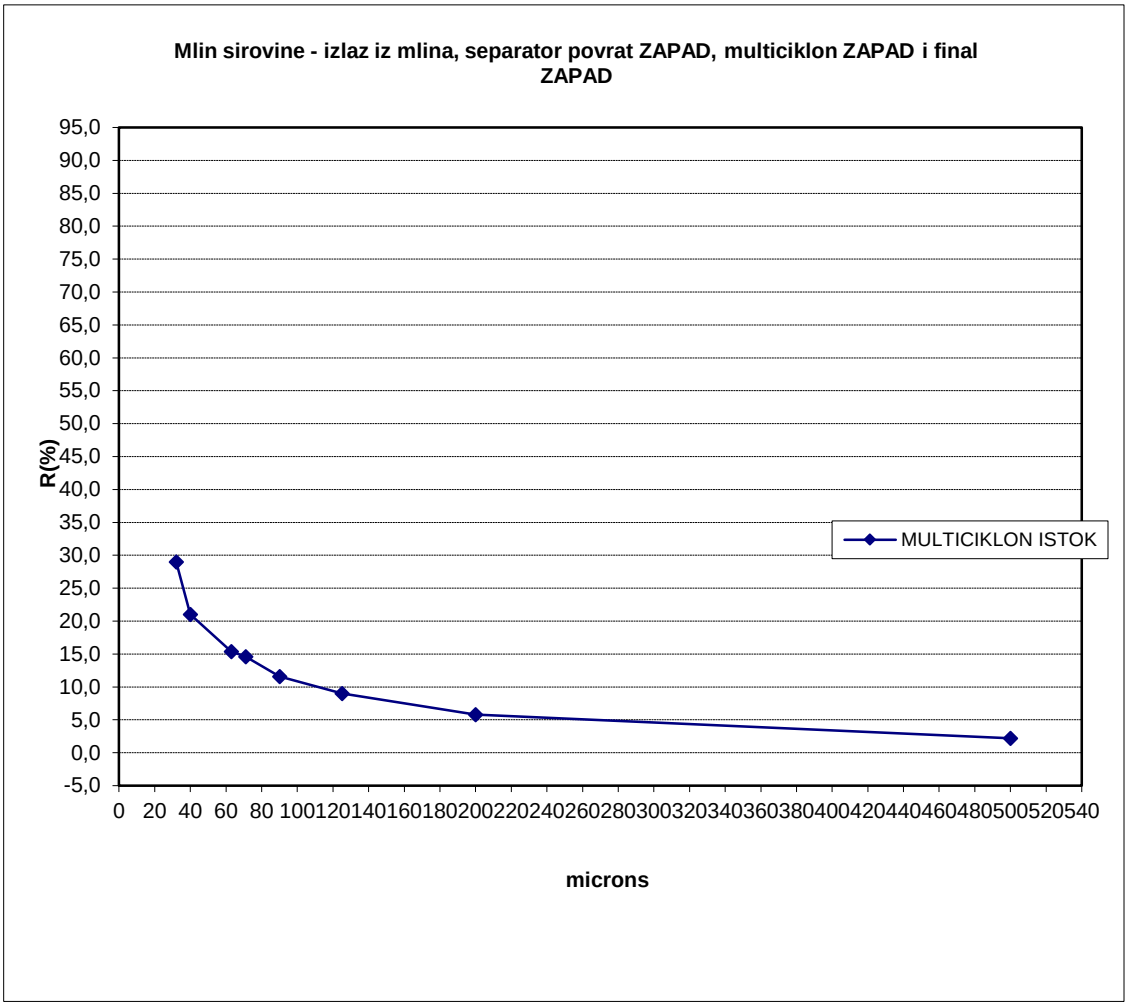
Filer od recikliranog betona je fino mljeveni beton koji je dobiven strojnim brušenjem betonske površine. Specifična površina zrna po Blaine-u je 7891 cm^2/g, a specifična težina je 2,45 g/cm^3. Potječe iz Dugopolja [7].

Tablica 4.7 Granulometrija filera [7]

PLANT "Sv. Kajo"

Datum: **11.8.2010**

SIEVES	**REST**
	MULTICIKLON ISTOK
Blaine	
microns	%
32	29,0
40	21,0
63	15,4
71	14,6
90	11,6
125	9,0
200	5,8
500	2,2
Grain size	MULTICIKLON ISTOK
microns	%
less than 32 mic.	71,0
32-40 mic.	8,00
40-63 mic.	5,60
63-71mic.	0,80
71-90 mic.	3,00
90-125mic.	2,60
125-200mic.	3,20
200-500 mic	3,60
sives	**passing**
	SEPARATOR (west+ 50% east) reject
microns	%
32	71,00
40	79,00
63	84,60
71	85,40
90	88,40
125	91,00
200	94,20
500	97,8



Slika 4.1 Granulometrijska krivulja filera od recikliranog betona [7]

4.2.6 Leteći pepeo

Leteći pepeo je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu spada u pucolane jer aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa. Leteći pepeo nastaje kao sporedni proizvod u modernim termoelektranama koje imaju pogon na ugljen i koji mora prethodno biti samljeven. Dakle, leteći pepeo je fini prah koji se uglavnom sastoji od čestica sferičnog oblika, dobiven izgaranjem ugljene prašine, uz eventualno sporedne materijale za izgaranje [5].

Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina:

- Fizikalnim efektom povezanog s povišenjem udjela finih čestica-čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa
- Pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama

Leteći pepeo smanjuje potrebu za vodom i izdvajanje vode, poboljšava obradivost, poboljšava nepropusnost, usporava oslobađanje topline hidratacije. Međutim, veliki udio letećeg pepela može uzrokovati da mješavina bude vrlo kohezivna i na taj način otporna na tečenje [5].

Tablica 4.8 Karakteristike korištenog letećeg pepela [7]

	Postav na:	8±2%	x	x
Datum:	Sat.	Ostatak na 0,045mm	Blain	G.Ž
5/2/10	21,35	5,8	5118	3,7

4.3 Metode ispitivanja

Metode ispitivanja svojstava mješavina u svježem stanju:

- Metoda razastiranja (HRN EN 12350-8)
- Metoda V-lijevak (HRN EN 12350-9)
- Metoda L-posuda (HRN EN 12350-10)
- Metoda J-prsten (HRN EN 12350-7)

Metode ispitivanja svojstava betona u očvrsnulom stanju:

- Tlačna čvrstoća (HRN EN 12390-3)
- Brzina ultrazvučnih valova(HRN EN 12504-4) i određivanje dinamičkog modula elastičnosti

Eksperimentalni dio rada je napravljen u laboratoriju za građevinske materijale na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu.

4.4 Proračun sastava mješavina

4.4.1 Proračun sastava za prvu mješavinu SCC1

Sadržaj krupnog (W_g) i sitnog agregata (W_s) u SCC-u izračunat je prema formulama:

$$W_g = PF \cdot W_{gL}\left(1-\frac{S}{a}\right) = 1{,}11 \cdot 1442{,}86 \cdot (1-0{,}53) = 752{,}74 kg/m^3$$

$$W_s = PF \cdot W_{sL} \cdot \frac{S}{a} = 1{,}11 \cdot 1594{,}42 \cdot 0{,}53 = 938 kg/m^3$$

Prethodno je određeno:

W_{gL} = 1442,86 kg/m^3 (volumna masa slobodno nasutog zasićenog površinski suhog krupnog agregata na zraku)

W_{sL} = 1594,42 kg/m^3 (volumna masa slobodno nasutog zasićenog površinski suhog sitnog agregata na zraku)

PF = 1,11 (faktor pakiranja se definira kao omjer mase zbijenog agregata i mase slobodno nasutog agregata)

S/a = 0,53 (omjer volumena sitnog agregata i ukupnog agregata je preporučen u rasponu od 50 - 57%)

Maksimalna veličina zrna agregata za prve tri mješavine je 16 mm. Raspored agregata po frakcijama je: 0 - 4 mm (53 %), 4 - 8 mm (15 %), 8 - 16 mm (32 %).

Drugi korak je izračun sadržaja cementa prema izrazu:

$$C = \frac{f_c'}{20} = \frac{7000}{20} = 350 kg/m^3$$

Pretpostavlja se da svaki kilogram cementa može pružiti tlačnu čvrstoću od 20 psi (0,14 MPa) za SCC od 28 dana.

Gdje je:

C - sadržaj cementa

f'_c - zahtijevana tlačna čvrstoća (u ovom eksperimentu zahtijevana tlačna čvrstoća je 48 MPa ili 7000 psi)

Treći korak je izračun sadržaja vode potrebne za cement prema izrazu:

$$W_{wc} = (W/C)xC = 0,43x350 = 151 \text{ kg/m}^3$$

W_{wc} - sadržaj vode u mješavini koju traži cement (kg/m^3)

W/C - omjer vode/cementa od težine može biti određen prema zahtijevanoj tlačnoj čvrstoći. Ovdje je uzeta vrijednost 0,43 preporučena od Ready-Mixed Concrete s Tajvana.

C - sadržaj cementa

Četvrti korak izračun sadržaja letećeg pepela(FA) i zgure(GGBS).

Volumen paste letećeg pepela (V_{Pf}) i volumen paste zgure (V_{PB}) izračunavaju se prema izrazu:

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_g}{1000 \cdot G_g} - \frac{W_S}{1000 \cdot G_s} - \frac{C}{1000 \cdot G_c} - \frac{W_{WC}}{1000 \cdot G_w} - V_a$$

$$\frac{W}{S} = 0{,}36 \; \frac{W}{F} = 0{,}45 \; \frac{W}{C} = 0{,}43 \; \frac{FA}{GGBS} = \frac{7}{3}$$

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \left(\frac{752{,}74}{1000 \cdot 2{,}65} + \frac{938}{1000 \cdot 2{,}64} + \frac{350}{1000 \cdot 3{,}15} + \frac{151}{1000 \cdot 1} + 0{,}015 \right)$$

$$V_{Pf} + V_{PB} = 0{,}084 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

G_g - specifična težina krupnih agregata

G_s - specifična težina sitnih agregata

G_c - specifična težina cementa

G_w - specifična težina vode

V_a - sadržaj zraka u SCC-u (%)

Ukupan iznos pucolanskih materijala (letećeg pepela i zgure) W_{pm} (kg/m^3)

Omjer tih dvaju materijala može se odrediti prema svojstvima lokalnih materijala i prijašnjim iskustvima. Postotak letećeg pepela označen je sa A%, a zgure sa B% od težine, prema metodi preporučenoj od Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai.

$$V_{Pf} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \cdot A\% \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_f} + \left(1 + \frac{W}{S}\right) \cdot B\% \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_B}$$

G_f, G_B, G_C, W/F i W/S: mogu biti dobiveni iz testova

$$0{,}084 = \frac{0{,}7 \cdot W_{pm}}{1000 \cdot 2{,}15} + \frac{0{,}45 \cdot 0{,}7 \cdot W_{pm}}{1000 \cdot 2{,}15} + \frac{0{,}3 \cdot W_{pm}}{1000 \cdot 2{,}92} + \frac{0{,}36 \cdot 0{,}3 \cdot W_{pm}}{1000 \cdot 2{,}92}$$

$$W_{pm} = 137{,}30 \text{ kg/m}^3$$

W_f: sadržaj letećeg pepela u SCC-u (kg/m^3) i W_B: sadržaj zgure u SCC-u (kg/m^3) može biti izračunat:

$$W_f = A\% \cdot W_{pm}$$

$$W_B = B\% \cdot W_{pm}$$

Prethodno predviđeni sadržaj zgure u ovom eksperimentu zamijenjen je s letećim pepelom, stoga prva mješavina u ovom eksperimentu sadrži samo leteći pepeo kao dodatak.

Sadržaj vode u mješavini potreban za pastu letećeg pepela:

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) \cdot W_f = 0{,}45 \cdot 137{,}30 = 61{,}79 kg/m^3$$

Peti korak je izračun sadržaja vode u mješavini potrebne za SCC:

$$W_w = W_{wc} + W_{wf} = 151 + 61{,}79 = 212{,}79 \text{ kg/m}^3$$

Prema Japanskom društvu Arhitekata preporučeni sadržaj vode je: $W_w = 160 – 185$ kg/m^3

Šesti korak je doziranje superplastifikatora(SP)

Prema prethodnim iskustvima miješanja samozbijajućeg betona doza SP-a je 1,2 % sadržaja veziva.

Doziranje SP-a: $W_{sp} = n\%(C + W_f) = 0{,}012(350 + 137{,}30) = 5{,}85$ kg/m^3

Kruti sadržaj SP-a je 40%. Sadržaj vode SP-a može biti smatran djelom vode za miješanje.

$W_{wSP} = (1 - m\%)W_{SP} = (1 - 0{,}4)5{,}84 = 3{,}51$ kg/m^3

Sadržaj vode u SP-u je zanemariv te se u ovom eksperimentu ne smatra djelom vode za miješanje.

Tijekom miješanja sve mješavine su vizualno pregledavane te je voda dodavana postepeno. Prvobitno izračunata količina vode od 212,79 kg/m^3 nije cijela dodana u mješavinu zbog toga jer je zaključeno da bi mješavina sa tom količinom vode izgubila zahtijevanu stabilnost. Stoga je mješavini u konačnici dodano samo 190,12 kg/m^3 vode. Druga probna mješavina SCC2 razlikuje se od prve u tome što je 30 % letećeg pepela zamijenjeno sa silikatnom prašinom, dok su sve ostale komponente ostale ne promijenjene. Treća mješavina SCC3 sadrži leteći

pepeo, silikatnu prašinu i reciklirani beton u jednakim količinama uz veći sadržaj vode (214,46 kg/m^3) u odnosu na prve dvije mješavine, dok su sve ostale komponente ostale nepromijenjene.

4.4.2 Proračun sastava za četvrtu mješavinu SCC4

Sadržaj krupnog (W_g) i sitnog agregata (W_s) u SCC-u izračunat je prema formulama:

$$W_g = PF \cdot W_{gL}\left(1-\frac{S}{a}\right) = 1{,}11 \cdot 1442{,}86 \cdot (1-0{,}58) = 672{,}66 kg/m^3$$

$$W_s = PF \cdot W_{sL} \cdot \frac{S}{a} = 1{,}11 \cdot 1594{,}42 \cdot 0{,}58 = 1026{,}49 kg/m^3$$

Prethodno je određeno:

W_{gL} = 1442,86 kg/m^3 (volumna masa slobodno nasutog zasićenog površinski suhog krupnog agregata na zraku)

W_{sL} = 1594,42 kg/m^3 (volumna masa slobodno nasutog zasićenog površinski suhog sitnog agregata na zraku)

PF = 1,11 (faktor pakiranja se definira kao omjer mase zbijenog agregata i mase slobodno nasutog agregata)

S/a = 0,58 (omjer volumena sitnog agregata i ukupnog agregata je preporučen u rasponu od 50 – 57%)

Maksimalna veličina zrna agregata za druge tri mješavine je 22 mm. Količina sitog agregata (0 - 4 mm) je 58 %. Kako bi se smanjila sklonost agregata prema segregaciji, kod krupnog agregata količina zrna frakcije 4 – 8 mm, prema količini zrna frakcija 8 - 16 mm i 16 - 22 mm odnosi se kao 1:√2.

Drugi korak je izračun sadržaja cementa prema izrazu:

$$C = \frac{f_c'}{20} = \frac{7000}{20} = 350 kg/m^3$$

Pretpostavlja se da svaki kilogram cementa može pružiti tlačnu čvrstoću od 20 psi (0,14 MPa) za SCC od 28 dana.

Gdje je:

C - sadržaj cementa

f'_c - zahtijevana tlačna čvrstoća (u ovom eksperimentu zahtijevana tlačna čvrstoća je 48 MPa ili 7000 psi)

Treći korak je izračun sadržaja vode potrebne za cement prema izrazu:

$$W_{wc} = (W/C)xC = 0{,}43x350 = 151 \text{ kg/m}^3$$

W_{wc} - sadržaj vode u mješavini koju traži cement (kg/m^3)

W/C - omjer vode/cementa od težine može biti određen prema zahtijevanoj tlačnoj čvrstoći. Ovdje je uzeta vrijednost 0,43 preporučena od Ready-Mixed Concrete s Tajvana.

C - sadržaj cementa

Četvrti korak izračun sadržaja letećeg pepela (FA) i zgure (GGBS).

Volumen paste letećeg pepela (V_{Pf}) i volumen paste zgure (V_{PB}) izračunavaju se prema izrazu:

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \frac{W_g}{1000 \cdot G_g} - \frac{W_S}{1000 \cdot G_s} - \frac{C}{1000 \cdot G_c} - \frac{W_{WC}}{1000 \cdot G_w} - V_a$$

$$\frac{W}{S} = 0{,}36 \; \frac{W}{F} = 0{,}45 \; \frac{W}{C} = 0{,}43 \; \frac{FA}{GGBS} = \frac{7}{3}$$

$$V_{Pf} + V_{PB} = 1 - \left(\frac{672{,}66}{1000 \cdot 2{,}65} + \frac{1026{,}49}{1000 \cdot 2{,}64} + \frac{350}{1000 \cdot 3{,}15} + \frac{151}{1000 \cdot 1} + 0{,}015 \right)$$

$$V_{Pf} + V_{PB} = 0{,}0802 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

G_g - specifična težina krupnih agregata

G_s - specifična težina sitnih agregata

G_c - specifična težina cementa

G_w - specifična težina vode

V_a - sadržaj zraka u SCC-u (%)

Ukupan iznos pucolanskih materijala (letećeg pepela i zgure) W_{pm} (kg/m^3). Proračun za ovaj eksperiment je napravljen samo sa letećim pepelom bez zgure.

$$V_{Pf} + V_{PB} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \cdot \frac{W_{pm}}{1000 \cdot G_f}$$

G_f, G_C i W/F: mogu biti dobiveni iz testova

$$0{,}0802 = \frac{W_{pm}}{1000 \cdot 2{,}15} + \frac{0{,}45 \cdot W_{pm}}{1000 \cdot 2{,}15}$$

$$W_{pm} = 118{,}92 \text{ kg/m}^3$$

W_f: sadržaj letećeg pepela u SCC-u (kg/m^3) jednak je ukupnom iznosu pucolanskih materijala u SCC-u

$$W_f = W_{pm}$$

Sadržaj vode u mješavini potreban za pastu letećeg pepela:

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) \cdot W_f = 0{,}45 \cdot 118{,}91 = 53{,}51 kg/m^3$$

Peti korak je izračun sadržaja vode u mješavini potrebne za SCC:

$$W_w = W_{wc} + W_{wf} = 151 + 53{,}51 = 204{,}51 \text{ kg/m}^3$$

Prema Japanskom društvu Arhitekata preporučeni sadržaj vode je: $W_w = 160 – 185$ kg/m^3

Šesti korak je doziranje superplastifikatora(SP)

Prema prethodnim iskustvima miješanja samozbijajućeg betona doza SP-a je 1,2 % sadržaja veziva.

Doziranje SP-a: $W_{sp} = n\%(C + W_f) = 0{,}012(350 + 118{,}92) = 5{,}63$ kg/m^3

Kruti sadržaj SP-a je 40%. Sadržaj vode SP-a može biti smatran djelom vode za miješanje.

$W_{wSP} = (1\text{-}m\%)W_{SP} = (1 - 0{,}4)5{,}63 = 3{,}38$ kg/m^3

Sadržaj vode u SP-u je zanemariv te se u ovom eksperimentu ne smatra djelom vode za miješanje.

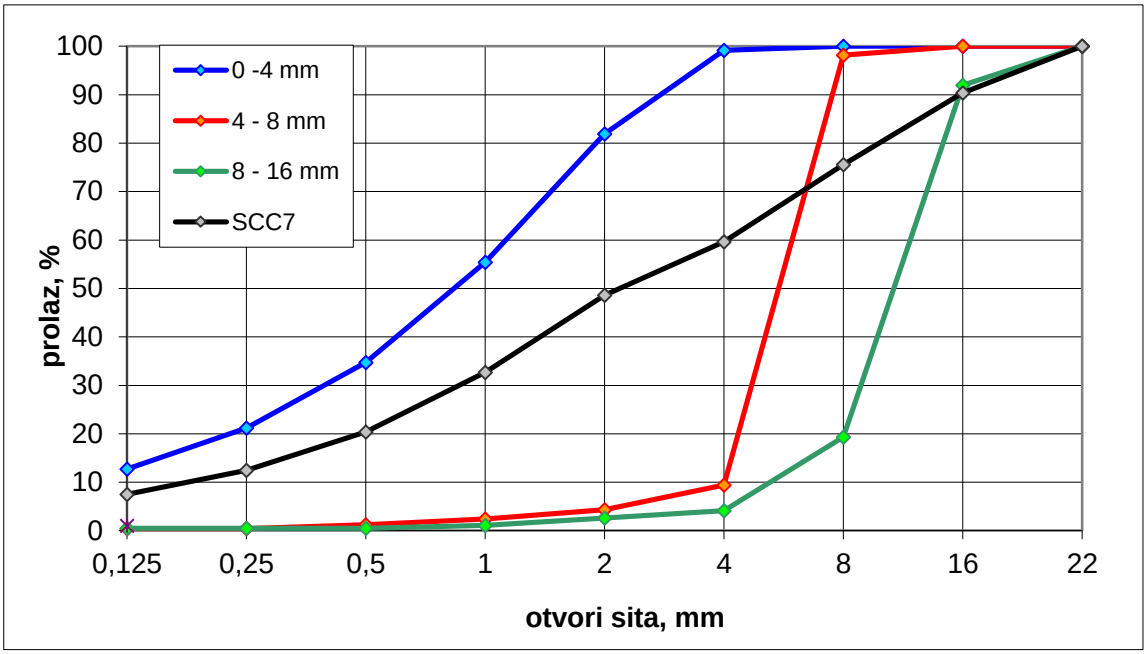
Tijekom miješanja sve mješavine su vizualno pregledavana te je voda dodavana postepeno. Prvobitno izračunata količina vode od 204,51 kg/m^3 nije cijela dodana u mješavinu SCC4 zbog toga jer je zaključeno da bi mješavina sa tom količinom vode izgubila zahtijevanu stabilnost. Stoga je mješavini dodano samo 180,48 kg/m^3 vode. Peta probna mješavina SCC5 razlikuje se od četvrte u tome što je 30 % letećeg pepela zamijenjeno sa silikatnom prašinom i zbog toga što je mješavina pripremljena s većim sadržajem vode (192,51 kg/m^3),dok su sve ostale komponente ostale ne promijenjene. Šesta mješavina SCC6 sadrži leteći pepeo, silikatnu prašinu i reciklirani beton u jednakim količinama i količinu vode koja se dobila proračunom za četvrtu mješavinu (204,51 kg/m^3), dok su sve ostale komponente ostale nepromijenjene.

4.4.3 Proračun sastava za sedmu mješavinu SCC7

Sastav sedme mješavine je određen prema CBI metodi. Mješavina je napravljena sa dodatkom: letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona. Potrebna količina dodatka je određena CBI metodom. Početni sastav za mješavinu samozbijajućeg betona se uzima bez dodataka.

Tablica 4.9 Granulometrijski sastav frakcija agregata i betona

	prolaz u %	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	22
0 -4 mm	58	7,4	12,3	20,1	32,1	47,5	57,5	58,0	58,0	58,0
4 - 8 mm	14	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	1,3	13,7	14,0	14,0
8-16 mm	20	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,8	3,9	18,4	20,0
16-22 mm	8	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	8,0
SCC7	100	7,5	12,5	20,4	32,7	48,6	59,7	75,6	90,4	100,0



Slika 4.2 Granulometrijske krivulje za frakcije agregata i betona SCC7

Količina cementa od 350 kg/m^3 za sastav polazne mješavine je uzeta kako bi se mogla napraviti usporedba s mješavinama proračunatim po prethodnoj metodi koja je zahtijevala tu količinu cementa.

Tablica 4.10 Sastav polazne mješavine za SCC7

SCC7	**Udio (%)**	**Gustoća (kg/dm^3)**	**Volumen (dm^3)**	**Masa (kg)**
Cement		3,1	112,9	350
Voda		1	175	175
Zrak	3		30	
Superplastifikator	1,2	1,05	4,0	4,2
0-4 mm	58	2,69	393,2	1057,69
4-8 mm	14	2,69	94,9	255,30
8-16 mm	20	2,69	135,6	364,72
16-22 mm	8	2,69	54,2	145,89
UKUPNO			1000	2352,80

U sljedećem koraku izračunat je udio praškastih komponenata, bez dodataka (letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona). Udio pijeska manjeg od 0,25 mm određen je iz granulometrijske krivulje. Iz polaznog sastava mješavine izračunat je volumen paste u betonu.

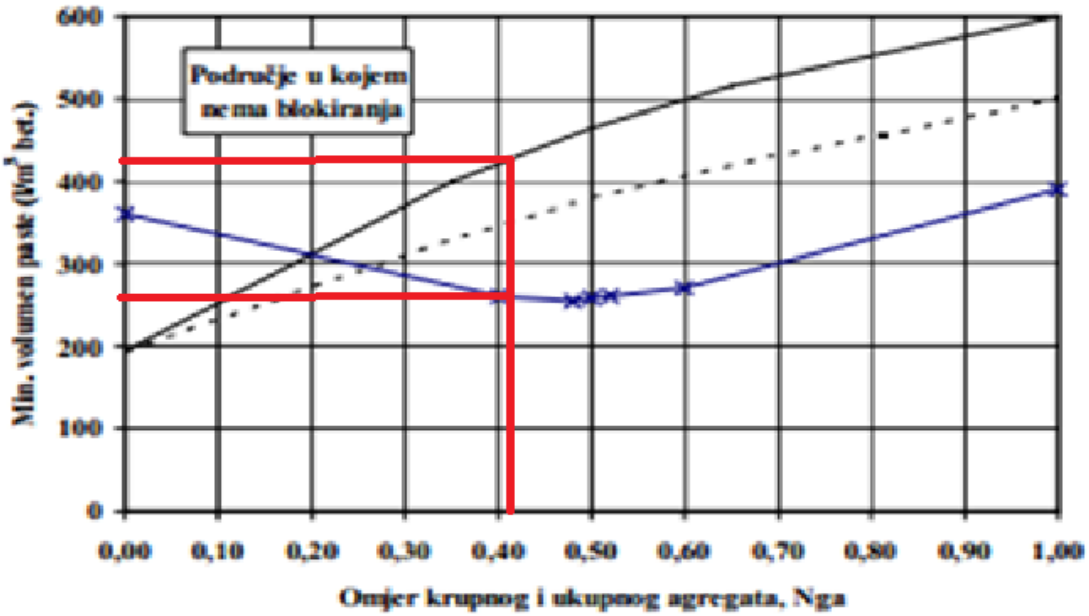
Tablica 4.11 Količina praškastih komponenata u sastavu SCC7 bez dodatka

	Pijesak <0,25mm	Cement	Voda	Superp.	Zrak	Mort	Prašak	Pasta
Masa	120,35	350	175	4,20		1586,89	470,35	649,55
Gustoća	1,65	3,10	1	1,05		1,29	2,35	1,65
Volumen	72,94	112,90	175	4	30	1230,15	185,84	394,84

Zatim je izračunat omjer mase krupnog i ukupnog agregata.

Nga = krupni agregat/ukupni agregat = 765,91/1823,6 = 0,42

Na temelju te vrijednosti je prema kriteriju sadržaja šupljina i kriteriju blokiranja određen minimalni potrebni volumen paste.



Slika 4.3 Određivanje minimalnog volumena paste na temelju dijagrama kriterija šupljina i kriterija blokiranja [6]

Prema kriteriju šupljina minimalni volumen paste = 260 l/m^3

Prema kriteriju blokiranja minimalni volumen paste = 420 l/m^3

Razlika između preporučenog i pretpostavljenog volumena paste nadomješta se dodatcima (letećim pepelom, silikatnom prašinom i filerom od recikliranog betona).

Pretpostavljena količina paste iznosi 394,84 l/m^3.

Razlika: 420 - 394,84 = 25,16 l/m^3

Ova potrebna razlika paste se dijeli u omjeru 1:1:1 (leteći pepeo:silikatna prašina:filer od recikliranog betona) da bi mješavina bila usporediva sa SCC6.

Tablica 4.12 Konačni sastav mješavine za SCC7

	Udio (%)	**Gustoća (kg/dm^3)**	**Volumen (dm^3)**	**Masa (kg)**
Cement		3,1	112,9	350
Voda		1	175	175
Zrak	3		30	
Superplastifikator	1,2	1,05	4,7	4,9
Leteći pepeo		2,25	8,4	18,9
Silikatna prašina		2,3	8,4	19,3
Reciklirani beton		2,45	8,4	20,5
0-4 mm	58	2,69	378,3	1017,7
4-8 mm	14	2,69	91,3	245,65
8-16 mm	20	2,69	130,5	350,92
16-22 mm	8	2,69	52,2	140,37
UKUPNO			1000	2343,24

Ako se parametri sastava ovako projektiranog samozbijajućeg betona ocijene prema preporučenim vrijednostima EFNARC-a [8] vidimo da je omjer sitnog agregata u odnosu na ukupni agregat prevelik–odnosno da je premali udio krupnog agregata u sastavu betona. Volumen paste je na gornjoj granici. Ove vrijednosti pokazuju da je moguće očekivati pojavu segregacije i nestabilnosti u svježem stanju.

Tablica 4.13 Ocjena sastava SCC7 prema EFNARC-u [8]

Parametar sastava	SCC7	Preporuka
volumenkrupnogagregata/m^3 (%)	22,18	27-36
masasitnog/masiukupnogagregata (%)	63	48-55
volumenpaste (%)	38,84	30-38
masa praškaste komponente	540,68	380-600
voda	175	150-210
v/p volumno	0,98	0,85-1,1
v/p težinski	0,32	0,28-0,37

4.5 Sastavi betonskih mješavina

Tablica 4.14 Sastavi betonskih mješavina za 1 m^3 betona

Komponente mješavine (kg)		SCC1	SCC2	SCC3	SCC4	SCC5	SCC6	SCC7
Cement		350	350	350	350	350	350	350
Voda		190,12	190,12	214,46	180,48	192,51	204,51	175
V/C		0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0.43	0,50
Superplastifikator		5,85	5,85	5,85	5,64	5,64	5,64	4,90
Leteći pepeo		137,32	96,12	45,76	118,92	83,24	39,64	18,8
Silikatna prašina			41,20	45,76		35,68	39,64	19,20
Filer(reciklirani beton)				45,76			39,64	20,4
Agregat	0-4 mm	938	938	938	1026,40	1026,40	1026,40	1017,60
	4-8 mm	240,24	240,24	240,24	214,68	214,68	214,68	245,60
	8-16 mm	512,52	512,52	512,52	324	324	324	350,80
	16-22 mm				134	134	134	140,40
UKUPNO		2374,1	2374,1	2398,4	2354,1	2366,2	2378,2	2353,5

Tablica 4.15 Sastavi betonskih mješavina za jedno laboratorijsko miješanje od 25 litara.

Komponente mješavine (kg)		SCC1	SCC2	SCC3	SCC4	SCC5	SCC6	SCC7
Cement		8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75	8,75
Voda		4,75	4,75	5,36	4,51	4,81	5,11	4,65
V/C		0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Superplastifikator		0,146	0,146	0,146	0,141	0,141	0,141	0,123
Leteći pepeo		3,433	2,403	1,144	2,973	2,081	0,991	0,47
Silikatna prašina			1,03	1,144		0,892	0,991	0,48
Filer(reciklirani beton)				1,144			0,991	0,51
Agregat	0-4 mm	23,45	23,45	23,45	25,66	25,66	25,66	25,44
	4-8 mm	6,01	6,01	6,01	5,37	5,37	5,37	6,14
	8-16 mm	12,81	12,81	12,81	8,1	8,1	8,1	8,77
	16-22 mm				3,35	3,35	3,35	3,51
UKUPNO		59,35	59,35	59,96	58,85	59,16	59,46	58,84

4.6 Rezultati ispitivanja i analiza rezultata

Ispitivanja su provedena u laboratorijskim uvjetima s opremom koju propisuju norme. Svojstva samozbijajućeg betona ispitana su prema europskim normama HRN EN 12350 8-12. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablicama i grafički.

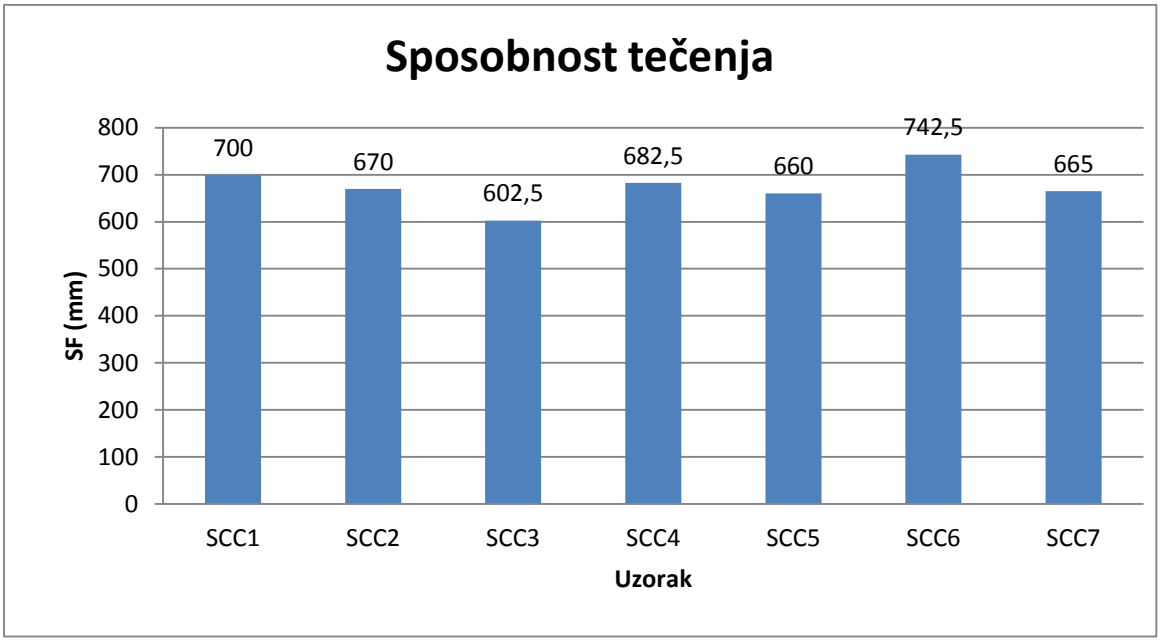
4.6.1 Rezultati rasprostiranja slijeganjem

Rezultati rasprostiranja slijeganjem prikazani su u tablici 4.16 te grafički na slikama 4.4 i 4.5. Ispod prikazanih rezultata dat je kratak komentar dobivenih rezultata.

Tablica 4.16 Rezultati rasprostiranja slijeganjem

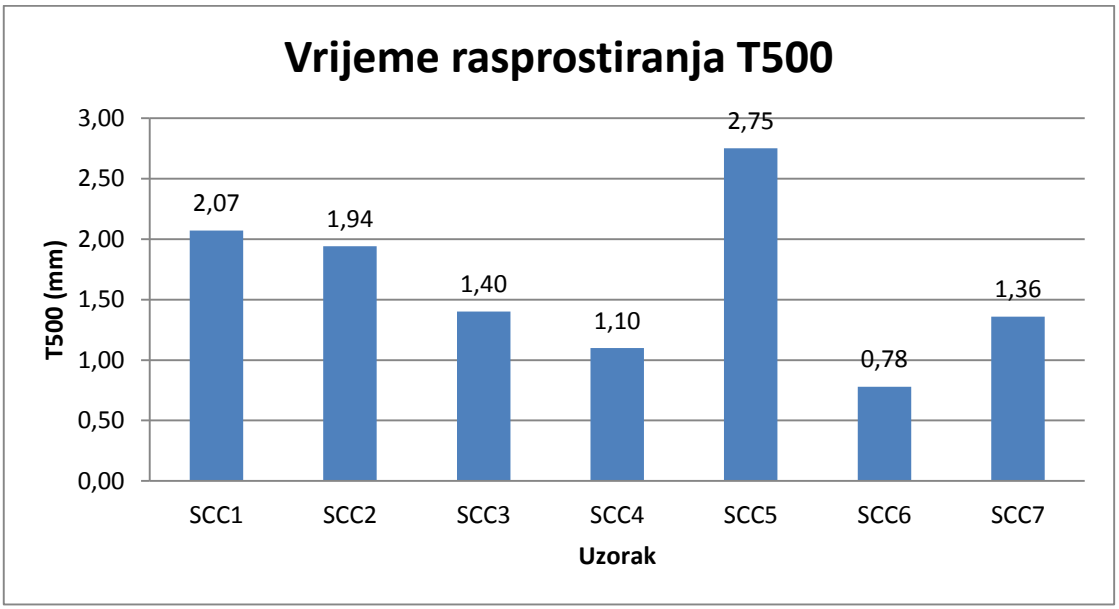
Oznaka uzorka	**d_1(mm)**	**d_2(mm)**	**SF(mm)**	**T_{500}(s)**	**Razred SF**	**Razred VS**
SCC1	700	700	700	2,07	SF2	VS2
SCC2	680	660	670	1,94	SF2	VS1
SCC3	605	600	602,5	1,40	SF1	VS1
SCC4	685	680	682,5	1,10	SF2	VS1
SCC5	670	650	660	2,75	SF2	VS2
SCC6	765	720	742,5	0,78	SF2	VS1
SCC7	660	670	665	1,36	SF2	VS1

Izmjerena veličina rasprostiranja (SF) i vrijeme rasprostiranja (T500) svih mješavina zadovoljavaju propise Europskog udruženja.



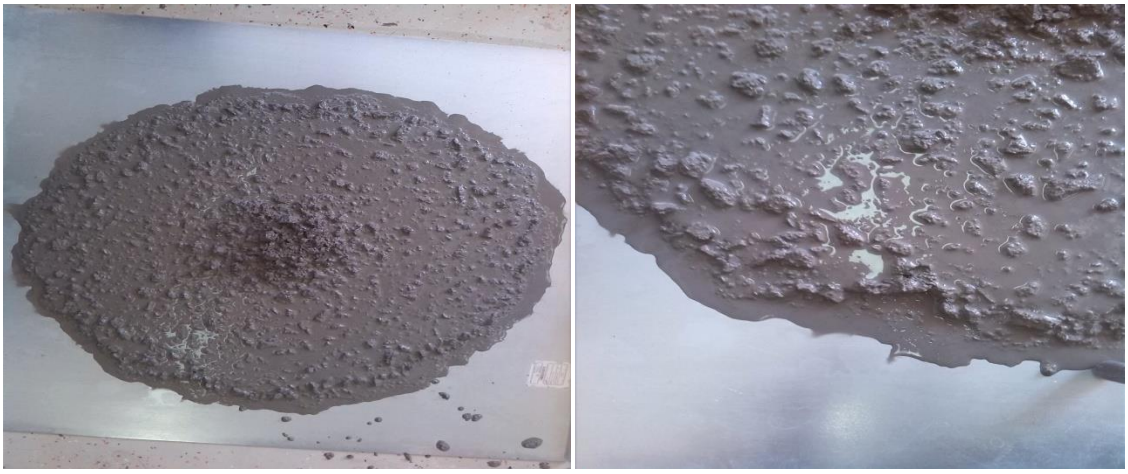
Slika 4.4 Grafički prikaz promjera rasprostiranja-slijeganjem

Iz dijagrama vidimo da je promjer razastiranja (SF) kod prve tri mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm najveći kod prve mješavine kad je mješavini dodan samo leteći pepeo. Kod druge mješavine zamjenom 30 % letećeg pepela iz prve mješavine sa silikatnom prašinom uz isti sadržaj svih ostalih komponenti kao u prvoj mješavini dolazi do malog smanjenja promjera razastiranja (SF). Raspodjelom dodataka(leteći pepeo, silikatna prašina, reciklirani beton) po trećinama u trećoj mješavini i unatoč povećanju sadržaja vode u odnosu na prve dvije mješavine dolazi do smanjenja promjera razastiranja (SF) u odnosu na prve dvije mješavine. Prema tome možemo zaključiti da reciklirani beton koji je korišten u ovom eksperimentu zahtjeva veći sadržaj vode nego što to zahtjeva leteći pepeo i silikatna prašina. Sljedeće četiri mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 22 mm imaju nešto veći sadržaj sitnog agregata nego sto je to slučaj kod prve tri mješavine. Unatoč tome što te četiri mješavine imaju nešto manji sadržaj dodataka i superplastifikatora (kod mješavine SCC7 proračunate prema CBI metodi to smanjenje dodataka je nešto izraženije) njihove veličine razastiranja su približno jednake ako ne i veće od onih koje su bile dobivene kod prve tri mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm i manjim sadržajem sitnog agregata. Iz toga možemo zaključiti da se upotrebom veće količine sitnog agregata može smanjiti sadržaj nekih drugih komponenti u mješavini kao što su: cement, superplastifikator i dodaci, a da se pritom zadrži tažena obradivost mješavine.



Slika 4.5 Grafički prikaz vremena rasprostiranja

Vrijeme rasprostiranja (T500) daje uvid u viskoznost betonske mješavine. Iz dijagrama vidimo da betonske mješavine s dodatkom recikliranog betona i većim sadržajem vode imaju manju viskoznost. Uspoređujući te dvije betonske mješavine s dodatkom recikliranog betona i većim sadržajem vode vidimo da je mješavina s maksimalnim zrnom agregata od 22 mm i većim sadržajem sitnog agregata nakon brzog početnog tečenja imala veći konačni promjer razastiranja (SF). Ukupno gledajući betonske mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 22 mm i većim sadržajem sitnog agregata imaju nešto manju viskoznost od betonskih mješavina s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm i manjim sadržajem sitnog agregata. Na temelju toga možemo zaključiti da se zahtijevano brzo početno tečenje može poboljšati povećanjem maksimalnog zrna agregata i većim sadržajem sitnog agregata.



Slika 4.6 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC1

Mješavina SCC1 pokazuje segregaciju krupnog agregata u sredino, a na krajevima kruga je vidljivo dosta veliko odvajanje vode. Mješavina nije stabilna.



Slika 4.7 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC2

Mješavina SCC2 pokazuje dobru otpornost prema segregaciji krupnog agregata i neznatno odvajanje vode na rubovima. Mješavina djeluje vrlo stabilno.



Slika 4.8 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC3

Mješavina SCC3 pokazuje dobru otpornost prema segregaciji krupnog agregata i jako malo odvajanje vode na rubovima. Mješavina djeluje vrlo stabilno.



Slika 4.9 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC4

Mješavina SCC4 pokazuje dobru otpornost prema segregaciji krupnog agregata i odvajanju vode na rubovima. Mješavina djeluje stabilno.



Slika 4.10 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC5

Mješavina SCC5 pokazuje solidnu otpornost prema segregaciji krupnog agregata, vidljiva je mala segregacija krupnog agregata u sredini i odvajanje vode na rubovima.



Slika 4.11 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC6

Mješavina SCC6 pokazuje segregaciju krupnog agregata i neznatno odvajanje vode na rubovima.



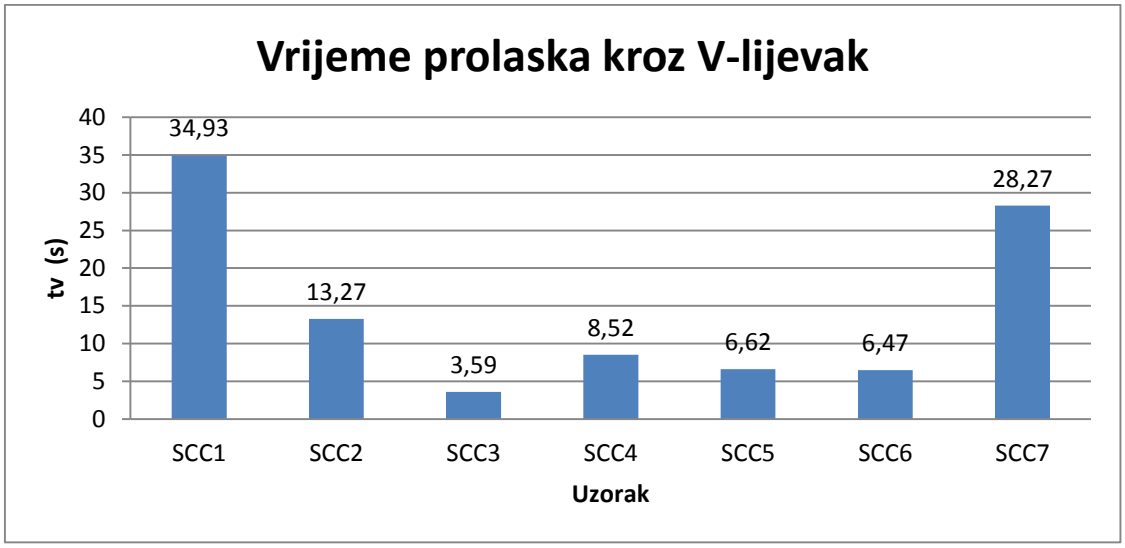
Slika 4.12 Rasprostiranje-slijeganjem mješavina SCC7

Mješavina SCC7 pokazuje dosta segregacije krupnog agregata u sredini, a na krajevima kruga vidljivo je veliko odvajanje vode. Mješavina nije stabilna.

4.6.2 Rezultati ispitivanja V-lijevkom

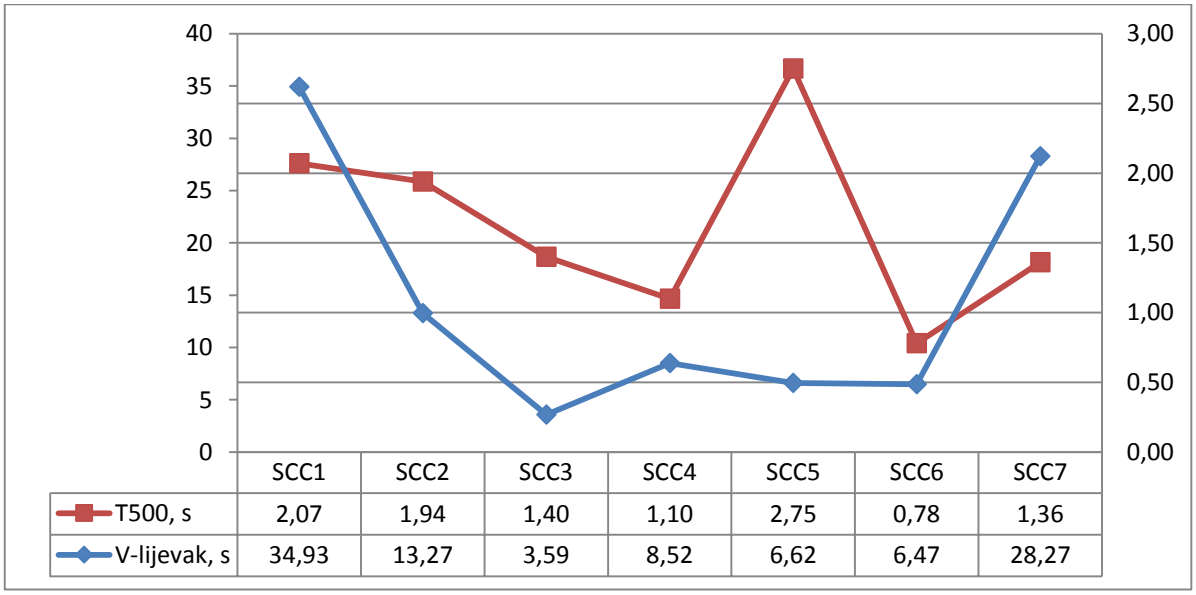
Tablica 4.17 Rezultati vremena istjecanja kroz V-lijevak

Oznaka uzorka	Vrijeme prolaska kroz V-lijevak, t_v (s)	Razred
SCC1	34,93	
SCC2	13,27	VF2
SCC3	3,59	VF1
SCC4	8,52	VF1
SCC5	6,62	VF1
SCC6	6,47	VF1
SCC7	28,27	



Slika 4.13 Grafički prikaz vremena istjecanja kroz V-lijevak

Mješavine SCC3, SCC4, SCC5 i SCC6 imale su optimalne rezultate istjecanja kroz V-lijevak. Mješavine SCC1 i SCC7 nisu zadovoljile uvjet prolaska kroz V-lijevak zbog segregacije krupnog agregata na dnu V-lijevaka što je dovelo do zastoja u istjecanju. Dok se kod mješavine SCC2 javila mogućnost blokiranja na dnu V-lijevka također zbog segregacije krupnog agregata.



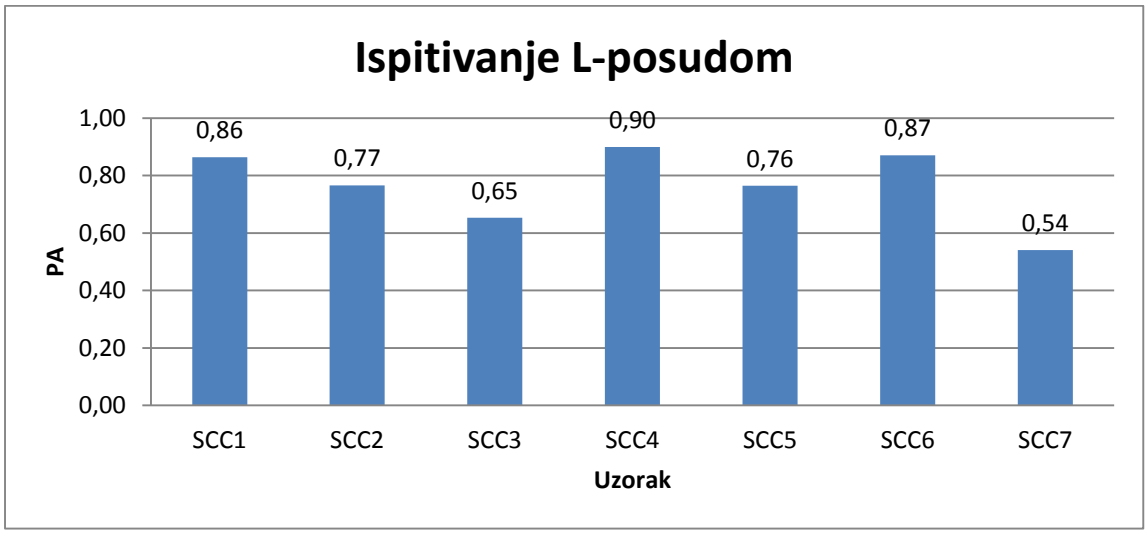
Slika 4.14 Grafički prikaz vremena istjecanja kroz V-lijevak i vremena T500

Na dijagramu je vidljivo najveće odstupanje kod mješavine SCC5, koja je imala brzo istjecanje iz V-lijevka, a najsporije vrijeme razastiranja T500. Kod drugih mješavina nema tako izraženih odstupanja.

4.6.3 Rezultati ispitivanja L-posudom

Tablica 4.18 Rezultati ispitivanja L-posudom

Oznaka uzorka	ΔH_{11} mm	ΔH_{12} mm	ΔH_{13} mm	ΔH_{1sr} mm	ΔH_{21} mm	ΔH_{22} mm	ΔH_{23} mm	ΔH_{2sr} mm	H_1= 600- ΔH_{1sr} mm	H_2= 150- ΔH_{2sr} mm	PA= H_2/H_1	Raz.
SCC1	495	490	485	490,0	55	55	55	55,0	110,0	95,0	0,86	PA2
SCC2	500	490	490	493,3	70	70	65	68,3	106,7	81,7	0,77	-
SCC3	480	480	480	480,0	70	70	75	71,7	120,0	78,3	0,65	-
SCC4	500	500	500	500,0	60	60	60	60,0	100,0	90,0	0,90	PA2
SCC5	490	485	485	486,7	65	60	65	63,3	113,3	86,7	0,76	-
SCC6	500	495	495	496,7	60	60	60	60,0	103,3	90,0	0,87	PA2
SCC7	480	480	470	476,7	80	80	90	83,3	123,3	66,7	0,54	-



Slika 4.15 Grafički prikaz rezultata ispitivanja L-posudom

Mješavine: SCC2, SCC3, SCC5 i SCC7 gledajući rezultate ispitivanja L-posudom nemaju zadovoljavajuću sposobnost prolaska betona kroz uske prostore između šipki armature.



Slika 4.16 SCC1



Slika 4.17 SCC2



Slika 4.18 SCC3



Slika 4.19 SCC4



Slika 4.20 SCC5



Slika 4.21 SCC6

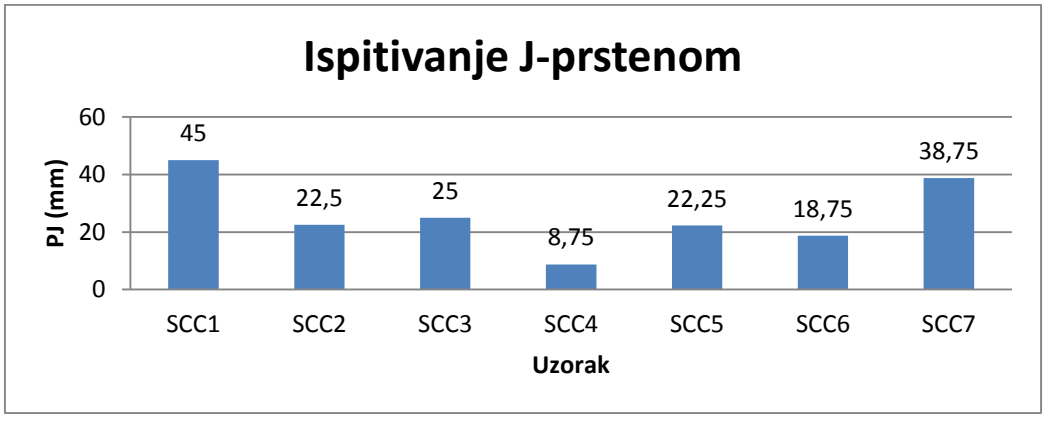


Slika 4.22 SCC7

4.6.4 Rezultati ispitivanja J-prstenom

Tablica 4.19 Rezultati ispitivanja J-prstenom

Oznaka uzorka	d_1 [mm]	d_2 [mm]	SF [mm]	T_{500} [s]	Δh_0 [mm]	Δh_{x1} [mm]	Δh_{x2} [mm]	Δh_{y1} [mm]	Δh_{y2} [mm]	PJ	Razred
SCC1	650	660	655	2,31	80	125	130	125	120	45	-
SCC2	640	615	627,5	2,28	100	123	122	122	123	22,5	-
SCC3	530	540	535	1,81	95	120	120	120	120	25	-
SCC4	680	660	670	2,63	105	110	105	120	120	8,75	PJ2
SCC5	610	630	620	2,03	100	122	122	125	120	22,25	-
SCC6	685	705	695	1,25	105	125	125	120	125	18,75	-
SCC7	610	620	615	2,75	85	125	125	120	125	38,75	-



Slika 4.23 Grafički prikaz rezultata ispitivanja J-prstenom

Samo mješavina SCC4 zadovoljava kriterij ispitivanja J-prstenom



Slika 4.24 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC1

Mješavina SCC1 ima najveću stopu blokiranja (PJ) od svih mješavina što ukazuje na lošu prolaznost samozbijajućeg betona. Vidljivo je odvajanje vode na rubovima i segregacija krupnog agregata u sredini.



Slika 4.25 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC2

Mješavina SCC2 ima veliku stopu blokiranja (PJ) iako se na slici vidi solidna prolaznost samozbijajućeg betona. Beton djeluje stabilno bez odvajanja vode na rubovima, ali pokazuje blagu segregacije krupnog agregata u sredini.



Slika 4.26 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC3

Mješavina SCC3 ima najmanji promjer razastiranja (SF) od svih mješavina uz dosta veliku stopu blokiranja. Beton djeluje stabilno bez odvajanja vode na rubovima i segregacije krupnog agregata u sredini.



Slika 4.27 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC4

Mješavina SCC4 ima najmanju stopu blokiranja (PJ) od svih mješavina i jedina zadovoljava kriterij ispitivanja J-prstenom što ukazuje na dobru sposobnost zaobilaženja prepreka.



Slika 4.28 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC5

Mješavina SCC5 ima veliku stopu blokiranja (PJ) iako se na slici vidi solidna prolaznost samozbijajućeg betona. Beton djeluje stabilno bez odvajanja vode na rubovima i segregacije krupnog agregata u sredini.



Slika 4.29 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC6

Mješavina SCC6 ima najveći promjer razastiranja (SF) i najkraće vrijeme razastiranja (T500) od svih mješavina. Nema značajnog odvajanja vode ali je vidljiva mala segregacija krupnog agregata.



Slika 4.30 Rezultati ispitivanja J-prstenom mješavine SCC7

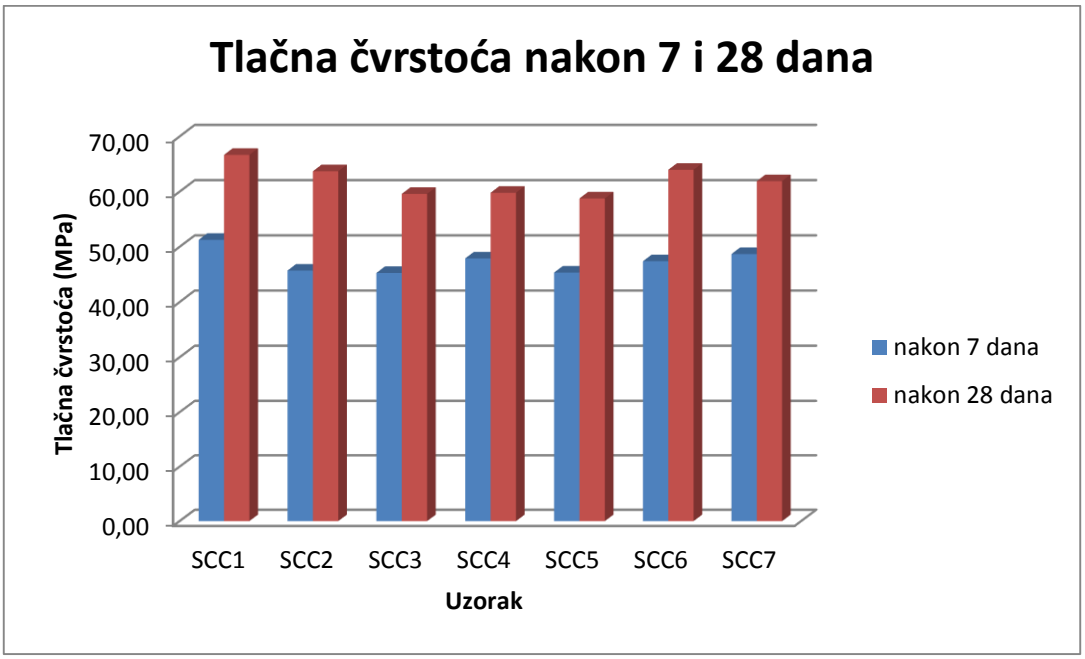
Mješavina SCC7 ima veliku stopu blokiranja (PJ) što znači i lošu prolaznost. Vidljivo je odvajanja vode na rubovima i segregacija krupnog agregata u sredini.

4.6.5 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona

Nakon završetka ispitivanja betona u svježem stanju beton je ugrađen u kalupe oblika kocke,dimenzija 150x150x150 mm. Uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i njegovani u vlažnoj komori u vapnenačkoj vodi na temperaturi od 20 ± 2ºC do dana ispitivanja. Ispitivanje je vršeno 7 i 28 dana nakon što su mješavine napravljene. U očvrsnutom stanju vršeno je ispitivanje tlačne čvrstoće prešom tako daje opterećenje nanošeno brzinom od 0,65 MPa/s te je mjerena brzina prolaska ultrazvučnih valova kroz uzorak.

Tablica 4.20 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona nakon 7 i 28 dana

Oznaka uzorka	Starost od 7 dana		Starost od 28 dana	
	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Masa [g]	Tlačna čvrstoća [MPa]
SCC1	8130,57	51,27	8180,67	66,67
SCC2	7923,13	45,70	7857,50	63,70
SCC3	7885,17	45,27	7879,53	59,60
SCC4	7946,86	47,90	7977,27	59,80
SCC5	7892,43	45,33	7884,73	58,77
SCC6	8008,20	47,40	8011,40	63,97
SCC7	8146,47	48,70	8098,50	61,90



Slika 4.31 Grafički prikaz tlačne čvrstoće betona nakon 7 i 28 dana

Tlačne čvrstoće svih betona prelaze tlačnu čvrstoću od 48 MPa koja je zahtijevana u proračunu. Najveću tlačnu čvrstoću nakon 7 i 28 dana pokazuje mješavina SCC1 s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm i dodatkom letećeg pepela. Zamjenom 30 % letećeg pepela iz mješavine SCC1 sa silikatnom prašinom uz isti sadržaj svih ostalih komponenti kao u mješavini SCC1 dolazi do malog smanjenja tlačne čvrstoće kod mješavine SCC2, to smanjenje je nešto jače izraženo u tlačnoj čvrstoći nakon 7 dana. Raspodjelom dodataka(leteći pepeo, silikatna prašina, reciklirani beton) po trećinama u mješavini SCC3 i povećanjem sadržaja vode u odnosu na prve dvije mješavine dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće mješavine SCC3 u odnosu na prve dvije mješavine. Sljedeće četiri mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 22 mm imaju nešto veći sadržaj sitnog agregata i nešto manji sadržaj dodataka (izraženije smanjenje dodataka je kod mješavine SCC7 sastavljene prema CBI metodi) u odnosu na prve tri mješavine te je njihova tlačna čvrstoća ukupno gledajući nakon 28 dana nešto manja u odnosu na prve tri mješavine. Najveći prirast tlačne čvrstoće između sedmog i dvadesetosmog dana primjećuje se kod mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 16 mm i dodatkom 70 % letećeg pepela i 30 % silikatne prašine. Dok je najmanji prirast tlačne čvrstoće između sedmog i dvadesetosmog dana vidljiv kod mješavine s maksimalnim zrnom agregata od 22 mm, nešto većim sadržajem sitnog agregata i dodatkom letećeg pepela.

4.6.6 Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti računa se prema sljedećoj formuli:

$$E_{\text{dim}} = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1+\mu) \cdot (1-2 \cdot \mu)}{(1-\mu)} [GPa]$$

Gdje je:

v - brzina ultrazvučnog vala (m/s)

ρ - gustoća betona (kg/m^3)

μ - poissonov koeficijent (μ=0.2)

Na uzorcima betona u očvrslom stanju mjerene su brzine širenja ultrazvučnih valova i određena je gustoća betona kako bi se mogao izračunati dinamički modul elastičnosti.

Tablica 4.21 Rezultati mjerenja brzine ultrazvučnih valova u očvrsnulom stanju

		SCC1	SCC2	SCC3	SCC4	SCC5	SCC6	SCC7
Brzina ultrazvučnog vala (m/s)	**nakon 7 dana**	4823,2	4637,6	4560,8	4733,5	4612,2	4735,2	4746,8
	nakon 28 dana	4753,5	4609,1	4713,7	4941,4	4854,4	4902,0	5071,4

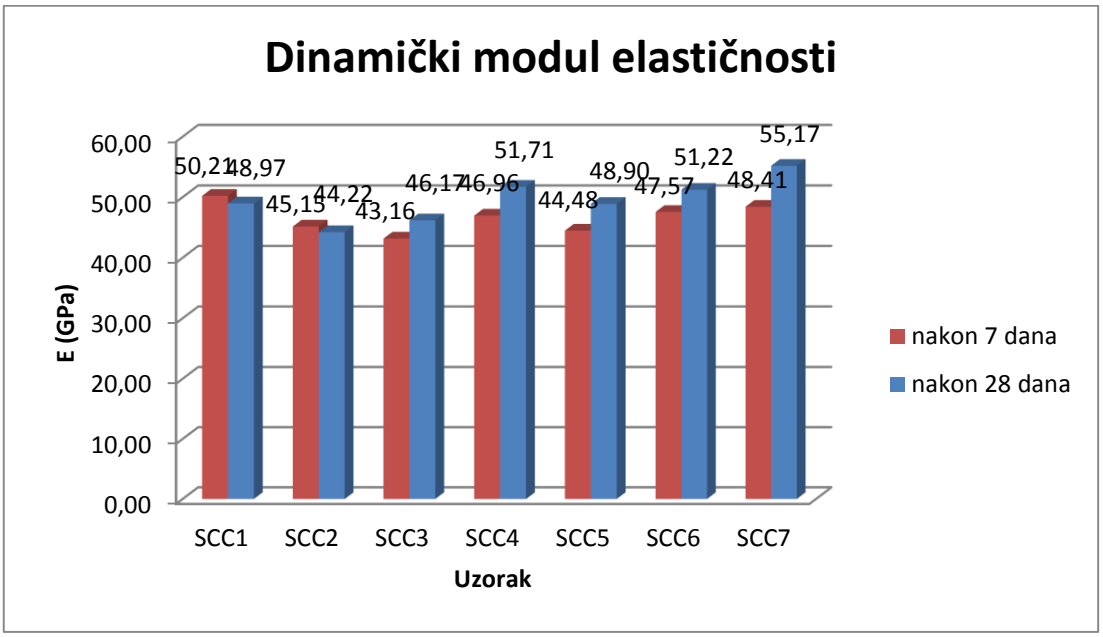
Pregledom rezultata brzine širenja ultrazvučnih valova nakon 28 dana može se zaključiti da svi dobiveni betoni po svojoj kvaliteti spadaju u kategoriju vrlo kvalitetnih betona.

Tablica 4.22 Rezultati gustoće u očvrsnulom stanju

		SCC1	SCC2	SCC3	SCC4	SCC5	SCC6	SCC7
Gustoća betona u očvrsnulom stanju (kg/m³)	**nakon 7 dana**	2398,4	2332,4	2305,6	2328,8	2323,3	2357,1	2387,3
	nakon 28 dana	2407,8	2312,7	2309,1	2353,2	2305,5	2368,5	2383,7

Tablica 4.23 Rezultati izračunatog dinamičkog modula elastičnosti betona u očvrsnulom stanju

		SCC1	SCC2	SCC3	SCC4	SCC5	SCC6	SCC7
Dinamički modul elastičnosti (Gpa)	**nakon 7 dana**	50,21	45,15	43,16	46,96	44,48	47,57	48,41
	nakon 28 dana	48,97	44,22	46,17	51,71	48,90	51,22	55,17



Slika 4.32 Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 7 i 28 dana

Svi uzorci pokazuju visok dinamički modul elastičnosti nakon 7 i 28 dana, kao što je bio slučaj i sa tlačnom čvrstoćom. Porast dinamičkog modula elastičnosti između sedmog i dvadesetosmog dana nije jako izražen. Uzorak sastavljen prema CBI metodi nakon 28 dana pokazuje najveći dinamički modul elastičnosti, iako nije postigao i najveću tlačnu čvrstoću.

5 ZAKLJUČAK

Sva navedena istraživanja samozbijajućeg betona u ovom radu usmjerena su prema smanjenu potrebnog udjela vezivnih materijala i kemijskih dodataka, što znači i nižu cijenu samozbijajućeg betona. Dokazano je da se povećanjem sadržaja pijeska i pravilnom raspodjelom svih krutih tvari u mješavini može smanjiti sadržaj cementa i ostalih skupih komponenata, a da se pritom zadovolje zahtjevi koje samozbijajući beton mora zadovoljiti u svježem stanju. Prije upotrebe nekih od tih metoda za proračun sastava samozbijajućeg betona važno je napraviti laboratorijska ispitivanja kako bi se ispitao utjecaj lokalnih materijala na svojstva samozbijajućeg betona.

Vlastita laboratorijska ispitivanja su napravljena na sedam različitih mješavina sa svrhom ispitivanja utjecaja: lokalnih materijala, proračuna po različitim metodama,korištenih dodataka, maksimalne veličine zrna agregata i sadržaja sitnog agregata na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrsnulom stanju. Na temelju dobivenih rezultata važno je bilo odrediti uzroke pojave segregacije agregata i izdvajanja vode u svježoj fazi samozbijajućeg betona.

Prva mješavina čiji je sastav proračunat prema metodi preporučenoj od (Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai) pokazala je znatnu segregaciju i odvajanje vode, iako tokom miješanja nije dodana sva izračunata količina vode. Na temelju toga može se zaključiti da predložena metoda nije pogodna za proračun količine vode potrebne za korištene materijale te bi je trebalo prilagoditi materijalima ovog područja. Zamjenom jedne trećine letećeg pepela iz te mješavine sa silikatnom prašinom uz zadržavanje istih udjela za sve ostale komponente kod druge mješavine, došlo je do znatnog smanjenja segregacije i odvajanja vode te je postignuta stabilnost mješavine. Zamjena polovine letećeg pepela iz druge mješavine sa filerom od recikliranog betona zahtijevala je povećanje udjela potrebne vode na količinu koja je približno jednaka količini proračunatoj prema upotrijebljenoj metodi.

Proračun četvrte mješavine prema toj metodi, sa maksimalnim zrnom agregata od 22 mm i nešto većim sadržajem sitnog agregata nego kod prve tri mješavine, rezultirao je nešto manjim sadržajem dodataka. Tako dobivena mješavina djelovala je vrlo stabilno, bez segregacije agregata i odvajanja vode te je zadovoljila sva provedena laboratorijska ispitivanja. Jedina je mješavina koja je uz zadovoljenje testa L-kutijom zadovoljila i ispitivanje J-prstenom što pokazuje dobru sposobnost prolaska betona između šipki armature.

Iz svega toga može se zaključiti da povećanje sadržaja sitnog agregata može smanjiti potrebu za dodacima i može poboljšati sposobnost prolaska betona između šipki armature. Količina vode koja je proračunata prema predloženoj metodi je previsoka te nije cijela dodana u mješavinu. Na temelju toga može se zaključiti da predložena metoda ne daje optimalnu količinu vode za materijale koji su bili korišteni u ovom eksperimentu. Zamjenom dijela letećeg pepela sa silikatnom prašinom, a zatim i sa filerom od recikliranog betona upotrijebljena količina vode se približila onoj dobivenoj u proračunu.

Mješavina sastavljena prema CBI metodi sadrži manje dodataka (letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona) od mješavina sastavljenih prema metodi preporučenoj od (Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai). Ta mješavina pokazuje dosta veliku segregaciju i odvajanje vode te nije zadovoljila testiranje V-lijevkom. Mješavina također nije zadovoljila ispitivanje L-kutijom i J-prstenom, što ukazuje na lošu sposobnost prolaska između šipki armature. Uzrok toga može se tražiti u loše odabranoj količini dodataka (letećeg pepela, silikatne prašine i filera od recikliranog betona) i korištenom agregatu kod kojeg je omjer sitnog agregata u odnosu na ukupni agregat prevelik, odnosno premali je udio krupnog agregata u sastavu betona. To je vidljivo kada se parametri sastava tako projektiranog samozbijajućeg betona ocijene prema preporučenim vrijednostima EFNARC-a.

Ispitivanja tlačne čvrstoće betona pokazuju da uzorci čiji je sastav određen prema metodi preporučenoj od (Nan Su, Kung-Chung Hsu i His-Wen Chai) prelaze tlačnu čvrstoću od 48 MPa koja je zahtijevana u proračunu. Uzrok toga može se tražiti u utjecaju korištenih dodataka (letećeg pepela, silikatne prašine i recikliranog betona) na tlačnu čvrstoću, iako je njihova osnovna zadaća bila zadovoljiti tražena svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju. Tlačne čvrstoće uzoraka sastavljenih prema toj metodi približno su jednake tlačnoj čvrstoći uzoraka sastavljenih prema CBI.

Pregledom rezultata brzine širenja ultrazvučnih valova nakon 28 dana može se zaključiti da svi dobiveni betoni po svojoj kvaliteti spadaju u kategoriju vrlo kvalitetnih betona. Također dinamički moduli elastičnosti svih uzorka izračunati na temelju izmjerenih brzina širenja ultrazvučnih valova i gustoća betona su jako visoki.

LITERATURA:

[1] Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai: A simple mix design method for self-compacting concrete, 2001.

[2] H.J.H. Brouwers and H.J. Radix: Self-Compacting concrete: The role of the particle size distribution, 2005.

[3] B.F. Tutikian, M. Pacheco: Self-compacting concretes (SCC)-comparison of methods of dosage, 2012.

[4] Mario Vujica: Smozbijajući ekološki održivi betoni; Diplomski rad

[5] Marina Algušić, Filip Lavriv: Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona, Zagreb, 2010.

[6] Nina Štirmer, Ivana Banjad Pečur: Projektiranje sastava samozbijajućeg betona, Građevinar 61 (2006) 4, 321-329

[7] Podaci preuzeti iz laboratorija za građevinske materijale na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu

[8] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC: The European Guidelines for Self Compacting Concrete, SCC 028

[9] Juradin S., Krstulović P.: Samozbijajući beton; Građevinski materijali II; Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split

[10] Katarina Grbeša: Utjecaj dodatka mljevene opeke na svojstva svježeg i očvrslog SCLC-a; Diplomski rad, Split, 2014.

[11] http://www.cemex.hr/

[12] http://www.lavčević.hr/