Samozbijajući beton s dodatkom punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka

Glibo, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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:123:512811

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

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

Nikolina Glibo

Split, 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Nikolina Glibo

Samozbijajući beton s dodatkom punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka

Diplomski rad

Split, 2017.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ:	**DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	Nikolina Glibo
BROJ INDEKSA:	515/2014
KATEDRA:	**Katedra za građevinske materijale**
PREDMET:	Građevinski materijali I

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Samozbijajući beton s dodatkom punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti neka dosadašnja istraživanja na temu recikliranog građevinskog materijala i njegova primjena na beton. Za eksperimentalni dio rada, kandidatkinja mora pripremiti punilo mljevenjem ispitanih betonskih kocki. Samljeveni materijal je potrebno frakcionirati na sitima od 0.063; 0.125; 0.25 i 0.5 mm. Po jednu od 5 dobivenih frakcija punila potrebno je ugraditi u uzorke samozbijajućeg betona, kako bi se uočio utjecaj punila na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju betonu je potrebno ispitati obradivost i to pomoću: razastiranja, T500, vremena tečenja, J-ring, L-box, te vizualno ocijeniti stabilnosti betona. U očvrslom stanju potrebno je odrediti dinamički modul elastičnosti i tlačnu čvrstoću za starost betona od 7 i 28 dana. Na uzorcima očvrslog betona određuje se i upijanje vode. Eksperimentalno dobivene rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu, 17.03.2017.

Voditelj Diplomskog rada:	Predsjednik Povjerenstva za završne i diplomske ispite:
Izv.prof.dr.sc.Sandra Juradin	Doc.dr.sc. Veljko Srzić

Samozbijajući beton s dodatkom punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka

Sažetak:

Ponovna upotreba staroga betona kao sastavnog dijela novoga betona poželjna je zbog očuvanja okoliša. U radu su prikazana svojstva samozbijajućeg betona (SZB) s dodatkom punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka koje se dobilo mljevenjem ispitnih betonskih kocaka. Izrađeno je ukupno devet mješavina samozbijajućeg betona. Cilj istraživanja je utvrditi utjecaj ovakvog dodatka na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. Provedena istraživanja su: V – lijevak, razastiranje slijeganjem, J – prsten, L – kutija, te tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana, dinamički modul elastičnosti i upijanje.

Ključne riječi: Samozbijajući beton, punilo, sitne čestice, obradivost, tlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti, upijanje.

Self-compacting concrete with the addition of filler from crushed testing concrete cubes

Abstract:

Reuse of old concrete as a component of new concrete is preferable for the sake of environmental protection. The study examined the properties of self-compacting concrete (SCC) with the addition of filler from crushed testing concrete cubes. Nine self-compacting concrete mixtures were prepared. The aim of the study was to see how the composition of the concrete affects the properties of the fresh and hardened state. Next studies have been performed: V-funnel, spreading settling, J-ring, L-box, and compressive strength after 7 and 28 days, modulus of elasticity and absorption.

Keywords: Self-compacting concrete, filler, small particles, workability, compressive strength, modulus of elasticity, absorption.

Sadržaj:

1. UVOD ... 1

1.1. Razvoj samozbijajućeg betona ... 2

1.2. Svojstva samozbijajućeg betona ... 3

1.3. Primjena samozbijajućeg betona ... 4

2. PROJEKTIRANJE SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA ... 8

2.1. Materijali za izradu samozbijajućeg betona ... 8

2.1.1. Cement ... 8

2.1.2. Agregat ... 8

2.1.3. Voda ... 9

2.1.4. Kemijski dodaci ... 9

2.1.5. Mineralni dodaci ... 9

2.1.6. Vlakna za mikroarmiranje ... 12

2.2. Osnovne smjernice za projektiranje samozbijajućeg betona [6] ... 12

3. SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA ... 14

3.1. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona ... 14

3.1.1. Sposobnost tečenja ... 14

3.1.2. Viskoznost ... 15

3.1.3. Sposobnost zaobilaženja prepreka ... 15

3.1.4. Otpornost prema segregaciji ... 15

3.2. Svojstva očvrslog samozbijajućeg betona ... 15

3.2.1. Tlačna čvrstoća ... 15

3.2.2. Vlačna čvrstoća ... 16

3.2.3. Statički modul elastičnosti ... 16

3.2.4. Puzanje ... 16

3.2.5. Skupljanje ... 16

3.2.6. Prianjanje za armaturu ... 17

3.2.7. Otpornost na posmičnu silu u ravnini spajanja betona ... 17

3.2.8. Otpornost na požar ... 17

3.2.9. Trajnost ... 17

3.3. Reološka svojstva samozbijajućeg betona ... 18

4. METODE ISPITIVANJA SVOJSTAVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA ... 20

4.1. Metode ispitivanja svojstava svježeg samozbijajućeg betona ... 20

4.1.1. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem [20] ... 20

4.1.2. Ispitivanje V-lijevkom [20] ... 23

4.1.3. Ispitivanje J-prstenom [20] ... *24*
4.1.4. Ispitivanje L kutijom [20] ... *26*
4.1.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu [20] ... *28*
4.1.6. Ostale metode [20] ... *28*
4.2. METODE ISPITIVANJA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA U OČVRSLOM STANJU [20] ... 30
4.2.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona ... *30*
4.2.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa ... *31*
4.2.3. Ostale metode ... *32*
5. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA ... 34
5.1. MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA S RECIKLIRANIM KRUPNIM AGREGATOM (KHALDOUN RAHAL) [26] ... 34
5.1.1. Uvod ... *34*
5.1.2. Eksperimentalni dio istraživanja ... *36*
5.1.3. Rasprava rezultata testova ... *38*
5.1.4. Zaključak ... *41*
5.2. MEHANIČKA SVOJSTVA I TRAJNOST BETONA S KONTAMINIRANIM RECIKLIRANIM AGREGATIMA (FARID DEBIEB, LUC COURARD, SAID KENAI, ROBERT DEGEIMBRE) [27] ... 42
5.2.1. Uvod ... *42*
5.2.2. Eksperimentalni dio istraživanja ... *43*
5.2.3. Rezultati i rasprava ... *45*
5.2.4. Zaključak ... *48*
5.3. UTJECAJ UVJETA OČVRŠĆIVANJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA S RECIKLIRANIM BETONSKIM OTPADOM (N. FONSECA, J. DE BRITO, L. EVANGELISTA) [28] ... 49
5.3.1. Uvod ... *49*
5.3.2. Eksperimentalni dio istraživanja ... *50*
5.3.3. Rezultati i rasprava ... *52*
5.3.4. Zaključak ... *55*
5.4. POSTUPAK IZRADE MJEŠAVINA ZA BETON S RECIKLIRANIM AGREGATOM (N. K. BAIRAGI, H. S. VIDYADHARA, KISHORE RAVANDE) [29] 56
5.4.1. Uvod ... *56*
5.4.2. Opseg istraživanja ... *57*
5.4.3. Materijali ... *57*
5.4.4. Program istraživanja ... *57*
5.4.5. Zaključak ... *62*
5.5. PONAŠANJE BETONA S RAZLIČITIM UDJELIMA PRIRODNIH I RECIKLIRANIH AGREGATA (N. K. BAIRAGI, KISHORE RAVANDE AND V. K. PAREEK) [30] ... 63
5.5.1. Uvod ... *63*
5.5.2. Materijali ... *63*

5.5.3. Postupak istraživanja *64*
5.5.4. Zaključak *71*
5.6. UTJECAJ PUNILA OD BETONSKOG OTPADA NA SVOJSTVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA (MISLAV LOVRIĆ) [31] 72
5.6.1. Uvod *72*
5.6.2. Materijal i sastav SCC mješavina *72*
5.6.3. Analiza eksperimentalnog dijela *74*
5.6.4. Zaključak *79*
6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA 80
6.1. UVOD 80
6.2. MATERIJALI 81
6.2.1. Cement [33] *82*
6.2.2. Agregat *83*
6.2.3. Superplastifikatori *83*
6.2.4. Ostali dodaci betonu *85*
6.3. SASTAV BETONSKIH MJEŠAVINA 88
6.4. NAČIN PRIPRAVE POKUSNIH MJEŠAVINA 90
6.5. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA SVJEŽEG BETONA 92
6.5.1. Metoda ispitivanja V-lijevak *93*
6.5.2. Metoda ispitivanja rasprostiranja – slijeganja *94*
6.5.3. Metoda ispitivanja J – prstenom *97*
6.5.4. Metoda ispitivanja L – kutijom *100*
6.5.5. Ispitivanje temperature i volumne mase *103*
6.6. MOGUĆI UZROCI LOŠIM SVOJSTVIMA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA 104
6.7. REZULTATI ISPITIVANJA I ANALIZA REZULTATA OČVRSLOG BETONA 107
6.7.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće *107*
6.7.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa i izračun dinamičkog modula elastičnosti *109*
6.7.3. Ispitivanje kapilarnog upijanja *111*
7. ZAKLJUČAK 115
8. LITERATURA 117

1. UVOD

Samozbijajući beton (eng. Self Compacting Concrete - SCC) je beton visokih svojstava koji ima dobru sposobnost tečenja pod utjecajem vlastite težine, popunjavanja teško dostupnih kutova oplate i prolaza kroz gusto složene armaturne šipke pritom zadržavajući homogenost bez pojave segregacije za vrijeme i nakon ugradnje. Na kraju se postiže ugradnja bez dodatnog zbijanja.

Ukratko, samozbijajući beton bi trebao imati visoku sposobnost tečenja, dobru sposobnost zaobilaženja prepreka, dobru sposobnost punjenja te visoku segregacijsku stabilnost. Osjetljiviji je na promjene negoli obični beton, zbog kombinacije detaljnih zahtjeva, složenijeg projektiranja sastava betonske mješavine te niske granice tečenja i viskoznosti. [1]

Radi se o građevinskom materijalu koji se sastoji od cementa, agregata, vode i aditiva kao i obični beton te još nekoliko novih sastavnica kao što su koloidni silikati, pucolanski materijali, leteći pepeo, mikrosilika, metakaolin, kemijski dodaci koji doprinose posebnim zahtjevima kao što su tečenje, čvrstoća, visoka obradivost, otpornost na kemijske i mehaničke utjecaje, otpornost segregaciji te trajnost. Kao i kod ostalih betona visokih svojstava, posebna svojstva kod SCC-a postižu se samo sustavnom optimizacijom pojedinačnih sastojaka samog betona. Stabilnost mješavine određena je prvenstveno interakcijom između praha tj. cementa i dodataka s promjerom čestica <0.125 mm, te vode i plastifikatora. [2]

Zbog svojih svojstava samozbijajući beton svrstava se u betone visoke kvalitete i izvedbe, te ima mnoge prednosti:

- Lagano se ugrađuje i ekonomičan je,
- Pogodan je za sve primjene koje zahtijevaju vrhunsku izvedbu i završnu obradu,
- Smanjuje opseg poslova koji su potrebni za ugradnju, izravnavanje i završnu obradu,
- Primjeren je za teške konstrukcije i za složene kalupe,
- Povećana izvedivost i odlična rana čvrstoća,
- Samoizravnavanje smanjuje vrijeme ugradnje,
- Nije potrebno zbijanje,
- Smanjena buka i problemi u vezi sa zdravljem i sigurnošću,
- Glatka površina koja zahtijeva minimalnu daljnju završnu obradu,
- U skladu ili bolji od relevantnih hrvatskih i europskih standarda. [3]

1.1. Razvoj samozbijajućeg betona

Razvoj samozbijajućeg betona započeo je 1983.g kada je problem trajnosti betonskih konstrukcija postao glavna tema interesa u Japanu. Kako bi se ostvarila trajnost betonskih konstrukcija, bio je potreban dovoljan broj kvalificiranih radnika u poslovima zbijanja betona. Međutim, postupno smanjenje broja radnika u japanskom građevinarstvu je dovelo do smanjenja kvalitete građevinskih radova. Jedno od rješenja je bila izvedba upravo samozbijajućeg betona. Okamura je 1986. godine predložio nužnost ove vrste betona dok su studije za razvoj samozbijajućeg betona, uključujući i temeljne studije o obradivosti betona, proveli Ozawe i Maekawa na sveučilištu u Tokiju.

Prototip samozbijajućeg betona prvotno je dovršen 1988. godine koristeći postojeće materijale na tržištu. Izveden je zadovoljavajuće u odnosu na sušenje i skupljanje, toplinu hidratacije, gustoću nakon stvrdnjavanja, i druga svojstva. Takav beton se nazivao beton visokih svojstava. Svojstva tog betona bila su definirana kao:

(1) u svježem stanju mora imati svojstvo samozbijanja;

(2) u ranoj starosti traži se izbjegavanje inicijalnih defekata;

(3) u očvrsnulom stanju mora biti otporan na vanjske utjecaje. [4]



Slika 1.1.: *Most Akashi Kaikyo [5]*

Tipičan primjer primjene samozbijajućeg betona predstavljaju temelji za Akashi Kaikyo most koji je otvoren u travnju 1998. godine. Radi se o visećem mostu s najdužim rasponom na svijetu (1.991 metara). Zbog dubine na kojoj se nalazi tlo i brzine morskih struja nije bilo moguće koristiti uobičajen postupak betoniranja temelja pod vodom, a zbog masivnosti temelja mosta i nemogućnosti vibriranja u čeličnim prstenovima graditelji su se odlučili na samozbijajući beton.

Time je uveden novi sustav gradnje, koji je u potpunosti koristio izvedbu samozbijajućeg betona. Beton se miješao u betonari pokraj gradilišta, a dalje se ispumpavao cijevima dugim 200 m do mjesta ugradnje. U konačnici, uporaba samozbijajućeg betona skratila je vrijeme gradnje temelja za 20%. [4]

Krajem 90-ih godina samozbijajući beton se počeo primjenjivati i u Europi. Ključni sastojak za izradu samozbijajućih betona predstavlja nova generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja. 2010.godine samozbijajući beton specificirale su i europske norme za proizvodnju betona i izvedbu betonskih konstrukcija (EN 206-1 i ENV 12350). [3]

Samozbijajući beton ostvario je napredak i široku primjenu u svim europskim zemljama kada su se donijele Europske smjernice koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju.

1.2. Svojstva samozbijajućeg betona

Uspoređujući s običnim betonom, kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer, veći je udio paste te je veći udio superplastifikatora, a može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoznosti. Pažljivim odabirom cementa i dodataka se postižu fluidnost i viskoznost betonske mješavine, uz ograničavanje omjera vode i sitnih čestica te dodavanje superplastifikatora i eventualno dodatka za promjenu viskoznosti.

Pri projektiranju sastava samozbijajućeg betona prvenstveno je potrebno prepoznati kakve zahtjeve rezultirajući beton mora ispuniti.

Pri tome se prate zahtjevi koji su u skladu s Europskim smjernicama:

- Razred tlačne čvrstoće
- Maksimalna veličina zrna agregata D_{max}
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava :
    - Maksimalni vodocementni faktor
    - Minimalna količina cementa
- Dodatni zahtjevi za samozbijajući beton:
    - Vrijednost T_{500} (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
    - Ispitivanje L kutijom

- Otpornost segregaciji
- Temperatura svježeg betona
- Drugi tehnički zahtjevi

Karakteristike samozbijajućeg betona u svježem stanju su:

- Tečenje: predstavlja rast deformacija materijala bez povećanja naprezanja. Za mjerenje se koristi metoda rasprostiranja slijeganjem, ali se može primjeniti i ispitivanje pomoću Kajimaine kutije. Ispitivanjem po metodi rasprostiranja slijeganjem se opisuje tečenje betona bez prepreka i upotrebljava se kao primarna provjera konzistencije betona.

- Viskoznost: predstavlja otpor materijala tečenju, a može se procijeniti mjerenjem u reometru. Osim toga, može se odrediti empirijskim postupcima od kojih je preporučeno ispitivanje s pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode kao što su određivanje parametra T_{500}, O-lijevak i Orimet.

- Sposobnost zaobilaženja prepreka: predstavlja sposobnost svježeg betona da zaobilazi armaturu i popunjava oplatu, a da se pritom ne događa segregacija. Sposobnost zaobilaženja prepreka najčešće se određuje L-kutijom, a mogu se primijeniti i ostale metode kao što su U kutija, J prsten i Kajimaina kutija.

- Otpornost segregaciji: otpornost segregaciji SR se izražava kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu. Pojava segregacije može biti osobito izražena u visokim betonskim elementima. Otpornost segregaciji definira se samo za veće razrede slijeganja rasprostiranjem i/ili za više razrede viskoznosti. [6]

1.3. Primjena samozbijajućeg betona

Danas se samozbijajući beton ugrađuje u sve vrste građevina i sve vrste elemenata, a njegove prednosti su višestruke: lako se ugrađuje i ekonomičan je, pogodan je za ugradnju, izravnavanje i završnu obradu te za teške konstrukcije i složene oplate. S njime se smanjuje vrijeme ugradnje, nije potrebno zbijanje, povećana je izvedivost, ima odličnu ranu čvrstoću, smanjena je buka na gradilištu, izgradnja se može izvesti noću bez uznemiravanja, te ima minimalnu završnu obradu, a kvaliteta betona je jednolika.

Samozbijajući beton se primjenjuje u izradi temelja, podova, zidova, složenim strukturama po mjerama, te u specijalnim primjenama koje predstavljaju izazov.

Česta je primjena i kod sendvič-konstrukcija pri čemu se dodaje novi sloj betona na postojeću konstrukciju kako bi se povećala nosivost ili zamjenio dotrajali sloj. [7]

Samozbijajući beton idealan je za primjenu kod:

- bušenih okna,
- stupova,
- potpornih sustava,
- područja s visokom koncentracijom armature i cijevi. [8]

Visokogradnja: Burj Khalifa neboder je u Dubaiju, u Ujedinjenim Arapskim Emiratima i najviša je građevina na Zemlji. Visok je 828 metara s antenom. Trebao se zvati Burj Dubai, ali je u čast šeika Kalifa al-Nahjan nazvan Burj Khalifa. Tijekom izgradnje nebodera potrošeno je 280.000 m^3 betona i više od 800.000 l superplastifikatora, a u izgradnji je sudjelovalo 3.000 radnika. [9]



Slika 1.2.: *Najviša zgrada na svijetu Burj Khalifa [9]*

Mostogradnja: Samozbijajući beton se također koristi i u mostovima, pa čak i na predgotovljenim elementima. Jedan od najznačajnijih projekata izrađenih pomoću samozbijajućeg betona je viseći most Akashi-Kaikyo. U ovom projektu, SCC se miješao na licu mjesta i pumpao kroz cjevovodni sustav do određene točke koja je bila udaljena 200 m, te je vrijeme gradnje smanjeno s 2,5 godine na 2 godine.



Slika 1.3.: *Most Akashi Kaikyo [10]*

Ritto Bridge je ovješeni most na autocesti u Japanu čiji je najviši potporni stup visok 65 metara. Za izgradnju su se koristila ojačanja i beton visoke čvrstoće kako bi se zadovoljila otpornost na potres. Raspored ojačanja bio je vrlo gust pa je stoga odabran samozbijajući beton zbog dobivanja dobre obradivosti za potporne stupove konstrukcije.



Slika 1.4.: *Most Ritto Bridge [11]*

Higashi-Oozu vijadukt u Japanu: Za glavne nosače na vijaduktu korišteni su predgotovljeni, prednapregnuti T-nosači. Na početku izrade, planirana je uporaba običnog, vibriranog betona s rasprostiranjem (slump-flow) od 80 mm. Međutim, pokazalo se da je običan beton nepraktičan zbog ogromnih dimenzija nosača pa se samozbijajući beton nametnuo kao odlično rješenje. Uočeno je da su predgotovljeni, prednapregnuti T-nosači SCC-a koji su proizvedeni u tvornici pokazali dobru izvedbu troškova. Međutim, u mnogim slučajevima, SCC u Japanu i dalje se smatra posebnim betonom zbog svojih visokih troškova i teškoća vezanih uz kontrolu kvalitete, iako je očito da nudi mnoge prednosti.



Slika 1.5.: *Glavni nosači vijadukta Higashi-Oozu [12]*

Tunelogradnja: Projekt Sodra Lanken (SL) najveći je infrastrukturni projekt u Švedskoj. Ukupni trošak SL projekta procjenjuje se na oko 800 milijuna USD. Projekt SL obuhvaća sedam glavnih čvorišta, s mostovima, potpornim zidovima, tunelskim ulazima i samim tunelima. Ukupna duljina stijenskih tunela iznosi 16.6 kilometara, a djelomično su obloženi betonom. Volumen betona koji se koristio u projektu iznosi 225.000 m^3. Iskustva s SCC-om općenito su dobra. On je prvenstveno korišten kod konstrukcija koje se teško kompaktiraju normalnim vibracijama te imaju visoke estetske zahtjeve, primjerice betonske podne obloge, podzemne instalacijske konstrukcije, ulazi u stijene, potporni zidovi s nagibom i reljefnim strukturama. [12]



Slika 1.6.: *Projekt Sodra Lanken [13]*

Rezervoari: Rezervoar LNG (Liquid Natural Gas) u Japanu čiji je kapacitet rezervoara 180000 m^3. U izgradnji je korišten samozbijajući beton čvrstoće 60 N/mm^2, te je zahvaljujući njegovoj primjeni debljina zidova smanjena s prvobitnih 90 cm na 60 cm, vrijeme izgradnje s 22 na 18 mjeseci, a broj radnika sa 150 na 50. [14]



Slika 1.7.: *Rezervoar LNG-a u Japanu [14]*

2. PROJEKTIRANJE SASTAVA SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

2.1. Materijali za izradu samozbijajućeg betona

Osnovni sastojci za izradu samozbijajućeg betona su gotovo isti kao i oni za izradu običnog betona. Kontrola kvalitete pojedinih materijala koji se koriste za izradu samozbijajućih betona se ispituje prema normama.

Osnovne sastojke čine cement, agregat i voda. Uz njih se često dodaju i kemijski dodaci kao što je superplastifikator, te mineralni dodaci poput punila, silikatne prašine, letećeg pepela, i drugi.

2.1.1. Cement

Cement je hidraulično građevno vezivo koje samostalno očvrsne na zraku i pod vodom. To je praškasti materijal koji pomiješan s vodom, kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrsnulu cementnu pastu ili cementni kamen. Uloga cementa u betonu je da čvrsto jedno s drugim slijepi sitnija i krupnija zrna agregata.

Prema hrvatskoj normi HRN EN 197-1 cement se definira na slijedeći način: „Cement je hidrauličko vezivo, to znači fino mljeveni anorganski materijal koji, pomješan s vodom, daje cementno vezivo koje procesom hidratacije veže i otvrdnjava, te nakon otvrdnjavanja ostaje postojanog volumena, također ispod vode.“

Cement obuhvaća 10-20% ukupne mase betona i ima vrlo veliki utjecaj na svojstva betona.

2.1.2. Agregat

Agregat čini u pravilu tri četvrtine volumena betona i stoga ima veliki utjecaj na svojstva betona, kako u svježem, tako i u očvrslom stanju. Krupna zrna agregata (>4 mm) čine skelet betona, a sitna zrna povećavaju kohezivnost svježeg betona.

Najčešće se koriste prirodni (riječni) šljunak i pijesak koji su jeftiniji i imaju bolje povezivanje zrna – veća adhezija s cementnim kamenom. Štetni sastojci u agregatu su: glina i druge sitne čestice, organske tvari i soli.

Oni dijelovi agregata koji su sitniji od 0,125 mm nazivaju se punilom, filerom ili praškastom frakcijom. Analizom granulometrijskog sastava samozbijajućeg betona utvrđuje se da kod ove vrste betona postoji velika potreba za sitnim česticama.

2.1.3. Voda

Dio mase betona čini voda sa svojih 5-10%. Voda je dobra za izradu betona ako je:

- pH 4,5 – 9,5,
- sulfatnih iona manje od 2700 mg/l,
- kloridnih iona manje od 300 mg/l,
- indeks organskih sastojaka manji od 200 mg/l,
- ukupno rastopljenih soli manje od 5000 mg/l (ne odnosi se na morsku vodu).

Najčešće se smatra da je voda za piće dobra i za spravljanje betona, međutim ako ta voda sadrži veću količinu natrija ili kalija, postoji opasnost od alkalno agregatne reakcije. Isto tako voda koja nije pitka može biti prikladna za spravljanje betona. Najčešće je dovoljno da je pH između 5 i 8, te da nije slana (ne sadrži kloride).

2.1.4. Kemijski dodaci

Kemijski dodaci betonu su neobavezna komponenta betona, kojom se dodavanjem betonu prilikom spravljanja u vrlo maloj količini, mogu poboljšati neka svojstva svježeg ili očvrsnutog betona. Najčešće se radi o sljedećim vrstama aditiva:

- plastifikatori (superplastifikatori) – smanjenje površinske napetosti,
- aeranti (uvlačivači zraka) – površinski aktivne tvari koje smanjuju površinsku napetost da bi omogućili stvaranje mjehurića te osigurali njihovu stabilnost,
- akceleratori (ubrzivači vezivanja ili očvršćivanja) – kemijskim putem utječu na vezanje i očvršćivanje,
- retarderi (usporivači vezanja) – usporavaju brzinu vezanja cementa,
- antifrizi (dodaci za betoniranje na niskim temperaturama) – zaustavljena hidratacija.

Uz ove aditive idu i prospekti u kojima se daju tablice primjene i doziranja. Treba naglasiti da se tablice daju za primjenu sa čistim cementom, koji se koristi u ograničenim količinama, te aditive treba ispitati s cementom s kojim će se primjenjivati. [3]

2.1.5. Mineralni dodaci

S obzirom na zahtjeve za samozbijajući beton, često mu se dodaju mineralni dodaci kako bi mu se poboljšala svojstva i održavala kohezija i otpornost segregaciji.

Oblik i upijanje vode mineralnih punila može utjecati na potrebu za vodom i osjetljivost pa su stoga primjenjivi za upotrebu u proizvodnji samozbijajućeg betona.

Tip I	**Inertni ili poluinertni**	• **mineralni filer (vapnenac, dolomit itd.)** • **pigmenti**
Tip 2	Pucolanski	• leteći pepeo • silicijska prašina • metakaolin
	Hidraulički	• Zgura visokih peći

Slika 2.1.: *Vrste mineralnih dodataka betonu [3]*

Punilo ili filer predstavlja sitne čestice koje prođu kroz sito otvora 0,125mm, ali je najpovoljnija frakcija koja prođe kroz sito od 0,063 mm. Spada u grupu inertnih, poluinertnih mineralnih dodataka (dolomit, vapnenac, itd). Punilo kao mineralni dodatak utječe na poboljšanje obradljivosti betona. Veličina čestica, oblik čestica i upijanje vode filera može utjecati na potrebu vode samozbijajućih betona. Fileri na bazi kalcijevog karbonata mogu dati odlična reološka svojstva samozbijajućeg betona.

Pigmenti predstavljaju dodatke netopive u vodi, a koriste se kako bi obojili građevne materijale koji su na bazi cementa i vapna. Kod samozbijajućeg betona se pigmenti jednoliko rasprostiru i postiže se veća ujednačenost boje radi veće fluidnosti samog betona. S obzirom na veću količinu paste kod samozbijajućih betona može se očekivati da će za postizanje potrebne gustoće boje biti potrebna i veća količina pigmenta. U samozbijajući beton se koriste isključivo radi postizanja određene boje.

Leteći pepeo je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu spada u pucolane jer aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa. 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.

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 obradljivost, 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.

Silicijska prašina je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu (aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa) spada u pucolane (silikatni i aluminosilikatni materijali koji nemaju latentna svojstva, kemijski reagiraju s vodom). Silicijska prašina je najkvalitetniji pucolan s najvećom pucolanskom aktivnošću. Sastoji se od vrlo finih čestica nastalih kao sporedni proizvod pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura. Fizikalni zahtjevi su: specifična ploština, sadržaj suhe tvari u mulju, indeks aktivnosti. Naziva se još i silikatna prašina ili mikrosilika. Veličine čestica silicijske prašine kreću se od 0,01-0,3 μm.

Silicijska prašina na svojstva betona ima učinak preko dva mehanizma:

- Pucolanske reakcije,
- Učinka sitnih čestica.

Sitne čestice doprinose poboljšanju obradljivosti i povećanju kohezivnosti te zapunjavaju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa. Silicijska prašina je učinkovita i za eliminiranje izdvajanja vode (poboljšava otpornost na segregaciju). [15]

Metakaolin (MK), prosječnog kemijskog sastava 50-55% SiO_2 i 40-45% Al_2O_3, je amorfni proizvod dehidratacije kaolinita koji se odlikuje visokom pucolanskom aktivnošću. Osnovna i najčešće korištena sirovina za proizvodnju metakaolina je kaolinska glina iz koje se „termičkom aktivacijom“ proizvodi metakaolin. Ostale sirovine za dobivanje metakaolina su „lateriti“ i otpadni talog iz industrije za reciklažu papira. [16]

Zgura (troska, drozga, šljaka) se dobiva kao ostatak pri proizvodnji željeza u visokim pećima. Naglim hlađenjem tekuće zgure koja pliva na rastaljenom željezu se granulira u zrna klinkerskog oblika. Postoje dva oblika zgure, a to su bazična i kisela. Bazična zgura sadrži najmanje 50 % bazičnih oksida CaO i Al_2O_3, a ostatak je najvećim dijelom SiO_2. Kisela zgura sadrži znatno manje od 50 % bazičnih oksida CaO i Al_2O_3, a prevladava SiO_2. Bazična zgura se upotrebljava kao vezivo. Zgura sama za sebe nema vezivna svojstva, ali ih dobije dodavanjem katalizatora (vapno, gips). Glavni mineral bazične zgure je belit koji ima produkte hidratacije skoro identične kao i hidrati belita iz cementnog klinkera tj. proces hidratacije zgure i proces hidratacije portland cementnog klinkera su istog osnovnog tipa. [17]

2.1.6. Vlakna za mikroarmiranje

Pri izradi samozbijajućih betona mogu se koristiti i vlakna za mikroarmiranje. Često se upotrebljavaju polimerna vlakna koja sprječavaju nastanak pukotina uzrokovanih skupljanjem betona, te čelična vlakna koja povećavaju duktilnost i vlačnu čvrstoću betona. Najčešća su čelična vlakna kružnog, kvadratičnog, plošnog i nepravilnog presjeka, te rebrasta i glatka. Zbog boljeg sidrenja vlakana u matricu, umjesto ravnih se koriste naborana i zaobljena vlakna te vlakna s kukama ili sidrima na krajevima. Betonu se na taj način povećava udarna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, nosivost na torziju i poprečne sile, te se reduciraju razmaci i širine pukotina, povećava se žilavost i otpornost na habanje i mraz. To ga svrstava u atraktivne građevinske materijale.

Fizikalno-mehanička svojstva vlaknastog betona ovise o vrsti i količini vlakana, omjeru oblika, o svojstvima matrice te o miješanju, ugradbi i njezi matrice. Upotreba vlakana za mikroarmiranje može smanjiti fluidnost i sposobnost popunjavanja betona, te povećati pojavu blokiranja.

Vlaknasti beton intenzivno se istražuje u Engleskoj, Njemačkoj, SAD-u i Singapuru. [32]

2.2. Osnovne smjernice za projektiranje samozbijajućeg betona [6]

Postoje različiti pristupi za projektiranje sastava samozbijajućeg betona, a zasnivaju se na:

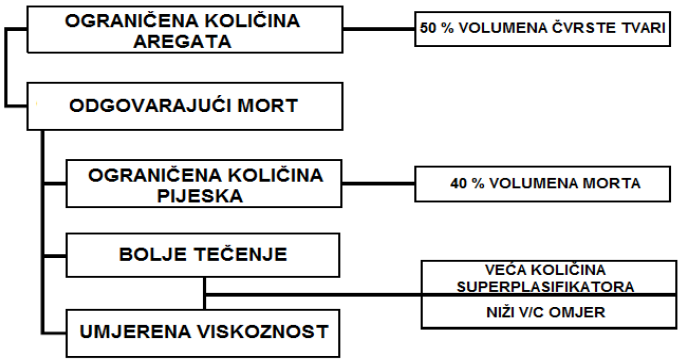
- određivanju vode te optimiziranju tečenja i stabilnosti paste,
- određivanju udjela pijeska i dodataka betonu,
- određivanju količine krupnog agregata,
- ispitivanju osjetljivosti na male varijacije u količinama sastojaka,
- proizvodnji betona u laboratoriju i ispitivanju tog betona u svježem stanju,
- ispitivanju betona u očvrslom stanju,
- proizvodnji probnih mješavina u betonari.

Okamura i Ozawa su na Sveučilištu u Tokiju razvili jednu od prvih metoda projektiranja samozbijajućeg betona. Međutim, bila je ograničena na uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata (C_2S). Osnovni principi te metode projektiranja samozbijaućeg betona su:

- volumen krupnog agregata u betonu iznosi 50 %,
- sve čestice agregata veće od 0,09 mm predstavljaju agregat, a manje od 0,09 mm vezivo,

- vodovezivni omjer i količina superplastifikatora se određuju ispitivanjem morta koristeći V-lijevak,

- vrijednost rasprostiranja slijeganjem preporučuje se od 650 mm, a prema tome se prilagođava udio superplastifikatora.



Slika 2.2.: *Način dobivanja svojstava samozbijanja kod betona [15]*

Kao nastavak na ovu metodu, kasnije su nastajale mnogobrojne druge modificirane metode koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala.

Edamatsu, Nishida i Ouchi su razvili metodu kojom se određivao udio sitnog agregata u mortu za sitni agregat različitog oblika zrna i granulometrijskog sastava. Zatim je Ouchi predložio metodu za određivanje povoljne kombinacije vodovezivnog omjera i udjela superplastifikatora. Nadovezivala su se istraživanja zasnovana na modelu Ozawe i Okamure na Sveučilištu u Delftu, ali s nizozemskim materijalima. Na University College London provodila su se istraživanja s obzirom na povećani udio pijeska u mortu te mogućnost variranja većeg raspona udjela agregata.

Razvile su se i druge metode poput CBI metode, JSCE metode i LCPC pristupa.

3. SVOJSTVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

Beton je složeni građevinski materijal čija svojstva je vrlo teško jednostavno odrediti, a kao materijal mora zadovoljiti dva osnovna zahtjeva:

1. u svježem stanju mora ispuniti cijeli prostor u kalupu ili oplati,
2. u očvrslom stanju mora imati tražena svojstva.

Oba zahtjeva su jednako važna za kvalitetu betonske konstrukcije te ako prvi zahtjev nije ispunjen, ne može biti ni drugi.

Sam način ugradnje betona utječe na njegova svojstva kada očvrsne, pa su stoga ta svojstva definirana kao:

- u svježem stanju treba imati svojstvo samozbijanja,
- u ranoj starosti traži se izbjegavanje inicijalnih defekata,
- u očvrsnutom stanju treba biti otporan na vanjske utjecaje. [15]

3.1. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona

Ponekad je dovoljno ispitati konzistenciju metodama slijeganjem ili rasprostiranjem kada se određuju karakteristike svježeg običnog betona. Ipak, kada se radi o svježem samozbijajućem betonu tada to nije dovoljno jer se ne dobivaju podaci o ostalim svojstvima kao što su viskoznost, sposobnost zaobilaženja prepreka, te pojava segregacije. Radi toga je potrebno definirati svojstva svježeg samozbijajućeg betona preko njegovih karakteristika kao što su: rasprostiranje – slijeganjem, viskoznost, sposobnost zaobilaženja prepreka, te otpornost segregaciji.

3.1.1. Sposobnost tečenja

Sposobnost tečenja se definira kao rast deformacija materijala bez povećanja naprezanja. Za procjenu sposobnosti tečenja se koristi metoda rasprostiranja slijeganjem (eng. Slump flow), ali se može primijeniti i ispitivanje s pomoću Kajimaine kutije. Ispitivanjem prema metodi rasprostiranja slijeganjem opisuje se tečenje betona bez prepreka i upotrebljava se kao primarna provjera konzistencije betona. Dodatne se informacije dobivaju vizualnim pregledom i mjerenjem vrijednosti T_{500}. Ispitivanje sposobnosti tečenja ujedno predstavlja i kontrolu konzistencije na gradilištu prije ugradnje velikih količina betona.

3.1.2. Viskoznost

Viskoznost se definira kao otpor materijala tečenju. Osim mjerenjem u reometru može se odrediti i empirijskim postupcima kao što je ispitivanje pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode (određivanje parametara T_{500}, O-lijevak, Orimet).

3.1.3. Sposobnost zaobilaženja prepreka

Sposobnost zaobilaženja prepreka se definira kao sposobnost svježeg samozbijajućeg betona da teče i zaobilazi gustu armaturu te popunjava oplatu, a da pritom ne dođe do segregacije. Prilikom definiranja sposobnosti zaobilaska prepreka potrebno je uzeti o obzir geometriju, gustoću armature, te maksimalnu veličinu zrna agregata u betonskoj mješavini.

3.1.4. Otpornost prema segregaciji

Otpornost prema segregaciji možemo definirati kao sposobnost cementne paste da spriječi relativno kretanje krupnog agregata u betonu. Otpornost segregaciji se izražava kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu.

Tečenje i viskoznost osnovni su faktori sposobnosti popunjavanja oplate samozbijajućeg betona. [15]

3.2. Svojstva očvrslog samozbijajućeg betona

Kada se uspoređuju svojstva očvrslog samozbijajućeg betona i očvrslog običnog betona, ne bi se trebale pojaviti velike razlike. Samozbijajući betoni mogu biti velikih razreda tlačnih čvrstoća kao i malih razreda tlačne čvrstoće. Nadalje, trajnost se razlikuje između običnih i samozbijajućih betona jer se beton promatra na nivou mikrostrukture. Bolja svojstva trajnosti pokazuju samozbijajući betoni radi veće gustoće i kompaktnije strukture.

Bitno je naglasiti da je poprilično teško uspoređivati samozbijajući i obični beton jer je količina dodataka vrlo različita, bez obzira na isti w/c faktor i količinu cementa.

3.2.1. Tlačna čvrstoća

Kada se uspoređuju tlačne čvrstoće između običnog betona i samozbijajućeg betona s istim w/c faktorom, rezultati će pokazati veću čvrstoću samozbijajućeg betona. Razlog tome je snažnija veza između agregata i očvrsle paste. Nadalje, na temelju dugogodišnjeg ispitivanja se pokazalo da se postižu veće tlačne čvrstoće kada se primjenjuje drobljeni agregat umjesto prirodnog agregata.

3.2.2. Vlačna čvrstoća

S obzirom da količina paste nema značajnog utjecaja na čvrstoću betona može se pretpostaviti da je vlačna čvrstoća ista kao i kod standardnog betona istog razreda čvrstoće. Kod dimenzioniranja armirano–betonskih presjeka na pukotine, toplinsko širenje, mikroarmiranih betona i sl. primjenjuje se vlačna čvrstoća koja je dobivena ispitivanjem na savijanje betonskih gredica.

3.2.3. Statički modul elastičnosti

Kada se promatra prostorni model betona volumno tada agregat ima najveći udio. Zbog toga vrsta i količina agregata najviše imaju utjecaj na konačni modul elastičnosti betona. Ako agregat ima veći modul elastičnosti, onda će i beton imati veći modul elastičnosti. Ipak, zbog većeg udjela cementne paste kod samozbijajućih betona, takvi betoni imaju malo niži modul elastičnosti, što ne mora biti nužno pravilo. Bitno je to znati kod otpuštanja prednapetih šipki i užadi. Nadalje, ispitivanja su pokazala da što je manja čvrstoća kod samozbijajućih i običnih betona, to se javlja veća razlika kod modula elastičnosti.

3.2.4. Puzanje

Kada je uzorak izložen konstantnom naprezanju pri čemu dolazi do deformacija uzorka, govori se o puzanju. Kod tlačno naprezanih prednapetih elemenata puzanje smanjuje silu prednapinjanja te uzrokuje polagani prijenos opterećenja sa betona na ojačanja. Kod vlačno naprezanih elemenata puzanje može biti pozitivno jer djelomično oslobađa zaostala naprezanja od npr. skupljanja i temperaturnih promjena. Pojava puzanja se događa unutar cementne paste te je uvjetovana njenom poroznošću koja je vezana sa vodocementnim faktorom. Za vrijeme hidratacije, poroznost cementne paste se smanjuje. Nadalje, na puzanje ima utjecaj i vrsta cementa pa će zbog toga cementi koji brže hidratiziraju imati veću čvrstoću kod opterećenja, manji omjer naprezanja/deformacija i manje puzanje. S obzirom na to se može doći do zaključka da se kod samozbijajućih betona može očekivati veće puzanje zbog većeg udjela cementne paste.

3.2.5. Skupljanje

Volumna deformacija pri kojoj dolazi do smanjivanja dimenzija neopterećenih betonskih elemenata tijekom vremena, približno linearno u svim pravcima, naziva se skupljanje betona. Ono se događa zbog smanjenja vlažnosti betona, a uzrok može biti isparavanje vode iz betona, hidratacija cementa i karbonatizacija. Popriličan utjecaj na skupljanje imaju veličina i udio agregata, te njegov modul elastičnosti. Što je veći volumni udio agregata i veći modul elastičnosti,

to će skupljanje biti manje. S obzirom na to, pojava skupljanja se može smanjiti koristeći krupniji agregat, ali se mora paziti da bude dovoljno paste kako bi ostala svojstva bila ispunjena. [18]

3.2.6. Prianjanje za armaturu

Jedno od osnovnih svojstava samozbijajućeg betona je fluidnost i kohezija, pa se može očekivati da će to dovesti do puno bolje veze između betona i armature. Da bi se pravilno prenosilo naprezanje između armature i betona bez da dođe do oštećenja konstrukcije potrebno je ostvariti i dovoljan zaštitni sloj betona iznad šipki. Često se javlja čupanje armature kod običnih betona kada se dosegne maksimalno naprezanje na spoju između betona i armature, međutim kod samozbijajućih betona dolazi samo do proklizavanja armature uz zadržavanje dodatne prionjivosti.

3.2.7. Otpornost na posmičnu silu u ravnini spajanja betona

Kada se samozbijajući beton ugradi i očvrsne, površina mu je glatka i nepropusna. Međutim, ako se element radi u nekoliko slojeva i pri tome se prekida betoniranje tada je potrebno površinu prekida pravilno tretirati kako bi bilo omogućeno pravilno preuzimanje i prijenos posmične sile. Ta površina se najčešće tretira premazivanjem s usporivačima vezanja, četkanjem i postupcima hrapavljenja površine.

3.2.8. Otpornost na požar

Europska komisija beton je klasificirala kao nezapaljiv materijal koji ne pridonosi širenju plamena, otrovnih plinova, niti dima. Kada je betonski element izložen požaru zadržava većinu svoje čvrstoće dok se toplina polako širi kroz njega. Ponašanje samozbijajućih betona u požaru slično je ponašanju običnih betona s tim što samozbijajući betoni imaju manju plinopropusnot (zbog velike gustoće mikrostrukture) pa može doći do jačeg ljuštenja i lakšeg otpadanja zaštitnog sloja zbog većeg pritiska pare i plinova unutar strukture.

3.2.9. Trajnost

Vijek trajanja pojedine vrste betonskog objekta trebao bi biti polazni kriterij za definiranje svojstava betona i dimenzioniranje pojedinih konstruktivnih elemenata. Jedan od problema koji je doveo do razvoja samozbijajućih betona je manji vijek trajanja običnog betona. Ako mu je sastav pravilno projektiran, samozbijajući beton odlikuje se homogenom strukturom sa minimalnim udjelom šupljina i glatkom nepropusnom površinom, što su preduvjeti povećane trajnosti građevina. Kada se beton vibrira može doći do problema koji su uzrokovani nedovoljnim vibriranjem, npr. zarobljeni zrak, loše prianjanje betona oko armature. Problem može stvoriti i

prekomjerno vibriranje koje može uzrokovati segregaciju. Ti svi problemi su eliminirani upotrebom samozbijajućeg betona koji se ugrađuje bez upotrebe vibratora te potpuno upotpunjuje oplatu djelovanjem vlastite težine. [18]

3.3. Reološka svojstva samozbijajućeg betona

Reologija nastoji opisati tečenje materijala pomoću odgovarajućih matematičkih modela sa što manjim brojem varijabli. Reološka svojstva cementne paste, morta i svježeg betona ovise ponajviše o:

a) količini sadržane vode;

b) količini punila (filera) i agregata te obliku, teksturi površine, poroznosti i veličini čestica punila i agregata, kao i o granulometrijskom sastavu agregata i njegovoj specifičnoj površini;

c) vrsti i količini cementa i zamjena za cement;

d) količini zahvaćenog zraka i veličini mjehurića zraka;

e) prisustvu i učinku dodataka betonu koji utječu na svojstva adsorbiranog sloja vode i raspored čestica;

f) temperaturi;

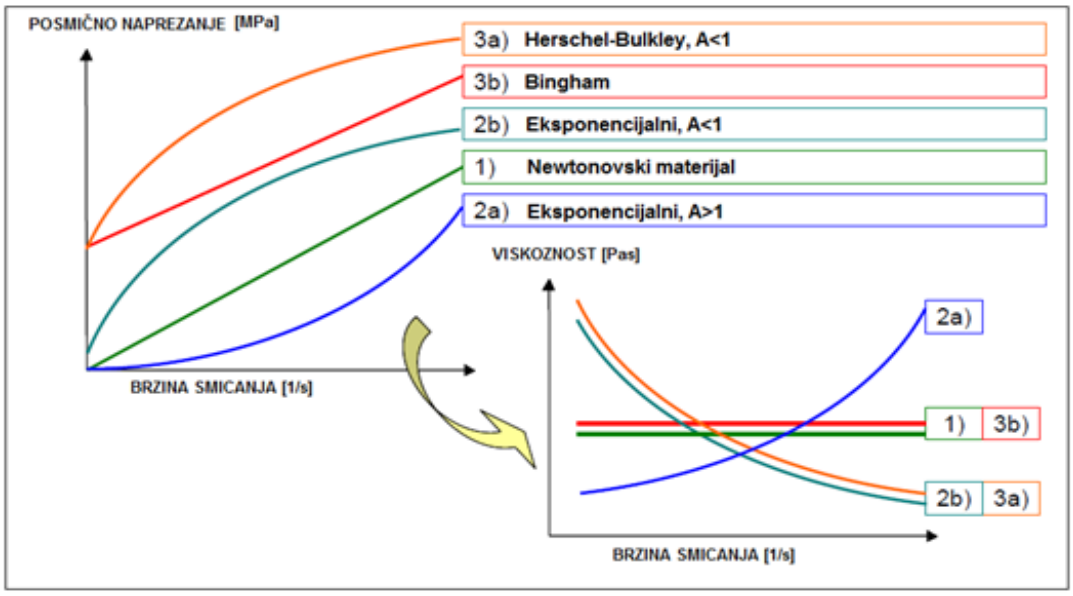
g) stupnju hidratacije;

h) vremenu koje je proteklo od miješanja;

i) tehnologiji miješanja.

Količina sadržane vode i specifična površina agregata najvažniji su faktor koji utječe na reološka svojstva. [15]

Na slici 3.1. dan je grafički prikaz ponašanja materijala u pojedinom reološkom modelu.



Slika 3.1.: *Reološki modeli [15]*

4. METODE ISPITIVANJA SVOJSTAVA SVJEŽEG I OČVRSLOG SAMOZBIJAJUĆEG BETONA

4.1. Metode ispitivanja svojstava svježeg samozbijajućeg betona

Pri razmatranju ovih metoda ispitivanja, potrebno je uzeti u obzir nekoliko smjernica:

- jedna od glavnih teškoća kod osmišljavanja ovakvih testova je da moraju procijeniti tri različita, ali povezana svojstva svježeg samozbijajućeg betona: njegovu sposobnost popunjavanja (tečenje), sposobnost zaobilaženja prepreka (bez blokiranja na armaturi) te otpornost na segregaciju (stabilnost). Ni jedan test koji je do sada osmišljen ne može mjeriti sva tri svojstva istovremeno.
- nema jasne veze između rezultata ispitivanja i izvedbe na gradilištu.
- ne postoje jasne smjernice o granicama usklađenosti.
- preporučena su dupla ispitivanja.
- metode ispitivanja i rezultati iskazuju se za maksimalnu veličinu agregata do 20 mm; različiti rezultati ispitivanja i/ili različite dimenzije oprema mogu biti prikladne za ostale veličine agregata.
- različiti rezultati ispitivanja mogu biti prikladni za beton koji se stavlja u vertikalnim i horizontalnim elementima.
- različite vrijednosti ispitivanja mogu biti prikladne za različite gustoće armatura.
- u obavljanju ispitivanja, beton treba uzorkovati, u skladu s HRN EN 12350-1 .
- ispitivanja se provode prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12. [19]

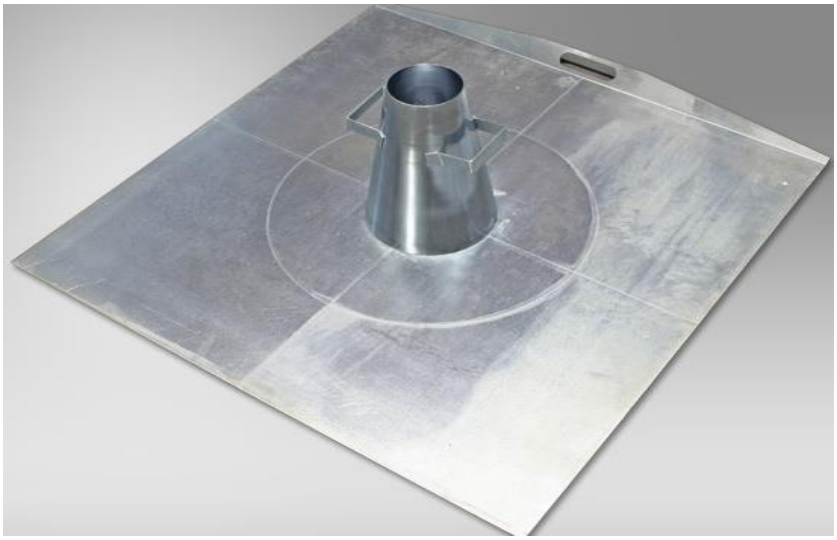
4.1.1. Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem [20]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-8 kojom se određuje sposobnost punjenja i viskoznost samozbijajućeg betona, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće za maksimalnu veličina zrna agregata od 40mm.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- Abramsov kalup u obliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm.

- osnovna ploča debljine minimalno 2cm, dimenzija 90x90cm, obilježena krugom u središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca, i koncentričnim krugom promjera 500 mm.
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, ručnik



Slika 4.1: *Abramsov kalup i osnovna ploča [21]*

Postupak ispitivanja:

Ploču je potrebno postaviti na ravnu i stabilnu površinu, navlažiti ju spužvom ili krpom bez procjeđivanja vode na površini. Također je potrebno navlažiti i unutrašnju stranu stošca te ga postaviti na označeni središnji dio ploče.

Lopaticom se ispuni sav stožac s mješavinom. Beton se ne nabija već se ručnikom ili lopaticom poravna razina na vrhu stošca i odmakne višak.

Potom se vertikalno podigne stožac i pusti da beton slobodno isteče. Istovremeno se pokrene štoperica i zabilježi vrijeme potrebno da beton dosegne krug promjera 500mm.

Mjeri se i konačni promjer betona u dva okomita smjera. Prosjek zabilježena dva promjera je vrijednost rasprostiranja slijeganjem mjeren u mm.

Potrebno je i zapaziti svojstva vizualno, poput odvajanja vode, morta ili cementne paste na rubovima, isto tako i nakupine krupnog agregata na određenom mjestu (segregacija).

Rezultati ispitivanja:

Što je veća vrijednost rasprostiranja slijeganjem (SF), to je veća sposobnost da ispuni oplatu pod vlastitom težinom. Za samozbijajuće betone ta vrijednost mora biti najmanje 650 mm. Nema

općeprihvaćenih savjeta o tome koje su razumne granice tolerancije tih vrijednosti, no ± 50 mm se smatra optimalnim.

Vrijeme T_{500} je sekundarni pokazatelj protoka. Niže vrijednosti označavaju veću protočnost. Prema nekim istraživanjima vrijeme prihvatljivo za primjenu u građevinarstvu je 3-7 sekundi, dok se za stambene primjene preporuča vrijeme tečenja od 2-5 sekundi.

Kod veće segregacije najviše će krupnog agregata ostati u središnjem dijelu ploče dok će mort i cementna pasta isteći na rubovima. Kod manje segregacije mort se odlijeva na rubovima betona.

Vrijednost SF je srednja vrijednost promjera d_1 i d_2 zaokružena na 10mm:

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

gdje je:

SF - razred rasprostiranja-slijeganjem [mm]

d_1- najveći promjer rasprostrtog betona [mm]

d_2 - promjer rasprostrtog betona za 90º u odnosu na d_1 [mm]

Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja su prikazani u tablici 4.1.

Tablica 4.1.: *Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja[3]*

RAZRED	***Tečenje betona (mmm)***	***Primjena***
SF1	*550-650*	*- nearmirani ili slabo armirani betonski elementi* *- ugradnja pumpama (npr. tunelska obloga)* *- elementi malih dimenzija koji ne zahtijevaju veliko horizontalno tečenje betona*
SF2	*660-750*	*- prikladno za većinu radova (zidovi, stupovi…)*
SF3	*760-850*	*- za elemente s gusto složenom aramaturom složenog oblika*

Vrijednost T_{500} se zaokružuje na desetinku sekundi i ona karakterizira viskoznost betona.
Pri tome se svrstavaju u razrede viskoznosti prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2.: *Razredi viskoznosti[3]*

RAZRED	***T_{500}(s)***	***Primjena***
VS1	*<2,0*	*- elementi s gusto postavljenom armaturom, horizontalni elementi, elementi složeno poprečnog presjeka i oblika (velikih širina i dužina)*
VS2	*≥2,0*	*- prikladan za većinu radova (zidovi, stupovi…)*

4.1.2. Ispitivanje V-lijevkom [20]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-9 i koristi se za određivanje viskoznosti i sposobnosti popunjavanja (sipkosti) betona maksimalne veličine agregata od 20mm. Iako je ispitivanje osmišljeno da mjeri protočnost, rezultat je pod utjecajem drugih svojstava betona. Oblik obrnutog stošca je odgovoran za blokiranje betona ukoliko isti sadrži previše krupnog agregata. Duže vrijeme protoka može biti povezano s niskom deformabilnosti zbog visoke viskoznosti paste te s velikim trenjem među česticama.

Iako je uređaj jednostavan, učinak suženja lijevka na protok betona nije potpuno poznat.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- V-lijevak
- kanta za prihvat betona
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ručnik

Postupak ispitivanja:

Postavi se V- lijevak na čvrstu i ravnu površinu te se navlaži unutrašnja površina lijevka. Vrata na dnu kalupa se drže otvorena kako bi višak vode mogao oteći. Vrata se zatvore i postavi se kanta ispod lijevka.

Lijevak se u potpunosti ispuni s betonom bez zbijanja ili nabijanja, a lopaticom se poravna i očisti višak betona.

U prvih desetak sekundi se otvore vrata na dnu posude nakon punjenja i dopusti betonu da proteče pod vlastitom težinom. Pokrene se štoperica onog trena kad se vrata otvore i zapiše vrijeme potrebno da se izvrši pražnjenje lijevka (vrijeme protoka). Trenutak koji se uzima da se ispraznio lijevak je onaj trenutak kad se nadzire svjetlost kroz lijevak odozgo gledano.

Cijelo ispitivanje se mora obaviti u roku od 5 minuta.



Slika 4.2: *V-lijevak s kantom za prihvat betona [22]*

Rezultati ispitivanja:

Ovo ispitivanje mjeri sposobnost protoka betona odnosno kraće vrijeme protoka pokazuje veću protočnost. Optimalno vrijeme protoka samozbijajućeg betona je oko 10 sekundi. Ograničeni protok kroz V-lijevak i produženo vrijeme protoka mogu dati naznake o osjetljivosti mješavine na blokiranje. Vrijeme protoka se značajno povećava što je beton skloniji segregaciji.

Tablica 4.3.: *Razredi viskoznosti (V-lijevak) [3]*

RAZRED	***Vrijeme tečenja (s)***
VF1	*<9,0*
VF2	*9,0-25,0*

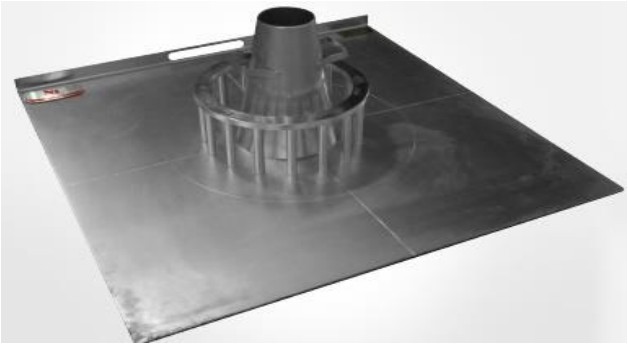
4.1.3. Ispitivanje J-prstenom [20]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-12 kojom se definira svojstvo popunjivosti i prolaznosti samozbijajućih betona te se koristi i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji.

Prilikom ovog ispitivanja mjeri se razastiranje, vrijeme razastiranja T_{500} i stopa blokiranja.

Potrebna oprema za ispitivanje:

- Abramsov kalup u obliku krnjeg stošca s promjerom od 200 mm, unutarnje dimenzije na bazi, promjera 100 mm na vrhu i visine od 300 mm
- osnovna ploča debljine minimalno 2cm, dimenzija 90x90cm, obilježena krugom u središnjem dijelu ploče za nalijeganje stošca, i koncentričnim krugom promjera 500 mm
- J prsten - čelični prsten koji je izbušen kako bi se vertikalno mogle postaviti šipke armature različitih promjera i na različitim razmacima (optimalno da je tri puta veći razmak od vrijednosti veličine maksimalnog zrna agregata). Promjer prstena je 300mm,a visina 100 mm.
- ravna šipka duljine 400mm
- dodatna oprema: lopatica, štoperica, ravnalo, ručnik



Slika 4.3.: *J- prsten s Abramsovim kalupom i osnovnom pločom [23]*

Postupak ispitivanja:

Prvenstveno je potrebno navlažiti ploču i unutrašnju površinu stošca. Na ravnu podlogu se postavlja ploča na koju se centrično namješta kalup oblika krnjeg stošca, a oko kalupa J-prsten tako da bude smješten koncentrično kalupu i čvrsto pritisnut. Beton se ulijeva u stožac i pripremi se za vertikalno podizanje stošca istovremeno mjereći vrijeme razastiranja (vrijeme potrebno da beton dosegne promjer od 500mm). Izmjereno vrijeme označava se s T_{500j}.

Mjeri se konačni promjer betona u dva međusobno okomita smjera. Izračuna se prosjek dvaju izmjerenih promjera u milimetrima.

Zatim se postavlja ravna šipka na J-prsten te se mjeri relativna visinska razlika između donjeg dijela šipke i površine betona u središtu Δh_0i četiri visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima Δh_{x1}, Δh_{x2}, Δh_{y3}, $\Delta h_{y4.}$ Provjerava se segregacija rasprostrtog betona i odvajanja paste na rubovima betona.

Razastiranje J-prstena SF_j srednja je vrijednost promjera d_1 i d_2.

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

gdje je:

SF_j- rasprostiranje [mm]

d_1- najveći promjer rasprostiranja [mm]

d_2- promjer rasprostiranja okomit na d_1 [mm]

T_{500j} izražava se u sekundama s točnošću od desetinke sekunde.

Stopa blokiranja dobije se iz izraza:

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

gdje su Δh izmjerene visine.

Tablica 4.4.: *Razredi ispitivanja J-prstenom[20]*

RAZRED	***Uvjet***
PJ1	*PJ≤10* *12 šipki*
PJ2	*PJ≤10* *16 šipki*

Rezultati ispitivanja:

Kod ovog ispitivanja mjerenje protoka i sposobnosti zaobilaženja prepreka daju međusobno ovisne rezultate. Izmjereni protok je zasigurno uvjetovan stopom blokiranja kroz šipke armature. Količina blokiranja je manje uvjetovana obilježjima protoka, a jasnije je da za veću razliku u visini je manja sposobnost prolaza betona kroz prepreke. Blokiranje i/ili segregacija često se pouzdanije definira vizualno nego proračunom.

4.1.4. Ispitivanje L kutijom [20]

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12350-10 kojim se određuje sposobnost prolaznosti samozbijajućeg betona kroz uske otvore između dvije ili tri armaturne šipke bez segregacije i blokiranja. Isto tako se vizualnim putem može utvrditi i ozbiljan nedostatak stabilnosti mješavine (segregacija).

Potrebna oprema za ispitivanje:

- L - kutija - kalup oblika L koji se sastoji od vertikalnog i horizontalnog dijela s kojim je odijeljen pomičnom pregradom i šipkama armature (3 glatke šipke na razmaku od 41mm ili 2 glatke šipke promjera 12mm na razmaku od 59mm)
- dodatna oprema: lopatica, štoperica i ručnik

Postupak ispitivanja:

Potrebno je postaviti kutiju na ravnu i čvrstu podlogu, osigurati da se klizna vrata mogu otvoriti slobodno i zatim ga zatvoriti. Namoči se unutarnja površina uređaja, ukloni višak vode i ispuni vertikalni presjek aparata s betonskim uzorkom. Ostavi se tako ispunjena kutija da odstoji 1 minutu. Vizualno se provjeri i zabilježi da li je došlo do segregacije. Podignu se klizna vrata i dopusti betonu da isteče van u horizontalni dio.

Kad gibanje betona prestane, mjeri se visinska razlika na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela posude te između površine betona i donjeg dijela posude. Mjerenja se vrše

na tri mjesta, dva na krajevima i jedno u sredini i iz tih vrijednosti se izračunaju srednje vrijednosti ΔH_1 i ΔH_2. Razlika visina posuda i tih vrijednosti daju vrijednosti H_1 i H_2 potrebne za proračun omjera blokiranja koji najbolje definira sposobnost prolaza betona.

Cijelo ispitivanje mora se obaviti unutar 5 minuta.



Slika 4.4.: *L-kutija [24]*

Sposobnost prolaza betona računa se po formuli:

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

gdje je:

p_A - omjer sposobnosti prolaska

H_1 - srednja dubina betona u vertikalnom dijelu kutije [mm]

H_2 - srednja dubina betona na kraju horizontalnog dijela kutije [mm]

Tablica 4.5.: *Razredi ispitivanja L kutijom[3]*

RAZRED	***Uvjet***	***Primjena***
PA1	*$H_2/H_1 \geq 0,8$* *2 šipke*	*Razmak 80 – 100 mm*
PA2	*$H_2/H_1 \geq 0,8$* *3 šipke*	*Razmak 60 – 80 mm*

Rezultati ispitivanja:

Ako beton teče slobodno, u mirovanju će biti horizontalan, tako da je $H_2/H_1=1$. Stoga, što je omjer bliži vrijednosti 1, tj. što su vrijednosti H_1 i H_2 bliži, bolji je protok betona. Europsko udruženje je predložilo minimalnu prihvatljivu vrijednost od 0,8. Vizualno se može ustanoviti blokiranje agregata iza šipki armaturi bez obzira na računsku vrijednost sposobnosti zaobilaženja prepreka.

4.1.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu [20]

Ispituje se prema normi HRN EN 12350-7 koja specificira metodu određivanja sadržaja zraka u svježem betonu, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće te maksimalne veličine zrna agregata od 63 mm.

Poroznost svježeg betona se ispituje porometrom. U posudu poznatog volumena stavi se uzorak i zatim poklopi te se prostor između uzorka i poklopca popuni vodom. U poklopcu je tlačna komora poznatog volumena u kojoj se napumpa zrak do pritiska oko 1 bar, što se točno očita na manometru kao pritisak p_0. Otvaranjem ventila pritisak se raspodijeli u posudi i tlačnoj komori pa se na manometru aparata za mjerenje sadržaja zraka (porometra) očita sadržaj zraka „z“ u % volumena posude za beton, bez računanja.



Slika 4.5.: *Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu [3]*

4.1.6. Ostale metode [20]

Određivanje segregacije sijanjem

Ispituje se stabilnost pomoću sita prema normi HRN EN 12350-11 kojom se određuje otpornost prema segregaciji mjereći pritom prolaznosti uzorka betona kroz sito veličine 5 mm. Ako samozbijajući beton ima slabu otpornost prema segregaciji, njegova pasta ili mort lako prolazi kroz sito.

Oprema koja se koristi kod ove metode je perforirano sito kvadratnih otvora veličine 5 mm s okvirom promjera 300 ili 315 mm, visine 40 ili 75 mm.

Koristi se i vaga digitalnog tipa s preciznošću od 20 grama i kapacitetom oko 10 g te kanta kapaciteta 10 – 12 litara s maksimalnim promjerom 300 ± 10 mm.

Nakon uzorkovanja, svježi beton se ostavi stajati 15 minuta i zabilježi se bilo kakvo izdvajanja vode. Gornji dio uzorka se zatim izlije u sito s otvorima 5 mm kvadratnih. Nakon dvije minute težina materijala koja je prošla kroz sito je zabilježena. Omjer segregacije se tada izračunava kao omjer uzorka koji je prošao kroz sito.

Ispitivanje U posudom

Ovo ispitivanje pruža izravnu procjenu sposobnosti tečenja koji ujedinjuje i zahtjev sposobnosti zaobilaženja prepreka.

Otvor s kliznim vratima je postavljen između dva dijela. Šipke promjera 13 mm (3 šipke) su postavljene na vratima s razmacima od 50 mm. To stvara svijetli otvor od 35 mm između rešetaka. Postoji i varijanta rešetke promjera 10mm (5 šipki) koja se odabire ovisno o stvarnom stanju u konstrukciji. U lijevom odjeljku se napuni samozbijajući beton do visine 680 mm. Zatim se podignu vrata i pusti beton da isteče prema drugom odjeljku. Mjeri se visina betona u svakom odjeljku.

Ako beton slobodno teče poput vode, u mirovanju će biti horizontalna razina betona pošto će visina u lijevom (h_1) i visina u desnom (h_2) odjeljku biti iste. Što je ta razlika bliže nuli beton se smatra tečniji i ima veću sposobnost zaobilaženja prepreka.

Samozbijajućim se smatra onaj beton koji se izdigne iznad razine minimalno 300mm.

Fill posuda (Kajima uređaj)

Ispitivanje se koristi za mjerenje sposobnosti punjenja samozbijajućeg betona s maksimalnim zrnom agregata veličine 20 mm. Uređaj se sastoji od spremnika s ravnom i glatkom podlogom. U spremniku se nalazi 35 prepreka izrađenih od PVC-a promjera 20 mm i međusobne udaljenosti 50 mm.

Na gornjoj strani je postavljena cijev za punjenje promjera 100 mm i visine 500 mm sa lijevkom na vrhu visine 100 mm. Spremnik se napuni s betonom, a razlika u visini između dviju strana spremnika je mjera sposobnosti popunjavanja betona.

Ovo ispitivanje je vrlo teško izvesti na gradilištu zbog složenosti uređaja i velike težine betona, no daje dobre smjernice o samozbijajućim karakteristikama betona.

Čak i beton s visokom sposobnošću punjenja se može pokazati lošim ako prilikom ispitivanja pokaže slabu sposobnost zaobilaženja prepreka i slabu otpornost prema segregaciji.



Slika 4.6.: *Kajima uređaj [25]*

4.2. Metode ispitivanja samozbijajućeg betona u očvrslom stanju [20]

4.2.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Ispituje se tlačna čvrstoća betona prema normi HRN EN 12390-3.

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 123390-2. Oblika su kocke ili cilindra, a dimenzije su određene normom HRN EN 123390-1. Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Uzorak je potrebno površinski očistiti prije nego se postavi u prešu. Uzorci oblika kocke se u prešu postavljaju okomito na smjer ugradnje i moraju se postaviti u sredinu preše kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno. Opterećenje se mora nanositi jednoliko, bez udara i mora biti između 0,2 MPa/s i 1,0 MPa/s. Maksimalno opterećenje (F) pri kojem je došlo do sloma se zabilježi kao rezultat pokusa.

Tlačna čvrstoća betona se računa prema izrazu:

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

gdje je:

f_c – tlačna čvrstoća betona [N/mm^2]

F – maksimalno opterećenje pri slomu [N]

A_c – površina uzorka [mm^2]



Slika 4.7.: *Uređaj za ispitivanje mehaničkih svojstava betona [3]*

4.2.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12504-4 kojom se određuje brzina širenja impulsa ultrazvučnih longitudinalnih valova u betonu.

Uređaj za ispitivanje se sastoji od generatora električnih impulsa, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka dolaska na prijemni pretvarač. Mjerenje brzine omogućuje kalibracijska šipka.

Na glatku i čistu površinu betona se postavi lice pretvarača. Prethodno je potrebno premazati glatki dio betona sa medijem za spajanje kao što je mast, mazivo, mekani sapun ili kaolinska/glicerolska pasta kako bi se osigurao dobar akustični spoj između betona i pretvarača. Uz lagano pritiskanje licem pretvarača, očitaju se brzine valova na tri mjesta na površini betona, dva krajnja i jedno u sredini.

Tablica 4.6.: *Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala [3]*

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



Slika 4.8.: *Ultrazvučni uređaj TICO Proceq Testing Instruments [3]*

4.2.3. Ostale metode

Ispitivanje savojne čvrstoće betona

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12390-5 koja određuje savojnu čvrstoću očvrslog betona.

Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2. Oblika su prizme, a dimenzije su određene normom HRN EN 12390-5. Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Za ispitivanje je potrebna preša podešena u skladu s normom HRN EN 12390-5.

Ležajevi se prvotno postave na propisane udaljenosti. Potom se uzorci prizme postave u prešu tako da su centrirane na ležajevima okomito na smjer opterećenja kako bi se nanosilo jednoliko opterećenje, bez udara i između 0,04 i 0,06 MPa/s.

Ispitivanje kapilarnog upijanja

Provodi se prema normi DIN-U.M8.300 i određuje mjeru kapilarnog upijanja vode homogenih građevinskih materijala. Nakon njegovanja uzorka u trajanju od 28 dana u vlažnoj komori, uzorci se osuše u sušioniku na 105±5ºC do stalne mase. Nakon sušenja uzorka do stalne mase, drže se 24 h na relativnoj vlažnosti iznad 90 %.

Oprema za ispitivanje: posuda za vodu s rešetkastim podešavajućim nosačem, spužva, sredstvo za brtvljenje, vaga točnosti d=0.01 g i štoperica.

Uzorak se brtvi sa strana na minimalnoj visini od 10 mm te se vodoupojna površina uranja u posudu s vodom na dubini od 2 do 5 mm. Uranjaju se koso u odnosu na vodeno lice kako ne bi došlo do stvaranja mjehurića zraka. Mjerenja se određuju u određenim vremenskim intervalima i prekida se kada se mjerne točke mogu povezati s dovoljnom točnošću ravnom crtom, u protivnom se mjerenja nastavljaju i preko 24 sata.

Koeficijent upijanja se računa prema formuli:

$$A = \frac{\Delta m_v}{\Delta\sqrt{t}} \left(\frac{kg}{m^2 h^{0.5}}\right)$$

gdje je:

A - koeficijent upijanja

m_v - kapilarno upijanje vode

t – vrijeme

5. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Budući da će se u ovom radu izrađivati i ispitivati samozbijajući beton s dodacima punila od mljevenih ispitnih betonskih kocaka, kroz nekoliko idućih naslova će se vidjeti rezultati i analize dosadašnjih sličnih ispitivanja.

5.1. Mehanička svojstva betona s recikliranim krupnim agregatom (Khaldoun Rahal) [26]

U ovom radu prikazani su eksperimentalni rezultati mehaničkih svojstava betona s recikliranim agregatom (RAC – Recycled Aggregate Concrete) u odnosu na standardni normalni beton (NAC – Normal Aggregate Concrete). Deset mješavina betona s ciljanom tlačnom čvrstoćom od 20 do 50 MPa napravljeno je sa normalnim ili recikliranim krupnim agregatom. Prikazan je prirast tlačne i indirektne posmične čvrstoće u periodima od 1, 3, 7, 14, 28 i 56 dana na uzorcima oblika kocke, a tlačna čvrstoća, deformacija kod maksimalnog tlaka i modul elastičnosti su testirani koristeći betonske cilindre nakon 28 dana. Rezultati pokazuju da 28-dnevna tlačna čvrstoća i indirektna posmična čvrstoća recikliranog betona su u prosjeku postigle 90% vrijednosti u odnosu na normalni beton s istim sastavom. Za beton s tlačnim čvrstoćama između 25 i 30 MPa koje su određene na valjcima, modul elastičnosti od RAC (recikliranog betona) je samo 3% niži od NAC (normalnog). Trendovi u prirastu tlačne i posmične čvrstoće i deformacija pri vršnom naprezanju kod recikliranog betona su slični onima kod normalnog betona.

5.1.1. Uvod

Utjecaj na okoliš kod proizvodnje sirovina za beton (kao što je cement, te krupni i sitni agregat) se dovodi u pitanje. S obzirom na veličinu problema razborito je istražiti druge izvore sirovih materijala kako bi se smanjila potrošnja energije i dostupnih prirodnih resursa, i kako bi se postigao „zeleniji“ beton.

U Kuvajtu, utjecaj na okoliš uslijed proizvodnje krupnog agregata je doveo do toga da su lokalne vlasti 1997. zabranile ovakav tip proizvodnje u lokalnim kamenolomima, i natjeralo je dobavljače da uvoze krupne agregate po većem trošku iz okolnih država kao što su Ujedinjeni Arapski Emirati. Ovo značajno podiže cijenu betona i mogućnosti varijacije svojstava dostupnih agregata.

Drobljenje betona za proizvodnju krupnog agregata koji se koriste za proizvodnju novog betona je jedan od načina zaštite okoliša. Ovo smanjuje potrošnju prirodnih resursa, a također se

manje pune odlagališta potrebna za betonski otpad. Ne postoje procjene volumena recikliranog otpada u Kuvajtu. Međutim, Environment Public Authority (EPA) procjenjuje da je građevinski otpad (materijal) u gradskim odlagalištima u 2001. i 2002. iznosio 58% od ukupnog otpada. Značajan udio ovog građevinskog otpada je beton i šut.

U Kuvajtu, beton koji se može iskoristiti za proizvodnju krupnog agregata potječe od rušenja postojećih armiranobetonskih konstrukcija i od odbačenog betona iz betonara: (1) velik broj armiranobetonskih građevina i raznih infrastrukturnih elemenata su građeni 20-40 godina unazad prateći ekonomski napredak uzrokovan početkom izvoza nafte. Značajan broj ovih konstrukcija su odslužile svoje i ruše se kako bi se zamijenile s novim u većini slučajeva većim konstrukcijama. Ova zamjena je također vođena nedavnim boom-om u poslu s nekretninama. Dodatno, (2) određen postotak betona proizveden u betonarama je obično vraćen nazad prije ugradnje, uglavnom zbog visokog početnog slijeganja, predugog čekanja na ugradnju ili je naručitelj loše procijenio potrebnu količinu. Zavisno o tipu betona koji se opskrbljuje (suha mješavina naspram vlažne mješavine) i sposobnosti menadžmenta, većina lokalnih dobavljača izmiješanog transportnog betona baci između 1% i 2% (u rijetkim slučajevima je ovaj odnos ispod 0.2%) betona od ukupno proizvedenog. Godišnja potrošnja betona u Kuvajtu je bila 3.5 milijuna metara kubičnih, i očekuje se da će doseći 5 milijuna do kraja 2005. godine. Odbačeni beton može stoga biti procijenjen na otprilike 110,000 metričkih tona. U '90-im, značajan udio odbačenog betona je odlagan na neovlaštenim lokacijama kao što je uz cestu koja vodi prema betonari. Lokalne vlasti su otada strogo zabranile neovlašteno odlaganje, ali kazna je bila samo 50 Kuvajtskih Dinara, što je vrijednost od 130€. Iako je relativno niska kazna neke natjerala da prestanu neovlašteno odlagati, potrebno je poduzeti primjerenije mjere pogotovo jer je odlaganje otpada u gradska odlagališta (deponija) ostalo nekažnjivo.

Mehanička svojstva i karakteristike trajnosti recikliranog betona se trebaju istražiti kako bi se osigurala pravilna upotreba recikliranog materijala. Postoje mnogobrojne studije koje dovode u pitanje mehanička svojstva i trajnost recikliranog betona. Testovi su pokazali da mehanička svojstva ovise o svojstvima recikliranog betona korištenog za proizvodnju agregata i o postotku zamjene krupnog agregata u novom betonu. Sa 100-postotnom zamjenom krupnog agregata s recikliranim agregatima na primjer, Ravindraraj mjeri 9-postotno smanjenje u tlačnoj čvrstoći dok Yamato i ostali mjere 45-postotno smanjenje. Isto tako, Gerardu i Hendriks su procijenili 15-postotno smanjenje kod modula elastičnosti recikliranog betona (RAC), dok Frondistuo-Yannas su prikazali da je smanjenje do 45% kod relativno visokog vodocementnog faktora od 0.75 i neznatna razlika kod niskog faktora od 0.55. Ravindraraj je predložio formule za modul

elastičnosti koje daju prosječno smanjenje od 15% za NAC i RAC za slične tlačne čvrstoće na valjcima.

Zbog velikih razlika u svojstvima materijala, svojstva dostupnih materijala se moraju istražiti kako bi se ostvarila pouzdanost. U regiji Perzijskog zaljeva (Arabian Gulf), betonski otpad od ruševina postaje sve veći izvor za reciklirani agregat te se i on mora istražiti.

Istraživanja svojstava betona s recikliranim agregatom u arapskoj regiji su malobrojna. Studija od Adbelfattah i Tabash se bavila s RAC za konstrukcijsku uporabu, i njihovi rezultati daju dobre osnove za opsežnija istraživanja ove tematike.

Mnogi zakoni o građenju kao što je ACI code dovode u vezu modul elastičnosti betona s određenom tlačnom čvrstoćom $f'c$ i pretpostavljaju da se vršni tlak javlja kod deformacije od 0.002. RAC se pokazao da je slabiji nego sličan beton napravljen od prirodnih agregata, i stoga može biti mekši te deformacija kod vršnog tlaka može biti veća nego što je obično pretpostavljena vrijednost od 0.002. Stoga ove vrijednosti treba dodatno istražiti kod primjene RAC-a kako bi se osigurala sigurnost koja se traži kod uporabe konstrukcija izvedenih sa ovakvom vrstom betona.

5.1.2. Eksperimentalni dio istraživanja

Ovaj rad prikazuje rezultate eksperimentalnog programa čiji je cilj usporedba nekih mehaničkih svojstava RAC-a s onima od NAC-a, pri čemu reciklirani agregat potječe iz srušenih betonskih konstrukcija. Prirodni sitni agregat je u izobilju dostupan u Kuvajtu i regiji (Arabiji) i stoga reciklirani sitni agregat vjerojatno neće biti interesantan s gledišta troškova, pa se njegov utjecaj neće ni istraživati. Također, korišten je i lokalno dostupan prirodni pijesak. Da bi se ispitao utjecaj potpune zamjene običnog agregata sa recikliranim, mješavine su napravljene sa istim udjelima krupnog agregata. Zbog većeg kapaciteta vodoupojnosti RA, agregati su održavani u zasićenom površinski suhom stanju prije nego se započne proces miješanja.

5.1.2.1. Reciklirani agregat

Betonski otpad je dobiven s dvije srušene zgrade u području Hawally u Kuvajtu, starosti između 20 i 40 godina. Dijelovi greda su transportirani u laboratorije, razbijeni, drobljeni koristeći čeljusnu drobilicu na veličinu manju od 20 mm, te su prosijani. Slično kao u općoj industrijskoj praksi, prosijana zrna veličine 9, 12 i 19 mm su pripremljena za korištenje u mješavini.

Korišteni prirodni agregat je od Gabro drobljene stijene, koji je uobičajeno uvezen u Kuvajt iz Al-Fujaira (Ujedinjeni Arapski Emirati). Tablica 5.1. prikazuje neka od svojstava prirodnog i

recikliranog agregata. Kao što je i očekivano, upijanje je značajno veće kod recikliranog agregata, ali specifična težina je manja.

Tablica 5.1.: *Svojstva korištenih agregata [26]*

Agregat	***Vodoupojnost (%)***	***Specifična težina (SSD)***	***Specifična težina (sušeno u peći)***	***Udio klorida (% od cementne mase)***
Prirodni	*0.68*	*2.86*	*2.84*	*0.14*
Reciklirani	*3.47*	*2.39*	*2.31*	*0.30*

5.1.2.2. Mješavine betona

Korišteno je pet različitih mješavina betona s ciljanom čvrstoćom između 20 i 50 MPa, na uzorcima oblika kocke. Vodocementni faktor iznosi između 0.40 za 50 MPa-ni beton i 0.65 za 20 MPa-ni beton. U regiji arapskog zaljeva je uobičajeno da se klasa betona označava sa slovom „K“ nakon kojeg slijedi tlačna čvrstoća u kg/cm^2, i to je usvojeno u ovom radu. Na primjer, K300 se odnosi na beton tlačne čvrstoće 300kg/cm^2, što je približno jednako 30 MPa.

Tablica 5.2.: *Udjeli u mješavini betona (kg/m^3) [26]*

Klasa	***K200***	***K250***	***K300***	***K400***	***K500***
Ciljana 28-dnevna čvrstoća kocke (MPa)	*20*	*25*	*30*	*40*	*50*
Cement (tip I)	*360*	*380*	*400*	*420*	*460*
Voda (+ tekući superplastifikator)	*234*	*190*	*192*	*181*	*184*
Voda / cement	*0.65*	*0.50*	*0.48*	*0.43*	*0.40*
Prirodni pijesak	*705*	*705*	*705*	*705*	*705*
Krupni agregat (9 mm)	*500*	*500*	*500*	*500*	*500*
Krupni agregat (12 mm)	*340*	*340*	*340*	*340*	*340*
Krupni agregat (19 mm)	*260*	*260*	*260*	*260*	*260*

Pet NAC (prirodnih) mješavina je napravljeno s prirodnim agregatom, a ostalih pet mješavina s recikliranim agregatom. Količina superplastifikatora je prilagođena kako bi se dobilo slijeganje od otprilike 50-60 mm. Napravljeno je dvadeset i pet 100 milimetarskih kocki te su one korištene umjesto standardnih 150mm-skih kocki za testove tlačne čvrstoće. Dodatno, tri 150mm-ske kocke su napravljene za mjerenje indirektne posmične čvrstoće. Napravljena su dva standardna valjka za K300 i K400 beton i jedan valjak za K500 beton od iste serije, a različite serije su korištene za 3 standardna valjka za svaku od 10 mješavina.

5.1.3. Rasprava rezultata testova

Rezultati testa su sumirani u tablice 5.3., 5.4. i 5.5. Sljedeći dio raspravlja o rezultatima istraživanja, s naglaskom na usporedbu između ponašanja RAC-a i NAC-a. Rezultati testa pokazuju da je gustoća RAC-a bila prosječno 2250 kg/m^3, što je otprilike 3.6% manje nego promatrana gustoća NAC-a od 2330 kg/m^3.

Tablica 5.3.: *Prosječni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kocki (MPa) [26]*

Mjereno svojstvo	***Tip***	***Br. testova***	***Klasa betona***				
			K200	***K250***	***K300***	***K400***	***K500***
Čvrstoća 1. dan	*RAC*	*3*	*4.3*	*5.60*	*6.30*	*8.97*	*10.1*
	NAC	*3*	*5.6*	*7.33*	*8.77*	*10.2*	*13.7*
Čvrstoća 3. dan	*RAC*	*3*	*10.7*	*13.4*	*16.4*	*18.5*	*21.5*
	NAC	*3*	*12.5*	*16.3*	*18.9*	*23.4*	*29.2*
Čvrstoća 7. dan	*RAC*	*3*	*15.0*	*18.9*	*22.7*	*26.5*	*27.8*
	NAC	*3*	*17.0*	*21.2*	*24.7*	*32.5*	*37.3*
Čvrstoća 14. dan	*RAC*	*3*	*18.0*	*22.5*	*27.2*	*35.2*	*41.5*
	NAC	*3*	*19.9*	*25.9*	*31.2*	*41.1*	*46.5*
Čvrstoća 28. dan	*RAC*	*10*	*20.3*	*29.2*	*32.2*	*39.4*	*46.5*
	NAC	*10*	*22.7*	*32.3*	*36.0*	*46.0*	*53.5*
Čvrstoća 56. dan	*RAC*	*3*	*21.6*	*30.7*	*33.4*	*42.7*	*51.2*
	NAC	*3*	*23.3*	*33.3*	*37.0*	*48.3*	*57.6*
Standardna devijacija čvrstoće 28. dana	*RAC*	*10*	*0.53*	*0.96*	*0.77*	*0.85*	*1.48*
	NAC	*10*	*0.95*	*0.80*	*0.84*	*0.99*	*1.00*
Koeficijent varijacije čvrstoće 28. dana (%)	*RAC*	*10*	*2.61*	*3.27*	*2.41*	*2.16*	*3.17*
	NAC	*10*	*4.18*	*2.47*	*2.33*	*2.14*	*1.87*

Tablica 5.4.: *Prosječni rezultati indirektnog ispitivanja na posmik (MPa) [26]*

Starost betona	***Tip***	***Br. testova***	***Klasa betona***				
			K200	***K250***	***K300***	***K400***	***K500***
1. dan	*RAC*	*3*	*0.6*	*0.7*	*0.8*	*1.0*	*1.1*
	NAC	*3*	*0.8*	*1.0*	*1.2*	*1.4*	*1.5*
3. dan	*RAC*	*3*	*1.4*	*1.8*	*2.2*	*2.4*	*2.6*
	NAC	*3*	*1.6*	*2.0*	*2.4*	*3.2*	*3.3*
7. dan	*RAC*	*3*	*2.0*	*2.6*	*3.1*	*3.3*	*3.6*
	NAC	*3*	*2.3*	*2.9*	*3.4*	*3.7*	*4.0*
14. dan	*RAC*	*3*	*2.6*	*3.3*	*3.8*	*3.9*	*4.2*
	NAC	*3*	*2.9*	*3.6*	*4.2*	*4.3*	*4.6*
28. dan	*RAC*	*10*	*2.8*	*3.3*	*4.1*	*4.4*	*4.5*
	NAC	*10*	*3.3*	*3.9*	*4.6*	*4.7*	*5.2*
56. dan	*RAC*	*3*	*3.1*	*3.6*	*4.4*	*4.6*	*4.8*
	NAC	*3*	*3.5*	*4.1*	*4.7*	*4.9*	*5.5*

U tablici 5.3. se vidi da je ciljana čvrstoća na uzorku oblika kocke postignuta 28-og dana za oba tipa betona, osim za K400 RAC i K500 RAC mješavine gdje su prosječne čvrstoće bile 1.4% i 7% niže od ciljane čvrstoće. Kao što je i očekivano, čvrstoća RAC-a je neznatno niža od standardnog normalnog betona. U prosjeku, čvrstoća reciklirane (RAC) kocke je iznosila 88.4% čvrstoće normalnog betona.

Uspoređujući prirast indirektne posmične čvrstoće i tlačne čvrstoće, uočava se da se indirektna posmična čvrstoća razvija relativno brže u prva dva tjedna, nakon čega slijedi brži razvoj tlačne čvrstoće u sljedeća dva tjedna.

Tablica 5.5.: *Sažetak rezultata za valjak nakon 28 dana [26]*

f'_c u MPa, (ε'_c), E_c (GPa)	Klasa				
	K200	K250	K300	K400	K500
NAC	25.1 (2.81) 14.1	26.2 (2.51) 13.1	27.3 (2.17) 12.9	28.7 (2.67) 14.6	30.4 (2.36) 15.9
	23.9 (2.84) 10.9	26.5 (2.44) 16.8	27.8 (2.31) 13.6	30.0 (2.41) 16.6	32.0 (2.92) 14.9
	21.8 (2.91) 9.1	27.4 (2.63) 14.8	28.1 (2.25) 13.2	30.5 (2.59) 15.7	32.4 (3.16) 13.9
	-	-	31.7 (2.08) 23.9[a]	32.8 (2.12) 22.2[a]	39.8 (2.96) 23.5[a]
	-	-	29.7 (2.62) 15.1[a]	33.4 (3.11) 19.9[a]	-
Prosjek	23.6 (2.85) 11.4	26.7 (2.53) 14.9	28.9 (2.29) 15.7	31.1 (2.58) 17.8	33.7 (2.85) 17.1
RAC	24.0 (2.52) 11.8	25.5 (2.56) 12.5	26.4 (2.40) 12.7	27.7 (2.79) 13.9	28.5 (2.90) 11.8
	21.4 (2.42) 12.4	24.6 (3.26) 10.1	26.6 (2.69) 11.2	28.9 (2.93) 13.4	29.5 (2.96) 15.4
	20.9 (2.82) 13.0	25.1 (2.88) 11.3	26.9 (2.55) 11.8	28.6 (3.01) 12.7	29.9 (2.99) 13.2
	-	-	28.3 (2.31) 19.2[a]	28.9 (2.44) 18.4[a]	30.0 (3.27) 13.2[a]
	-	-	27.5 (2.37) 19.7[a]	29.2 (2.68) 15.1[a]	-
Prosjek	22.1 (2.58) 12.4	25.1 (2.90) 11.3	27.2 (2.46) 14.9	28.7 (2.77) 14.7	29.5 (3.03) 13.4

[a] Deformacije mjerene preko 250mm duljine mjernih instrumenata

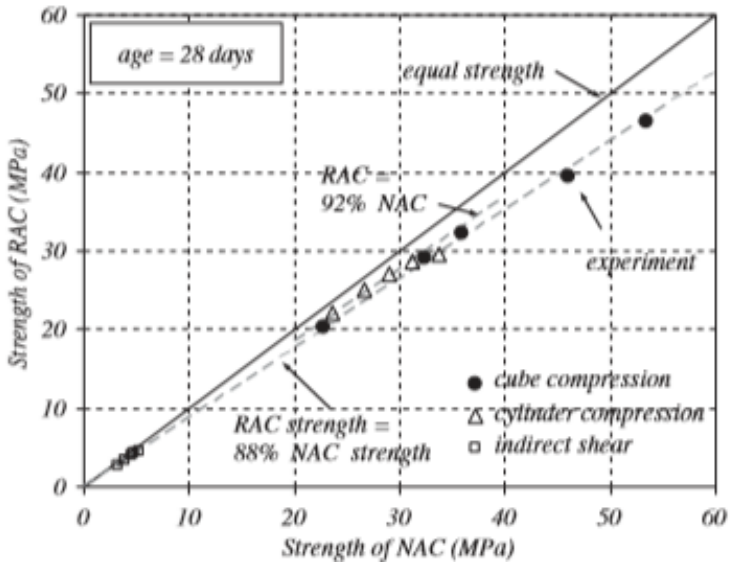
Za svaku od 10 mješavina, 10 kocki je testirano 28-og dana kako bi se proučila varijacija u čvrstoći. Tablica 5.3. donosi prosjek, standardnu devijaciju i koeficijent varijacije za svaku od 10 mješavina. Osim za mješavinu K200, koeficijent varijacije za RAC je bio neznatno veći nego kod standardnog normalnog betona. Prosjek od pet vrijednosti koeficijenta varijacije u 5 mješavina je bio 2.60% u NAC i 2.73% u RAC. Ova razlika je neznatna, vjerojatno zbog ograničenog broja izvora recikliranog agregata.

5.1.3.1. Čvrstoća RAC-a i NAC-a

Slika 5.1. uspoređuje prosječnu čvrstoću RAC-a s NAC-om, a u usporedbu su uključene tlačna čvrstoća izmjerena na uzorcima oblika kocke i valjka, te indirektna posmična čvrstoća. U prosjeku, čvrstoća RAC-a određena na kocki je bila 88.4% čvrstoće normalnog betona. Slično

tome, tlačna čvrstoća određena na valjku, te indirektna posmična čvrstoća RAC-a su bile 92.2% i 87.7% od NAC-ovih.

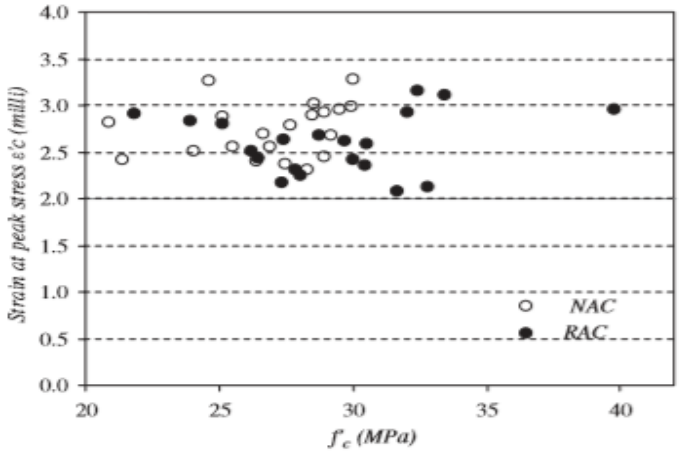
Općenito, postoji 10-postotno smanjenje u čvrstoći kada se koristi reciklirani krupni agregat.



Slika 5.1.: *Usporedba između čvrstoće RAC-a i NAC-a nakon 28 dana [26]*

5.1.3.2. Deformacija pri vršnom naprezanju

Očitanja pomaka na dva mjerna instrumenta za mjerenje pomaka postavljenih na stezaljke oko valjaka su bila praktički ista. Korištene su prosječne vrijednosti za izračun deformacije ε'_c pri vršnom naprezanju f'_c , i modul elastičnosti (E_c). Slika 5.2. i tablica 5.5. prikazuju deformaciju pri vršnom tlaku za testirane valjke. Slika ne prikazuje neku značajnu razliku između deformacija RAC-a i NAC-a. U prosjeku, deformacija pri vršnom tlaku kod RAC-a je bila samo 5.5% veća nego kod NAC-a. Malo je vjerojatno da će ova razlika imati neki značajan utjecaj na projekte.



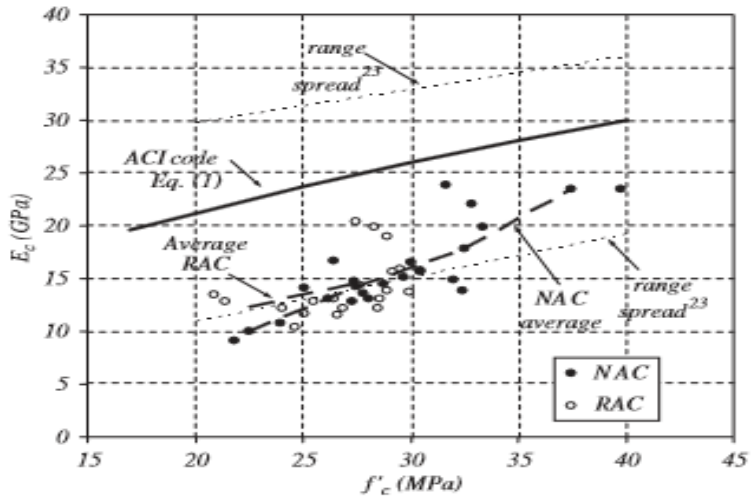
Slika 5.2.: *Deformacije na valjcima pri vršnom naprezanju [26]*

5.1.3.3. Modul elastičnosti

Slika 5.3. prikazuje varijacije modula elastičnosti E_c računate pri naprezanju od 0.45 f'_c za testirane valjke, i prosječne vrijednosti za svaki interval od 5MPa za promatranu čvrstoću. Ove vrijednosti su normalizirane za gustoću od 2320 kg/m^3 (145pcf). Prosječna vrijednost promatranih rezultata za svaku klasu betona je dana u tablici 5.5. Krutost je isto uspoređena s vrijednostima E_c računanim po formuli od ACI:

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c},$$

gdje je w_c jedinična težina betona (u kg/m^3), a f'_c i E_c su u MPa. Uzorci NAC-a pokazuju značajno povećanje s povećanjem u čvrstoći. Slično promatranje je bilo manje očito za RAC zbog toga što je većina podataka za f'_c varirala između 25 i 30 MPa. Direktna usporedba između modula elastičnosti i f'_c je bila moguća u ovom rasponu, i otkriveno je da je modul od RAC bio samo 3% niži od onog od NAC.



Slika 5.3.: *Varijacije modula elastičnosti računate pri naprezanju od 0.45 f'_c [26]*

5.1.4. Zaključak

S obzirom na eksperimentalne rezultate, može se zaključiti:

- 28-dnevna ciljana tlačna čvrstoća za svih pet mješavina je postignuta osim za 40 i 50 MPa kod recikliranog betona, gdje je uočena čvrstoća malo niža nego ciljana.

- Tlačna čvrstoća određena na kocki i valjku, te indirektna posmična čvrstoća RAC-a je bila oko 90% od one od NAC-a sa sličnim sastavom i slijeganjem (slijeganje je kontrolirano s prilagođavanjem količine smanjenja vode u mješavini).

- U prosjeku, čvrstoća određena na kocki nakon 56 dana je bila 5% i 3% veća nego 28-dnevna čvrstoća za RAC i NAC.

- Kao kod NAC, i kod RAC čvrstoća može biti povećana smanjenjem vodocementnog faktora ako se koriste redukcije vode da pruže odgovarajuću obradivost.

- Tlačna čvrstoća RAC-a ne ovisi o čvrstoći ruševnog betona korištenog za proizvodnju recikliranog agregata.

- RAC i NAC pokazuju slične trendove u prirastu tlačne čvrstoće, s relativno bržim prirastom čvrstoće kod NAC-a do starosti od 7 dana.

- 28-dnevna čvrstoća kocke kod RAC-a pokazuje odstupanja nešto slično kao i kod NAC-a. Ova relativno mala varijacija je zbog ograničenih izvora za reciklirane agregate.

- Za beton s čvrstoćama između 25 i 30 MPa koje su određene na valjcima, modul elastičnosti RAC-a je bio samo 3% niži od NAC-a.

- Deformacije pri vršnom tlačnom naprezanju kod RAC-a su bile 5.5% veće nego kod NAC-a. Mala je vjerojatnost da će ova razlika imati neke značajne utjecaje na građevinske projekte.

5.2. Mehanička svojstva i trajnost betona s kontaminiranim recikliranim agregatima (Farid Debieb, Luc Courard, Said Kenai, Robert Degeimbre) [27]

Degradacija betonskih konstrukcija zbog prodiranja klorida i sulfata je značajno važna u građevini jer ima veliki utjecaj na trajnost konstrukcija. U ovom radu su prikazani rezultati istraživanja utjecaja kontaminiranog drobljenog betonskog agregata na mehanička svojstva i trajnost recikliranog betona. Betonske ploče s prirodnim agregatom (NC) su uranjane u vodi, morskoj vodi, otopini klorida i otopini sulfata, i zatim su drobljene kako bi se dobili čisti i kontaminirani (zagađeni) reciklirani agregati. Analizirana su svojstva prirodnih (NA) i recikliranih agregata (RA), te mehanička svojstva i trajnost novog betona napravljenog od 100%-tnog RA (recikliranog agregata). Rezultati pokazuju da je kontaminirani RA mnogo osjetljiviji na kloride nego sulfate. Uočene su značajne razlike između svojstava originalnog i novog betona, te rezultati očito pokazuju da je potrebno uzeti u obzir kontaminiranost.

5.2.1. Uvod

Korištenje građevinskog (C&D) otpada kao izvor agregata za proizvodnju novog betona je u zadnjem desetljeću postalo učestalo. Od 3 milijarde tona otpada svih vrsta koji je godišnje

proizveden u Europskoj Uniji, oko 31% dolazi s C&D područja; uglavnom se sastoji od betona, asfalta i opeke.

Tehnike ponovnog korištenja C&D otpada ispituju se u laboratorijima te se sve više i više koriste u industrijama kao alternativno rješenje.

Međutim, beton koji se treba reciklirati može biti oštećen ili zagađen u određenoj okolini. U praksi, RA može biti kontaminiran iz različitih izvora agresivnih iona kao što su kloridi i sulfati koji potječu od soli protiv smrzavanja, otpadnih voda ili morske vode. Ovi zagađivači mogu utjecati na svojstva recikliranog betona u svježoj i/ili očvrsnuloj fazi i ubrzati proces raspadanja pa je važno razumjeti utjecaje svojstava RA na svojstva recikliranog betona. Provedeno je mnogo istraživanja u vezi s korištenjem RA u betonu kako bi se odredila svojstva betona s recikliranim agregatom (RC). Međutim, većina ovih studija je fokusirana samo na mehanička svojstva i ne uzimaju u obzir moguću kontaminaciju recikliranih agregata.

To je ujedno i razlog zašto je istraživanje pokrenuto tj. kako bi se istražio utjecaj ovakve agresivnosti na mehanička svojstva i trajnost betona napravljenog sa 100%-tno kontaminiranim recikliranim agregatima.

5.2.2. Eksperimentalni dio istraživanja

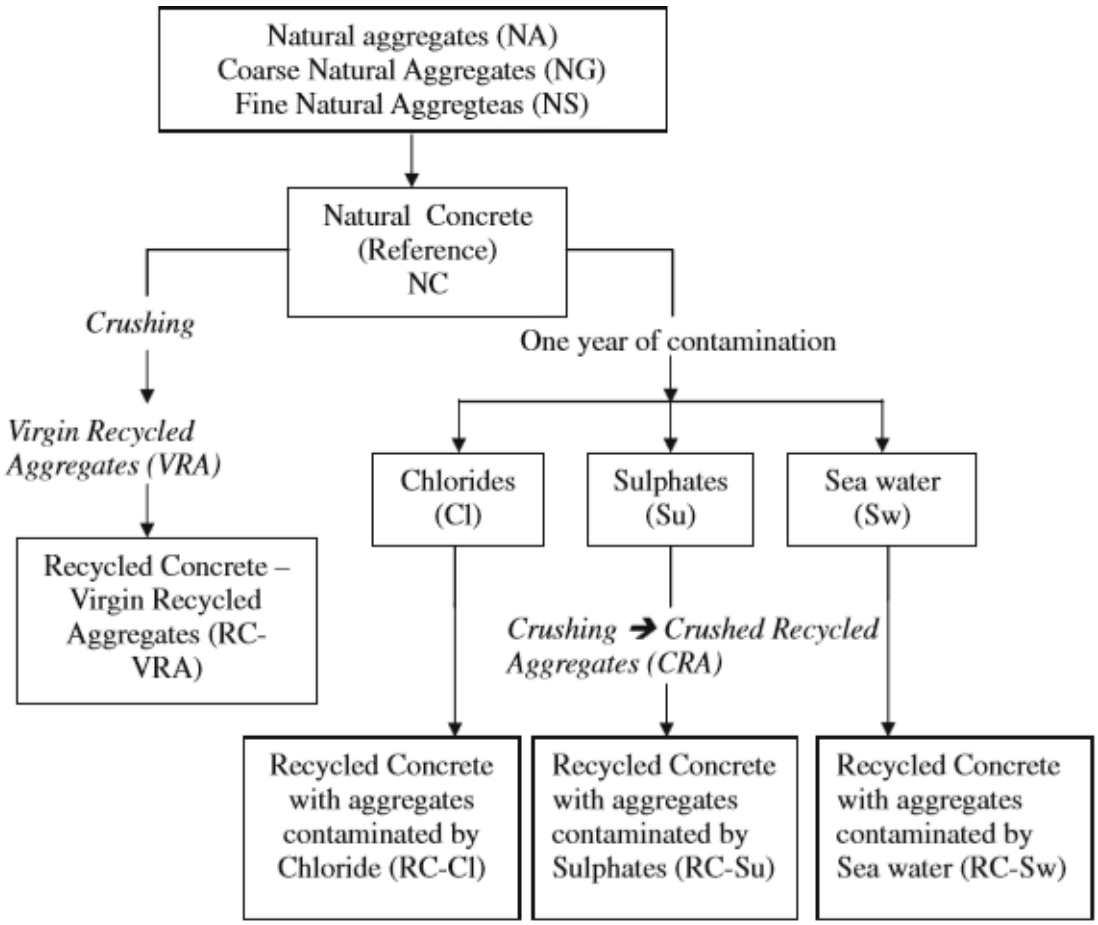
5.2.2.1. Materijali

Za beton je korišten industrijski Portland cement tip CEM I 52.5 N iz Belgije, Blaine finoće 385 m^2/kg, gustoće 3130 kg/m^3 i prosječne tlačne čvrstoće 28. dana 64 MPa.

Za mješavine betona su korištene četiri različite veličine NA (krupni prirodni agregati (NG): 2/7 mm, 7/14 mm i 14/20 mm i sitni prirodni agregat (NS): 0/2 mm). Male betonske ploče, sa stopostotnim krupnim i sitnim prirodnim agregatom, su napravljene u laboratoriju te su polu-uronjene u kontaminiranu otopinu vode i izložene kapilarnom upijanju. Pripremljene su tri agresivne otopine (klorid: NaCl – 5% (Cl), sulfat: $MgSO_4 \bullet 7H_20$ – 5% (Su), i morska voda (Sw)). Nakon godinu dana, ploče su drobljene kako bi se proizvelo čiste (VRA) i kontaminirane (CRA) reciklirane agregate. Dobivene su tri veličine recikliranog agregata (krupnog recikliranog agregata (RG): 4/14 mm i 14/20 mm i sitnog recikliranog agregata (RS): 0/4 mm), te su korištene za reciklirane smjese betona.

5.2.2.2. Mješavine betona

Testirano je pet tipova betona (slika 5.4.) baziranih na istom granulometrijskom sastavu i istoj količini cementa. Sitni i krupni NA su korišteni za proizvodnju relevantnog NC. Svi NA su zamijenjeni s VRA ili CRA (RA-Cl, RA-Su ili RA-Sw) kako bi se dobio reciklirani beton s čistim recikliranim agregatom (RC-VRA) ili reciklirani beton s kontaminiranim recikliranim agregatom (RC-Cl: RC s RA kontaminiranim kloridom, RC-Su: RC s RA kontaminiranim sulfatom i RC-Sw: RC s RA kontaminiranim morskom vodom).



Slika 5.4.: *Postupak proizvodnje recikliranih agregata i recikliranih betona [27]*

5.2.2.3. Proces testiranja

Mehanička i fizička svojstva svježeg i očvrslog betona su određena prema lokalnim i europskim standardima (tablica 5.6.). Nakupine iona klorida i sulfata su mjerene s potenciometrijskom titracijom i gravimetrijskom metodom po belgijskim standardima NBN B 15-257, NBN B 61-201 i NBN B 15-256.

Tablica 5.6.: *Identifikacija testa [27]*

Test	***Uzorci (mm^3)***	***Standard***
Slijeganje (slump)	*Abramsov stožac*	*EN 12350-2*
Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti	*Cilindar (Ø160, h320)*	*NBN B 15-203*
Vlačna čvrstoća	*Cilindar (Ø160, h320)*	*NBN B 15-218*
Permeabilnost kisika	*Disk (Ø150, h50)*	*AFPC-AFREM*
Kapilarna upojnost	*Jezgra ((Ø80, h100)*	*EN 13057*
Poroznost	*Prizma (100 x 100 x 100)*	*AFPC-AFREM itd.*
Otpornost na smrzavanje-topljenje	*Prizma (100 x 100 x 100)*	*NBN B 05-203*
Korozija	*Greda (140 x 100 x 600)*	*ASTM C 876-09*

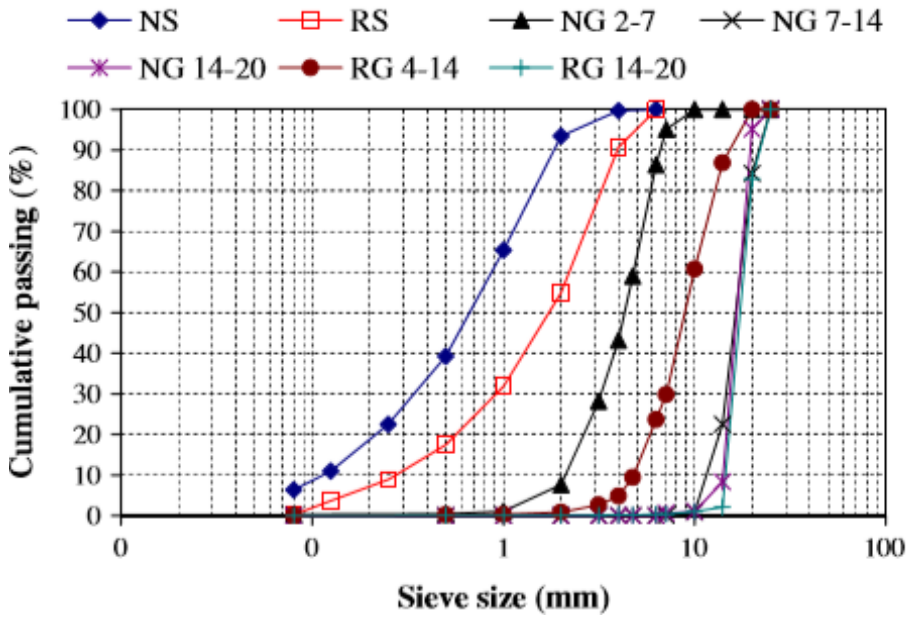
Prije vađenja iz kalupa, uzorci su čuvani u laboratorijskim uvjetima (25 ± 5 °C i 55 ± 5% RH) i pokriveni plastičnom folijom kako bi se izbjeglo isparavanje vode. Nakon 24 sata su izvađeni iz kalupa i čuvani (28 dana uzorci za čvrstoću i module elastičnosti, a 8 mjeseci ostali uzorci) u klimatiziranoj sobi (20 ± 2°C i 95 ± 5% RH). Svaki test je proveden na tri uzorka.

Izveden je test permeabilnosti i test vodoupojnosti, analizirana je osjetljivost na hrđu te je ocjenjena otpornost na smrzavanje.

5.2.3. Rezultati i rasprava

5.2.3.1. Fizička i mehanička svojstva agregata

Granulometrijske krivulje NA i RA su prikazane na slici 5.5., a njihova fizička i mehanička svojstva su sumirana u tablici 5.7.



Slika 5.5.: *Granulometrijske krivulje prirodnih i recikliranih agregata [27]*

Tablica 5.7.: *Fizička i mehanička svojstva prirodnih i recikliranih agregata [27]*

Svojstva	***NS***	***RS***	***NG***			***RG***		***Norma***
	0-2	***0-4***	***2-7***	***7-14***	***14-20***	***4-14***	***14-20***	
Specifična težina (kg/m^3)	*2707*	*2309*	*2670*	*2691*	*2757*	*2329*	*2319*	*NBNB11-255*
Rasuta gustoća (kg/m^3)	*1510*	*1364*	*1326*	*1312*	*1319*	*1164*	*1022*	*NBNB11-255*
Vodoupojnost (%)	*0.28*	*9.20*	*1.20*	*0.37*	*0.36*	*4.92*	*6.00*	*NBNB11-255*
Ekvivalent pijeska	*78.8*	*84*	*-*	*-*	*-*	*-*	*-*	*NF P 18-598*
Modul finoće	*2.72*	*3-33*	*-*	*-*	*-*	*-*	*-*	*NF P 18-598*
Strana tijela (%)	*-*	*-*	*0.27*	*0.60*	*0.24*	*0.52*	*0.93*	*NF P 18-598*
Los Angeles (%)	*-*	*-*	*25*	*22*	*24*	*34*	*36*	*NF P 18-573*
Kubičnost (%)	*-*	*-*	*71*			*55*		*BS 812:1*
Cem. od stare žbuke (%)	*-*	*14*	*-*	*-*	*-*	*13*	*13*	*NBNB15-256*

5.2.3.2. Svojstva kontaminiranog agregata

Nakon godinu dana stajanja u kontaktu s agresivnim otopinama (klorid, sulfat ili morska voda), razina kontaminacije kloridima (% Cl) i sulfatima (% Su) betonskih ploča je prikazana u tablici 5.8. Dobiveni rezultati potvrđuju da je beton visoko zagađen.

Tablica 5.8.: *Prosječni udio klorida i sulfata u betonskim pločama nakon kontaminacije [27]*

	0 dana čisti uzorak		***30 dana***		***90 dana***		***365 dana***	
	%[a] Cl	***% Su***	***% Cl***	***% Su***	***% Cl***	***% Su***	***% Cl***	***% Su***
NC	*0.104*	*4.472*	*-*	*-*	*-*	*-*	*-*	*-*
NC-Cl	*-*	*-*	*0.432*	*-*	*0.968*	*-*	*2.632*	
NC-Su	*-*	*-*	*-*	*4.128*	*-*	*4.768*	*-*	*4.608*
NC-Sw	*-*	*-*	*0.208*	*4.856*	*1.240*	*4.512*	*3.640*	*5.504*

Tablica 5.9. prikazuje udio klorida i sulfata u NA, VRA i CRA. Ove vrijednosti odgovaraju prosjeku mjerenja na dva uzorka (približno 200 g agregata po uzorku).

Tablica 5.9.: *Udio klorida i sulfata u agregatima [27]*

	NS 0/2 ***RS 0/4***		***2/7 mm***		***4/14 mm***		***7/14 mm***		***14/20 mm***	
	% Cl	***% Su***	***% Cl***	***% Su***	***% Cl***	***% Su***	***% Cl***	***% Su***	***% Cl***	***% Su***
NA	*0.073*	*0.845*	*0.033*	*0.669*	*-*	*-*	*0.064*	*0.510*	*0.157*	*0.471*
VRA	*0.099*	*4.172*	*-*	*-*	*0.083*	*3.439*	*-*	*-*	*0.083*	*3.229*
CRA-Cl	*3.079*	*-*	*-*	*-*	*4.246*	*-*	*-*	*-*	*4.629*	*-*
CRA-Su	*-*	*5.814*	*-*	*-*	*-*	*4.365*	*-*	*-*	*-*	*4.321*
CRA-Sw	*1.105*	*5.691*	*-*	*-*	*2.234*	*3.274*	*-*	*-*	*3.256*	*4.405*

Može se vidjeti značajan udio klorida u CRA, dok je udio sulfata usporediv s onim mjerenim na VRA. Izmjereni udio klorida i sulfata na sitnom agregatu je veći nego na krupnom agregatu. Ovo je vjerojatno zbog prisustva velike količine starog morta i fine cementne prašine u pijesku.

Nadalje, nakon 15 dana potpune uronjenosti u vodu, krupni RA dobiven od kontaminacije betona kloridima, izgubi do 96% svojih klorida te u konačnici postaje usporediv s onim od NA. Ovi kloridi su stoga slobodni kloridi, nisu vezani kloridi i zato mogu izaći iz betona nakon prikladnog ispiranja. Prema tome očito da je mjerenje količine klorida jedna stavka koju treba provjeriti prije korištenja recikliranih agregata. Nadalje, nakon dobrog pranja ili totalnog uranjanja u vodu tokom najmanje 2 tjedna, ispiranje klorida može dovesti do čistog RA koji se može koristiti u betonu, čak i u armiranom ili prednapetom betonu bez ikakvog rizika od hrđanja.

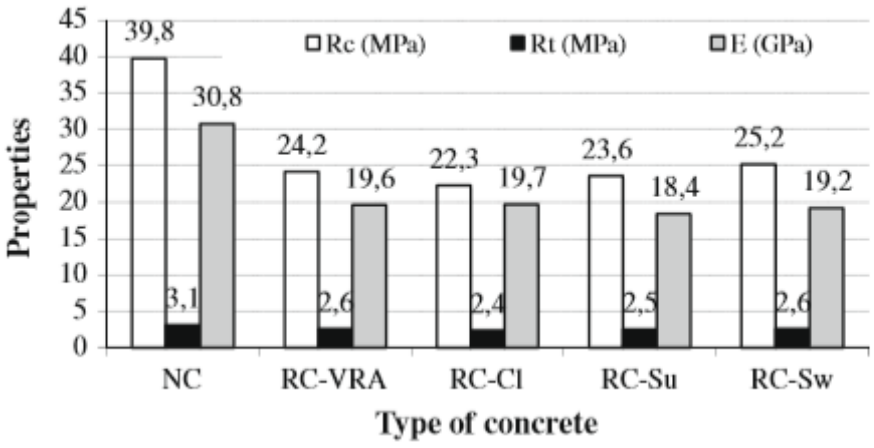
5.2.3.3. Svojstva betona

Svježi beton

Gustoće su manje za RC (do 7%) nego za NC. Nadalje, za vrijeme miješanja koje prelazi 30s, segregacija je vidljiva kod RC. Moguće zbog previše vode koja je dodana s natopljenim agregatima prije miješanja.

Mehanička svojstva

Slika 5.6. prikazuje varijaciju tlačne čvrstoće (Rc), vlačnu čvrstoću (Rt) i modul elastičnosti (E). Mehanička svojstva RC su niža (40% za Rc, 19% za Rt i 38% za E) nego kod referentnog (NC) betona. Ovi rezultati poklapaju se s rezultatima drugih istraživanja koja su naišla na otprilike 24-35%-tno smanjenje mehaničkih svojstava recikliranog betona.



Slika 5.6.: *Tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća i modul elastičnosti betona [27]*

Fizička svojstva očvrslog betona

- *Permeabilnost kisika.* Rezultati potvrđuju da RC ima veću permeabilnost kisika nego NC. Čak i ako je ova permeabilnost skoro dupla od NC i ostaje konstantna za sve RC, relativno je niska.

- *Vodoupojnost*. Eksperimentalni rezultati vodoupojnosti i početnog upijanja pokazuju da je proces vodoupojnosti sličan kod RC i NC. Međutim, RC pokazuje veću razinu vodoupojnosti nego NC, a razlog tome je visoki postotak RA (100%) i veliki kapacitet vodoupojnosti recikliranog sitnog agregata. Početna upojnost RC je 10 puta veća nego kod NC.

- *Poroznost*. Sukladno rezultatima poroznosti, RC je ekstremno porozan (prosječno dva puta) u usporedbi s NC. Ovo je vjerojatno zbog veće poroznosti RA, a pogotovo s visokim udjelom zamjene (100%).

- *Osjetljivost na hrđu.* Općenito je priznato da udio klorida između 0.3% i 0.5%, a čak i ispod ovih vrijednosti, može stvoriti opasnost od korozije. Armirani beton sa 100% krupnog i sitnog agregata kontaminiranog kloridima (RC-Cl) pokazuje vrijednosti potencijala od 0.57, sulfatima (RC-Su) 0.35 i morskom vodom (RC-Sw) 0.44 V. S obzirom na granice od ASTM C 876-80 standarda, vjerojatnost za hrđu armaturne šipke u armiranom betonu sa 100% CRA kloridima i/ili sulfatima je veća od 90 %.

- *Otpornost na smrzavanje-topljenje.* Nakon 14 ciklusa smrzavanja-topljenja, vizualni pregled uzoraka nije uočio nikakve značajne deformacije za sve betone. Odnos između gubitka mase i vodoupojnosti pokazao je da gubitak mase RC ne prelazi 1% u bilo kojem slučaju. Ovi betoni stoga imaju vrlo dobru otpornost u zimskim uvjetima, unatoč višoj poroznosti.

5.2.4. Zaključak

Iz istraživanja možemo zaključiti:

- Reciklirani agregati su lakši (po masi) te upijaju više vode.

- Reciklirani agregati kontaminirani kloridima se isperu ako se urone u vodu. Nakon dobrog ispiranja ili potpunog uranjanja u vodu u razdoblju od najmanje 2 tjedna, ispiranjem klorida se može dobiti čisti reciklirani agregat koji se može koristiti u betonu, čak i u armiranom ili prednapetom betonu bez opasnosti od korozije.

- Uočeno je da kontaminacija ne utječe na mehanička svojstva betona do 28 dana starosti.

- Na trajnost betona s recikliranim agregatima može jako utjecati poroznost i visoka vodoupojnost recikliranih agregata.

- Tip kontaminacije recikliranih agregata nema značajan utjecaj na poroznost i permeabilnost betona s recikliranim agregatima. Međutim korištenje recikliranih agregata izaziva povećanu početnu upojnost i poroznost, zavisno o tipu kontaminacije.

- Usprkos visokoj poroznosti, beton koji sadržava samo reciklirane agregate ima dobru otpornost na cikluse smrzavanja-topljenja.

- Međutim, kontaminacija s kloridima ima značajan utjecaj na trajnost betona, a pogotovo na koroziju armature.

Prema tome, korištenje kontaminiranih agregata iziskuje poseban pristup kako bi se osigurala dovoljno niska vrijednost koncentracija iona klorida ili sulfata. Ispiranje vodom može biti rješenje jer ovi ioni nisu vezani za cementnu mikrostrukturu, i stoga ih je lako odstraniti iz betona jednostavnim ispiranjem vodom. Ipak, daljnja istraživanja su potrebna s fokusom na kontaminaciju sulfatima i moguću sekundarnu etringit formaciju jer ovo može biti potencijalna opasnost.

5.3. Utjecaj uvjeta očvršćivanja na mehanička svojstva betona s recikliranim betonskim otpadom (N. Fonseca, J. de Brito, L. Evangelista) [28]

Ovaj rad pokazuje glavne rezultate eksperimenta s ciljem da se odredi utjecaj različitih uvjeta očvršćivanja na mehanička svojstva betona napravljenog s krupnim recikliranim agregatom od drobljenog betona. Svojstva koja su analizirana su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, modul elastičnosti i otpornost na abraziju. Općeniti zaključak u vidu mehaničkih svojstava je taj da na RAC utječu uvjeti očvršćivanja otprilike na isti način kao i na standardni normalni beton (CC).

5.3.1. Uvod

Korištenje recikliranog agregata (RA) u betonu otvara niz novih mogućnosti za ponovno korištenje materijala u gradnji. Ponovno korištenje betonskog otpada kao RA u novom betonu je korisno zbog zaštite okoliša i očuvanja resursa, jer smanjuje korištenje neobnovljivih materijala korištenih u proizvodnji betona.

Za uvjete očvršćivanja je poznato da utječu na mehanička svojstva betona, osobito gdje su primijenjene vlačne sile. Za neke druge konstrukcijske elemente gdje je omjer površine prema volumenu velik (npr. ploče), važnost uvjeta očvršćivanja zbog procesa hidratacije može biti

značajna. Također, ovo pitanje se može smatrati od velikog značaja za korištenje RAC-a i zbog njegove poroznije strukture. Glavni cilj ovog istraživanja je otkriti da li je RAC osjetljiviji na nepovoljne (ili bar manje optimalne) uvjete očvršćivanja nego standardni beton.

Cilj ovog istraživanja je procijeniti utjecaj različitih uvjeta očvršćivanja na mehanička svojstva recikliranog betona s krupnim betonskim agregatom (nadalje referiran kao RAC), i da se ocijene utjecaji ugradnje recikliranog betonskog krupnog agregata (nadalje kao RCA) na svojstva betona. Ispitane su tlačna i vlačna čvrstoća, modul elastičnosti i otpornost na abraziju. Testni uzorci napravljeni su u četiri različita uvjeta očvršćivanja: laboratorijski uvjeti očvršćivanja (LCC), vanjski uvjeti očvršćivanja (OEC), očvršćivanje u vlažnoj komori (WCC), te očvršćivanje u uronjenoj vodi (WIC).

5.3.2. Eksperimentalni dio istraživanja

Četiri mješavine betona su napravljene koristeći različite sastave, te su se testirale četiri različite metode očvršćivanja. Da bi usporedili različite mješavine i/ili uvjete očvršćivanja, mješavine betona su napravljene tako da imaju istu obradivost. Nakon perioda očvršćivanja, napravljeni su testovi očvrslog betona.

5.3.2.1. Materijali i mješavine

Četiri različite mješavine su napravljene: standardni normalni beton (NAC) i tri betona s recikliranim agregatima (RAC) s nivoom zamjene od 20%, 50% i 100% NCA s RCA. Sve mješavine betona (NAC i RAC) su pripremljene s vodocementnim faktorom od 0.43 i uravnotežene su da imaju slijeganje od 80 ± 10 mm (mjereno s Abramsovim stošcem).

Krupni reciklirani agregat je dobiven drobljenjem laboratorijski napravljenog betona, pomoću čeljusne drobilice. Korištenje takvog betona dozvoljava kontrolu njegove proizvodnje i može se zatim temeljito okarakterizirati.

Tablica 5.10. prikazuje sastav za sve analizirane mješavine betona.

Krupni agregati su odvojeni prosijavanjem, a količina vode koja je dodana je apsolutna vrijednost, uzimajući u obzir dodatnu vodu potrebnu za upijanje RCA. Veza između ukupne količine vode i cementa je referirana kao „prividni omjer voda/cement“, a veza između količine vode korištene u hidratacijskom procesu i cementa je referirana kao „efektivni omjer voda/cement“. Efektivni omjer voda/cement koji je predstavljen pokazuje da dodavanje RCA u mješavine nema izravan učinak na obradivost betona.

Tablica 5.10.: *Sastav betonskih mješavina [28]*

sastojak		***količina (kg/m³)***			
		RC	***C20***	***C50***	***C100***
krupni prirodni agregati	*4-5.6 mm*	*103.7*	*83.0*	*51.9*	*-*
	5.6-8 mm	*117.8*	*94.3*	*58.9*	*-*
	8-11.2 mm	*119.1*	*95.3*	*59.6*	*-*
	11.2-16 mm	*236.8*	*189.4*	*118.4*	*-*
	16-22.4 mm	*293.3*	*234.6*	*146.6*	*-*
	22.4-25.4 mm	*114.7*	*91.8*	*57.4*	*-*
krupni reciklirani agregati	*4-5.6 mm*	*-*	*19.5*	*48.9*	*97.7*
	5.6-8 mm	*-*	*22.2*	*55.5*	*111.0*
	8-11.2 mm	*-*	*22.5*	*56.1*	*112.3*
	11.2-16 mm	*-*	*44.6*	*111.6*	*223.1*
	16-22.4 mm	*-*	*55.3*	*138.2*	*276.4*
	22.4-25.4 mm	*-*	*21.6*	*54.0*	*108.1*
sitni pijesak		*167.0*	*167.0*	*167.0*	*167.0*
krupni pijesak		*528.6*	*528.6*	*528.6*	*528.6*
CEM II A-L 42.5R cement		*446*	*446*	*446*	*446*
Voda		*191.6*	*191.6*	*194.4*	*198.7*
prividni omjer vode/cementa		*0.43*	*0.43*	*0.44*	*0.45*
efektivni omjer vode/cementa		*0.43*	*0.43*	*0.43*	*0.43*
slijeganje (mm)		*97*	*86*	*87*	*87*

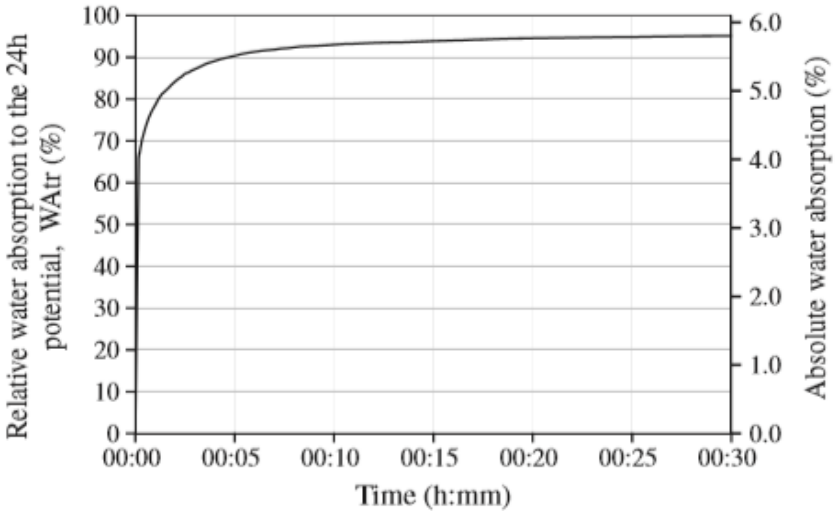
**RC – stand. beton (bez recik.agregata); Cxx – beton s xx% zamjene u vol. prirod. krupnog agregata s recikliranim*

5.3.2.2. Uvjeti očvršćivanja

Obična voda iz slavine je korištena kod WIC i temperatura očvršćivanja je održavana na 16.3°C dok su WCC uzorci čuvani na relativnoj vlažnosti od 100% i temperaturi 20.0°C. U slučaju OEC, uzorci su izloženi vremenskim uvjetima bez ikakve zaštite i neprekidno im je mjerena temperatura i vlažnost. Testiranje se zbilo između studenog 2007. i svibnja 2008., što odgovara mediteranskim zima/proljeće uvjetima. LCC uzorci su čuvani u laboratoriju (u nestandardnim uvjetima vlažnosti i temperature), ali su bili zaštićeni od naglih vremenskih promjena.

5.3.2.3. Procesi testiranja

Glavna svojstva agregata su analizirana po najnovijim europskim standardima. Vodoupojnost RAC-a kroz vrijeme je određena po metodologiji koju su utvrdili Ferreira i ostali. Ta metodologija dopušta da se uzme u obzir, kod određivanja količine vode za miješanje, da RCA ima znatno veću vodoupojnost nego NCA. Slika 5.7. pokazuje razvoj vodoupojnosti kroz vrijeme te se vidi da se tokom prvih 5 min događa najveća vodoupojnost. Sukladno tome, smatrano je da 90% od maksimalnog potencijala upijanja se događa nakon 5 minuta i ova količina vode je dodana u mješavinu kojoj je smanjena količina vode u agregatima (mjereno prije miješanja).



Slika 5.7.: *Razvoj vodoupojnosti kod RCA [28]*

Na svim mješavinama su provedeni isti testovi za očvrsli beton. Tlačna čvrstoća je mjerena sukladno po EN 12390-3 pri starosti od 7, 28 i 56 dana na 0.15 m uzorcima kocke (3, 5 i 3), a 28-dnevna vlačna čvrstoća je mjerena sukladno EN 12390-6 na tri uzorka oblika valjka. Modul elastičnosti u tlaku je mjeren po LNEC E-397 na dva uzorka oblika valjka. Otpornost na abraziju je određena testom na trošenje s Bohme-ovim valjkom za brušenje, po DIN 52108 na tri uzorka dimenzija 71 x 71 x 50 mm^3.

5.3.3. Rezultati i rasprava

5.3.3.1. Tlačna čvrstoća

Rezultati tlačne čvrstoće (obe glavne vrijednosti – f_{cm} i standardna devijacija – SD) za sve uvjete očvršćivanja i omjere zamjene (definirane kao C**, gdje je ** udio zamjene kao postotak), su dani u tablici 5.11.

U svim uvjetima očvršćivanja, tlačna čvrstoća betona se s vremenom povećavala. Prosjek tlačnih čvrstoća pri starosti od 7 dana je 42.8 MPa, 28 dana je 49.8 MPa i 56 dana je 51.6 MPa. Općenito, nakon 7 i 28 dana očvršćivanja uzorci su pokazali otprilike 80% i 95% od svoje 56-dnevne tlačne čvrstoće.

Bilo je za očekivati da će se tlačna čvrstoća linearno smanjivati zamjenom NCA s RCA, ipak razlika u tlačnoj čvrstoći svih mješavina betona je jednaka ili manja od 7.5% u odnosu na NAC-ove. Dva su moguća razloga za to: jedan je RCA vezna pasta koja pridonosi stečenoj čvrstoći, a drugi je da grublja specifična površina RCA pridonosi boljim unutarnjim vezama između recikliranog agregata i nove cementne paste nego kod standardnog betona. Stoga se ne može

uspostaviti značajna poveznica između tlačne čvrstoće i udjela RA u mješavini betona. Iz tog razloga izgleda da na RAC utječu uvjeti očvršćivanja isto kao i na NAC.

Tablica 5.11.: *Tlač.čvrstoća različitih mješavina u različitim uvjetima očvršćivanja (MPa) [28]*

Uvjeti očvršćivanja	*Dob (dana)*		*CC*	*C20*	*C50*	*C100*
LCC	*7*	f_{cm}	*42.2*	*42.7*	*42.5*	*45.6*
		SD	*1.43*	*1.46*	*0.84*	*1.43*
	28	f_{cm}	*51.0*	*48.8*	*51.3*	*51.2*
		SD	*1.31*	*1.07*	*3.28*	*1.36*
	56	f_{cm}	*53.4*	*53.5*	*51.7*	*54.4*
		SD	*1.83*	*1.98*	*0.93*	*2.21*
OEC	*7*	f_{cm}	*42.9*	*39.5*	*41.6*	*41.8*
		SD	*0.14*	*1.83*	*1.11*	*0.10*
	28	f_{cm}	*51.7*	*50.6*	*50.3*	*49.2*
		SD	*1.99*	*2.30*	*1.02*	*0.50*
	56	f_{cm}	*50.0*	*50.9*	*52.0*	*49.1*
		SD	*3.11*	*3.24*	*0.95*	*0.43*
WCC	*7*	f_{cm}	*44.5*	*43.2*	*42.1*	*42.9*
		SD	*2.59*	*0.68*	*0.90*	*0.63*
	28	f_{cm}	*48.8*	*48.0*	*47.7*	*47.2*
		SD	*2.33*	*1.45*	*1.63*	*2.40*
	56	f_{cm}	*49.3*	*48.4*	*52.0*	*51.4*
		SD	*1.97*	*0.43*	*2.83*	*2.10*
WIC	*7*	f_{cm}	*44.6*	*43.9*	*44.0*	*43.0*
		SD	*3.20*	*0.71*	*1.21*	*0.60*
	28	f_{cm}	*50.5*	*50.1*	*48.8*	*50.0*
		SD	*2.10*	*3.98*	*1.51*	*1.45*
	56	f_{cm}	*53.7*	*52.6*	*51.0*	*53.3*
		SD	*1.58*	*0.79*	*1.87*	*1.77*

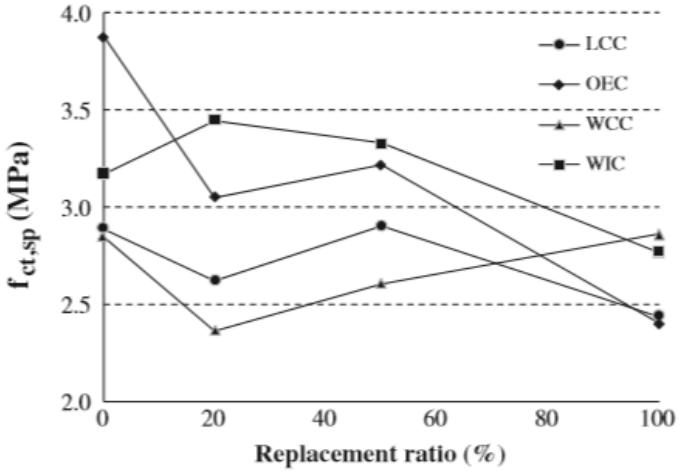
**LCC – laboratorijsko očvršćivanje; OEC – očvršćivanje u vanjskim uvjetima; WCC – očvršćivanje u vlažnoj komori; WIC – očvršćivanje u uronjenoj vodi; CC– standardni normalni beton (bez recikliranih agregata); Cxx – beton s xx% zamjene u volumenu prirodnih krupnih agregata s recikliranim krupnim agregatima*.

Nadalje, za svaku mješavinu betona su promatrani utjecaji različitih uvjeta očvršćivanja na razvoj tlačne čvrstoće. Općenito, kod OEC uvjeta izgleda da dolazi do stabiliziranja tlačne čvrstoće nakon 28-og dana stvrdnjavanja, ali beton C50 ne prati ovaj trend i pokazuje malo povećanje tlačne čvrstoće nakon 28-og dana. Slično ponašanje je zabilježeno i za WCC uvjete za mješavine CC i C20. U drugim slučajevima tlačna čvrstoća betona se povećava s vremenom, kao što je i očekivano.

5.3.3.2. Vlačna čvrstoća

Rezultati 28-dnevne vlačne čvrstoće za sve mješavine betona su prikazane na slici 5.8. Općenito, 28-dnevna vlačna čvrstoća opada s porastom udjela RCA i u rasponu je od 2.37 do 3.88 MPa za različite udjele RCA i uvjete očvršćivanja. Svi C100 uzorci pokazuju nižu vrijednost

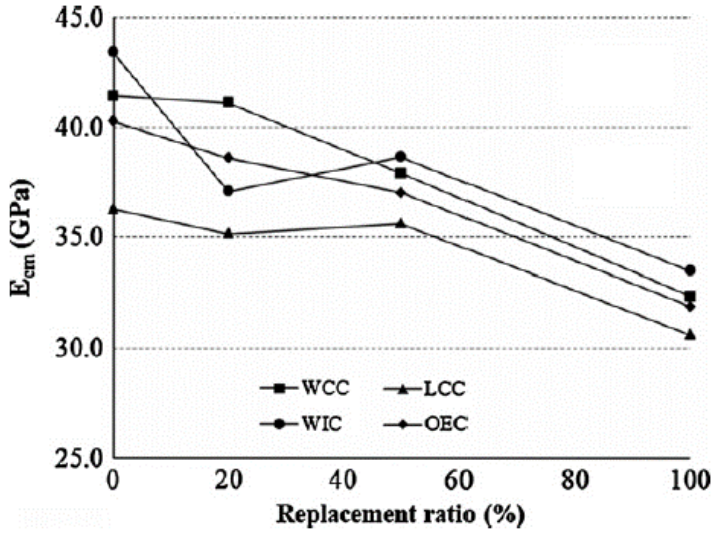
vlačne čvrstoće, s iznimkom za WCC uzorke koji su pokazali malo veće vrijednosti nego NAC-WCC.



Slika 5.8.: *Prikaz vlačne čvrstoće za sve mješavine betona [28]*

5.3.3.3. Modul elastičnosti

Rezultati modula elastičnosti u tlaku za sve smjese betona su prikazani na slici 5.9. Modul elastičnosti opada sa povećanjem udjela RCA i varira od 30.6 do 43.4 GPa, za različite udjele RCA i uvjete očvršćivanja.

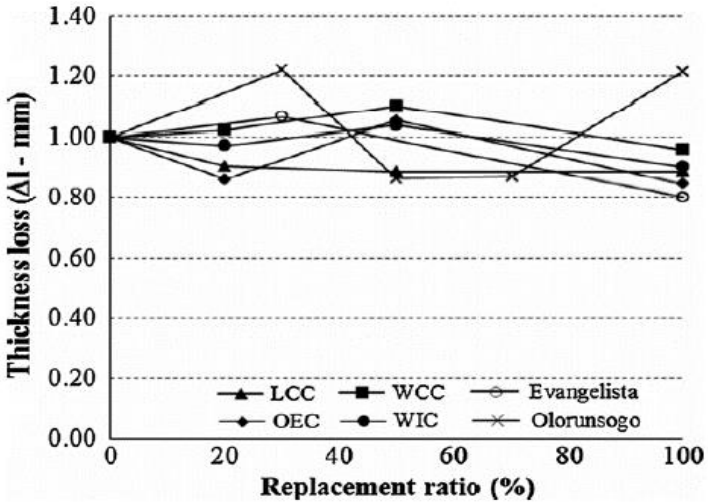


Slika 5.9.: *Moduli elastičnosti za sve mješavine betona [28]*

5.3.3.4. Otpornost na abraziju

Rezultati otpornosti na abraziju za sve mješavine betona su prikazani na slici 5.10. S obzirom da uvjeti očvršćivanja značajno utječu na površinski sloj betona, treba uzeti u obzir da su testni uzorci (71 x 71 x 50 mm3) dobiveni pilanjem veće betonske kocke (100mm stranica) nakon

očvršćivanja tako da završni površinski sloj betona ne bude varijabla u testu. Stoga, površina testiranja je površina rezanja, tj. unutarnja ploha betona.



Slika 5.10.: *Rezultati otpornosti na abraziju za sve mješavine betona [28]*

Neusklađena varijacija vrijednosti otpornosti na abraziju, u svim uvjetima očvršćivanja, znači da se ne može uspostaviti čista poveznica između otpornosti na abraziju i udjela RCA. Osim za mješavinu C50-WCC koja pokazuje 10% veće trošenje nego NAC mješavina, otpornost na abraziju za sve ostale mješavine betona se razlikuje manje od 5% u odnosu na NAC, te nije statistički značajno s eksperimentalne točke gledišta.

C100 uzorci pokazuju najmanji gubitak debljine i veću otpornost na abraziju, za sve uvjete očvršćivanja, što nas vodi do zaključka da veći udio RCA vodi prema boljim svojstvima u smislu otpornosti na abraziju.

Ne mogu se izvući jasni zaključci u odnosu na uvjete očvršćivanja, ali niže varijacije sugeriraju da uvjeti očvršćivanja ne utječu na RAC ništa drugačije nego kao na CC.

U cilju usporedbe postignutih rezultata, test otpornosti na abraziju na betonima s recikliranim agregatima iz druge dvije studije (Evangelista i de Brito, te Olorunsogo) je priložen na slici 5.10. te pokazuje slično ponašanje onom koje je uočeno i u ovom istraživanju.

5.3.4. Zaključak

Općenito je poznato za betone s recikliranim agregatima (RAC) da se očekuje da imaju lošija svojstva nego standardni normalni beton (CC). Međutim, ovaj tip betona i dalje može biti prikladan za korištenje kao konstrukcijski materijal. Sljedeći zaključci se mogu izvući temeljem rezultata eksperimenta i rasprave studije:

- Izgleda da na tlačnu čvrstoću ne utječe udio recikliranog betonskog krupnog agregata (RCA) za prikazane uvjete očvršćivanja, uspoređujući s CC; također se čini da ni uvjeti očvršćivanja ne utječu na tlačnu čvrstoću (za CC i RCA).

- Vlačna čvrstoća se smanjuje s porastom udjela RCA.

- Modul elastičnosti se smanjuje s porastom udjela RCA.

- Vrijednosti testa otpornosti na abraziju su vrlo nedosljedne i stoga se ne može uspostaviti nikakva veza, ali niske varijacije sugeriraju da su svojstva mješavina s RA usporediva sa svojstvima CC, s obzirom na uvjete očvršćivanja. Međutim, uočeno je da sve RAC100 mješavine pokazuju najmanje trošenje za razliku od ostalih mješavina za iste uvjete očvršćivanja.

Ovo područje ima mnogo mogućnosti i potrebe za istraživanjem ako se ponašanje betona s recikliranim agregatom želi u potpunosti razumjeti. Ova eksperimentalna studija ističe kako ovaj tip agregata ima potencijal kao komponenta u proizvodnji konstrukcijskog betona.

5.4. Postupak izrade mješavina za beton s recikliranim agregatom (N. K. Bairagi, H. S. Vidyadhara, Kishore Ravande) [29]

U ovom radu autori su otkrili najpogodniju metodu izrade mješavina za RAC, od dostupnih konvencionalnih metoda za izradu mješavina. Otkriven je utjecajni parametar te je predložen empirijski odnos kako bi se modificiralo taj parametar. Tako dobiveni parametri mješavina omogućuju da RAC dobije ciljanu čvrstoću bez pokušavanja ikakvih probnih miješanja. Predloženi modificirani postupak, međutim, zahtjeva 10% više cementa što se smatra poprilično razumno i prihvatljivo s gledišta lošije kvalitete recikliranih agregata.

5.4.1. Uvod

Suprotno betonu s prirodnim agregatom (NAC) koji je pripremljen s prirodnim krupnim i sitnim agregatima, beton s recikliranim agregatom (RAC) je onaj u kojem su prirodni agregati zamijenjeni agregatima proizašlim iz odbačenog šuta i srušenih betonskih konstrukcija.

Ponovno korištenje recikliranih agregata (RA) u konstrukcijskom betonu, umjesto odbacivanja kao otpadnog materijala, je uglavnom proizašlo zbog sljedećih razloga: nedostatak velikih odlagališta za smještaj takvog otpada, nedostupnost prikladnih agregata za željenu kvalitetu, te velika transportna udaljenost između kamenoloma i gradilišta.

5.4.2. Opseg istraživanja

S obzirom da su reciklirani agregati dobiveni nakon drobljenja i prebiranja velikih otpadnih komada šuta, matrica sitnijih agregata i cementa ostaje vezana za stari krupni agregat što utječe na veliku vjerojatnost promjene fizičkih svojstava recikliranog agregata. Obično reciklirani agregati pokazuju veću poroznost i vodoupojnost što je povezano s manjom gustoćom i čvrstoćom kad se usporede s prirodnim agregatima.

Naizgled, izgleda paradoksalno da u jednu ruku beton s recikliranim agregatom teži slabijoj čvrstoći nego beton s prirodnim agregatom dok u drugu ruku, očito je da se viši stupanj betona s recikliranim agregatom može proizvesti od recikliranih agregata dobivenih od nižeg stupnja betona s prirodnim agregatom. Uzimajući to u obzir, izgleda logično da se razvije prikladna modifikacija postojećem postupku miješanja za beton s recikliranim agregatom višeg stupnja, koristeći reciklirane agregate nastale iz nižeg stupnja betona s prirodnim agregatom, kojem se znaju karakteristike i povijest čvrstoće.

Betoni s recikliranim agregatima klasa M15, M20, M25 i M30 su uzeti za ispitivanje za ovu studiju dok je beton s prirodnim agregatom klase M15 bio izvor za reciklirane agregate.

5.4.3. Materijali

Obični Portland cement u skladu s IS 269 (1976), i lokalno dostupan prirodni pijesak kao sitni agregat u skladu s IS 383 (1970), su korišteni i za beton s prirodnim agregatom i za beton s recikliranim agregatom. Krupni agregat korišten za beton s prirodnim agregatom je drobljena crna bazalt stijena koja ima maksimalnu veličinu zrna od 20 mm i zadovoljavajuće zahtjeve granulacije po IS 383 (1970).

Reciklirani agregat je dobiven od betona s prirodnim agregatom koji je napravljen za klasu M15, izlijevan je u standardne kalupe, stvrdnjavan 28 dana pod vodom i drobljen nakon 3 mjeseca starosti.

5.4.4. Program istraživanja

Detaljno istraživanje je provedeno s ciljem razvijanja potrebnih modifikacija postojećim standardnim miješanjima, tako da odgovaraju betonu s recikliranim agregatom. Cijeli postupak istraživanja se sastoji od 3 posebne faze eksperimenta i četvrte faze modifikacije udjela. Faze su:

Faza I: Obrada i istraživanje svojstava recikliranih agregata.

Faza II: Biranje prikladnog postupka miješanja za beton s recikliranim agregatom.

Faza III: Probne mješavine betona s recikliranim agregatom i prepoznavanje utjecajnog parametra.

Faza IV: Predložene modifikacije s obzirom na određeni parametar.

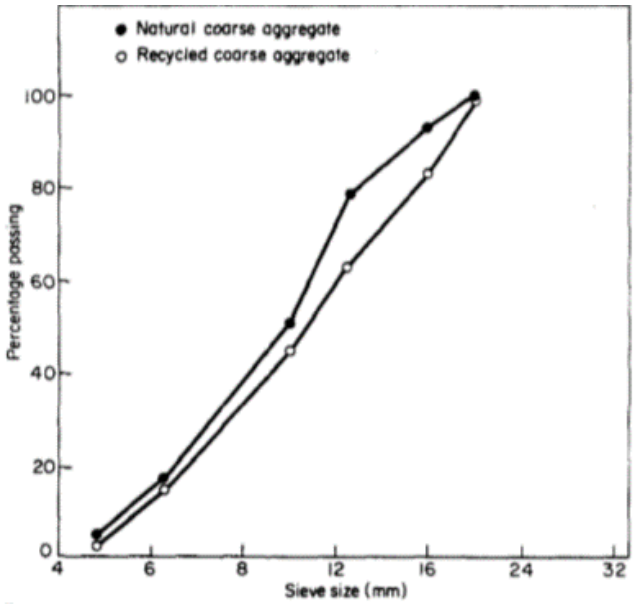
5.4.4.1. Faza I

Napravljen je beton s prirodnim agregatom klase M15, te su tri kocke iz svake serije podvrgnute testu tlačne čvrstoće 28-og dana kako bi se provjerila ciljana čvrstoća. Reciklirani agregati su dobiveni drobljenjem ovih kocaka u laboratoriju s čeljusnom drobilicom kako je ranije rečeno.

Fizička svojstva i karakteristike recikliranih agregata su proučeni i uspoređeni s onima od prirodnih agregata. To je objašnjeno na slici 5.11. i tablici 5.12.

Tablica 5.12.: *Svojstva betona s prirodnim i recikliranim agregatom [29]*

tip agregata	***specifična težina u SSD***	***vodoupojnost (%)***	***vrijednost udara (%)***	***vrijednost drobljenja***	***modul finoće***
prirodni agregat	*2.90*	*2.00*	*9.95*	*21.59*	*6.45*
reciklirani grubi agregat	*2.56*	*5.76*	*22.47*	*26.04*	*6.57*



Slika 5.11.: *Granulometrijska krivulja prirodnog i recikliranog krupnog agregata [29]*

Slika 5.21. jasno prikazuje da granulometrijska krivulja oba agregata (prirodnog i recikliranog) prati sličan trend. Međutim, reciklirani agregati pokazuju grublju granulaciju od prirodnog agregata.

Vizualna opažanja indiciraju da su većinom sve čestice recikliranog agregata presvučene starim cementnim mortom.

5.4.4.2. Faza II

Svaka od četiri standardne metode miješanja smjesa, tj. „I.S. code method“, „ACI method“, „RRL method“ i „Surface and Angularity index method“, su provedene za beton klase M15 i prikazane u tablici 5.13.

Tablica 5.13.: *Udjeli u mješavini za klasu M15 [29]*

metoda miješanja	***beton s prirodnim agregatom***				***beton s recikliranim agregatom***			
	ime	***W/C***	***A/C***	***cem.:FA:CA***	***ime***	***W/C***	***A/C***	***cem.:FA:CA***
IS code method	*NM1*	*0.60*	*6.20*	*1:2.1:3.9*	*RM1*	*0.60*	*5.70*	*1:2.2:3.5*
ACI method	*NM2*	*0.65*	*6.00*	*1:2.8:3.4*	*RM2*	*0.65*	*5.75*	*1:2.6:3.1*
RRL method	*NM3*	*0.69*	*6.10*	*1:2.1:4.0*	*RM3*	*0.69*	*6.10*	*1:2.1:4.0*
S & A indeks method	*NM4*	*0.68*	*6.20*	*1:2.3:3.9*	*RM4*	*0.68*	*6.20*	*1:2.4:3.8*

Šest standardnih kocaka i jednak broj valjaka je napravljen od betona s prirodnim agregatom i betona s recikliranim agregatom, a s obzirom na metodu miješanja su nazvani NM1, NM2, NM3 i NM4 za NAC i RM1, RM2, RM3 i RM4 za RAC (tablica 5.13.). Uzorci su podvrgnuti standardnom testu tlačne čvrstoće i testu vlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana. Prosjek rezultata tri testa i vrijeme očvršćivanja su dani u tablici 5.14.

Tablica 5.14.: *Vlačna i tlačna čvrstoća betona za klasu M15 [29]*

metoda miješanja	***beton s prirodnim agregatom***					***beton s recikliranim agregatom***				
	ime	***Pros. f_c N/mm²***		***Pros. f_t N/mm²***		***ime***	***Pros. f_c N/mm²***		***Pros. f_t N/mm²***	
		7 dana	***28 dana***	***7 dana***	***28 dana***		***7 dana***	***28 dana***	***7 dana***	***28 dana***
IS code method	*NM1*	*11.0*	*20.9*	*0.9*	*2.0*	*RM1*	*6.8*	*16.5*	*0.8*	*1.7*
ACI method	*NM2*	*10.8*	*21.0*	*1.0*	*2.2*	*RM2*	*11.1*	*18.9*	*0.8*	*1.9*
RRL method	*NM3*	*10.2*	*19.7*	*0.8*	*1.8*	*RM3*	*8.2*	*13.9*	*0.7*	*1.3*
S&A index method	*NM4*	*10.5*	*20.0*	*0.8*	*1.7*	*RM4*	*8.9*	*14.7*	*0.9*	*1.3*

Rezultati u tablici 5.14. sugeriraju da ACI metoda daje najbolju čvrstoću, kako za beton s prirodnim agregatom tako i za beton s recikliranim agregatom. Nadalje, uspređujući 28-dnevne tlačne čvrstoće NAC-a i RAC-a, otprilike 10% niže vrijednosti su zabilježene kod RAC-a. Međutim, ovo smanjenje varira od 20% do 30% za beton s recikliranim agregatom napravljenim s ostale tri metode. Stoga je od ove 4 metode ACI metoda najprikladnija, te je odabrana za sljedeće faze rada.

5.4.4.3. Faza III

Prema ACI metodi, napravljene su probne mješavine klasa M15, M20, M25 i M30 za beton s recikliranim agregatom. Za svaku klasu su prvo određeni traženi omjeri A/C i W/C, te je s obzirom na njih napravljeno 12 različitih probnih mješavina kombinirajući 4 A/C omjera za svaki od 3 W/C omjera. Tri standardne kocke s bridom 150 mm i tri standardna valjka veličine 150 mm x 300 mm su napravljeni od RAC-a od svake probne mješavine. Svi uzorci su se držali pod vodom 28 dana (na 27° ± 1°C i 95 ± 1% relativne vlažnosti) nakon što su izvađeni iz kalupa. Prosjek rezultata tri testa je iznesen za svaki tip testa. Također, obradivost za svaku od probnih mješavina je mjerena prema faktoru kompaktnosti. Svi navedeni rezultati su dani u tablici 5.15.

Tablica 5.15.: *Rezultati probnih mješavina betona s recikliranim agregatom za klase M15, M20, M25 i M30 [29]*

ime	***prosjek f_c (N/mm^2)***	***prosjek f_t (N/mm^2)***	***Faktor kompaktnosti***	***ime***	***prosjek f_c (N/mm^2)***	***prosjek f_t (N/mm^2)***	***Faktor kompaktnosti***
A_1	22.7	2.3	0.95	C_1	39.8	3.3	0.86
A_2	21.2	2.8	0.90	C_2	35.1	3.6	0.86
A_3	18.2	2.0	0.90	C_3	31.1	3.2	0.85
A_4	19.5	2.7	0.90	C_4	32.8	3.3	0.86
A_5	23.0	2.6	0.85	C_5	39.4	4.4	0.84
A_6	22.1	2.7	0.85	C_6	36.4	4.5	0.84
A_7	18.8	2.6	0.84	C_7	31.8	4.0	0.84
A_8	23.2	2.9	0.84	C_8	30.9	3.2	0.84
A_9	20.5	2.8	0.78	C_9	31.2	3.9	0.80
A_{10}	25.2	3.2	0.74	C_{10}	32.9	4.6	0.82
A_{11}	24.5	2.5	0.78	C_{11}	32.0	4.4	0.80
A_{12}	23.2	2.5	0.76	C_{12}	31.0	4.8	0.80
B_1	30.1	3.0	0.90	D_1	40.6	5.7	0.80
B_2	28.2	3.5	0.90	D_2	37.8	4.7	0.80
B_3	26.4	3.0	0.89	D_3	36.5	5.3	0.80
B_4	24.3	3.2	0.90	D_4	36.9	4.8	0.80
B_5	31.1	3.6	0.88	D_5	42.2	4.8	0.78
B_6	30.2	3.8	0.88	D_6	40.0	4.6	0.78
B_7	29.2	3.5	0.86	D_7	39.6	4.7	0.79
B_8	31.2	4.2	0.86	D_8	39.0	4.0	0.78
B_9	34.5	3.7	0.79	D_9	42.6	4.2	0.75
B_{10}	30.4	3.7	0.78	D_{10}	38.7	3.8	0.75
B_{11}	28.8	2.7	0.78	D_{11}	37.8	3.7	0.76
B_{12}	20.0	2.1	0.78	D_{12}	35.5	3.6	0.76

Tablica 5.16. sumira najbolje vrijednosti tlačne čvrstoće koje su blizu ciljanoj čvrstoći, zajedno s odgovarajućim omjerima A/C i W/C.

Detaljna analiza rezultata u tablici 5.16. otkriva da za svaku klasu betona, za određenu vrijednost omjera W/C, postoji odgovarajuća vrijednost omjera A/C, koja je različita od one koja je određena te teži vrijednosti tlačne čvrstoće koja je blizu ciljane čvrstoće. Vrijednosti vlačne čvrstoće izgledaju zadovoljavajuće. Faktor kompaktnosti koji je mjera obradivosti, također

pokazuje zadovoljavajući trend. Ovaj novi omjer A/C, nazvan „modificirani omjer A/C“, je otkriven kao utjecajni parametar za miješanje betona s recikliranim agregatom.

Tablica 5.16.: *Sumirani rezultati probnih mješavina betona s recikliranim agregatom za klase M15, M20, M25 i M30 [29]*

ime	***omjer W/C***	***omjer A/C***	***28 d pr. f_c (N/mm^2)***	***28 d pr. f_t (N/mm^2)***	***faktor komp.***	***napomene***
A_2	0.65	5.25	21.2	2.8	0.90	željeni omjer W/C = 0.65
A_6	0.60	5.25	22.1	2.7	0.85	željeni omjer A/C = 5.75
A_9	0.55	4.75	20.5	2.8	0.78	željena ciljana tlačna čvrstoća = 20.8 N/mm^2
B_2	0.53	4.2	28.2	3.5	0.9	željeni omjer W/C = 0.53
B_7	0.50	4.4	29.2	3.5	0.86	željeni omjer A/C = 4.4
B_{11}	0.47	4.4	28.8	2.7	0.78	željena ciljana tlačna čvrstoća = 28 N/mm^2
C_2	0.46	3.5	35.1	3.6	0.86	željeni omjer W/C = 0.46
C_6	0.43	3.5	36.4	4.5	0.84	željeni omjer A/C = 3.7
C_{10}	0.40	3.5	32.9	4.6	0.82	željena ciljana tlačna čvrstoća = 33.8 N/mm^2
D_1	0.38	2.5	40.6	5.7	0.80	željeni omjer W/C = 0.38
D_6	0.36	2.7	40.0	4.6	0.78	željeni omjer A/C = 2.9
D_9	0.34	2.5	42.6	4.2	0.75	željena ciljana tlačna čvrstoća = 39.9 N/mm^2

5.4.4.4. Faza IV

Kada se pronađe modificirani omjer A/C kao što je iznad navedeno, mješavine za željeni tip RAC-a se mogu napraviti uobičajenim koracima. Ali u praksi, potrebno je napraviti skupinu probnih mješavina (kao što je opisano u Fazi II) da bi se došlo do modificiranog omjera A/C. Ova izvedba izgleda naporna, a troši materijal, vrijeme i novac. Stoga je neophodno da se ona izbjegne te da se razvije jednostavna i brza metoda.

Kako bi se postigao ovaj cilj, otkriveno je da je potrebno uspostaviti vezu između željenog omjera $(AC)_d$ i modificiranog omjera $(AC)_m$. Koristeći dijagram varijacije $(AC)_m$ i $(AC)_d$ u odnosu na različite klase (M) betona, razvijena je veza između željenog omjera A/C, modificiranog omjera A/C i klase betona (M):

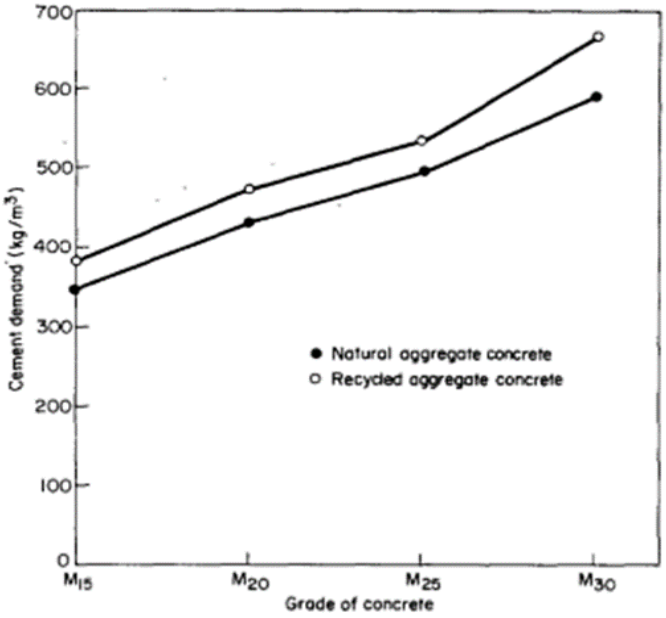
$$(AC)_m = \frac{M \cdot (AC)_d}{e^{(0.045M+2.238)} - 2}$$

gdje je M u N/mm^2.

Stoga, ovaj odnos će pomoći modificirati omjer A/C za ACI metodu bez pripremanja probnih mješavina RAC-a za bilo koju klasu betona od M15 do M30.

Kako bi se odredila promjena količine cementa zbog modificiranog omjera A/C, slika 5.12. prikazuje odnos između klase betona i zahtijevane količine cementa za NAC i za RAC. Graf

pokazuje da se 8% do 13% više cementa zahtijeva za RAC kako bi se postigla ciljana čvrstoća, s većim vrijednostima za više klase betona. Ova dodatna količina cementa je poprilično razumna s gledišta značajnog postignuća veće čvrstoće betona sa slabije kvalitetnim recikliranim agregatima.



Slika 5.12.: *Veza između zahtijevane količine cementa i klase betona, za RAC i NAC [29]*

5.4.5. Zaključak

Sljedeći zaključci se mogu izvući temeljem rezultata eksperimenta i rasprave studije:

- Granulometrijska krivulja recikliranog krupnog agregata ne odstupa značajno od granulometrijske krivulje prirodnog krupnog agregata.

- Od četiri prihvaćene metode miješanja, ACI metoda je najprikladnija za izradu betona s recikliranim agregatom.

- Probne mješavine ACI metode, za različite promatrane klase, pokazuju da je modificirani omjer A/C za željeni omjer W/C težio ciljanoj čvrstoći.

- Za razliku od NAC-a, dodatna zahtijevana količina cementa za RAC je između 8% i 13% (veće vrijednosti za više klase betona). S obzirom na značajno povećanje čvrstoće, ovo povećanje u količini cementa izgleda razumno.

- Za klase betona od M15 do M30 je predložen empirijski odnos za izračun modificiranog omjera A/C bez pokušavanja probnih mješavina.

- Omjer A/C je omogućio izradu različitih klasa RAC-a koristeći reciklirane agregate dobivene od lošijeg betona s prirodnim agregatom klase M15.

Predloženi empirijski odnos je od velikog značaja u pogledu otklanjanja napornog postupka izrade probnih mješavina.

5.5. Ponašanje betona s različitim udjelima prirodnih i recikliranih agregata (N. K. Bairagi, Kishore Ravande and V. K. Pareek) [30]

Korištenje recikliranih agregata za izradu betona postaje sve popularnije. Glavni cilj ove studije je dobiti prihvatljivu kvalitetu betona s maksimalnim korištenjem recikliranog agregata umjesto prirodnog agregata. U ovom radu, izraz „omjer zamjene“ je uveden i definiran kao omjer recikliranog krupnog agregata naspram ukupnom krupnom agregatu u mješavini betona. Ispitane su mješavine betona s omjerom zamjene od 0, 0.25, 0.50, 0.75 i 1.00 da bi se procijenilo njihovo ponašanje u svježem i u očvrslom stanju. Navedena studija je napravljena za tri različita vodocementna faktora: 0.57, 0.50 i 0.43. Predložena je maksimalna vrijednost omjera zamjene, imajući na umu cjelokupno ponašanje betona i glavni cilj ovog istraživanja.

5.5.1. Uvod

S ogromnim povećanjem količine otpadnih materijala u jednu ruku, i neprestanog manjka odlagališta u drugu ruku, problem odlaganja otpada postaje prevelik. Manjak odlagališta rezultira povećanjem troškova prijevoza i odlaganja otpada. Nadalje, očuvanje prirodnih resursa, te očuvanje zdravog okoliša su podjednako važni. Stoga nije čudno da je koncept recikliranja otpadnih materijala i njihovo ponovno korištenje u značajnom porastu.

U ovom radu, izraz omjer zamjene (r) je definiran i izražen kao r = RA / (RA+NA) gdje je $0 \leq r \leq 1$. Pet mješavina je napravljeno u istraživanju, s r = 0, 0.25, 0.50, 0.75 i 1.00. Beton s r = 0 služi kao referentni beton (beton s prirodnim agregatom, NAC) sa 100% prirodnog agregata, a beton s r = 1 je beton sa 100% recikliranog agregata (beton s recikliranim agregatom, RAC).

Prije formiranja mješavina, istražena su svojstva prirodnih i recikliranih agregata. Za svih pet mješavina su također istražena svojstva svježeg betona. Nadalje, ponašanje betona je procijenjeno s tlakom (f_c), vlakom (f_t), modulima elastičnosti (E) i savijanja (f_r). Određen je maksimalni udio RA s NA, bez ozbiljnog utjecaja na kvalitetu betona.

5.5.2. Materijali

Obični Portland cement, u skladu s IS 269 (1976), i lokalno dostupan pijesak kao sitni agregat, u skladu s IS 383 (1970), su korišteni za sve tipove mješavina. Korišteni prirodni krupni

agregat je drobljena crna bazalt stijena, s maksimalnom veličinom zrna od 20 mm i zadovoljavajućim zahtjevima granulacije sukladno IS 383 (1970).

Reciklirani krupni agregat, s maksimalnom veličinom zrna 20 mm, je dobiven drobljenjem betona s prirodnim agregatom klase M20.

5.5.3. Postupak istraživanja

Kako bi se proučila svojstva betona s različitim omjerima zamjene krupnog agregata, u svježem i očvrslom stanju, eksperimentalni rad je planiran i proveden u sljedeće dvije faze.

Faza I: obrada recikliranih agregata i istraživanje njihovih svojstava.

Faza II: priprema različitih mješavina i priprema testnih uzoraka.

5.5.3.1. Faza I

Uzorci betona s prirodnim agregatom klase M20 su napravljeni u standardnim laboratorijskim kalupima i držali su se pod vodom 4 tjedna (na 27 ± 1°C i 95 ± 1% relativne vlažnosti). Daljnji period očvršćivanja na zraku je iznosio devet tjedana, a zatim su uzorci drobljeni kako bi se dobio reciklirani agregat maksimalne veličine zrna 20 mm.

Razna fizička svojstva recikliranih agregata su proučena i uspoređena s onima od prirodnih agregata, što je prikazano u tablicama 5.17. i 5.18. Svi testovi su provedeni u skladu s postupcima danima u IS 2386 (Dio I, III i IV).

Tablica 5.17.: *Fizička i mehanička svojstva prirodnih i recikliranih agregata [30]*

svojstvo	***grubi agregat***	
	prirodni	***reciklirani***
specifična težina (SSD)	*2.92*	*2.66*
prividna specifična težina (OD)	*2.99*	*2.89*
vodoupojnost	*0.99*	*3.95*
gustoća mase (kg/l)		
i rahlo	*1.54*	*1.33*
ii zbijeno	*1.74*	*1.49*
omjer šupljina (%)	*40*	*44*
indeks slabosti (%)	*19*	*12*
indeks istezanja (%)	*30*	*19*
modul finoće	*6.45*	*6.59*
vrijednost udara (%)	*23*	*29*
vrijednost drobljenja (%)	*19*	*23*
vrijednost Los Angeles abrazije (%)	*21*	*27*

Granulometrijske krivulje za prirodni i reciklirani agregat prikazuju da oba tipa agregata prate više-manje sličan trend.

Nadalje, tablica 5.17. prikazuje fizička i mehanička svojstva prirodnih i recikliranih agregata. Rezultati pokazuju da reciklirani agregat ima nižu specifičnu težinu i veći postotak vodoupojnosti, u usporedbi s prirodnim agregatom. Prisustvo vezanog morta u česticama agregata je vjerojatno glavni razlog za ovakve rezultate.

Tablica 5.18.: *Fizička svojstva izmiješanih krupnih agregata [30]*

svojstvo	***udio zamjene (r)***				
	0	***0.25***	***0.50***	***0.75***	***1.00***
specifična težina (SSD)	*2.92*	*2.86*	*2.75*	*2.68*	*2.66*
prividna spec. težina (OD)	*2.99*	*2.97*	*2.94*	*2.90*	*2.89*
vodoupojnost (%)	*0.99*	*1.22*	*2.35*	*2.99*	*3.95*
gustoća mase (kg/l)					
i rahlo	*1.54*	*1.48*	*1.44*	*1.38*	*1.33*
ii zbijeno	*1.74*	*1.69*	*1.62*	*1.56*	*1.49*
omjer šupljina (%)	*40*	*41*	*41*	*42*	*44*

Tablica 5.18. prikazuje varijaciju fizičkih svojstava krupnog agregata s obzirom na omjer zamjene. Ovo je učinjeno da bi se uključio utjecaj omjera zamjene na fizička svojstva krupnog agregata kao cjeline. Rezultati pokazuju postupno smanjenje specifične težine i gustoće rasutih tvari s odgovarajućim povećanjem postotka vodoupojnosti i postotka šupljina. Rezultati prate očekivani trend.

Uočeno je da je vodoupojnost vrlo ubrzana u početnom periodu od 30 minuta namakanja za prirodni i za reciklirani agregat. U prvih trideset minuta prirodni agregat i reciklirani agregat zadobiju 72% i 76% od 24-satnog kapaciteta vodoupojnosti, dok u četiri sata te vrijednosti iznose 92% za prirodni agregat i 94% za reciklirani agregat.

5.5.3.2. Faza II

Pet mješavina je razmatrano, s udjelima zamjene r = 0, 0.25, 0.50, 0.75 i 1.00 za svaki od tri odabrana vodocementna faktora, tj. 0.57, 0.50 i 0.43. Ukupno petnaest različitih mješavina je razmatrano u istraživanju. Mješavine s vodocementnim faktorima 0.57, 0.5 i 0.43 su označene kao A, B i C, dok se A(r), B(r) i C(r) odnosi na iste mješavine s različitim omjerima zamjene (r).

Sljedeći testni uzorci su pripremljeni iz petnaest ranije spomenutih mješavina:

(a) Za tlačni test: 12 uzoraka od svake mješavine, kocke standardne veličine 150 mm.

(b) Za vlak i modul elastičnosti: 6 uzoraka od svake mješavine, valjci standardne veličine 150 x 300 mm.

(c) Za savijanje: 3 uzorka od svake mješavine, standardne grede 100 x 100 x 500 mm.

Ukupno je napravljeno 180 kocki, 90 valjaka i 45 greda.

Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata i čuvani u vodi (na 27 ± 1°C i 95 ± 1% relativne vlažnosti) 3, 7, 14 i 28 dana, ovisno o slučaju.

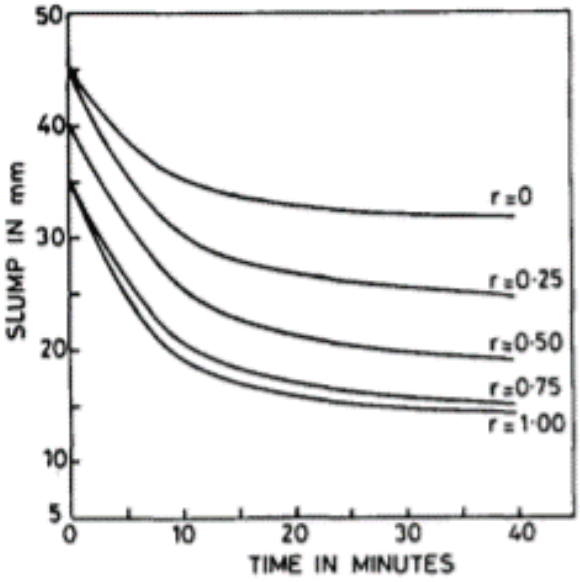
5.5.3.2.1. Postupak testiranja

Svježi beton.

Prije kalupljenja uzoraka, promatrana je obradivost svih mješavina s obzirom na slijeganje i faktor kompaktnosti. Također je promatran i gubitak obradivosti s vremenom. Ovi testovi obradivosti su provedeni otprilike 10 minuta nakon što je prvi put dodana voda u sastojke mješavine. Nadalje, izmjerena je vlažna gustoća za sve slučajeve mješavina. Ovi rezultati testova su dani u tablici 5.19. i na slici 5.13. Svi navedeni testovi su provedeni u skladu s procedurama danim u IS 1199 (1959).

Tablica 5.19.: *Svojstva svježeg betona [30]*

svojstvo	***mješavina***	***omjer zamjene (r)***				
		0	***0.25***	***0.50***	***0.75***	***1.00***
slijeganje (mm)	*A(r)*	*35*	*30*	*25*	*20*	*20*
	B(r)	*30*	*30*	*25*	*20*	*20*
	C(r)	*30*	*25*	*20*	*15*	*15*
faktor kompaktnosti	*A(r)*	*0.88*	*0.87*	*0.86*	*0.84*	*0.81*
	B(r)	*0.88*	*0.86*	*0.85*	*0.80*	*0.80*
	C(r)	*0.85*	*0.83*	*0.82*	*0.80*	*0.78*
vlažna gustoća (KN/m^3)	*A(r)*	*25.5*	*25.0*	*24.6*	*24.3*	*24.2*
	B(r)	*25.9*	*24.8*	*24.6*	*24.4*	*24.3*
	C(r)	*25.9*	*25.7*	*24.8*	*24.6*	*24.4*



Slika 5.13.: *Gubitak obradivosti s vremenom za mješavinu A [30]*

Očvrsli beton

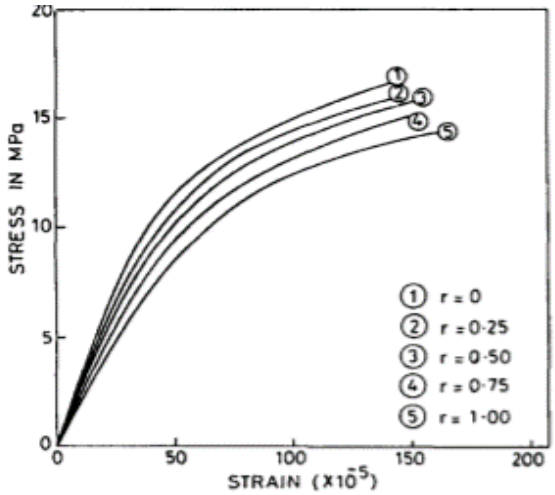
(i) Tlačna čvrstoća: kako bi se promatrao prirast čvrstoće za svaki tip mješavine, kocke su podvrgnute testu tlačne čvrstoće nakon 3, 7, 14 i 28 dana. Prosjeci rezultata od tri testa za svaku mješavinu su dani u obliku postotka s obzirom na 28-dnevnu tlačnu čvrstoću (tablica 5.20.), i stvarne vrijednosti 28-dnevne čvrstoće su prikazane u tablici 5.21.

Tablica 5.20.: *Relativni postotak postignute tlačne čvrstoće betona [30]*

mješavina	***starost***	***omjer zamjene (r)***				
		0	***0.25***	***0.50***	***0.75***	***1.00***
A(r)	*3*	*52*	*49*	*47*	*46*	*45*
	7	*69*	*65*	*64*	*64*	*63*
	14	*87*	*83*	*81*	*80*	*80*
	28	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*
B(r)	*3*	*59*	*55*	*54*	*52*	*52*
	7	*72*	*71*	*70*	*70*	*69*
	14	*89*	*88*	*87*	*86*	*86*
	28	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*
C(r)	*3*	*62*	*62*	*60*	*59*	*57*
	7	*76*	*74*	*73*	*72*	*70*
	14	*92*	*91*	*87*	*88*	*87*
	28	*100*	*100*	*100*	*100*	*100*

(ii) Vlačna čvrstoća: Valjci standardne veličine su podvrgnuti testu vlačne čvrstoće nakon 28 dana. Prosjek rezultata tri testa za svaku mješavinu je prikazan u tablici 5.21.

(iii) Modul elastičnosti: Test je proveden na svaki od tri valjka standardne veličine za odgovarajuću mješavinu. Naponsko-deformacijska krivulja je nacrtana koristeći podatke testa, kako bi se dobio modul elastičnosti. Srednja vrijednost ovako dobivenih vrijednosti E za svaku mješavinu je prikazana u tablici 5.21. Slika 5.14. prikazuje naponsko-deformacijsku vezu betona za sve omjere zamjene, tipično za A mješavinu.



Slika 5.14.: *Naponsko-deformacijska krivulja za mješavinu A, za sve omjere zamjene [30]*

(iv) Test savijanja: Grede standardne veličine su nakon 28 dana podvrgnute opterećenju u dvije točke uzdužno, kako bi se promatralo njihovo ponašanje kod savijanja. Srednja vrijednost rezultata tri testa za svaku mješavinu je dana u tablici 5.21.

Tablica 5.21.: *Mehanička svojstva očvrslog betona [30]*

svojstvo	***mješavina***	***omjer zamjene (r)***				
		0	***0.25***	***0.50***	***0.75***	***1.00***
tlačna čvrstoća, f_c (MPa)	*A(r)*	*25.1*	*24.5*	*23.6*	*22.6*	*21.0*
	B(r)	*29.7*	*29.0*	*28.0*	*27.0*	*25.7*
	C(r)	*35.0*	*34.5*	*33.2*	*32.5*	*31.0*
vlačna čvrstoća, f_t (MPa)	*A(r)*	*2.6*	*2.4*	*2.3*	*1.8*	*1.5*
	B(r)	*3.1*	*3.0*	*2.8*	*2.3*	*2.0*
	C(r)	*4.3*	*4.0*	*3.9*	*3.0*	*2.4*
modul elastičnosti, E (GPa)	*A(r)*	*28.9*	*27.0*	*24.8*	*22.7*	*20.3*
	B(r)	*31.5*	*29.3*	*27.0*	*24.8*	*22.5*
	C(r)	*34.2*	*32.0*	*29.4*	*27.2*	*24.7*
modul savijanja, f_r (MPa)	*A(r)*	*4.1*	*3.9*	*3.6*	*3.3*	*2.9*
	B(r)	*4.5*	*4.2*	*3.9*	*3.6*	*3.3*
	C(r)	*4.9*	*4.6*	*4.3*	*4.1*	*3.7*

5.5.3.2.2. Rasprava na rad u fazi II

Svojstva svježeg betona

Može se primijetiti da se smanjuju vrijednosti slijeganja i faktora kompaktnosti određenih mješavina s povećanjem omjera zamjene. Razlozi smanjenja obradivosti s povećanjem omjera zamjene su očiti, s obzirom da je kapacitet vodoupojnosti recikliranih agregata jako visok. Iako su potrebne promjene količine vode napravljene za svaku mješavinu, visok kapacitet vodoupojnosti i gruba tekstura recikliranih agregata izgleda da utječu na smanjenje obradivosti u pogledu vrijednosti slijeganja i faktora kompaktnosti.

Nadalje, gubitak obradivosti s vremenom je tipičan za mješavinu A sa svih pet omjera zamjene. Rezultati prikazani na slici 5.13. jasno prikazuju ubrzani gubitak obradivosti u prvih 10-15 minuta za svih pet mješavina, te je taj gubitak veći s povećanjem omjera zamjene. Nakon petnaest minuta je jako mala promjena u obradivosti, koja se više-manje stabilizira nadalje.

Vlažna gustoća za sve mješavine je također prikazana u tablici 5.19. Rezultati pokazuju samo 5-6% smanjenja za sve mješavine A(r), B(r) i C(r) s r=1.00, uspoređujući s odgovarajućim mješavinama sa r=0.

Svojstva očvrslog betona

(a) Tlačna čvrstoća: Prirast tlačne čvrstoće s vremenom ostaje više-manje isti, bez obzira na omjere zamjene u mješavinama. Ovo opažanje se slaže s prijašnjim opažanjima za RAC sa 100%

recikliranog agregata. Pogled na rezultate prikazane u tablici 5.20. otkriva da se prirast čvrstoće nakon 3, 7 i 14 dana postupno smanjuje s povećanjem omjera zamjene.

Nadalje, može se primijetiti da je prirast čvrstoće veći za mješavine s manjim vodocementnim faktorom, bez obzira na omjer zamjene u mješavini.

(b) Naponsko-deformacijska krivulja: Slika 5.14. pokazuje da omjer zamjene ima značajan utjecaj na naponsko-deformacijski odnos, pogotovo za veće vrijednosti omjera zamjene. Sve krivulje prate sličan trend, ali zakrivljenost im se povećava s povećanjem omjera zamjene.

(c) Mehanička svojstva: U prosjeku, kada je omjer zamjene varirao između 0.25 i 0.50 dobivene su relativne čvrstoće koje iznose: 98 do 94% za tlak, 94 do 90% za vlak i 94 do 87% za savijanje. Za omjer zamjene 1.0 odgovarajuće srednje vrijednosti su 86, 60 i 74% što je jako nisko. Slično tome, prosječna relativna vrijednost modula elastičnosti varira od 93 do 85% kada se omjer zamjene promjeni iz 0.25 u 0.50, dok je odgovarajuća vrijednost za omjer zamjene od 1.0 niska tj. 71%.

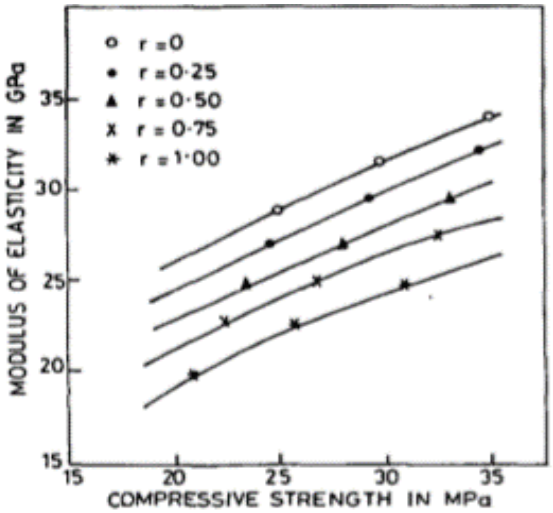
Gubitak navedenih čvrstoća je uočen za beton s recikliranim agregatom, ali je značajno veći kada je omjer zamjene veći od 0.50.

Veza između f_c i E:

Slika 5.15. prikazuje vezu između tlačne čvrstoće (f_c) i modula elastičnosti (E) za različite omjere zamjene (r). Empirijska veza između E i f_c u odnosu na r je predložena kao:

$$E = \alpha\sqrt{f_c}\,; (0 \le r \le 1.0), \quad \text{gdje je } \alpha = \alpha(r) = (5780 - 1340r).$$

Bitno je spomenuti da je vrijednost α izražena kao funkcija omjera zamjene (r) pa stoga daje općenitu formulu koja pokriva sve mješavine betona s različitim omjerima zamjene.



Slika 5.15.: *Veza između tlačne čvrstoće i modula elastičnosti [30]*

Kada je r=0, vrijednost α ispada 5780, što je blizu vrijednosti od 5700 preporučene od IS 456 (1978). Predložena formula zadovoljavajuće odgovara opaženim rezultatima.

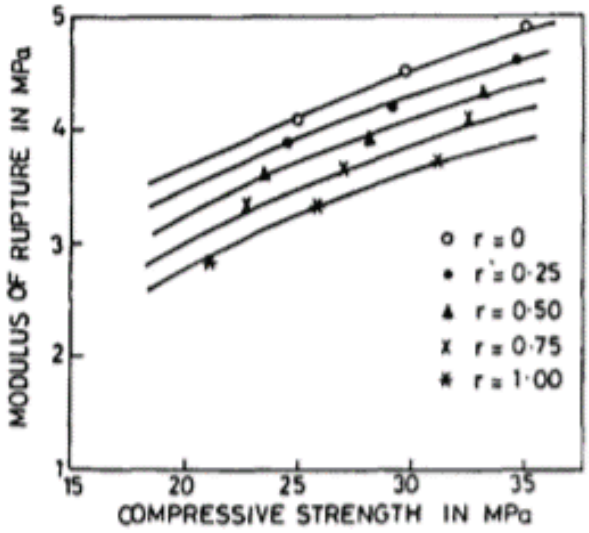
Veza između f_c i f_r:

Veza između tlačne čvrstoće (f_c) i modula savijanja (f_r) je prikazana na slici 5.16., za različite omjere zamjene (r). Empirijska veza između f_r i f_c u odnosu na r je predložena kao:

$$f_r = \beta\sqrt{f_c}\,; (0 \le r \le 1.0), \quad \text{gdje je } \beta = \beta(r) = (0.824 - 0.164r).$$

Ovdje je β izražena kao funkcija omjera zamjene (r) tako da općeniti oblik formule pokriva sve mješavine s različitim omjerima zamjene.

Vrijednost β ispada 0.824 kada je r=0. Ova vrijednost, međutim, odstupa otprilike 18% od standardne vrijednosti od 0.7 preporučene od IS 456 (1978). Formula je i dalje valjana, jer zadovoljavajuće odgovara opaženim rezultatima i daje valjanu procjenu modula savijanja.



Slika 5.16.: *Veza između tlačne čvrstoće i modula savijanja [30]*

Maksimalni omjer zamjene

Iako je smanjenje čvrstoće očekivano za beton s bilo kojim omjerom zamjene većim od nule, to smanjenje je značajno veće kada je omjer zamjene veći od 0.50 i približava se 1.0. Kako bi se odlučilo za maksimalni omjer zamjene, treba imati u vidu sveukupnu sliku svih svojstava. U ovom istraživanju se došlo do zaključka da se do 50% prirodnog agregata može zamijeniti recikliranim agregatom, bez ozbiljnog utjecaja na svojstva betona. Tako se postiže prilično dobra i prihvatljiva kvaliteta betona.

5.5.4. Zaključak

S obzirom na navedene rezultate može se zaključiti:

- Reciklirani agregati imaju relativno veći modul finoće, značajno nižu specifičnu gustoću, vrlo visoku vodoupojnost i nisku otpornost na mehanički rad.

- Vrlo brzo upijanje je uočeno za reciklirani agregat. Skoro 75% od 24-satnog kapaciteta upijanja je postignuto u prvih 30 minuta.

- Gubitak obradivosti u prvih 10 minuta se povećava s povećanjem omjera zamjene.

- Prirast čvrstoće s vremenom se smanjuje s povećanjem omjera zamjene.

- Varijacije u omjeru zamjene utječu na naponsko-deformacijski odnos, te je zakrivljenost krivulja veća s povećanjem omjera zamjene.

- Maksimalno smanjenje od 15% je uočeno u mehaničkim svojstvima mješavina u kojima je do 50% prirodnog agregata zamijenjeno recikliranim agregatom. Za beton sa 100% recikliranog agregata, maksimalni gubitak čvrstoće je otprilike 40%.

- Do 50% prirodnog agregata može biti zamijenjeno recikliranim agregatom bez ozbiljnog utjecaja na svojstva betona.

- Dvije predložene formule, koje daju odnos između E i fc, te fr i fc je moguće usporediti sa preporučenim standardnim formulama i korisne su u procjenjivanju E i fr za beton s različitim udjelima recikliranog agregata.

5.6. Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona (Mislav Lovrić) [31]

5.6.1. Uvod

Samozbijajući beton (SCC) je beton superiorne sposobnosti tečenja koji uz pomoć vlastite težine teče i popunjava oplatu bez potrebe dodatnog vibriranja. Nakon skidanja oplate površina betona ostaje glatka, bez šupljina i zadovoljava estetske kriterije, a očvrsli beton je gust i homogen. Samozbijajući beton treba imati dobra svojstva u svježem i u očvrslom stanju. Razlika između običnog i samozbijajućeg betona je veći sadržaj sitnih čestica kod SCC-a, manje maksimalno zrno agregata i obavezna primjena dodataka.

Cilj eksperimentalnog istraživanja je bio utvrditi utjecaj betonskog otpada kao punila na obradivost i tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona.

5.6.2. Materijal i sastav SCC mješavina

U pripravljanju ispitnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- portland cement CEM II/A - LL 42,5 R,
- drobljeni agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm
- superplastifikator KEDOBET SP 103
- superplastifikator MASTERGLENIUM SKY 629
- silikatna prašina,
- reciklirani beton
- leteći pepeo
- reciklirani betonski otpad („bijeli šut“)
- reciklirani betonski otpad („crveni šut“)
- kameno brašno

U svrhu istraživanja izrađeno je 9 mješavina betona (M1 – M9), a upotrebljene recepture prikazane su u tablici 5.22. Sve mješavine betona sadrže sitnu (0 – 4 mm) i krupnu (4 – 8 i 8 – 16 mm) frakciju drobljenog agregata. Količina cementa je u svim mješavinama jednaka i iznosi 360 kg/m^3.

Tablica 5.22.: *Sastav i oznake mješavina [31]*

Sastav (kg)	***M1***	***M2***	***M3***	***M4***	***M5***	***M6***	***M7***	***M8***	***M9***
Cement	*360*	*360*	*360*	*360*	*360*	*360*	*360*	*360*	*360*
Voda	*183*	*183*	*183*	*183*	*183*	*183*	*183*	*183*	*183*
W/C	*0,51*	*0,51*	*0,51*	*0,51*	*0,51*	*0,51*	*0,51*	*0,51*	*0,51*
Punilo (reciklirani beton)	*92,88*	*92,88*	*46,44*	*0*	*69,66*	*0*	*46,44*	*69,66*	*0*
Punilo (betonski otpad – „bijeli šut“)	*0*	*0*	*46,44*	*92,88*	*23,22*	*0*	*0*	*0*	*23,22*
Punilo (betonski otpad – „crveni šut“)	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*92,88*	*46,44*	*23,22*	*0*
Silikatna prašina	*36,00*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*36,00*
Leteći pepeo	*0*	*36,00*	*36,00*	*36,00*	*36,00*	*36,00*	*36,00*	*36,00*	*0*
Kameno brašno	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*69,66*
Agregat 0-4 mm	*810,45*	*810,45*	*810,45*	*810,45*	*810,45*	*810,45*	*810,45*	*810,45*	*810,45*
Agregat 4-8 mm	*161,57*	*161,57*	*161,57*	*161,57*	*161,57*	*161,57*	*161,57*	*161,57*	*161,57*
Agregat 8-16 mm	*649,47*	*649,47*	*649,47*	*649,47*	*649,47*	*649,47*	*649,47*	*649,47*	*649,47*
Superplastifikator (Kedobet) 1%	*3,96*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
Superplastifikator (Glenium) 1%	*0*	*3,96*	*3,96*	*3,96*	*3,96*	*3,96*	*3,96*	*3,96*	*3,96*
Voda*	*164,5*	*219*	*212*	*189***	*197*	*210*	*216*	*219*	*217*
W/C*	*0,46*	*0,61*	*0,59*	*0,53***	*0,55*	*0,58*	*0,60*	*0,61*	*0,60*
W/V	*0,34*	*0,45*	*0,43*	*0,39***	*0,40*	*0,43*	*0,44*	*0,45*	*0,44*

*voda je korigirana obzirom na vlažnost agregata, te također tijekom miješanja voda je dodana ili smanjena

**taj dan je kiša padala, te se agregat namočio

Svi sastojci pojedinih mješavina su izvagani na preciznoj vagi, te dodani u miješalicu, gdje su suho miješani 1 minutu. Zatim je postepeno dodavana voda i superplastifikator, voda se dodavala ili smanjivala prema vizualnoj procjeni.

5.6.3. Analiza eksperimentalnog dijela

5.6.3.1. Svježi beton-obradivost betona

Obradivost SCC-a je ispitana na svježem betonu. Provedena su sljedeća ispitivanja: V-lijevak, metoda razastiranja, J-ring, L-box te je izmjerena temperatura svježeg betona. Nakon ispitivanja u svježem stanju mješavine su ugrađene u standardne kalupe.

Za potrebe analize rezultata, u tablici 5.23. su dane granične vrijednosti ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju.

Tablica 5.23.: *Klasifikacija samozbijajućih betona u svježem stanju [31]*

Metoda ispitivanja	***Granične vrijednosti***	***Razred***
Rasprostiranje (mm)	*550-650*	*SF1*
	660-750	*SF2*
	760-850	*SF3*
Viskoznost t_{500}(s)	*≤2*	*VS1*
	>2	*VS2*
V-lijevak (s)	*≤8*	*VF1*
	9-25	*VF2*
L-kutija	*≥0.8*	*PA1 (2 rebra)*
		PA2 (3 rebra)
J-prsten	*≤10*	*PJ1 (2 rebra)*
		PJ2 (3 rebra)

Metoda ispitivanja V-lijevak

Tablica 5.24.: *Vrijeme istjecanje uzorka kroz V – lijevak [31]*

Mješavina	***Vrijeme istjecanja kroz lijevak (s)***	***Razred***
M1	*88,93*	-
M2	*3,19*	*VF1*
M3	*4,24*	*VF1*
M4	*5,91*	*VF1*
M5	*3,15*	*VF1*
M6	*3,65*	*VF1*
M7	*3,45*	*VF1*
M8	*6,9*	*VF1*
M9	*9,26*	*VF2*

Mješavine M2 – M8 imale su jako dobro tečenje, dok je mješavina M9 nešto duže prolazila kroz lijevak, te je klasificirana u 2. razred. Za mješavinu M1 je vrijeme prolaska kroz lijevak trajalo oko minutu i pol, te se iz toga odmah moglo zaključiti da ne spada među samozbijajuće betone.

Metoda ispitivanja rasprostiranja – slijeganja

Tablica 5.25.: *Vrijeme razastiranja i promjer razastiranja [31]*

Mješavina	t_{500} *(s)*	d_1 *(mm)*	d_2 *(mm)*	$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$	*Razred SF*	*Razred VS*
M1	*3,17*	*520*	*520*	*520*	**-*	*VS2*
M2	*0,74*	*510*	*460*	*485*	**-*	*VS1*
M3	*0,91*	*550*	*460*	*505*	**-*	*VS1*
M4	*1,23*	*560*	*570*	*565*	*SF1*	*VS1*
M5	*0,92*	*510*	*650*	*630*	*SF1*	*VS1*
M6	*0,62*	*600*	*580*	*590*	*SF1*	*VS1*
M7	*0,94*	*605*	*610*	*607,5*	*SF1*	*VS1*
M8	*1,26*	*685*	*670*	*677,5*	*SF2*	*VS1*
M9	*0,73*	*640*	*640*	*640*	*SF1*	*VS1*

* za rasprostiranje <550 mm mora se osigurati minimalno vibriranje

Samo mješavina M1 pokazuje drugačiji trend (najdulje vrijeme rasprostiranja) dok je najmanje vrijeme rasprostiranja imala mješavina M6. Mješavine M2, M3 i M4 imaju vrijeme T_{500} u rangu ostalih 5 mješavina, ali im je rasprostiranje manje. M3 i M4 su mješavine sa „bijelim šutom“ koje nakon početnog brzog rasprostiranja odjednom „zgusnu“, ali im se nakon miješanja vrati obradivost pa je vjerojatno riječ o pojavi tiksotropije. Najveći promjer razastiranja imala je mješavina M8. Sve su se mješavine jednoliko rasprostirale te nijedna nije lučila višak vode.

Metoda ispitivanja J – prstenom

Tablica 5.26.: *Rezultati ispitivanja J – prstena [31]*

Mješavina	t_{500} *(s)*	d_1	d_2	SF_j	h_{x1}	h_{x2}	h_{y1}	h_{y1}	h_0	*PJ*	*Razred*
M1	∞	*490*	*490*	*490*	*12,5*	*12*	*14*	*13,5*	*9*	*40*	-
M2	*6,78*	*475*	*435*	*455*	*13*	*12*	*12*	*11,5*	*8*	*41,25*	-
M3	*2,22*	*480*	*480*	*480*	*11,5*	*12*	*12*	*12*	*7,5*	*43,75*	-
M4	*1,73*	*545*	*560*	*552,5*	*11,5*	*12,5*	*12*	*12,5*	*9*	*31,25*	-
M5	*1,24*	*640*	*610*	*625*	*12*	*13*	*12,5*	*13*	*9,5*	*31,25*	-
M6	*1,52*	*540*	*550*	*545*	*12*	*12,5*	*12,5*	*13*	*9*	*35*	-
M7	*1,81*	*565*	*570*	*567,5*	*13*	*12,5*	*12*	*12*	*9*	*33,75*	-
M8	*1,33*	*640*	*600*	*620*	*12,5*	*12,5*	*13*	*13*	*9,5*	*32,5*	-
M9	*1,03*	*580*	*585*	*582,5*	*12,5*	*12,5*	*13*	*12,5*	*9*	*36,25*	-

*mješavina M1 nije dosegnula promjer od 500mm

Kod ovog ispitivanja nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije ispitivanja (vrijednost PJ je svim mješavinama >10mm), te se po tome nijedna mješavina ne bi mogla svrstati u samozbijajuće betone.

Metoda ispitivanja L – kutijom

Tablica 5.27.: *Rezultati ispitivanja L – kutijom [31]*

Mj.	h_1	h_2	h_3	h_{sr}	H_1	H_2	H_3	H_{sr}	$H_1 = 600 - h_{sr}$	$H_2 = 150 - h_{sr}$	$PA = \frac{H_2}{H_1}$	***Raz.***
M1	*255*	*255*	*255*	*255,00*	*150*	*150*	*150*	*150,00*	*345,00*	*0,00*	*0,00*	-
M2	*435*	*450*	*430*	*438,33*	*110*	*100*	*105*	*75,00*	*161,67*	*75,00*	*0,46*	-
M3	*450*	*455*	*440*	*448,33*	*90*	*90*	*100*	*93,33*	*151,67*	*56,67*	*0,37*	-
M4	*455*	*455*	*450*	*453,33*	*90*	*85*	*95*	*90,00*	*146,67*	*60,00*	*0,41*	-
M5	*480*	*480*	*480*	*480,00*	*70*	*70*	*70*	*70,00*	*120,00*	*80,00*	*0,67*	-
M6	*450*	*455*	*450*	*451,67*	*85*	*80*	*95*	*86,67*	*148,33*	*63,33*	*0,43*	-
M7	*475*	*475*	*470*	*473,33*	*75*	*75*	*75*	*75,00*	*126,67*	*75,00*	*0,59*	-
M8	*475*	*475*	*470*	*473,33*	*75*	*70*	*80*	*75,00*	*126,67*	*75,00*	*0,59*	-
M9	*430*	*435*	*420*	*428,33*	*90*	*80*	*85*	*85,00*	*171,67*	*65,00*	*0,38*	-

Kod ovog ispitivanja također nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije, te nam to također govori da se ovakav beton ne može ugraditi bez vibriranja. Sve mješavine, osim M1 su ispunile horizontalni dio kutije dok je mješavina M5 bila najbliža ispunjavanju kriterija, međutim nedovoljno dobra.

Ispitivanje temperature i volumne mase

Tablica 5.28.: *Volumna masa svježeg betona i temperatura svježih mješavina [31]*

Mješavina	***Volumna masa svježeg betona (g)***	***Temperatura (C°)***
M1	*7997*	-*
M2	*7551*	*23*
M3	*7585*	*22,8*
M4	*7817*	*18,2*
M5	*7900*	*17,2*
M6	*7756*	*18,3*
M7	*7816*	*18,3*
M8	*7910*	*20,4*
M9	*7988*	*19,4*
MAX	*7997*	*23,0*
MIN	*7551*	*17,2*

*temperatura M1 nije zabilježena

Najveću volumnu masu imala je mješavina M1, koja je bila ekstremna u svakom ispitivanju, dok je najmanju masu imala mješavina M2. Najvišu temperaturu imala je mješavina M2, a najnižu mješavina M5.

Parametri sastava mješavina se nisu vodili po rasponima preporučenim od Europskog udruženja EFNARC za samozbijajući beton. Međutim nijedna mješavina nije imala lučenje vode, a blaga segregacija se dogodila bez obzira na preporučenu količinu filera i agregata. Nadalje, trebalo bi povećati količinu vode određenim mješavinama, povećati volumen paste te povećati količinu superplastifikatora.

5.6.3.2. Očvrsli beton-tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti

Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća ispitivala se 7, 14 i 28 dana nakon ugrađivanja. Ispitno tijelo je bilo u vodom zasićenom stanju, a površine su obrisane. Najprije je izmjerena masa i sve dimenzije ispitnog tijela te izračunata volumna masa betona. Zatim je tijelo stavljeno u prešu i opterećivano brzinom od 0,6 ± 0,4 MPa/s do sloma. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 5.29.

Talica 5.29.: *Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak [31]*

Uzorci betona/Čvrstoće	***7 dana***	***14 dana***	***28 dana***
M1	*48,5*	*58,6*	*59,5*
M2	*41,6*	*43,6*	*45,1*
M3	*43,5*	*43,5*	*51,2*
M4	*44,5*	*47,2*	*52,5*
M5	*44,0*	*50,7*	*53,2*
M6	*42,8*	*48,8*	*51,1*
M7	*43*	*46,8*	*49,5*
M8	*42,9*	*47,4*	*53,0*
M9	*43,6*	*46,1*	*53,7*

Početne čvrstoće betona variraju od 41,6 do 48,5 MPa. Najveću početnu čvrstoću ima beton M1, a najmanja pripada betonu M2. Tlačne čvrstoće nakon 14 dana variraju od 43,5 MPa do 58,6 MPa. Tu također najveću čvrstoću ima beton M1, dok najmanje imaju betoni M2 i M3. Dobivene 28 – dnevne tlačne čvrstoće kreću se u rasponu 45,1 MPa do 59,5 MPa, gdje je najveća čvrstoća betona M1, a najmanja betona M2.

Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa i izračun dinamičkog modula elastičnosti

Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti brzina ultrazvučnih valova odredio se dinamički modul elastičnosti mješavina (tablica 5.30.).

Tablica 5.30.: *Rezultati dinamičkog modula elastičnosti očvrslog betona [31]*

		M1	***M2***	***M3***	***M4***	***M5***	***M6***	***M7***	***M8***	***M9***
Dinamički modul elastičnosti (GPa)	***7 dana***	*32,6*	*28,6*	*28,5*	*31,2*	*31,3*	*30,9*	*31,1*	*30,9*	*32,5*
	14 dana	*33,8*	*30,4*	*29,8*	*32,0*	*31,7*	*32,4*	*31,6*	*32,1*	*32,8*
	28 dana	*35,7*	*30,7*	*31,8*	*32,7*	*32,5*	*32,8*	*32,7*	*33,3*	*34,1*

Dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana kreće se u rasponu od 28,5 do 32,6 GPa, nakon 14 dana se povećava na raspon od 29,8 do 33,8 GPa, a nakon 28 dana raspon mu je od 30,7 do 35,7 GPa. Najveći dinamički modul elastičnosti nakon 7, 14 i 28 dana ima beton M1.

Ispitivanje kapilarnog upijanja

Tablica 5.31.: *Kapilarno upijanje A nakon vremena t [31]*

Upijanja	***M1***	***M2***	***M3***	***M4***	***M5***	***M6***	***M7***	***M8***	***M9***
A_2	*11,0*	*16,5*	*22,0*	*16,5*	*22,0*	*27,5*	*27,5*	*27,5*	*33,0*
A_4	*11,6*	*15,5*	*19,3*	*15,5*	*19,3*	*23,2*	*23,2*	*23,2*	*30,9*
A_8	*8,2*	*13,7*	*16,5*	*16,5*	*19,2*	*19,2*	*19,2*	*19,2*	*24,7*
A_{15}	*8,0*	*10,0*	*12,0*	*12,0*	*16,0*	*16,0*	*16,0*	*16,0*	*20,0*
A_{30}	*5,7*	*8,5*	*11,3*	*11,3*	*14,1*	*12,7*	*12,7*	*14,1*	*17,0*
A_{45}	*4,6*	*8,1*	*9,2*	*11,5*	*12,7*	*11,5*	*11,5*	*13,9*	*13,9*
A_{60}	*4,0*	*7,0*	*9,0*	*11,0*	*12,0*	*10,0*	*10,0*	*12,0*	*13,0*
A_{4h}	*3,5*	*5,0*	*6,5*	*8,5*	*9,0*	*7,0*	*7,0*	*8,0*	*9,0*
A_{24h}	*1,6*	*2,7*	*3,5*	*5,1*	*5,1*	*3,9*	*3,7*	*4,5*	*4,9*

Najmanja početna upijanja ima beton M1, koji ujedno ima i najmanja upijanja i nakon 24 sata. Najveća početna upijanja ima beton M9 koji sadrži silikatnu prašinu i kameno brašno te drugačiji aditiv u odnosu na M1. Najveća upijanja nakon 24 sata imaju betoni M4 i M5. Nema jasne poveznice između količine i vrste filera sa upijanjima. Betoni bez šuta imaju najmanja upijanja (M1 i M2).

5.6.4. Zaključak

Iz ovih rezultata se može zaključiti sljedeće:

- veća količina šuta smanjuje rasprostiranje betona,
- na vrijeme rasprostiranja u J-prstenu najlošije utječe kombinacija iste količine punila od recikliranog betona i šuta,
- vrijeme istjecanja i t_{500} ne slijede istu zakonitost za obe vrste šuta: kod crvenog šuta se povećava obradivost povećanjem udjela šuta, a kod bijelog smanjuje,
- sve mješavine ne zaobilaze prepreke, te bi se kao takve teško ugradile,
- samljeveni šut ima veliku specifičnu površinu, što doprinosi ovakvim rezultatima,
- dodatak mljevenog šuta dao je prihvatljive rezultate tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti,
- svi betoni sa dodatkom šuta imaju veće upijanje u odnosu na betone bez ovakvih dodataka.

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

6.1. Uvod

Glavna sposobnost samozbijajućeg betona je da uz pomoć vlastite težine teče, zaobilazi prepreke i popunjava oplatu bez potrebe dodatnog vibriranja. To znači da bi trebao imati visoku sposobnost tečenja, dobru sposobnost zaobilaženja prepreka, dobru sposobnost punjenja te visoku segregacijsku stabilnost. Poslije skidanja oplate površina mu treba biti glatka i bez šupljina te treba zadovoljavati estetske kriterije. Samozbijajući beton treba imati dobra svojstva kako u svježem, tako i u očvrslom stanju. Svojstva samozbijanja se postižu upotrebom superplastifikatora, povećanjem udjela sitnih čestica te niskim vodocementnim faktorom.

Pasta treba biti stabilna, a uz to imati i visoku sposobnost tečenja. Taj zahtjev se može ispuniti korištenjem veziva s velikim udjelom najsitnijih čestica. Pasti se dodaju čestice sitnije od cementa kako bi istodobno bila postignuta i stabilnost i visoka sposobnost tečenja.

Mort sam za sebe također mora biti stabilan, a to se postiže upotrebom sitnog agregata s dovoljnim sadržajem zrna sitnijih od 1mm, čime se sprječava segregacija između morta i paste.

Također, i beton kao cjelina mora biti stabilan i konzistencije unutar određenih granica. [7]

Za potrebu ovog ekperimentalnog dijela rada, u laboratoriju je napravljeno 9 različitih betonskih mješavina u kojima se uobičajeno punilo zamijenilo sa recikliranim punilom (samljevenim, prosijanim betonskim kockama), te su uspoređena svojstva u svježem i očvrslom stanju. U svim je mješavinama korištena ista količina i vrsta cementa, te ista količina i vrsta agregata. Početna količina vode je ista, ali se korigirala u tijekom miješanja ovisno o vizualnoj procijeni. U svim mješavinama je korišten isti superplastifikator.

Napravljene su sljedeće mješavine:

N1 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%) i punilom od recikliranog betona s veličinom čestica <0.063mm (72%),

N2 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%) i punilom od recikliranog betona s veličinom čestica 0.063mm-0.125mm (72%),

N3 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%) i punilom od recikliranog betona s veličinom čestica 0.125mm-0.25mm (72%),

N4 – mješavina napravljena s letećim pepelom (28%) i punilom od recikliranog betona s veličinom čestica 0.125mm-0.25mm (72%),

N5 – mješavina napravljena s metakaolinom (28%) i punilom od recikliranog betona s veličinom čestica 0.125mm-0.25mm (72%),

N6 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%) i punilom od recikliranog betona s veličinom čestica 0.125mm-0.25mm (36%) i 0.25mm-0.5mm (36%),

N7 – mješavina napravljena sa silikatnom prašinom (28%) i punilom od recikliranog betona s pomiješanim veličinama čestica tj. čestice su <0.5mm (72%),

N8 – mješavina napravljena s letećim pepelom (28%) i punilom od recikliranog betona s pomiješanim veličinama čestica tj. čestice su <0.5mm (72%),

N9 – mješavina napravljena s metakaolinom (28%) i punilom od recikliranog betona s pomiješanim veličinama čestica tj. čestice su <0.5mm (72%).

Nakon izrade mješavina, provedena su sljedeća ispitivanja betona u svježem stanju: V-lijevak, metoda razastiranja, J-ring, L-box te je izmjerena temperatura svježeg betona. Zatim su mješavine ugrađene u standardne kalupe oblika kocke, dimenzija 150x150x150 mm. Nakon 24h uzorci su se izvadili iz kalupa i prebacili u vlažnu komoru, u vodu na temperaturu 20±2ºC. U vlažnoj komori su se njegovali do dana ispitivanja u očvrslom stanju. Ispitana je tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti uzoraka nakon 7 i 28 dana, te upijanje nakon 28 dana. Zatim su analizirani rezultati te se donose zaključci o svojstvima dobivenog samozbijajućeg betona.

6.2. Materijali

Za pripremu ispitnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- portland cement CEM II/A - LL 42,5 R,
- drobljeni agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm,
- superplastifikator MASTERGLENIUM SKY 629,
- silikatna prašina,
- leteći pepeo,
- metakaolin,
- reciklirani beton.

6.2.1. **Cement** [33]

Za izradu samozbijajućeg betona je korišten portland cement CEM II/A – LL 42.5 R. S obzirom da je taj cement bio pokusni tvornički cement, nedostaju podaci o njemu. Proizvođač mu je Cemex Hrvatska, a opisana su svojstva istog cementa kojem je proizvođač Cemex Češka.

Portland cement CEM II/A – LL 42.5 R, proizveden je i ispitan u skladu s europskim standardom EN 197 – 1. Cement koji uz klinker sadrži i vapnenac, a zajamčena mu je minimalna tlačna čvrstoća 42,5 MPa nakon 28 dana i minimalna rana čvrstoća od 20 MPa nakon 2 dana.

Osnovne karakteristike cementa:

- brzo povećanje početne čvrstoće i visoka konačna čvrstoća

- više topline hidratacije tijekom očvršćivanja omogućuje betoniranje u hladnoj okolini,

- prisutnost vapnenca pruža bolju obradivost.

Tablica 6.1.: *Svojstva cementa CEM II/A – LL 42.5 R [33]*

	Jedinica	***Prosjek***	***Minimum***	***Maximum***
FIZIKALNE KARAKTERISTIKE				
Specifična površina	*cm^2/g*	*3901*	*3774*	*4043*
Voda za miješanje	*%*	*29,0*	*28,4*	*29,6*
Početno vrijeme vezanja	*min.*	*224*	*185*	*270*
Konačno vrijeme vezanja	*min.*	*315*	*275*	*376*
Postojanost volumena (Le Chat.)	*mm*	*0,5*	*0,0*	*1,0*
ČVRSTOĆA				
Tlačna nakon 2 dana	*MPa*	*30,1*	*27,6*	*33,0*
Tlačna nakon 28 dana	*MPa*	*54,1*	*51,1*	*56,8*
Vlačna nakon 2 dana	*MPa*	*5,9*	*5,6*	*6,3*
Vlačna nakon 28 dana	*MPa*	*9,2*	*8,6*	*9,7*
KEMIJSKE KARAKTERISTIKE				
C_3A	*%*	*9,39*	*8,76*	*9,80*
Gubitak žarenjem	*%*	*5,17*	*4,10*	*6,02*
SO_3	*%*	*3,46*	*3,33*	*3,57*
Cl	*%*	*0,076*		
K_2O	*%*	*0,71*	*0,64*	*0,77*
Na_2O	*%*	*0,32*	*0,29*	*0,36*
Na_2O - ekvivalent	*%*	*0,79*	*0,74*	*0,86*

Preporučuje se za primjenu:

- za armirane i nearmirane betonske konstrukcije,

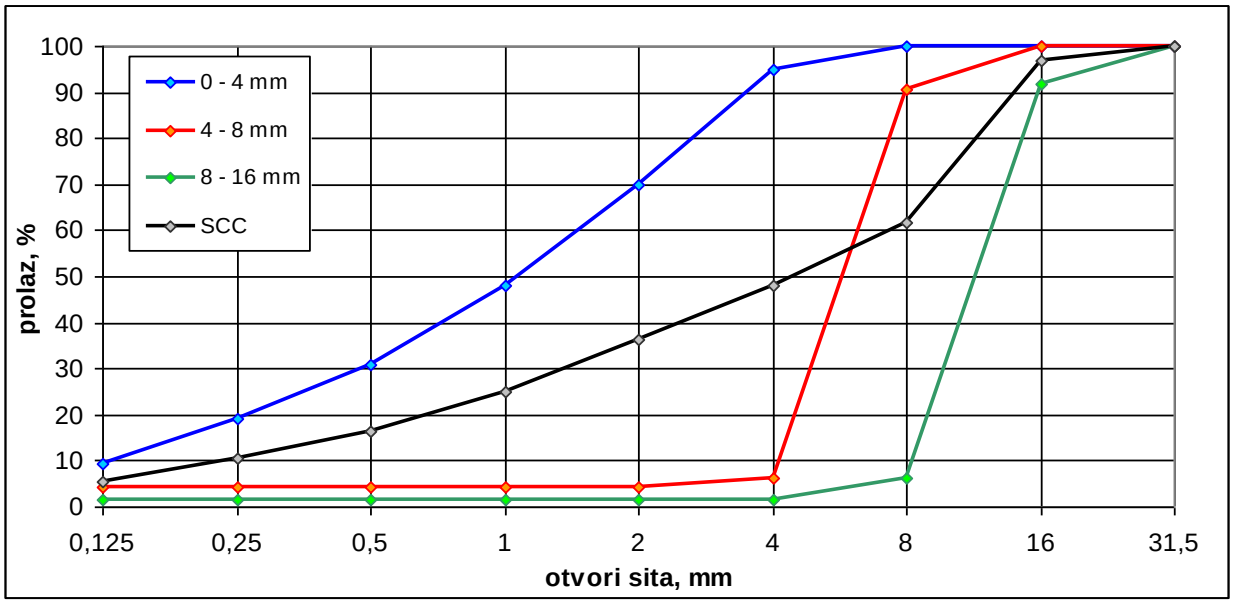
- za sve betone razreda normalnih čvrstoća,

- kod izgradnje temelja, industrijskih objekata i prefabriciranih elemenata,

- za žbuku i cementni mort.

6.2.2. Agregat

Za potrebe izrade mješavina samozbijajućeg betona korišten je drobljeni agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm, proizvođača Alas iz kamenoloma Seget. Na slici 6.1 prikazan je granulometrijski sastav za svaku frakciju i kumulativna krivulja betona.



Slika 6.1.: *Granulometrijske krivulje frakcija drobljenog agregata i betona*

6.2.3. Superplastifikatori

Superplastifikatori su pogodni za izradu betona koji iz određenih razloga treba imati visoki sadržaj veziva. U pravilu, takav beton ima preveliki sadržaj paste kao slabije komponente. Dodatkom superplastifikatora se ostvaruju velike uštede vode i cementa i time se znatno smanjuje sadržaj paste.

Daljnja primjena je za izradu betona, morta ili paste vrlo visoke čvrstoće, kada glavni cilj nije ušteda u sadržaju paste, već postizanje što veće čvrstoće. Takav beton se pravi s velikim sadržajem cementa, a dodatkom superplastifikatora se može smanjiti vodocementni faktor znatno ispod 0.40, a ponekad i ispod 0.30.

Upotrebom superplastifikatora se može izraditi stabilan tekući beton koji se zbija pod vlastitom težinom i samozaravnava, bez pojave segregacije. To je moguće zbog velike uštede vode, pri dovoljno visokom sadržaju veziva. Za izradu takvog betona treba upotrijebiti vezivo dovoljno velike finoće.

Svi superplastifikatori imaju jedan značajan nedostatak. Već oko 20 minuta nakon pripreme betona, njihovo djelovanje na svježi beton naglo slabi. To se manifestira kao veliki gubitak konzistencije betona. Međutim, istodobnim dodavanjem čistog usporivača vezanja taj nepovoljan efekt može se neutralizirati. [34]

U ovom radu korišten je superplastifikator Masterglenium sky 629.

Masterglenium sky 629 - superplastifikatori poput Gleniuma temelje se na sintetičkim organskim polimerima poput polikarboksilatnog etera (PCE). Molekula PCE-a sastoji se od jednog dugačkog glavnog lanca i kraćih bočnih lanaca. Glavni lanci molekula PCE-a negativno su nabijeni. Kada se te molekule pomiješaju sa svježim betonom, adsorbiraju se na površinu čestica koje se nalaze u betonu. Bočni lanci strše prema van, poput iglica na ljusci kestena, te drže čestice na udaljenosti jednu od druge. To im omogućava lakše kretanje te beton postaje tečniji. Svojstva betona mogu se mijenjati variranjem duljine glavnog lanca i bočnih lanaca. [35]

Specijalno je projektiran za proizvodnju reoplastičnog, reodinamičnog i SDC betona s najmanjim omjerom vode i cementa, te za održavanje konzistencije u dužem vremenskom periodu i izbjegavanje problema naknadnog dodavanja vode. U usporedbi s tradicionalnim superplastifikatorima ima znatno poboljšanje svojstava rane i konačne, te tlačne i savojne čvrstoće (u skladu sa zahtjevima EN206-1 i UNI 11104). Prikladan je za korištenje na temperaturama iznad 28º-30 ºC tj. za topla godišnja doba.

Preporučeno doziranje za MasterGlenium-a SKY 629 iznosi 0,8 do 1,4 l na 100 kg veziva. U specifičnim slučajevima se može preporučiti drugačije doziranje. [36]

Tablica 6.2.: *Tehnički podaci superplastifikatora Masterglenium Sky 629 [36]*

Tehnički podaci	
Oblik	*tekućina*
Specifična težina (g/ml pri 20°C)	*1.042 -1.082*

6.2.4. Ostali dodaci betonu

Silikatna prašina – Silikatna prašina je vrlo fini pucolanski materijal koji se sastoji uglavnom od amorfnog silicijeva dioksida koji je nastao kao nusproizvod u elektrolučnim pećima pri proizvodnji elementarnog silicija ili ferosilicijskih slitina, a koji je poznat i kao condensed silica fume (CSF).

Aktivnost CSF-a se može promatrati preko dvaju mehanizama, a to su pucolanske reakcije i učinci sitnih čestica. Sitne čestice djeluju tako da zapunjuju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa što doprinosi boljoj obradivosti i povećanju kohezivnosti. [37]

Za pripremu pokusnih mješavina koristila se Microsit H20 koja je najprikladnija za proizvodnju građevinskog materijala s posebnim svojstvima, kao što su:

- Samozbijajući betoni s visokom fluidnošću,
- Betoni i mortovi kod kojih se zahtjeva otpornost na habanje,
- Betoni i mortovi s visokom otpornošću na kemijske i fizičke utjecaje,
- Injekcijski mortovi, vrlo fina veziva za pukotinske popravke.

Doziranje im iznosi 8 – 15 % u odnosu na masu cementa. [31]

Tablica 6.3.: *Svojstva Silikatne prašine Microsit H20*

KEMIJSKE KARAKTERISTIKE	
SiO_2	*56%*
Al_2O_3	*27%*
Fe_2O_3	*5%*
CaO	*5%*
FIZIKALNE KARAKTERISTIKE	
LOI	*3,4%*
Oblik čestica	*sferni*
Specifična površina (Blain)	*6.000 cm^2/g*
Specifična gustoća	*2,47 g/cm^2*
Boja	*siva*
Potražnja za vodom	*30%*

Leteći pepeo – Leteći pepeo nastaje kao nusprodukt u modernim termoelektranama koje kao gorivo koriste sitno samljeveni ugljen. Kada ugljen dođe u peći u zonu visokih temperatura (obično između 1000 ºC i 1600 ºC), hlapljive supstance i organski sastojci sagore, a mineralna onečišćenja iz ugljena (kvarc, glina i feldspati) zaostaju kao nesagorivi ostatak. Taj nesagorivi ostatak brzim se transportom u zonu niže temperature solidificira u obliku sferičnih čestica. Dio se mineralnog ostatka anglomerira kao ložišni pepeo, a veći dio bude povučen sagorjevnim plinovima te se naziva letećim pepelom.

Za leteći pepeo važne su dvije karakteristike, a to su veličina čestica i sadržaj pucolanski aktivnog SiO_2, odnosno sadržaj kalcijeva oksida. Prema tim karakteristikama, propisuje se mogućnost uporabe letećeg pepela za daljnju primjenu.

Uporabom letećeg pepela dolazi do smanjenja sadržaja cementa u betonu, što doprinosi smanjenju troškova. Smanjuje se toplina razvijena hidratacijom te se poboljšava obradivost i trajnost betona. [37]

Metakaolin [38] – Metakaolin je mineralni dodatak s pucolanskom aktivnošću koji se dobiva proizvodnjom iz kaolinske gline. Uobičajeno se koristi u količini od 10 do 25 % u odnosu na masu cementa. Ekološka prihvatljivost toga dodatka očituje se u činjenici da pri proizvodnji metakaolina dolazi do znatno manje emisije CO_2 nego pri proizvodnji cementa. Ovaj podatak posebno dobiva na važnosti ako se zna da 5 do 7 % ukupne svjetske emisije CO_2 dolazi uslijed proizvodnje cementa. Rezultati ispitivanja pokazuju da dodatak metakaolina u beton poboljšava mehanička svojstva i trajnost običnog betona. Provedena istraživanja potvrdila su da metakaolin u samozbijajućem betonu poboljšava rane tlačne čvrstoće te određena svojstva trajnosti (otpornost na mraz i sol, vodoupojnost). Pokusna proizvodnja potvrdila je prikladnost samozbijajućeg betona s dodatkom 17.5 % metakaolina na masu cementa za izradu predgotovljenih betonskih elemenata.

S obzirom na navedeno, njegov utjecaj na svojstva betona je sljedeći:

- smanjuje ukupnu količinu pora te se postiže veća gustoća i otpornost na kiseline,

- dodatkom do 15 % metakaolina na masu veziva značajno se povećava tlačna čvrstoća i otpornost betona na sulfate,

- ima veliku otpornost na soli te je pogodan za korištenje u konstrukcijama koje se nalaze u moru ili uz more,

- kod malih vodovezivnih omjera pokazuje jako dobru otpornost na smrzavanje i odmrzavanje,

- prilikom proizvodnje metakaolina emisija CO_2 je daleko manja nego kod proizvodnje cementa, čime postaje i ekološki prihvatljiviji. [3]

Reciklirani beton – nastao je mljevenjem ispitnih betonskih kocaka. Nakon toga se prosijavao na sitima otvora 0.5, 0.25, 0.125 i 0.063mm, te se koristio kao punilo s različitim frakcijama: <0.063mm, 0.063-0.125mm, 0.125-0.25mm, 0.25-0.5mm. Tri zadnje mješavine su napravljene s izmiješanima frakcijama, tj.s frakcijom <0.5mm. Na slici 6.2. i 6.3. su prikazane navedene frakcije punila.



Slika 6.2.: *Frakcije punila: <0.063mm i 0.063-0.125mm*



Slika 6.3.: *Frakcije punila: 0.125-0.25mm i 0.25-0.5mm*

6.3. Sastav betonskih mješavina

Izrađeno je 9 mješavina betona (N1 – N9). Sve pripremljene mješavine sadrže sitnu (0 – 4 mm) i krupnu (4 – 8 i 8 – 16 mm) frakciju drobljenog agregata, a količina cementa je u svim mješavinama jednaka. Također, sve mješavine su napravljene s dodatkom superplastifikatora MasterGlenium Sky 629 u količini od 1% na masu veziva.

Polazni vodocementni faktor ispitnih mješavina je iznosio 0.51, ali se tijekom miješanja (ovisno o vizualnoj procjeni) povećavao ili smanjivao.

Sastav betonskih mješavina za 1 m^3 betona je prikazan u tablici 6.4, a za jedno laboratorijsko miješanje je prikazano u tablici 6.5. Iz svake mješavine je proizašlo 5 ispitnih uzoraka potrebnih za ispitivanja u očvrslom stanju.

Tablica 6.4.: *Sastav mješavina za 1m^3 betona*

Sastav (kg)		***N1***	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
Cement		360	360	360	360	360	360	360	360	360
Voda		183	183	183	183	183	183	183	183	183
W/C		0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Punilo (reciklirani beton)	***<0.063***	92,88	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,063-0,125	0	92,88	0	0	0	0	0	0	0
	0,125-0,25	0	0	92,88	92,88	92,88	46,44	0	0	0
	0,25-0,5	0	0	0	0	0	46,44	0	0	0
	mix	0	0	0	0	0	0	92,88	92,88	92,88
Silikatna prašina		36	36	36	0	0	36	36	0	0
Letići pepeo		0	0	0	36	0	0	0	36	0
Metakaolin		0	0	0	0	36	0	0	0	36
Agregat 0-4 mm		810,45	810,45	810,45	810,45	810,45	810,45	810,45	810,45	810,45
Agregat 4-8 mm		161,57	161,57	161,57	161,57	161,57	161,57	161,57	161,57	161,57
Agregat 8-16 mm		649,47	649,47	649,47	649,47	649,47	649,47	649,47	649,47	649,47
Superplastifikator (Glenium) 1%		3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96
Voda*		197,85	210,98	208,78	218,19	211,36	230,46	236,62	225,62	217,89
W/C*		0,55	0,59	0,58	0,61	0,59	0,64	0,66	0,63	0,61
W/V		0,40	0,43	0,43	0,45	0,43	0,47	0,48	0,46	0,45

*voda je korigirana tijekom miješanja

Tablica 6.5.: *Sastav betonskih mješavina za jedno laboratorijsko miješanje*

Sastav (kg)		***N1***	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
Cement		6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84
Voda		3,477	3,477	3,477	3,477	3,477	3,477	3,477	3,477	3,477
W/C		0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Punilo (reciklirani beton)	***<0.063***	1,7647	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,063-0,125	0	1,7647	0	0	0	0	0	0	0
	0,125-0,25	0	0	1,7647	1,7647	1,7647	0,8824	0	0	0
	0,25-0,5	0	0	0	0	0	0,8824	0	0	0
	mix	0	0	0	0	0	0	1,7647	1,7647	1,7647
Silikatna prašina		0,684	0,684	0,684	0	0	0,684	0,684	0	0
Letići pepeo		0	0	0	0,684	0	0	0	0,684	0
Metakaolin		0	0	0	0	0,684	0	0	0	0,684
Agregat 0-4 mm		15,399	15,399	15,399	15,399	15,399	15,399	15,399	15,399	15,399
Agregat 4-8 mm		3,0698	3,0698	3,0698	3,0698	3,0698	3,0698	3,0698	3,0698	3,0698
Agregat 8-16 mm		12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339	12,339
Superplastifikator (Glenium) 1%		0,0752	0,0752	0,0752	0,0752	0,0752	0,0752	0,0752	0,0752	0,0752
Voda*		3,7591	4,0086	3,9668	4,1457	4,0159	4,3787	4,4957	4,2867	4,14
W/C*		0,55	0,59	0,58	0,61	0,59	0,64	0,66	0,63	0,61
W/V		0,40	0,43	0,43	0,45	0,43	0,47	0,48	0,46	0,45

*voda je korigirana tijekom miješanja

Sastav samozbijajućeg betona s dodatkom punila od recikliranog betona se usporedio s preporučenim vrijednostima prema EFNARC-u, što je prikazano u tablici 6.6. [39]

Iz tablice se vidi da se nisu svi parametri sastava samozbijajućeg betona vodili prema preporučenim vrijednostima od EFNARC-a.

U nastavku će se analizirati koliko će ta odstupanja imati utjecaja na svojstva samozbijajućeg betona. Potrebno je napomenuti da se nije u obzir uzela količina vode koju upije punilo.

Tablica 6.6.: *Preporučene vrijednosti prema EFNARC-u [39]*

Parametar sastava	***Preporuka***	***N1***	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
Krupni agregat (kg/m³)	750 - 1000	811,04	811,04	811,04	811,04	811,04	811,04	811,04	811,04	811,04
Masa sitnog agregata/uk. agregat (%)	48 – 55%	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Volumen paste (l/m³)	300 – 380	312	312	312	312	312	312	312	312	312
Masa praškaste komponente (kg)	380 - 600	488,88	488,88	488,88	488,88	488,88	488,88	488,88	488,88	488,88
Volumen praškaste komponente (m³)		170	170	170	170	170	170	170	170	170
Voda (kg)	150 - 210	197,85	210,98	208,78	218,19	211,36	230,46	236,62	225,62	217,89
v/p	0,85 – 1,10	1,16	1,24	1,23	1,28	1,24	1,36	1,39	1,33	1,28

6.4. Način priprave pokusnih mješavina

Sastojci mješavina su se izvagali na preciznoj vagi nakon čega su dodani u miješalicu gdje su suho miješani 1 minutu. Zatim se postepeno dodavala voda prema vizualnoj procjeni, te superplastifikator.

N1 - Ova mješavina je sa silikatnom prašinom i punilom od recikliranog betona frakcije <0.063mm, a pri miješanju je dodano više vode nego što je planirano.

N2 - Ova mješavina je također sa silikatnom prašinom, te sa punilom od recikliranog betona frakcije 0.063 – 0.125mm. Pri miješanju je isto dodano više vode nego što je planirano.

N3 - Kod ove mješavine, koja je sadržavala punilo od recikliranog betona veličine frakcije 0.125 - 0.25mm i silikatnu prašinu, također je dodano više vode od prvotno planiranog.

N4 - Ova mješavina je ponovno sadržavala punilo od recikliranog betona veličine frakcije 0.125 – 0.25mm. Međutim, za razliku od prethodnih mješavina, nije sadržavala silikatnu prašinu nego leteći pepeo. Pri miješanju je isto dodano više vode nego što je planirano.

N5 - Ova mješavina je isto sadržavala punilo od recikliranog betona frakcije 0.125 – 0.25mm. Međutim, ovdje je kao dodatak korišten metakaolin. Pri miješanju je dodano više vode nego što je planirano.

N6 - Ova mješavina je sa silikatnom prašinom i punilom od recikliranog betona s frakcijama 0.125 – 0.25mm i 0.25 – 0.5mm, a pri miješanju je dodano više vode nego što je planirano.

N7 - Ova mješavina je ponovno sa silikatnom prašinom. Međutim, napravljena je s ostatkom punila od recikliranog betona tj.s izmiješanim frakcijama. Pri miješanju je dodano više vode nego što je planirano.

N8 - Ova mješavina je također napravljena s izmiješanim frakcijama, a kao dodatak se koristio leteći pepeo. Pri miješanju je isto dodano više vode od planiranog.

N9 - Ova mješavina je isto napravljena s izmiješanim frakcijama, a kao dodatak se koristio metakaolin. Također je dodano više vode od nego što je planirano.



Slika 6.4.: *Laboratorijska mješalica*

6.5. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata svježeg betona

Ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona provedena su prema nizu europskih normi HRN EN 12350 8-12, te su sva ispitivanja provedena u laboratorijskim uvjetima s opremom prema pravilima koja propisuju norme. Metode ispitivanja svježeg betona su opisane u poglavlju 4.1. Kako bi se analizirali rezultati provedenih ispitivanja, u tablici 6.7. su dane granične vrijednosti ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju.

Tablica 6.7.: *Klasifikacija samozbijajućih betona u svježem stanju[39]*

Metoda ispitivanja	***Granične vrijednosti***	***Razred***
Rasprostiranje (mm)	*550-650*	*SF1*
	660-750	*SF2*
	760-850	*SF3*
Viskoznost t_{500}(s)	*≤2*	*VS1*
	>2	*VS2*
V-lijevak (s)	*≤8*	*VF1*
	9-25	*VF2*
L-kutija	*≥0,8*	*PA1 (2 rebra)*
		PA2 (3 rebra)
J-prsten	*≤10*	*PJ1 (2 rebra)*
		PJ2 (3 rebra)

U tablici 6.8. prikazani su preporučeni razredi za različitu primjenu prema konstruktivnim elementima. Ovu preporuku dalo je Europsko udruženje proizvođača samozbijajućih betona EFNARC 2005 godine.

Tablica 6.8: *Primjena SZB prema razredima konzistencije za različite konstruktivne elemente[39]*

<table>
<tr><td>Viskoznost</td><td></td><td></td><td></td><td>Otpornost segregacije (SR) / sposobnost prolaženja (PA)</td></tr>
<tr><td>VS2 (t_{500})
VF2 (v-lijevak)</td><td>Ploče u nagibu</td><td>Zidovi i stupovi</td><td>Visoki i tanki elementi</td><td>Odrediti PA (l-box) za SF1 i SF2</td></tr>
<tr><td>VS1 ili VS2
VF1 ili VF2 ili ciljane vrijednosti</td><td></td><td>Zidovi i stupovi</td><td>Visoki i tanki elementi</td><td>Odrediti SR za SF3</td></tr>
<tr><td>VS1 (t_{500})
VF1 (v-lijevak)</td><td colspan="3">Podovi i ploče</td><td>Odrediti SR za SF2 i SF3</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>SF1</td><td>SF2</td><td>SF3</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">Rasprostiranje slijeganjem</td></tr>
</table>

6.5.1. Metoda ispitivanja V-lijevak

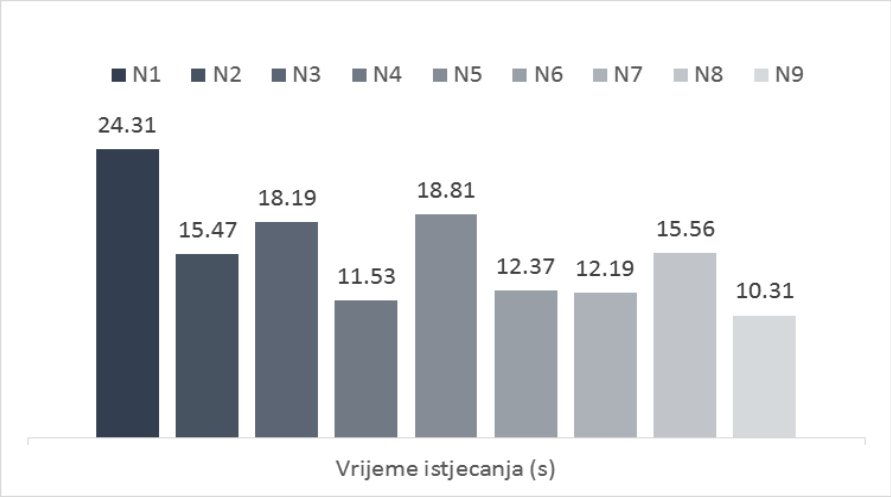
Prvo ispitivanje nakon miješanja betona je ispitivanje vremena istjecanja betona iz V – lijevka, a koristi se za određivanje viskoznosti i svojstava popunjavanja samozbijajućeg betona. Na slici 6.6. prikazano je istjecanje mješavine M8 iz V - lijevka.

U tablici 6.9. i na slici 6.7. prikazani su rezultati ispitivanja istjecanja iz V – lijevka.

Tablica 6.9.: *Vrijeme istjecanje uzorka kroz V – lijevak*

Mješavina	***Vrijeme istjecanja kroz V-lijevak (s)***	***Razred***
N1	24,31	VF2
N2	15,47	VF2
N3	18,19	VF2
N4	11,53	VF2
N5	18,81	VF2
N6	12,37	VF2
N7	12,19	VF2
N8	15,56	VF2
N9	10,31	VF2

Sve mješavine N1 – N9 su pokazale rezultate istjecanja koji se svrstavaju u razred VF2. Iako sve mješavine odgovaraju razredu VF2, kod mješavina N1, N3 i N5 se javlja jako sporo tečenje za potrebe dobrog samozbijajućeg betona. Mješavine N1 i N3 si imale silikatnu prašinu kao dodatak, a mješavina N5 metakaolin. Ovakav rezultat mješavine N1 koja sadrži silikatnu prašinu i punilo frakcije <0.063mm objašnjava se činjenicom da upravo ona ima najveću specifičnu površinu veziva. Najbolje rezultate istjecanja ima mješavina N9 s dodatkom metakaolina i s punilom od recikliranog betona s izmiješanim frakcijama, iako i ona spada u razred VF2.



Slika 6.5.: *Vrijeme istjecanja uzoraka kroz V – lijevak*

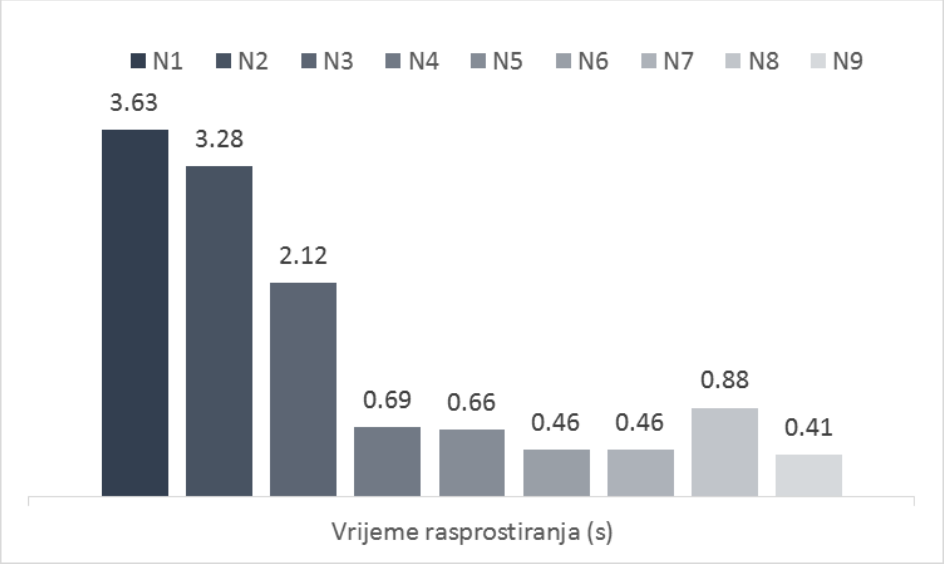
6.5.2. Metoda ispitivanja rasprostiranja – slijeganja

U tablici 6.10. i na slikama 6.6., 6.7. i 6.8. prikazani su rezultati ispitivanja razastiranja.

Tablica 6.10.: *Vrijeme razastiranja i promjer razastiranja*

Mješavina	t_{500} *(s)*	d_1 *(mm)*	d_2 *(mm)*	$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$	*Razred SF*	*Razred VS*
N1	3,63	460	470	465	*-	VS2
N2	3,28	420	470	445	*-	VS2
N3	2,12	520	530	525	*-	VS2
N4	0,69	730	740	735	SF2	VS1
N5	0,66	625	620	622,5	SF1	VS1
N6	0,46	605	610	607,5	SF1	VS1
N7	0,46	610	610	610	SF1	VS1
N8	0,88	690	690	690	SF2	VS1
N9	0,41	680	700	690	SF2	VS1

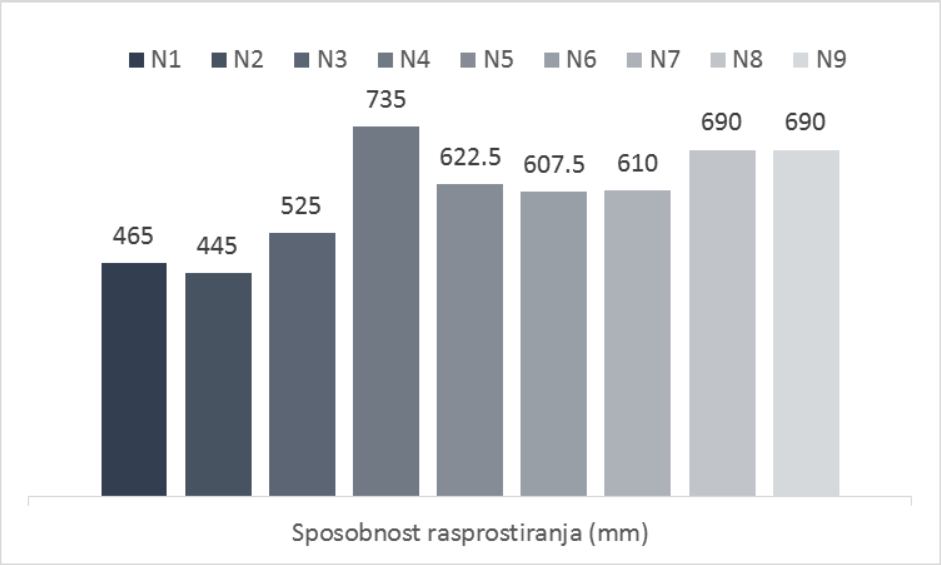
* za rasprostiranje <550 mm mora se osigurati minimalno vibriranje



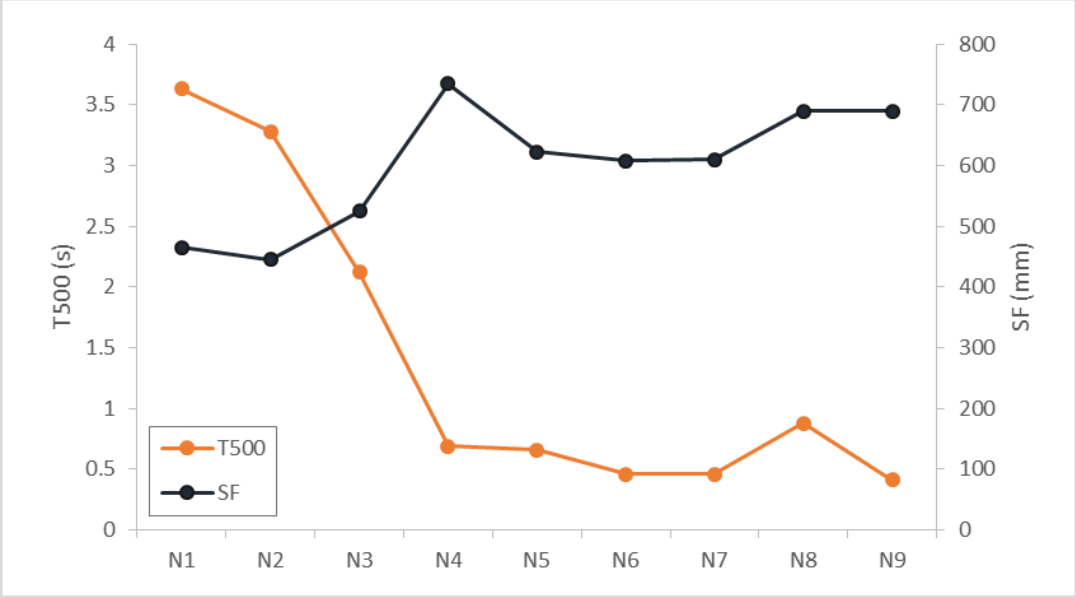
Slika 6.6.: *Grafički prikaz vremena rasprostiranja*

Ako se rezultati ispitivanja prikažu na zajedničkom grafu kao što je napravljeno na slici 6.8., tada je vidljivo da mješavine N1, N2 i N3 pokazuju drugačiji trend tj. najdulje vrijeme rasprostiranja i najmanju sposobnost rasprostiranja. Kod ostalih mješavina se linije vremena rasprostiranja i promjera rasprostiranja na neki način prate. Mješavine N1, N2 i N3 imaju silikatnu

prašinu kao dodatak, a punilo od recikliranog betona im je različitih frakcija tj. kod N1 je <0.063mm, kod N2 0.063 – 0.125mm, a kod N3 0.125 – 0.25mm. Nadalje, te mješavine nisu ni zadovoljile s rezultatima rasprostiranja što upućuje na smanjenu sposobnost deformiranja betona, odnosno popunjavanja betona bez potrebe za vibriranjem. Mješavine N3, N4 i N5 imaju sličan sastav mješavina, razlikuju se jedino u vrsti dodatka. Kao dodaci su korišteni redom silikatna prašina, leteći pepeo i metakaolin, te mješavine s letećim pepelom (N4) i metakaolinom (N5) pokazuju da su puno pokretljivije i u vremena istjecanja kao i u vremenu rasprostiranja. Najveći promjer razastiranja imala je mješavina N4, a kod mješavine N1 je uočena pojava tiksotropije (slika 6.11.). Kod mješavina N8 i N9 je došlo do izlučivanja vode (slika 6.10.).



Slika 6.7..: *Grafički prikaz promjera rasprostiranja*



Slika 6.8.: *Vrijeme rasprostiranja i promjer rasprostiranja*



Slika 6.9.: *Rasprostiranje mješavine N1 (nema lučenja vode)*



Slika 6.10.: *Rasprostiranje mješavine N8 (izlučivanje vode)*



Slika 6.11.: *Zgušnjavanje mješavine N1 - tiksotropija*

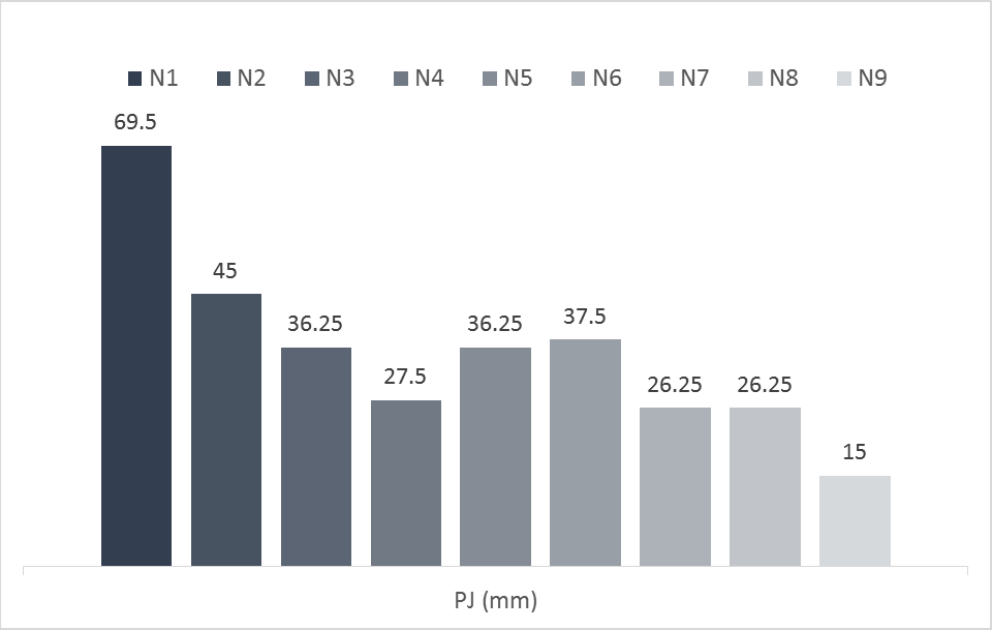
6.5.3. Metoda ispitivanja J – prstenom

U tablici 6.11. i na slikama 6.12. i 6.13. prikazani su rezultati ispitivanja sa J – prstenom.

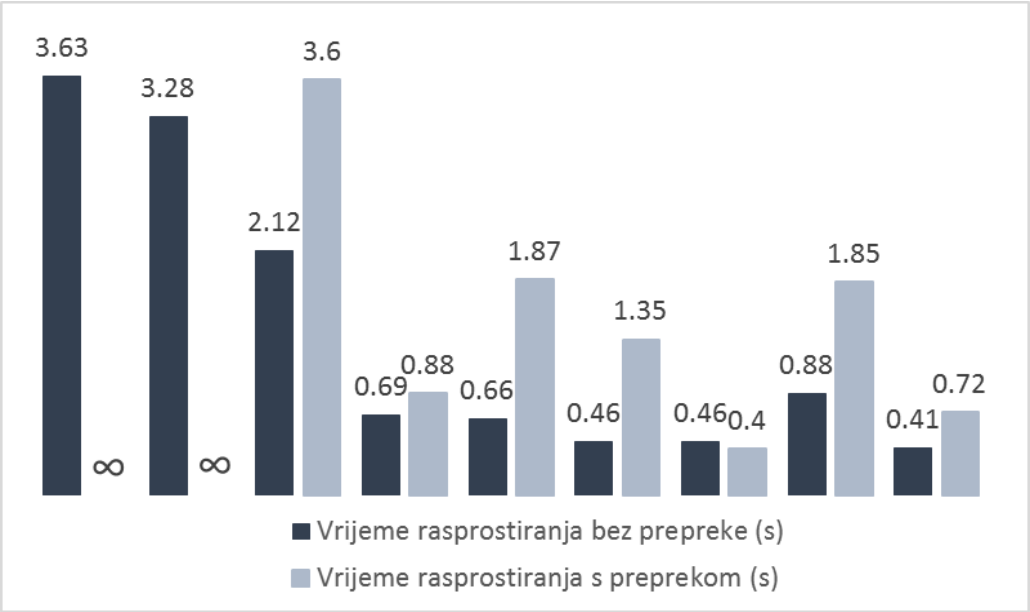
***Tablica 6.11.*:** Rezultati ispitivanja J - prstena

Mješavina	t_{500} *(s)*	d_1	d_2	SF_j	Δh_{x1}	Δh_{x2}	Δh_{y1}	Δh_{y2}	Δh_0	*PJ*	*Razred*
N1	∞	375	390	382,5	115	125	125	105	48	69,5	-
N2	∞	400	410	405	115	115	110	120	70	45	-
N3	3,6	440	480	460	115	120	110	120	80	36,25	-
N4	0,88	645	705	675	130	125	125	130	100	27,5	-
N5	1,87	560	570	565	125	125	120	115	85	36,25	-
N6	1,35	540	580	560	125	130	120	115	85	37,5	-
N7	0,40	590	600	595	120	115	125	125	95	26,25	-
N8	1,85	660	650	655	125	125	125	130	100	26,25	-
N9	0,72	710	705	707,5	125	125	125	125	110	15	-

*mješavine N1 i N2 nisu dosegnule promjer od 500mm

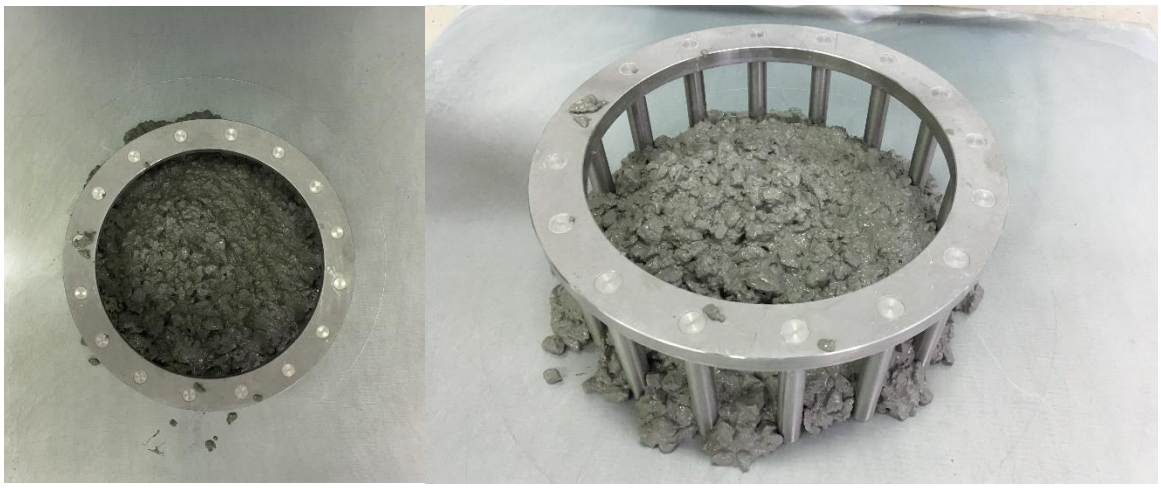


***Slika 6.12.**: Grafički prikaz rezultata ispitivanja J – prstenom*



Slika 6.13.: *Grafički prikaz usporedbe vremena rasprostiranja bez prepreke i sa preprekom*

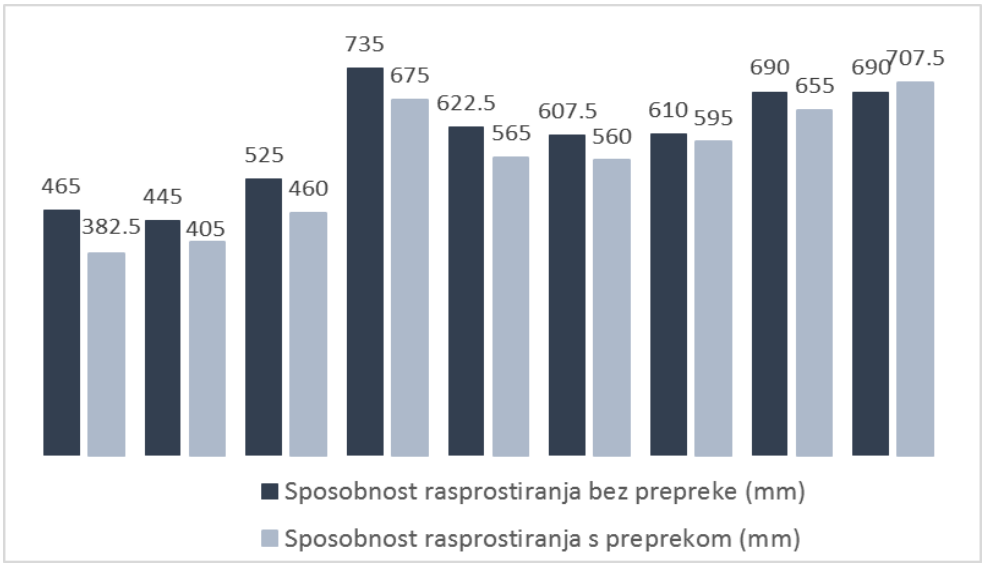
Kod ovog ispitivanja nijedna mješavina od njih devet nije zadovoljila kriterije ispitivanja (vrijednost PJ je svim mješavinama veća od 10mm), te se po tome nijedna mješavina ne bi mogla svrstati u samozbijajuće betone. Najbrže vrijeme rasprostiranja imala je mješavina N7, koja je imala dodatak punila od recikliranog betona s izmiješanim veličinama frakcija (<0.5mm) i silikatnu prašinu. Slijedi je mješavina N9 koja je isto napravljena s punilom od izmiješanih veličina frakcija (<0.5mm) i s metakaolinom, te mješavina N4 koja je kao dodatak imala punilo s veličinom frakcija 0.125 – 0.25mm i leteći pepeo. Najsporije tečenje imale su mješavine N1 i N2, obe sa silikatnom prašinom. Najveći promjer razastiranja imala je već spomenuta mješavina N9 koja je napravljena s punilom od izmiješanih veličina frakcija (<0.5mm) i s metakaolinom. Na slici 6.12. je također vidljivo kako vrijednost PJ opada kod mješavina N1, N2 i N3, kako im se povećava veličina frakcije dodanog punila (sve tri mješavine su sa silikatnom prašinom). Logično je bilo za očekivati da će vrijeme rasprostiranja s preprekom biti dulje od istog bez prepreke (slika 6.13.), isto tako da će sposobnost rasprostiranja biti veća bez prepreke, odnosno manja sa preprekom (slika 6.16.). Međutim, u idealnim uvjetima te vrijednosti ne bi trebale imati veliku razliku. Najveće blokiranje agregata na J-prstenu ima mješavina N1 koja nije imala sposobnost tečenja (slika 6.12. i 6.14.). Najveću razliku u vremenu ima mješavina N1, dok najmanju ima mješavina N7. Obe su napravljene sa silikatnom prašinom, međutim kod N1 su korištene frakcije punila <0.063mm, a kod N7 izmješane frakcije punila (<0.5mm). Najmanju razliku u rasprostiranju ponovno ima mješavina N7, dok najveću ima N1. Na slici 6.15. vidljivo je kako su krupna zrna agregata zapela o prepreku prstena.



Slika 6.14.: *Ispitivanje J-ringa (mješavina N1)*



Slika 6.15.: *Ispitivanje J-ringa (mješavina N8)*



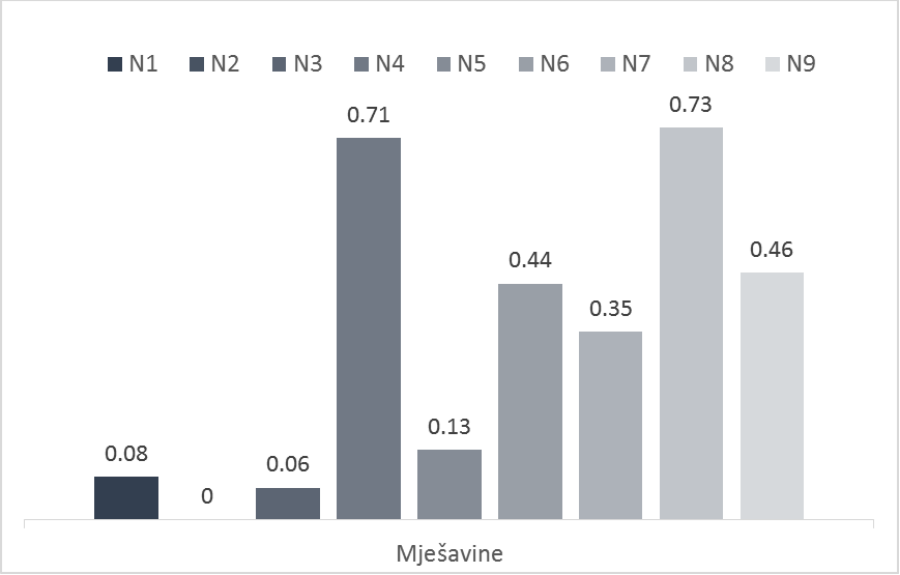
Slika 6.16.: *Grafički prikaz usporedbe sposobnosti rasprostiranja bez prepreke i sa preprekom*

6.5.4. Metoda ispitivanja L – kutijom

Rezultati ispitivanja L – kutijom prikazani su u tablici 6.12. i na slici 6.17.

Tablica 6.12.: *Rezultati ispitivanja L – kutijom*

Mješavina	H_1	H_2	H_3	H_{sr}	h_1	h_2	h_3	h_{sr}	$H_1=600-H_{sr}$	$H_2=150-h_{sr}$	$PA = \frac{H_2}{H_1}$	Razred
N1	380	390	395	388,33	140	130	130	133,33	211,67	16,67	0,08	-
N2	200	210	200	203,33	150	150	150	150,00	396,67	0,00	0,00	-
N3	295	305	295	298,33	135	125	135	131,67	301,67	18,33	0,06	-
N4	490	485	480	485,00	65	70	70	68,33	115,00	81,67	0,71	-
N5	460	445	440	448,33	90	85	100	91,67	151,67	58,33	0,13	-
N6	450	455	450	451,67	85	80	90	85,00	148,33	65	0,44	-
N7	445	450	440	445,00	100	85	100	95,00	155,00	55,00	0,35	-
N8	500	485	480	488,33	70	65	70	68,33	111,67	81,67	0,73	-
N9	420	440	420	426,67	70	70	70	70,00	173,33	80,00	0,46	-



Slika 6.17.: *Grafički prikaz rezultata ispitivanja L – kutijom*

Kod ovog ispitivanja također nijedna mješavina nije zadovoljila kriterije ispitivanja što ukazuje da se ovakav beton ne može ugraditi bez vibriranja. Sve mješavine, osim N2 su ispunile horizontalni dio kutije. Na slici 6.18. je vidljivo izrazito blokiranje agregata kod mješavine N2, s

nemogućnošću popunjavanja horizontalnog dijela L-kutije. Mješavine N4 i N8 su bile najbliže ispunjavanju kriterija, međutim isto nedovoljno dobre. Obe mješavine su napravljene s dodatkom letećeg pepela, a prikazane su na slici 6.19.



Slika 6.18.: *Ispitivanje L – kutijom (mješavina N2)*



Slika 6.19.: *Ispitivanje L – kutijom (mješavine N4 i N8)*

Na slici 6.20. se uočava da se krupni drobljeni agregat skoro pa čitav zadržao na šipkama kod mješavine N9, te je vidljiva izlučena voda na horizontalnom dijelu L-kutije. Krupni agregat se nakupio na donjem vertikalnom dijela L-kutije, tako da je prilikom otpuštanja pregrade cijeli agregat kao cjelina pao na dno s nemogućnošću prolaza kroz šipke armature. Ovo upućuje na važnost određivanja maksimalnog zrna agregata u mješavini, a posebno na funkciju morta u SZB-u. Važno je da sva zrna nesmetano prođu kroz prepreke i popune razne složene oblike betona zahtijevane projektom.



Slika 6.20.: *Ispitivanje L – kutijom (mješavina N9)*



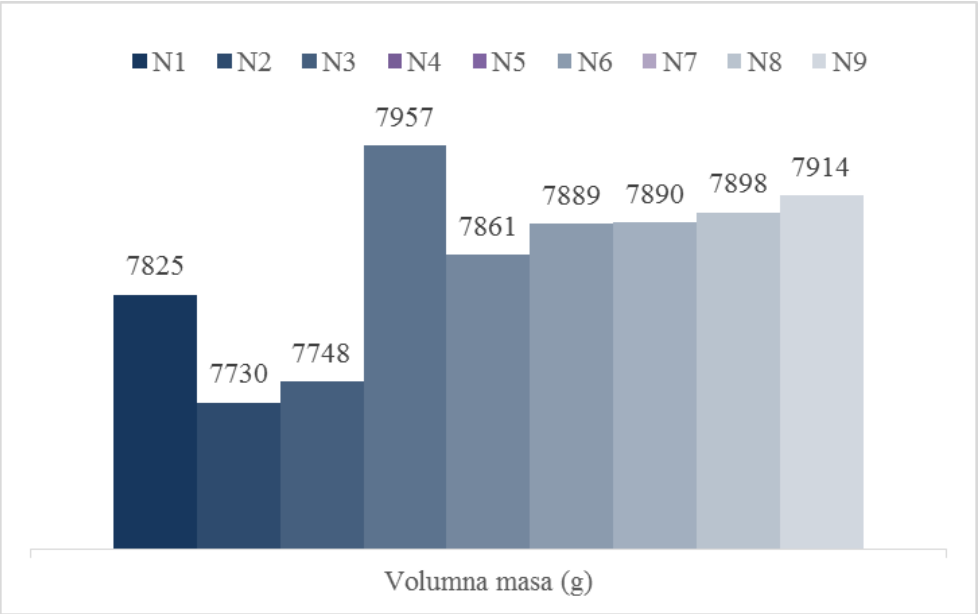
Slika 6.21.: *Zadržavanje krupnog agregata na šipkama (mješavina N9)*

6.5.5. Ispitivanje temperature i volumne mase

Na kraju ispitivanja betona u svježem stanju određena je volumna masa i temperatura svake mješavine. Nakon toga su se mješavine ugrađivale u standardne kalupe oblika kocke. Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 6.13. i na slikama 6.22. i 6.23.

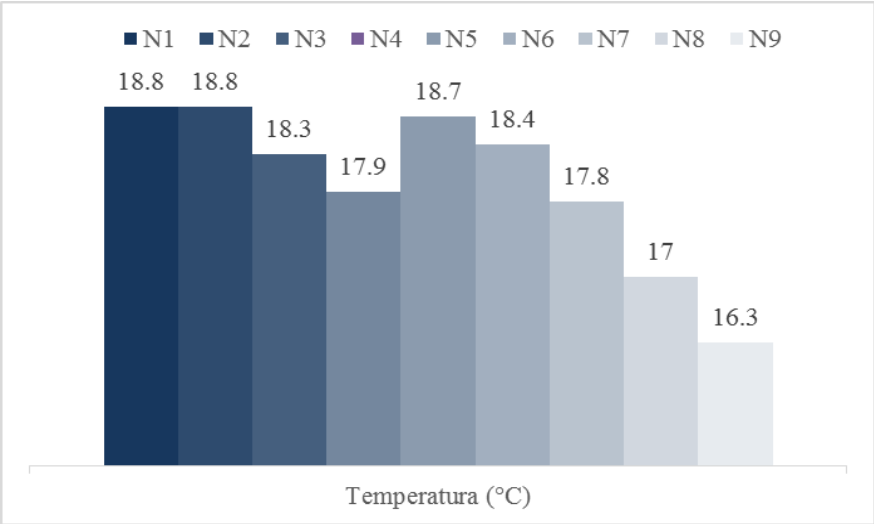
Tablica 6.13.: *Volumna masa svježeg betona i temperatura svježih mješavina*

Mješavina	***Volummna masa svježeg betona (g)***	***Temperatura (°C)***
N1	7825	18.8
N2	7730	18.8
N3	7748	18.3
N4	7957	17.9
N5	7861	18.7
N6	7889	18.4
N7	7890	17.8
N8	7898	17
N9	7914	16.3
MAX	7957	18.8
MIN	7730	16.3



Slika 6.22.: *Grafički prikaz volumnih masa svježih mješavina*

Najveću volumnu masu imala je mješavina N4 koja je napravljena s dodatkom letećeg pepela i punilom od recikliranog betona s frakcijom 0.125-0.25mm, a najmanju je imala mješavina N2 koja je napravljena s dodatkom silikatne prašine i punilom frakcije 0.063-0.125mm.



Slika 6.23.: *Grafički prikaz temperatura svježih mješavina*

Najvišu temperaturu su imale mješavine N1 i N2, obe napravljene sa silikatnom prašinom. Kod mješavine N1 je korišteno punilo frakcije <0.063mm, a kod N2 0.063-0.125mm. Najmanju temperaturu je imala mješavina N9, napravljena s dodatkom metakaolina te s izmiješanim frakcijama punila (<0.5mm).

6.6. Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona

U tablici 6.14. su prikazani mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona, a u tablici 6.15. korektivne mjere za neke nepravilnosti te njihov utjecaj na svojstva.

Tablica 6.14.:*Mogući uzroci lošim svojstvima samozbijajućeg betona [39]*

Ispitivanje	***Rezultati manji od***	***Mogući uzrok***	***Rezultati veći od***	***Mogući uzrok***
Rasprostiranje slijeganjem	*650 mm*	*prevelika viskoznost* *visoka granica tečenja*	*750 mm*	*premala viskoznost* *segregacija*
T_{500} vrijeme rasprostiranja	*2s*	*premala viskoznost*	*5s*	*prevelika viskoznost* *visoka granica tečenja*
V - lijevak	*8s*	*premala viskoznost*	*12s*	*prevelika viskoznost* *visoka granica tečenja* *blokiranje*
J - prsten		*prevelika viskoznost* *visoka granica tečenja* *segregacija* *blokiranje*	*10mm*	*premala viskoznost* *segregacija*
L - kutija	*0,8*	*prevelika viskoznost* *visoka granica tečenja* *blokiranje*	*1*	*pogreška u rezultatu*

Tablica 6.15.: *Korektivne mjere lošim svojstvima samozbijajućeg betona [39]*

Moguća poboljšanja	***Utjecaj na:***			
Prevelika viskoznost	***Sposobnost popunjavanja***	***Sposobnost zaobilaženja prepreka***	***Otpornost segregaciji***	***Čvrstoća***
povećati količinu vode	+	+	-	-
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati količinu superplast.	+	+	-	+
Premala viskoznost				
smanjti količinu vode	-	-	+	+
smanjiti volumen paste	-	-	-	-
povećati kol. modifika. visk.	-	-	+	-
smanjiti količinu superplast.	-	-	+	0
koristiti sitnije prašk. komp.	+	+	+	0
koristiti sitniji pijesak	+	+	+	0
Previsoka granica tečenja				
povećati količinu superplast.	+	+	-	+
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati volumen morta	+	+	+	+
Segregacija				
povećati volumen paste	+	+	+	+
povećati volumen morta	+	+	+	+
smanjiti količinu vode	-	-	+	+
koristiti sitnije praškaste ko.	+	+	+	0
Ubrzano smanjenje obradivosti				
koristiti sporijevezujući cem.	0	0	-	-
povećati količinu usporivača	0	0	-	-
koristiti drugu vrstu superpl.	?	?	?	?
izmijeniti količ. filera i cem.	?	?	?	?
Blokiranje				
smanjiti maksimalno zrno ag.	+	+	+	-
povećati volumena paste	+	+	+	+
povećati volumen morta	+	+	+	+

\+ upućuje na bolje rezultate u odnosu na svojstva betona.

\- upućuje na lošije rezultate u odnosu na svojstva betona.

0 prikazuje da nema utjecaj na određeno svojstvo betona.

? prikazuje da se ne može predvidjeti utjecaj na svojstvo betona.

Prema tablici 6.6., parametri sastava mješavina se nisu vodili po rasponima preporučenim od Europskog udruženja EFNARC za samozbijajući beton. Primjerice, mješavine N2, N4, N5, N6, N7, N8 i N9 sadrže veću količinu vode od preporučenog, a lučenje vode su imale mješavine N8 i N9. Blaga segregacija se dogodila (vidljivo na ispitivanju J - prstena) bez obzira na preporučenu količinu filera i agregata. Međutim, trebalo bi ispitati upijanje punila i korigirati potrebe betona za vodom čime bi se količina vode dovela u preporučene raspone.

Prema tablici 6.6. trebalo bi povećati količinu vode određenim mješavinama, povećati volumen paste te povećati količinu superplastifikatora.

6.7. Rezultati ispitivanja i analiza rezultata očvrslog betona

Nakon ispitivanja betona u svježem stanju, beton je ugrađen u standardne kalupe oblika kocke dimenzija 150 mm x 150 mm x 150 mm bez zbijanja. Uzorci su u kalupu stali 24 sata, u prostoriji relativne vlažnosti zraka najmanje 95% i temperature 20 ± 3 °C. Nakon toga su izvađeni iz kalupa i čuvani u vodi do dana ispitivanja.

6.7.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

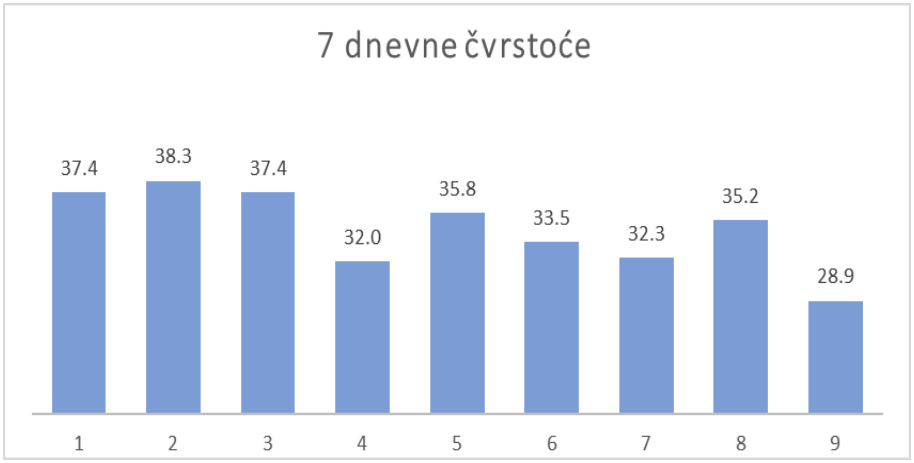
Tlačna čvrstoća se mjerila 7 i 28 dana nakon ugrađivanja. Preciznost preše, ravnost pritisnih ploča i ostalo se propisuje standardom. Uzorci su bili u vodom zasićenom stanju, a prije postavljanja u prešu površine su im obrisane. Prvo im je izmjerena masa i sve dimenzije te je izračunata volumna masa betona. Nakon toga su uzorci stavljeni u prešu i opterećivani brzinom od 0,6 ± 0,4 MPa/s do sloma (slika 6.24.). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.16. i na slikama 6.25. i 6.26.



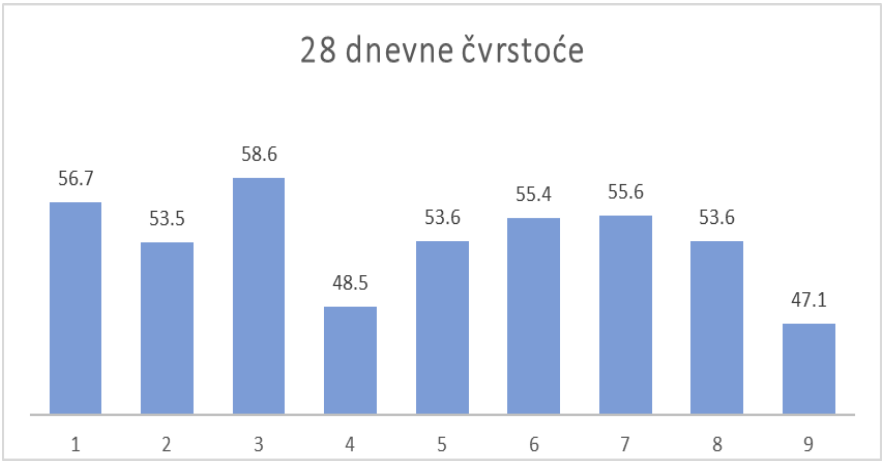
Slika 6.24.: *Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće betona*

Talica 6.16.: *Rezultati ispitivanja čvrstoće na pritisak*

Uzorci betona/Čvrstoće	***7 dana (MPa)***	***28 dana (MPa)***
N1	37,4	56,7
N2	38,3	53,5
N3	37,4	58,6
N4	32,0	48,5
N5	35,8	53,6
N6	33,5	55,4
N7	32,3	55,6
N8	35,2	53,6
N9	28,9	47,1



Slika 6.25.: *Grafički prikaz tlačnih čvrstoća nakon 7 dana*



Slika 6.26.: *Grafički prikaz tlačnih čvrstoća nakon 28 dana*

Tlačne čvrstoće nakon 7 dana variraju od 28,9 MPa do 38,3 MPa. Najveću tlačnu čvrstoću nakon 7 dana pokazuje beton N2 koji je napravljen s dodatkom silikatne prašine i punilom frakcije 0.063-0.125mm, a odmah nakon njega su mješavine N1 i N3. One su također napravljene sa silikatnom prašinom, ali s punilom frakcije <0.063mm (N1) i 0.125-0.25mm (N3). Najmanju tlačnu čvrstoću nakon 7 dana ima beton N9 koji sadrži metakaolin i punilo s izmiješanim frakcijama (<0.5mm), a slijedi ga beton N4 s letećim pepelom.

Tlačne čvrstoće nakon 28 dana variraju od 47,1 MPa do 58,6 MPa. Najveću tlačnu čvrstoću nakon 28 dana pokazuje beton N3 koji je napravljen s dodatkom silikatne prašine i punilom frakcije 0.125-0.25mm, a slijede ga mješavine N1, N6 i N7. Svim tim mješavinama koje pokazuju najbolju tlačnu čvrstoću nakon 28 dana je zajednička silikatna prašina kao dodatak. Najmanju tlačnu čvrstoću nakon 28 dana ponovno ima beton N9 koji sadrži metakaolin, te ga isto slijedi beton N4 s letećim pepelom. Za očekivati je da će uzorcima s pepelom još rasti čvrstoća. Općenito, svi betoni su postigli dobre čvrstoće s obzirom da se radi o betonima s dodatkom recikliranog otpada.

6.7.2. Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa i izračun dinamičkog modula elastičnosti

Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti brzina ultrazvučnih valova prikazanih u tablici 6.17. odredio se dinamički modul elastičnosti mješavina koji je prikazan u tablici 6.19. Na slici 6.29. je prikazan uređaj za mjerenje brzina ultrazvučnih valova. Dinamički modul elastičnosti se odredio prema sljedećoj formuli:

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

gdje je:

v - brzina ultrazvučnog vala [m/s]

ρ – gustoća betona [kg/m^3]

μ – poissonov koeficijent [μ =0.2]

Tablica 6.17.: *Rezultati brzina ultrazvučnog vala očvrslog betona*

		N1	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
Brzina ultrazvučnog vala (m/s)	***7 dana***	3896,1	3839,6	3836,3	3762,5	3816,8	3826,5	3676,5	3839,6	3655,6
	28 dana	3827,6	3720,0	3737,5	3646,7	3840,7	3690,5	3633,9	3759,4	3765,7

Analizom rezultata brzine ultrazvučnog vala nakon 28 dana svi betoni se mogu klasificirati kao vrlo kvalitetni betoni. Najveću brzinu nakon 28 dana je postigao beton N5.

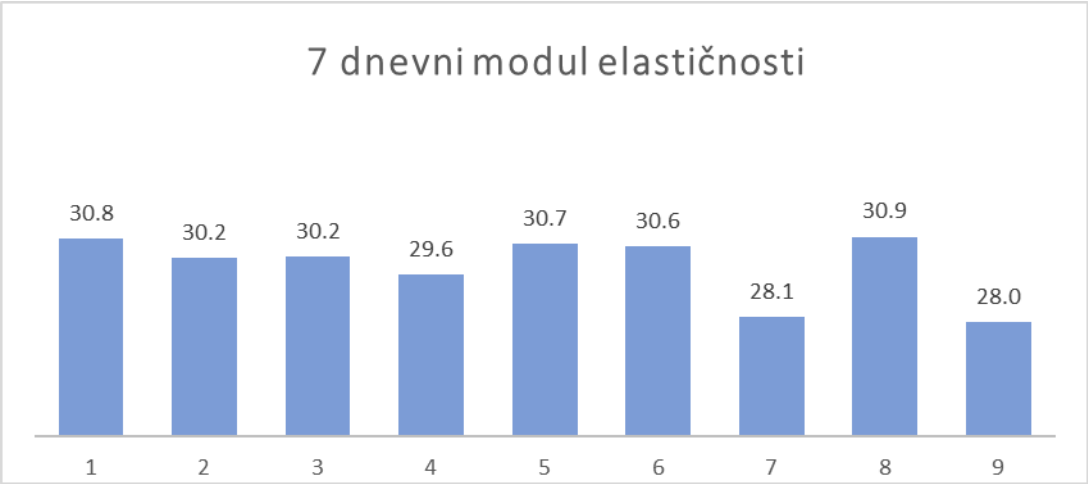
Tablica 6.18.: *Rezultati gustoća očvrslog betona*

		N1	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
Gustoća betona u očvrslom stanju (kg/m^3)	***7 dana***	2257,0	2274,3	2281,1	2321,2	2338,3	2319,7	2311,4	2328,6	2324,8
	28 dana	2285,3	2294,5	2318,5	2340,9	2336,3	2325,3	2321,8	2364,1	2344,4

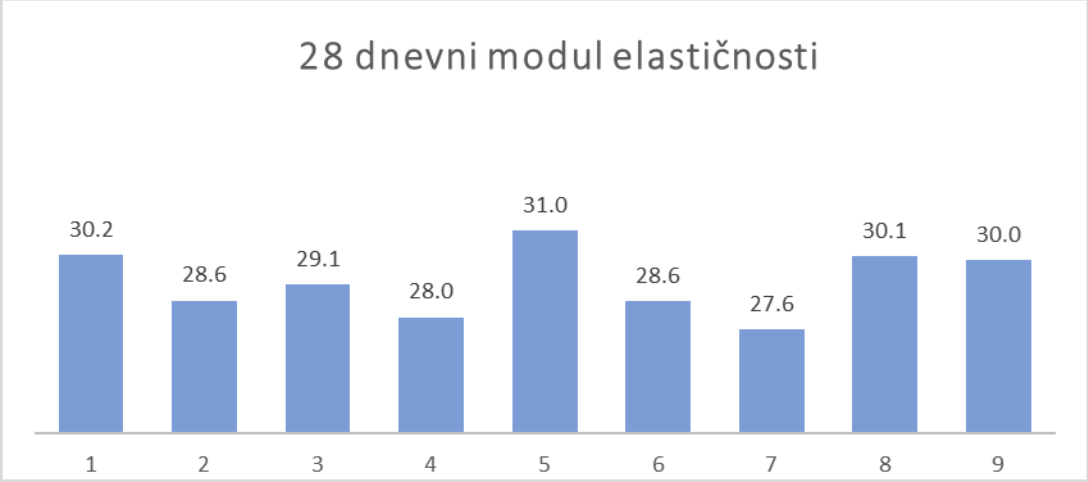
U tablicama 6.17. i 6.18. su prikazane vrijednosti brzina ultrazvučnih valova i gustoće betona koje su potrebne pri proračunu dinamičkog modula elastičnosti betona.

Tablica 6.19.: *Rezultati dinamičkog modula elastičnosti očvrslog betona*

		N1	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
Dinamički modul elastičnosti (GPa)	***7 dana***	30,8	30,2	30,2	29,6	30,7	30,6	28,1	30,9	28,0
	28 dana	30,2	28,6	29,1	28,0	31,0	28,6	27,6	30,1	30,0

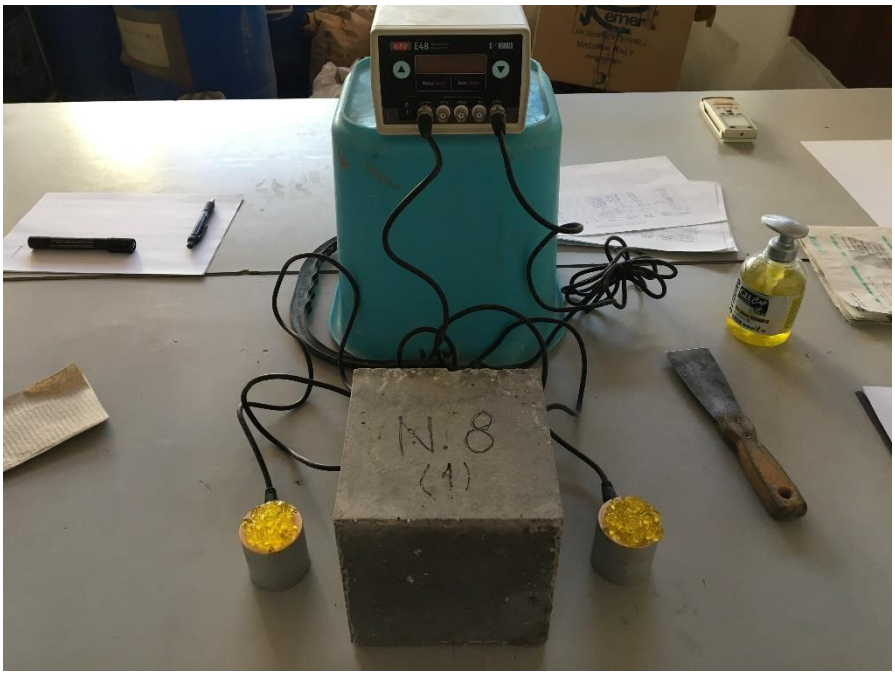


Slika 6.27.: *Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 7 dana*



Slika 6.28.: *Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti nakon 28 dana*

Dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana kreće se u rasponu od 28,0 do 30,9 GPa, a nakon 28 dana raspon mu je od 27,6 do 31 GPa. Najveći dinamički modul elastičnosti nakon 7 dana ima beton N8, a nakon 28 dana N5. Najmanju vrijednost dinamičkog modula elastičnosti nakon 7 dana ima beton N9, a nakon 28 dana N7.



Slika 6.29.: *Uređaj za ispitivanje brzine ultrazvučnih valova*

6.7.3. Ispitivanje kapilarnog upijanja

Nakon vlažne njege betonskih uzoraka koja je trajala 28 dana, uzorci su izvađeni iz komore te prirodno osušeni do stalne mase. Zatim su uzorci uronjeni u vodu visine do 5 mm te se mjerilo upijanje tj. povećanje mase uzoraka nakon 2 min, 4 min, 8 min, 15min, 30 min, 45 min, 60min, 4h i 24h (slika 6.30.). Povećanje masa betonskih uzoraka je prikazano u tablici 6.20., a koeficijenti upijanja u tablici 6.21. Koeficijent upijanja se računa prema jednadžbi:

$$A = \frac{\Delta m_v}{\Delta\sqrt{t}} \left(\frac{g}{m^2 h^{0.5}}\right)$$



Slika 6.30.: *Betonski uzorci uronjeni u vodi*

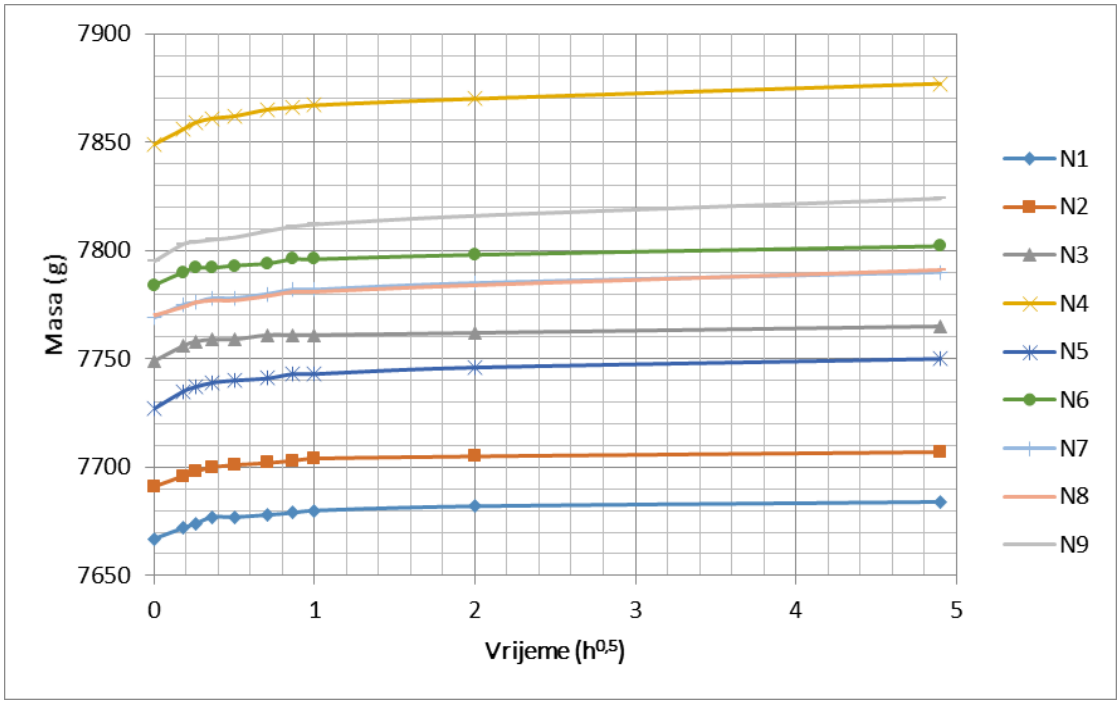
Tablica 6.20.: *Povećanje masa uzoraka nakon vremena t*

Uzorci / Mase	***N1***	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
m_0	7667	7691	7749	7849	7727	7784	7769	7770	7795
m_2	7672	7696	7756	7856	7735	7790	7775	7774	7803
m_4	7674	7698	7758	7859	7737	7792	7776	7776	7804
m_8	7677	7700	7759	7861	7739	7792	7778	7777	7805
m_{15}	7677	7701	7759	7862	7740	7793	7778	7777	7806
m_{30}	7678	7702	7761	7865	7741	7794	7780	7779	7809
m_{45}	7679	7703	7761	7866	7743	7796	7782	7781	7811
m_{60}	7680	7704	7761	7867	7743	7796	7782	7781	7812
m_{4h}	7682	7705	7762	7870	7746	7798	7785	7784	7816
m_{24h}	7684	7707	7765	7877	7750	7802	7790	7791	7824
$D= m_{24h} - m_0$	17	16	16	28	23	18	21	21	29

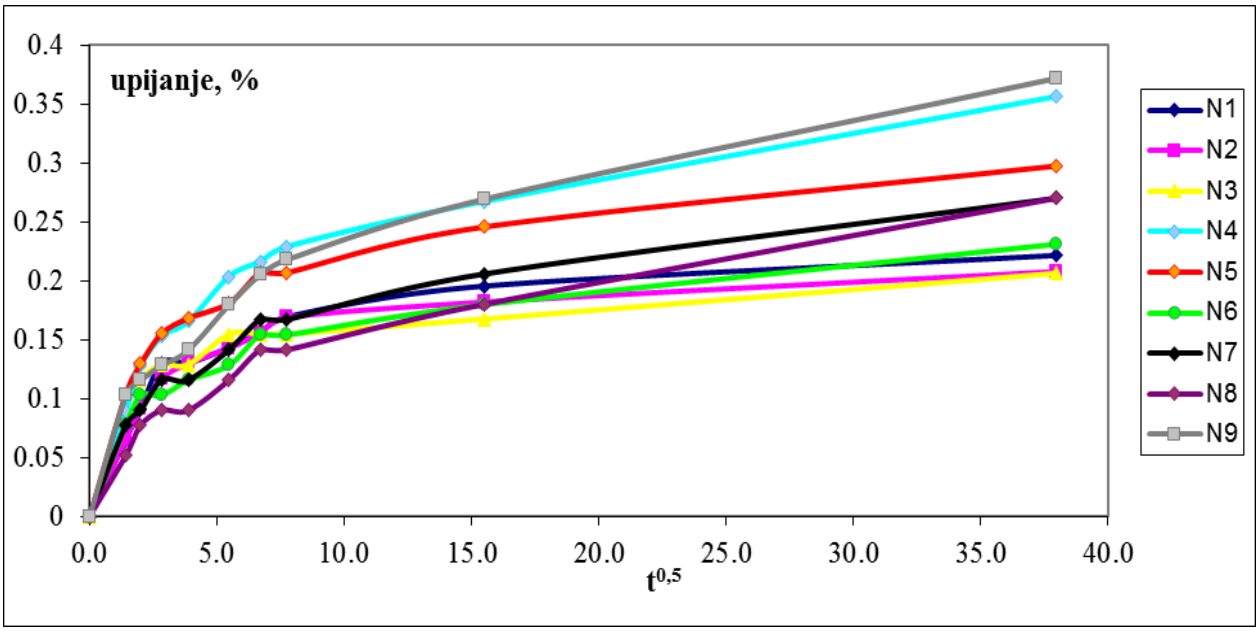
Tablica 6.21.: *Kapilarno upijanje A nakon vremena t*

Upijanja	***N1***	***N2***	***N3***	***N4***	***N5***	***N6***	***N7***	***N8***	***N9***
A_2	27,4	27,4	38,3	38,3	43,8	32,9	32,9	21,9	43,8
A_4	27,1	27,1	34,9	38,7	38,7	31,0	27,1	23,2	34,9
A_8	27,4	24,6	27,4	32,9	32,9	21,9	24,6	19,2	27,4
A_{15}	20,0	20,0	20,0	26,0	26,0	18,0	18,0	14,0	22,0
A_{30}	15,6	15,6	17,0	22,6	19,8	14,1	15,6	12,7	19,8
A_{45}	13,9	13,9	13,9	19,6	18,5	13,9	15,0	12,7	18,5
A_{60}	13,0	13,0	12,0	18,0	16,0	12,0	13,0	11,0	17,0
A_{4h}	7,5	7,0	6,5	10,5	9,5	7,0	8,0	7,0	10,5
A_{24h}	3,5	3,3	3,3	5,7	4,7	3,7	4,3	4,3	5,9

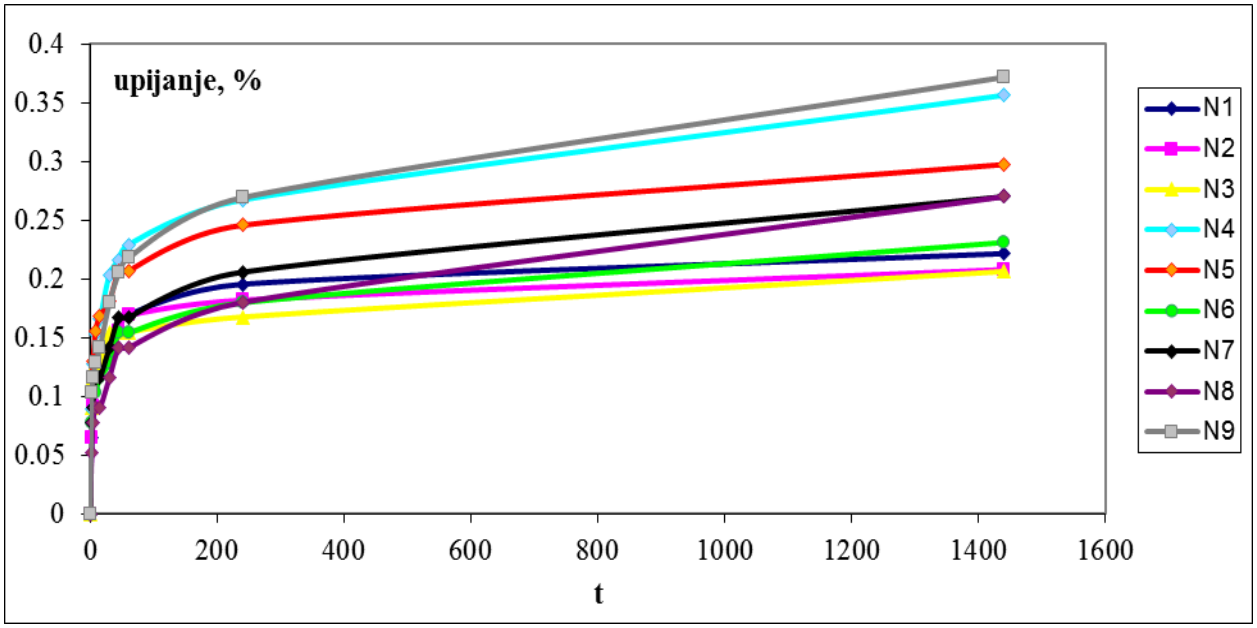
Na slikama 6.31 – 6.33. prikazana je ovisnost kapilarnog upijanja vode (m_v i $\sqrt{t}$), upijanje vode kao funkcija kvadratnog korijena vremena te upijanje vode kao funkcija vremena.



Slika 6.31.: *Ovisnost kapilarnog upijanja vode (m_v i $\sqrt{t}$)*



Slika 6.32.: *Upijanje vode kao funkcija kvadratnog korijena vremena*



Slika 6.33.: *Upijanje vode kao funkcija vremena*

Najmanja početna upijanja ima beton N8 s dodatkom letećeg pepela i punilom s izmiješanim frakcijama (<0.5mm), a najmanja upijanja nakon 24 sata imaju beton N2 i N3, oba sa silikatnom prašinom. Kod N2 je korišteno punilo s frakcijom 0.063-0.125mm, a kod N3 0.125-0.25mm. Najveća početna upijanja imaju beton N5 i N9, oba s dodatkom metakaolina. Kod betona N5 je korišteno punilo frakcije 0.125-0.25mm, a kod N9 punilo s izmiješanim frakcijama (<0.5mm). Najveća upijanja nakon 24 sata opet ima beton N9, napravljen s dodatkom metakaolina i s punilom s izmiješanim frakcijama (<0.5mm). S obzirom na to, izgleda da najveća upijanja ima mješavina s izmiješanim frakcijama punila od betonskog otpada (<0.5mm).

7. ZAKLJUČAK

Samozbijajući beton je vrsta betona koji tečenjem popunjava oplatu, odnosno sam zaobilazi prepreke i ispunjava prostor bez upotrebe vibracijskih uređaja. S obzirom na to, njegovo korištenje smanjuje vrijeme građenja, potrebnu radnu snagu i opremu na gradilištu, olakšava gradnju gusto armiranih kontsrukcija i teško dostupnih područja, te smanjuje buku i ozljede tokom vibriranja. Samo neke od karakteristika samozbijajućeg betona su poboljšana fluidnost i dobra otpornost segregaciji, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja te povećana trajnost.

Uspoređujući ga s običnim betonom, samozbijajući beton obično ima manji udio krupnog agregata, manji vodocementni faktor, veći udio paste, veći sadržaj sitnih čestica te manje maksimalno zrno agregata (D_{max}=20mm). Uz to je i obavezna primjena superplastifikatora, a ponekad i dodatka za promjenu viskoznosti.

U novije vrijeme se sve više pročavaju načini za ponovno korištenje građevinskog otpada, a glavni razlozi za to su prevelike količine otpada, nedostatak prikladnih odlagališta, nedostupnost agregata za željenu kvalitetu betona, te ujedno i velika udaljenost između kamenoloma i gradilišta. Problem odlaganja građevinskog otpada postaje sve veći s ogromnim povećavanjem količine otpada u jednu ruku, i s manjkom odlagališta u drugu ruku. To sve rezultira s većim troškovima prijevoza i odlaganja otpada. Nadalje, uz to su jednako važni i zaštita okoliša te očuvanje prirodnih resursa, a ponovnim korištenjem građevinskog otpada se smanjuje potrošnja prirodnih resursa i manje se pune odlagališta takvog otpada. Stoga nije čudno da se tehnike ponovnog korištenja građevinskog otpada ispituju u laboratorijima te se sve više i više koriste.

Mnoga takva istraživanja su već provedena diljem svijeta, a neka od njih su i spomenuta u ovom radu. Ta istraživanja su pokazala mogućnost dobivanja kvalitetnog betona u kojem je prirodni agregat zamijenjen s recikliranim agregatom.

U ovom radu su provedena laboratorijska ispitivanja na 9 različitih mješavina samozbijajućeg betona.

Za sve mješavine je korištena ista vrsta i količina cementa, te ista količina sitnog i krupnog agregata, a količina vode se korigirala tokom miješanja ovisno o vizualnoj procjeni mješavine. Svih 9 mješavina je imalo istu vrstu i količinu aditiva. Ukupna količina praškastih dodataka je također ista, ali su se dodaci dodavali u različitim vrstama i količinama. Korišteni dodaci su silikatna prašina, leteći pepeo, metakaolin te punilo od recikliranog betona s različitim frakcijama,

a korištene frakcije punila su: <0.063mm, 0.063-0.125mm, 0.125-0.25mm, 0.25-0.5mm te izmiješane frakcije (<0.5mm).

Iz rezultata provedenih ispitivanja na mješavinama samozbijajućeg betona se može zaključiti sljedeće:

- Najbolja svojstva kod analize rezultata rasprostiranja slijeganjem je pokazala mješavina s dodatkom letećeg pepela i s punilom od recikliranog betona frakcije 0.125-0.25mm.

- Najbolje rezultate tečenja je pokazala mješavina s dodatkom metakaolina i s punilom od recikliranog betona s izmiješanim frakcijama (<0.5mm), koja je isto tako pokazala i dobra svojstva rasprostiranja.

- Nijedna mješavina nije zadovoljila kriterij ispitivanja J-prstenom. Kod ovog ispitivanja je najmanje blokiranje imala mješavina s metakaolinom i s punilom od recikliranog betona s izmiješanim frakcijama (<0.5mm). Najveće blokiranje je imala mješavina sa silikatnom prašinom i s punilom frakcije <0.063mm.

- Rezultate ispitivanja L-kutijom nije zadovoljila ni jedna mješavina, a najbliža je bila mješavina s dodatkom letećeg pepela i s punilom od recikliranog betona s izmiješanim frakcijama (<0.5mm). Najlošija svojstva je pokazala mješavina sa silikatnom prašinom i s punilom frakcije 0.063-0.125mm koja nije niti popunila L-kutiju te nije pokazala ni sposobnost popunjavanja ni sposobnost zaobilaženja prepreka.

- Najveću tlačnu čvrstoću je postigla mješavina s dodatkom silikatne prašine i s punilom od recikliranog betona frakcije 0.125-0.25mm.

- Najveće upijanje je imala mješavina s metakaolinom i s izmiješanim frakcijama punila od betonskog otpada (<0.5mm), a najmanje upijanje su pokazale mješavine s dodatkom silikatne prašine i s punilom frakcije 0.063-0.125mm, te 0.125-0.25mm.

Na kraju se može zaključiti da se korištenjem betonskog otpada može dobiti i vrlo kvalitetan samozbijajući beton. U ovom radu se još trebalo poraditi na recepturi kako bi bili zadovoljeni svi kriteriji, no izgleda da su najbolja svojstva betona u svježem stanju pokazale mješavine napravljene s punilom od recikliranog betona s izmiješanim frakcijama (<0.5mm). Nadalje, korištenjem betonskog otpada u izradi novog betona bi se uvelike utjecalo na uštedu prirodnih resursa i na smanjenje količine otpada, odnosno na zaštitu okoliša.

8. LITERATURA

Popis literature:

[1] Parviz Ghoddousi, Amir Masoud Salehi: Utjecaj sastava mješavine samozbijajućeg betona na robusnost, Građevinar 67 (2015) 1, 1-9

[2] Kordts, S.; Grube, H.: Controlling the workability properties of self compacting concrete used as ready-mixed concrete, 2002

[3] Mario Vujica: Samozbijajući ekološki održivi betoni

[4] Masahiro Ouchi, Makoto Hibino: Development, applications and investigations of Self-Compacting Concrete

[5] http://wondersofenginering.blogspot.hr/2015/04/akashi-kaikyo-bridge.html

[6] Nina Štirmer, Ivana Banjad Pečur: Projektiranje sastava samozbijajućeg betona, Građevinar 61 (2009) 4, 321-329

[7] Juradin S.,Krstulović P.: Samozbijajući beton, Građevinski materijali II

[8] https://www.thebalance.com/self-compacting-concrete-844767

[9] http://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/specijalne_vrste_betona_1445415666714.pdf

[10] https://www.jnto.go.jp/eng/spot/bridges/akashi-kaikyo-bridge.html

[11] https://files1.structurae.de/files/photos/1/omiodori_bridge02.jpg

[12] Ouchi, Nakamura, Osterson, Hallberg, and Lwin: Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/S%C3%B6dra_l%C3%A4nken

[14] http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0543-0798/2009/0543-07980901021D.pdf

[15] Marina Algušić, Filip Lavriv: Eksperimentalno određivanje reoloških svojstava samozbijajućeg betona; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.

[16] http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0543-0798/2005/0543-07980503048M.pdf

[17] https://hr.wikipedia.org/wiki/Zgura

[18] Wurth, D.: Ovisnost sastava i svojstva samozbijajućeg betona, Građevinski fakultet, Zagreb, 2011.

[19] EFNARC: Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002.

[20] Vranješ, L. K.; Samozbijajući lagani beton sa dodatkom punila od mljevene opeke, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2015.

[21] http://multiserw-morek.pl/!data/products/243.jpg

[22] http://www.matest.com/Cms_Data/Import_Data_Image/Prodotto/_2759_C171_V127%20V%20FUNNEL%20TEST1.jpg

[23] http://www.nl-test.com/Images/Concrete%20PIC/NL%204028%20X%20001-J-Ring%20Appratus.jpg

[24] http://webshop.macben.eu/images/products/Large/C172-C172.jpg_1.jpg

[25] https://theconstructor.org/wp-content/uploads/2011/11/clip_image0012.jpg

[26] Khaldoun Rahal: Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate

[27] Farid Debieb, Luc Courard, Said Kenai, Robert Degeimbre: Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates

[28] N. Fonseca, J. de Brito, L. Evangelista: The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste

[29] N. K. Bairagi, H. S. Vidyadhara, Kishore Ravande: Mix design procedure for recycled aggregate concrete

[30] N. K. Bairagi, Kishore Ravande and V. K. Pareek: Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates

[31] Juradin S., Lovrić M.: Influence of filler concrete waste on properties of self compacting concrete

[32] Ivan Tomičić: Betonske konstrukcije

[33] http://www.cemex.cz/portlandsky-cement-s-vapencem-42,5-r.aspx

[34] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut građevinarsta Hrvatske, Split, 2000.

[35] http://www.gradimo.hr/clanak/odrziva-gradnja-betonom/39267

[36] https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Italian%20(Italy)/BASF-MasterGlenium%20SKY%20629%20Oct_2016%20EN.pdf

[37] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/DODACI_ZA_CEMENTNE_KOMPOZITE_-NASTAVNI_TEKST__12.04.2017.pdf

[38] Marijan Skazlić, Mario Vujica: Samozbijajući ekološki prihvatljivi betoni, Građevinar 64 (2012) 9, 905-913

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