

Uticaj primjene recikliranog betonskog agregata na otpornost betona prema dejstvu mraza

Gordana Broćeta¹, Marina Latinović Krndija¹, Anđelko Cumbo¹, Aleksandar Savić², Slobodan Šupić³, Žarko Lazić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

³Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

gordana.broceta@aggf.unibl.org, marina.latinovic@aggf.unibl.org,
andjelko.cumbo@aggf.unibl.org, sasha@imk.grf.bg.ac.rs, ssupic@uns.ac.rs, zarko.lazic@aggf.unibl.org

Sažetak—Agresivno djelovanje mraza predstavlja jedan od ključnih uzroka degradacije betonskih konstrukcija u područjima s izraženim hladnim klimatskim uslovima tokom zimskog perioda, kao što je slučaj sa prostorom Republike Srpske.

Cilj ovog rada jeste eksperimentalno ispitivanje uticaja različitih vrsta recikliranih agregata, dobijenih drobljenjem starog, otpadnog betona, na stepen degradacije samougrađujućih betona (*Self-Compacting Concrete – SCC*) usljed agresivnog dejstva mraza.

U okviru eksperimentalnog istraživanja projektovane su četiri mješavine samougrađujućeg betona, pri čemu su korišćeni agregati različitog porijekla sa domaćeg tržišta: prirodni riječni agregat (NRA), prirodni drobljeni agregat (NCA), te reciklirani agregati poznatog (RCA-K) i nepoznatog porijekla (RCA-U).

Ispitivana svojstva su obuhvatila za svjež beton – temperaturu, sadržaj zaostalog vazduha, konzistenciju i zapreminsku masu, a za očvršli beton – čvrstoću pri pritisku u starosti od 28 dana i otpornost na dejstvo mraza.

Iako su sve ispitivane betonske mješavine zadovoljile propisane kriterijume domaće regulative u pogledu otpornosti na mraz nakon 150 i 200 ciklusa naizmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja, ustanovljeno je da vrsta primijenjenog agregata ipak ima nezanemarljiv uticaj. Konkretno, izbor vrste prirodnog agregata (riječni ili drobljeni) ne pokazuje značajan uticaj na otpornost na mraz. Sa druge strane, reciklirani agregat poznatog porijekla (RCA-K) pokazuje se kao adekvatna zamjena za prirodne agregate u uslovima izloženosti mrazu. Najveće smanjenje otpornosti na mraz zabilježeno je nakon 200 ciklusa naizmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja kod betona sa recikliranim agregatom nepoznatog porijekla (RCA-U), i to u prosjeku za oko 10% u odnosu na betone spravljene sa ostalim vrstama agregata.

Ključne riječi — samougrađujući beton; prirodni riječni agregat; prirodni drobljeni agregat; reciklirani betonski agregat; otpornost prema dejstvu mraza;

I. UVOD

Trajnost betona predstavlja jednu od najaktuelnijih tema savremenog graditeljstva, budući da je beton osnovni konstrukcijski materijal današnjice, dok je istovremeno

evidentan problem njegove degradacije pod uticajem agresivnih faktora sredine. U uslovima hladne klime tokom zimskog perioda, jedan od najznačajnijih mehanizama degradacije jeste djelovanje mraza [1]–[4]. Shodno tome, istraživanja usmjerena na ublažavanje posljedica ovog mehanizma su od izuzetne važnosti za unapređenje trajnosti betonskih konstrukcija.

U tom kontekstu, posebno mjesto zauzima uspostavljanje principa za racionalan izbor komponentnih materijala kod samougrađujućih betona (*Self-Compacting Concrete – SCC*), čija primjena u inženjerskoj praksi bilježi kontinuiran porast, sa tendencijom da u potpunosti zamijeni klasične tradicionalne betone, koji se ugrađuju vibriranjem [5]–[8]. Imajući u vidu problem prekomjernog iscrpljivanja prirodnih resursa pri proizvodnji komponentnih materijala za betonske kompozite, posebnu važnost ima iskorišćavanje potencijala otpadnih materijala kroz proces reciklaže, a sa ciljem njihove ponovne upotrebe kao korisnih sastojaka u proizvodnji novog betona [8]–[11]. U tom smislu, poseban potencijal ima recikliranje otpadnog betona, za koji ne postoje sistemski uređene deponije građevinskog otpada u Republici Srpskoj. Svakodnevno se generišu značajne količine ovakvog otpada usljed rušenja postojećih objekata, kao i nakon hazardnih događaja poput poplava iz 2014. godine, pri čemu se građevinski otpad, uključujući i otpadni beton, najčešće odlaže na neadekvatne lokacije – komunalne ili, još češće, divlje deponije – Sl. 1.



Sl. 1. Divlja deponija građevinskog otpada

Istraživanja ukazuju da je količina tzv. građevinskog i demoliranog otpada višestruko veća od količine komunalnog otpada koji se svakodnevno generiše, a u državama sa visokim intenzitetom nove gradnje taj odnos može biti i do četiri puta veći [12]. Kao jedno od održivih rješenja za istovremeni problem prekomjerne proizvodnje građevinskog otpada i iscrpljivanja nalazišta prirodnih agregata, pokazao se postupak reciklaže deponovanih građevinskih materijala, i to prije svega betona [13].

Jedan od mogućih pristupa unapređenju trajnosnih karakteristika betona, konkretno otpornosti na dejstvo mraza, jeste izbor odgovarajuće vrste agregata [12]. U tom cilju, u ovom radu analizirani su uticaji različitih vrsta agregata sa domaćeg tržišta – prirodnog riječnog agregata (NRA), prirodnog drobljenog agregata (NCA), te recikliranih agregata dobijenih drobljenjem otpadnih betona (RCA) – na otpornost samougrađujućeg betona prema dejstvu mraza.

Istraživanje otpornosti samougrađujućeg betona prema dejstvu mraza, nakon 300 ciklusa, a u skladu sa ASTM S666, *M. Tuyan*-a i sar. [14], pokazalo je da povećanje vrijednosti vodopraškastog faktora i povećanje učešća krupnog recikliranog betonskog agregata utiče na smanjenje predmetne otpornosti betona. Pri tome je uočeno da vodopraškasti faktor ima značajniji uticaj na predmetno svojstvo. Takođe, ovo istraživanje je pokazalo mogućim uspostavljanje linearne funkcionalne zavisnosti između upijanja metodom postupnog potapanja i gubitka mase nakon realizovanih ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, sa gotovo savršenom korelacijom. Primjenom istog standarda *N. Öznur Öz*-a i sar. [15], ispitali su uticaj primjene plavuća u krupnim frakcijama agregata, variranjem njegovog učešća u iznosima 10, 20, 25 i 30%. Tim istraživanjem pokazalo se da primjena plavuća smanjuje čvrstoću pri pritisku samougrađujućih betona, ali da se ipak najmanje procentualno smanjenje čvrstoće nakon 300 ciklusa dobija za betone sa 10, 15 i 20% plavuća – navedeno respektivno. Autori istraživanja ovo objašnjavaju pozitivnim uticajem porozne strukture plavuća i njegove sposobnosti da upije vodu, koja u procesu mržnjenja migrira iz kapilarnog sistema cementnog kamena u porni prostor plavuća. Ipak, korišćenje plavuća u iznosu od 30% krupnog agregata stvara dodatni "prostor", zbog kojeg se smanjuje otpornost prema dejstvu mraza. Analizom rezultata mjerenja gubitka mase pokazalo se da je povećanje broja ciklusa iniciralo sve veći gubitak mase uzoraka. U tom smislu, najbolji rezultati su dobijeni za uzorke betona spravljenog sa 10% plavuća, a najlošiji primjenom istog u iznosu od 30%. Konačno, predmetnim istraživanjem se zaključilo da najbolju otpornost prema dejstvu mraza, nakon 300 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, kako nedestruktivnom, tako i destruktivnom metodom, ima samougrađujući beton sa učešćem od 10% plavuća. Pri tome, upotreba ovog lakog agregata može biti pogodna do učešća u iznosu od 20% zapremine krupnih frakcija, ali dalje povećanje njegovog učešća degradira otpornost betona prema ovom deterioracionom mehanizmu. Istraživanjem *Huda et al.* [16], u kojem je krupna frakcija prirodnog agregata zamijenjena sa recikliranim betonskim agregatom u iznosima 0, 30, 40 i 50% u samougrađujućim betonima sa elektrofilterskim pepelom, kao mineralnim dodatkom, pokazalo je da svi projektovani betoni

zadovoljavaju kriterijum otpornosti na dejstvo mraza nakon 300 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, u skladu sa ASTM S666. Bez obzira na navedeno, uočeno je da učešće recikliranog betonskog agregata smanjuje nivo predmetne otpornosti, pri čemu se kao najniža pokazala za učešće od 40% ovog agregata. Istraživanjem *Hao Yan et al.* [17], u kojem je varirano učešće eolskog pijeska u iznosu 0, 20, 40 i 60% i krupne frakcije recikliranog betonskog agregata u iznosu od 0, 25 i 50% ispitana je otpornost na 200 ciklusa mraza samougrađujućih betona u skladu sa GB/T50082. Pokazalo se da povećanje učešća eolskog pijeska ubrzava pad otpornosti betona na dejstvo mraza, a da učešće recikliranog betonskog agregata usporava tu tendenciju. Sa tim u vezi utvrđene su optimalne stope zamjene eolskog pijeska i recikliranog betonskog agregata, respektivno u iznosima, od 20 do 40% i od 25 do 50%.

II. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Radi određivanja uticaja različitih vrsta recikliranih agregata proizvedenih od starog otpadnog betona na otpornost samougrađujućeg betona na dejstvo mraza, u okviru eksperimentalnog istraživanja ispitane su četiri betonske mješavine. U njima su korišćene sledeće vrste agregata: prirodni (riječni, oznake NRA i drobljeni, oznake NCA) i reciklirani agregati (poznatog, oznake RCA-K i nepoznatog porijekla, oznake RCA-U). Sve mješavine agregata su projektovane kao trofrakcijske, nominalno najkrupnijeg zrna 16 mm, kontinualnog granulometrijskog sastava.

U nastavku su navedene oznake betonskih mješavina kao i vrste upotrebljenog agregata:

- C-NR – samougrađujući beton spravljen sa prirodnim riječnim agregatom,
- C-NC – samougrađujući beton spravljen sa prirodnim drobljenim agregatom,
- C-RC-K – samougrađujući beton spravljen sa mješavinom sitnog riječnog i krupnog agregata od recikliranog betona poznatog porijekla i
- C-RC-U – samougrađujući beton spravljen sa mješavinom sitnog riječnog i krupnog agregata od recikliranog betona nepoznatog porijekla.

Na betonima u svježem stanju ispitane su sljedeće karakteristike:

- temperatura, u skladu sa EN 12350-1 [18],
- sadržaj zaostalog vazduha, u skladu sa EN 12350-7 [19],
- konzistencija, u skladu sa EN 12350-8 [20] i
- zapreminska masa, u skladu sa EN 12350-6 [21].

Na očvrslim betonima ispitana su sljedeća svojstva:

- čvrstoća pri pritisku u starosti od 28 dana, u skladu sa EN 12390-3 [22] i
- otpornost na dejstvo mraza, u skladu sa SRPS U.M1.016 [23].

A. Komponentni materijali

Za izradu predmetnih betona korišćeni su sljedeći komponentni materijali:

- cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, "Dalmacijacement", proizvođača "Sv. Juraj" iz Splita, specifične mase 3140 kg/m^3 ;
- mineralni dodatak tipa I – krečnjačko brašno, proizvođača "Japra" a. d. iz Novog Grada, specifične mase 2780 kg/m^3 ;
- NRA – prirodni riječni agregat "Petoševci", proizvođača "Niskogradnja" iz Laktaša, BiH, pran i separisan u frakcije: 0/4, 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1606 , 1554 i 1582 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2740 , 2696 i 2683 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 0,6, 0,8 i 0,4%;
- NCA – prirodni drobljeni agregat "Dobrnja", proizvođača "Binis" iz Banjaluke, BiH, pran i separisan u frakcije: 0/4, 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1546 , 1354 i 1318 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2709 , 2746 i 2718 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 0,64, 1,22 i 0,71%;
- RCA-K – reciklirani agregat poznatog porijekla, dobijen drobljenjem otpadnog betona C25/30 i C35/45, frakcije: 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1278 i 1231 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2350 i 2350 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 2,4 i 2,2%;
- RCA-U – reciklirani agregat nepoznatog porijekla, dobijen drobljenjem otpadnog betona uzetog sa deponije građevinskog šuta, frakcije: 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1267 i 1221 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2330 i 2330 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 3,6 i 3,1%;
- hemijski dodatak – superplastifikator "Cementol®Zeta Super S", proizvođača "TKK" iz Srprenica, Slovenija;
- voda iz gradskog vodovoda.

B. Betonske mješavine

Polazni kriterijum za projektovanje mješavina bio je ispunjenje uslova za klasu konzistencije SF2, za koju se vrijednost razlivanja slijeganjem kreće u granicama od 660 do 750 mm. Izbor ove klase konzistencije samougrađujućeg betona izvršen je s obzirom da ona ima najširu primjenu u praksi, jer je pogodna za izvođenje normalno armiranih stubova i zidova.

U tabeli I su date količine komponentnih materijala u 1 m^3 projektovanih samougrađujućih betonskih mješavina

praškastog tipa, kao i računске vrijednosti zapreminskih masa betona u svježem stanju. Pri tome se napominje da je, prema preporukama [12], [24] za betone spravljene sa recikliranim betonskim agregatima primijenjena dodatna količina vode, koju reciklirani agregati upiju za 30 min, a u svrhu postizanja zahtijevane konzistencije.

TABELA I. SASTAVI I ZAPREMINSKE MASE PROJEKTOVANIH BETONA

Vrsta betona			C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U	
Cement			[kg/m ³]	453	448	450	450
Krečnjačko brašno			[kg/m ³]	181	153	196	193
Agregat	NRA	0/4 mm	[kg/m ³]	909	–	832	860
		4/8 mm	[kg/m ³]	185	–	–	–
		8/16 mm	[kg/m ³]	460	–	–	–
	NCA	0/4 mm	[kg/m ³]	–	827	–	–
		4/8 mm	[kg/m ³]	–	239	–	–
		8/16 mm	[kg/m ³]	–	539	–	–
	RCA	4/8 mm	[kg/m ³]	–	–	234	262
		8/16 mm	[kg/m ³]	–	–	394	335
HRWRA			[kg/m ³]	6,74	6,73	6,75	6,75
Voda			[kg/m ³]	202,4	188,7	189,0	189,0
Dodatna voda			[kg/m ³]	–	–	14,3	19,9
Zapreminska masa			[kg/m ³]	2397	2401	2316	2316

C. Realizacija ispitivanja

Spravljanje svih betona, izrada i njegovanje uzoraka izvršeni su na isti način i pri jednakim termohigrometrijskim uslovima u laboratoriji – pri temperaturi od $20 \pm 3^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti vazduha od $65 \pm 5\%$.

Miješanje betona je izvršeno u laboratorijskoj miješalici proizvođača "CONTROLS", model "TTM 140V". Temperatura svježeg betona izmjerena je digitalnim termometrima proizvođača "CONTROLS", modela "82-D1226/A" i proizvođača "HANNA", u skladu sa EN 12350-1 [18]. Sadržaj zaostalog vazduha izmjeren je porozimetrom zapremine osnovnog suda 8000 cm^3 , proizvođača "CONTROLS", modela "54-C0170/D", u skladu sa EN 12350-7 [19]. Procjena konzistencije izvršena je metodom razlivanja slijeganjem, u skladu sa EN 12350-8 [20] pri normalnom položaju konusa tokom ispitivanja – Sl. 2. Ispitivanja su sprovedena korišćenjem Abramsovog konusa, proizvođača "CONTROLS", modela "C150/A" i bazne ploče istog proizvođača, modela "54 C0149/20".



Sl. 2. Mjerenje konzistencije svježeg samougrađujućeg betona – dizanje Abramsovog konusa iz normalnog položaja

Zapreminska masa svježeg betona dobijena je kao srednja vrijednost izmjerena na tri uzorka oblika kocke dužine ivice 15 cm, u skladu sa EN 12350-6 [20].

Svi uzorci su se u prva 24 h držali u kalupima, prekriveni folijom, a zatim do 28 dana u bazenima napunjenim vodom, pri temperaturi od $20 \pm 3^\circ\text{C}$,

Čvrstoća betona pri pritisku dobijena je kao srednja vrijednost izmjerena na tri uzorka oblika kocke dužine ivice 15 cm u starosti od 28 dana, prema standardu EN 12390-3.

Ispitivanje otpornosti betona na dejstvo mraza izvršeno je u skladu sa nacionalnim standardom SRPS U.M1.016 [23], primjenom destruktivne metode. Broj uzoraka po jednoj betonskoj mješavini iznosio je 15, podijeljeno u sljedeće grupe:

- E_0 – etaloni, čija je čvrstoća pri pritisku utvrđena na dan početka ispitivanja,
- E_I – etaloni – uzorci koji nisu bili izloženi zamrzavanju, a čija je čvrstoća pri pritisku određena na dan ekvivalentne starosti, u odnosu na uzorke koji su bili izloženi na 150 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja,
- E_{II} – etaloni – uzorci koji nisu bili izloženi zamrzavanju, a čija se čvrstoća pri pritisku odredila na dan ekvivalentne starosti, u odnosu na uzorke koji su bili izloženi na 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja,
- M_{150} – uzorci koji su bili izloženi na 150 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja i
- M_{200} – uzorci koji su bili izloženi na 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja.

Postupak zamrzavanja sproveden je u komori za hlađenje proizvođača “CONTROLS”, modela “65-D1409”, kapaciteta 50 kg sa mogućnošću održavanja stalne temperature vazduha od -20 do $+65^\circ\text{C}$ i tačnošću od $0,1^\circ\text{C}$, te automatskim registrovanjem temperature vazduha u uređaju u blizini betonskih tijela.

Na Sl. 3 prikazana je predmetna komora u radu i sa uzorcima postavljenim u ladicama komore.



Sl. 3. Komora za hlađenje sa uzorcima postavljenim u rad

III. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA

A. Beton u svježem stanju

Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju – temperature (T), zapreminske mase (D), zaostale poroznosti (A_c) i razlivanja slijeganjem (SF) prikazani su u tabeli II.

TABELA II. REZULTATI ISPITIVANJA BETONA U SVJEŽEM STANJU

Vrsta betona		C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U
T	[$^\circ\text{C}$]	26	25	29	29
A_c	[%]	1,1	1,8	4,2	4,2
SF	[mm]	760	700	660	710
D	[kg/m^3]	2396	2400	2316	2317

B. Beton u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku u starosti 28 dana ($f_{c,cube,28}$) dati su u tabeli III. Svi projektovani betoni imali su mješovit lom – lom po cementnom kamenu i zrnima agregata, kao i pravilnu figuru loma.

TABELA III. REZULTATI ISPITIVANJA ČVRSTOĆE BETONA PRI PRITISKU

Vrsta betona		C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U
$f_{c,cube,28}$	[MPa]	59,1	63,1	65,1	60,9

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na dejstvo mraza, dobijeni kao prosječne vrijednosti čvrstoća pri pritisku zamrzanih tijela $f_{c,cyl}(M)$ i etalona ekvivalentne starosti $f_{c,cyl}(E)$, dati su u tabeli IV.

TABELA IV. REZULTATI ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA MRAZ

Vrsta betona		C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U
$f_{c,cyl}(E_0)$	[MPa]	56,3	63,0	65,9	60,1
$f_{c,cyl}(E_I)$	[MPa]	62,7	70,7	66,0	60,3
$f_{c,cyl}(M_{150})$	[MPa]	61,8	64,8	65,8	59,3
$f_{c,cyl}(E_{II})$	[MPa]	66,1	74,4	66,1	60,3
$f_{c,cyl}(M_{200})$	[MPa]	57,4	65,0	60,7	47,5

IV. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

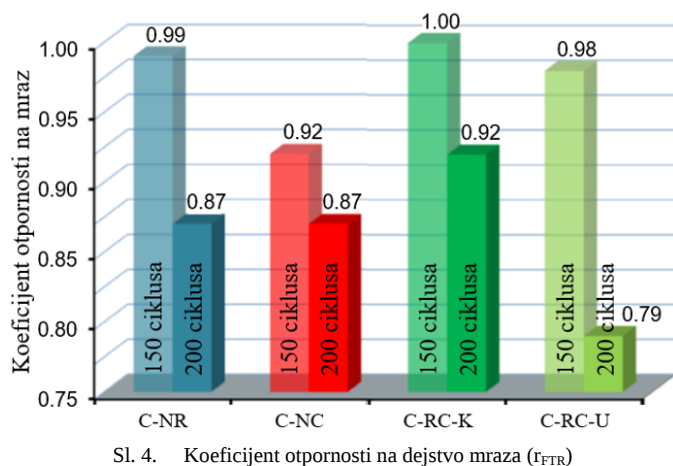
Učešće recikliranih agregata u samougrađujućim betonskim mješavinama imalo je uticaj na smanjenje zapreminske mase prosječno za oko $80 \text{ kg}/\text{m}^3$, u odnosu na betone spravljene sa prirodnim agregatima. Takođe, njihovo prisustvo znatno je uticalo i na povećanje zaostalog vazduha u svježem betonu i to za 2,75%. Pritom, nije bilo znatnog uticaja na smanjenje razlivanja slijeganjem (prosječno smanjenje razlivanja iznosilo je 45 mm, što se ne smatra značajnim s obzirom da je postignuta ciljana konzistencija, tj. klasa SF2), jer je korišćena dodatna količina vode prilikom spravljanja betona sa recikliranim agregatima.

Prema vrijednostima dobijenih zapreminskih masa, svi betoni su ocijenjeni kao betoni normalne zapreminske mase.

Analiza čvrstoća pri pritisku u starosti od 28 dana izvršena je testiranjem značajnosti razlika čvrstoća parova betona primjenom Studentovog t testa. S obzirom da je za sve analizirane betone aritmetička sredina dobijena iz tri rezultata ispitivanja broj stepeni slobode svakoga analiziranog para betona iznosio je četiri. Za nivoom značajnosti od 0,05,

konstatovano je da rezultati testiranja pripadaju istom skupu, tj. da razlike u vrijednostima čvrstoća nisu statistički značajne. Naime, dobijene su neznatno veće čvrstoće betona sa recikliranim agregatima u iznosu oko 2 MPa za betone u starosti od 28 dana. Analizom čvrstoća etalonskih betona u zasićenom stanju pokazalo se da beton spravljen sa prirodnim riječnim agregatom i beton spravljen sa kombinacijom prirodnog sitnog riječnog agregata i recikliranog krupnog agregata poznatog porijekla imaju približno jednake priraštaje čvrstoća u starostima većim od 28 dana. Pritom se uočava da beton spravljen sa recikliranim agregatom nepoznatog porijekla ne prati ovaj priraštaj čvrstoće pri pritisku, odnosno ima za oko 6 MPa manje vrijednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na beton spravljen sa recikliranim agregatom poznatog porijekla u starostima većim od 28 dana u zasićenom stanju. Navedeno se može objasniti prisustvom nepoželjnih materija u recikliranom betonskom agregatu nepoznatog porijekla, koji je dobijen sa deponije građevinskog šuta, a koje nepovoljno utiču na adheziju između cementnog kamena i zrna agregata, te time i na priraštaj čvrstoće betona pri pritisku u starostima većim od 28 dana.

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na dejstvo mraza pokazali su da je za sve eksperimentom obuhvaćene betone, odnos čvrstoća pri pritisku ispitnih tijela, koji su bili izloženi naizmjeničnim ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja (150 i 200 ciklusa) i ispitnih tijela – etalona, ekvivalentne starosti, veći od 0,75 – Sl. 4. Na osnovu kriterijuma [23] zaključeno je da sve ispitivane vrste betona zadovoljavaju uslove kvaliteta nakon 150 i 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja.



Sl. 4. Koeficijent otpornosti na dejstvo mraza (I_{FTR})

Detaljnijom analizom dobijenih rezultata uočeno je da na otpornost betona na dejstvo mraza imaju uticaj primijenjena vrsta agregata, ostvarena čvrstoća pri pritisku i poroznost.

Najveći pad otpornosti na dejstvo mraza ima C-RC-U. Ovaj beton pokazuje odličnu otpornost do 150 ciklusa, a nakon još samo 50 ciklusa, pokazatelj njegove otpornosti je manji za 21,2% (što je značajno više u odnosu na prosječan predmetni pad svih ostalih vrsta betona, koji iznosi 11,3%). Takođe, uzorci C-RC-U su nakon 200 ciklusa mraza pretrpjeli i fizičku destrukciju, ocijenjenu vizuelno i evidentiranu kroz gubitak mase (< 5%), tako da se uslovno može prognozirati da ovaj beton ne bi zadovoljio strože zahtjeve u pogledu otpornosti na mraz.

Potpuno drugačije ponašanje usljed dejstva mraza pokazuje C-RC-K. Ovaj beton ima visok nivo otpornosti za obje serije ciklusa mraza (150 i 200), pri čemu je pad koeficijenta otpornosti na mraz (I_{FTR}) između 200 i 150 ciklusa za oko 8%. To je približno prosječnoj gorenavedenoj vrijednosti, kada se izuzme C-RC-U. Poređenjem betona C-RC-K, sa betonom C-NR, uočava se da beton C-RC-K ima bolju otpornost na dejstvo mraza. Betoni C-NR i C-RC-K su odabrani za poređenje jer su originalna zrna korišćenog RCA, takođe riječnog porijekla (agregati se razlikuju po prisustvu starog cementnog kamena). Ovo implicira da prisustvo starog cementnog kamena u RCA, sa aspekta analiziranog svojstva, svakako nije nedostatak ovom agregatu. Štaviše, pore starog cementnog kamena u RCA su u određenoj mjeri omogućile migraciju vode iz nove prelazne zone, a time u toj mjeri i ekspanziju leda tokom mržnjenja. Slični zaključci nalaze se kod istraživanja N. Öznur Öz-a i sar. [19], gdje su procenti smanjenja čvrstoće, nakon 300 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, za primjenu 10, 20 i 30% plavuća u krupnoj frakciji, manji u odnosu na etalonski beton (zbog porozne strukture plavuća može se u izvjesnoj mjeri napraviti poređenje sa RCA). Takođe, kod betona C-RC-K dobijena je veća poroznost cementnog kamena, odnosno veći porni prostor (krupnih pora i kapilara), za ekspanziju leda i migraciju vode tokom mržnjenja. Dakle, otpornost betona na mraz je i u funkciji poroznosti.

Poređenjem betona sa riječnim i drobljenim agregatom, uočava se da ne postoji značajna razlika u otpornosti na dejstvo mraza.

V. ZAKLJUČAK

Otpornost betona na dejstvo mraza zavisi od vrste primijenjenog agregata. Ovo se prvenstveno odnosi na izbor između recikliranog agregata nepoznatog porijekla i ostalih primijenjenih vrsta agregata (riječnog, drobljenog, mješavine riječnog i recikliranog agregata poznatog porijekla). Primjena recikliranog agregata nepoznatog porijekla utiče na smanjenje otpornosti na dejstvo mraza, u odnosu na prosječnu otpornost, koja se uočava kod betona sa nekom od drugih vrsta agregata. Do navedenog smanjenja dolazi tek nakon 200 ciklusa naizmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja, čemu su svakako doprinijele činjenice da se ovaj beton karakteriše većom količinom cementnog kamena, najvećim količinama upijene vode i najvećom mogućnošću da u manjoj mjeri zaostanu sastojci koji smanjuju kvalitet agregata u pogledu predmetnog svojstva (napominje se da je sirovina za proizvodnju ovog agregata bio otpadni beton sa deponije građevinskog šuta). Stoga se ne može očekivati da bi primjena recikliranog agregata nepoznatog porijekla mogla zadovoljiti strože zahtjeve u pogledu otpornosti na dejstvo mraza. Ipak, primjenom svih navedenih vrsta agregata, a za tehnologiju proizvodnje samougrađujućeg betona praškastog tipa, pokazalo se mogućim izrada betona otpornih na 200 ciklusa mraza.

Izbor između riječnog i/ili drobljenog ili recikliranog agregata poznatog porijekla, nema značajan uticaj na otpornost na dejstvo mraza. Pokazalo se da se bolja otpornost na dejstvo mraza dobija što je veća čvrstoća betona pri pritisku i veća zaostala poroznost.

LITERATURA

- [1] Y. Şahin, Y. Akkaya, and M. Taşdemir, "Effects of freezing conditions on the frost resistance and microstructure of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 270, pp. 121458, 2020.
- [2] K. Ma, K. Feng, Z. Wang, G. Long, Y. Xie and W. Li, "Mechanical properties and crack evolution of SCC with macro-crack under freeze-thaw cycles," *Journal of Building Engineering*, vol. 69, pp. 106323, 2023.
- [3] G. Broćeta, M. Malešev, V. Radonjanin, S. Šupić, A. Savić, I. Lukić, A. Cumbo and M. Latinović, "Effect of aggregate origin on freeze/thaw resistance of self-compacting concrete with and without a de-icing agent," *Building Materials and Structures*, vol. 66, no. 4, pp. 2300013B, 2023.
- [4] J. Nilimaa and V. Zhaka, "An Overview of Smart Materials and Technologies for Concrete Construction in Cold Weather," *Eng.*, vol. 4, pp. 1550–1580, 2023.
- [5] D. Jevtić, G. Broćeta i A. Savić, "Projektovanje mješavina samozbijajućih betona," *Savremeni materijali 2013*, VI Međunarodni naučni skup, Banjaluka, str. 497–514, 2014.
- [6] A. Savić, G. Broćeta, M. Aškrabić, S. Panić and L. Vidanović, "Effect of Mixing Approach on the Properties of Concrete with Different Aggregate Types," *Contemporary Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 74–83, 2022.
- [7] K. C. Onyelowe, S. Hanandeh, V. Kamchoom, et al. "Mechanical properties of self compacting concrete reinforced with hybrid fibers and industrial wastes under elevated heat treatment," *Scientific Reports*, vol. 15, pp. 12753, 2025.
- [8] B. N. Kumar, A. M. Reddy and P. S. Vineela, "Development of sustainable high performance self compacting concrete using construction & demolition waste and steel slag," *Discover Civil Engineering*, vol. 2, pp. 62, 2025.
- [9] A. Savić, M. Aškrabić, B. Kovačević and D. Pavlović, "Properties of SCC mixtures with coarse recycled aggregates," *ASES International Congress Proceedings*, pp. 265–274, 2018.
- [10] M. Popović, B. Borozan, M. Štavljanin, A. Savić and M. Latinović, "Evaluation of scc mixtures with the combined use of crumb rubber and recycled concrete aggregate," *10th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Union of Mechanical and Electrotechnical Engineers and Technicians of Serbia (SMEITS) Society for Renewable Electrical Power Sources*, 2022.
- [11] M. Popović, A. Savić, G. Broćeta, B. Borozan and M. Štavljanin, "Experimental investigation of scc with recycled rubber and recycled concrete aggregate," *International Conference On Contemporary Theory and Practice In Construction XV*, Banja Luka, pp. 63–72, 2022.
- [12] G. Broćeta, M. Malešev i V. Radonjanin, *Trajnost samougrađujućeg betona u funkciji primijenjene vrste agregata*, Naučna monografija izuzetnog značaja, Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-gradjevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, 2021.
- [13] M. Malešev, V. Radonjanin and G. Broćeta, "Properties of recycled aggregate concrete," *Contemporary Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 240–249, 2014.
- [14] M. Tuyan, A. Mardani-Aghabaglou and K. Ramyar, "Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate," *Materials & Design* vol. 53, pp. 983–991, 2014.
- [15] H. Öznur Öz, H. Erhan Yücel and M. Güneş, "Freeze-Thaw Resistance of Self Compacting Concrete Incorporating Basic Pumice," *Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 1, pp. 285–291, 2016.
- [16] S. B. Huda and M. S. Alam, "Mechanical and Freeze-Thaw Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no.10, 2015.
- [17] H. Yan, Qi. Liu, F. Han, S. Liu, T. Han and B. He, "Frost Durability of Self-Compacting Concrete Prepared with Aeolian Sand and Recycled Coarse Aggregate," *Materials*, vol. 16, no. 19, pp. 6393, 2023.
- [18] EN 12350-1:2019 Testing fresh concrete – Part 1: Sampling and common apparatus.
- [19] EN 12350-7:2019 Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods.
- [20] EN 12350-8:2019 Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test.
- [21] EN 12350-6:2019 Testing fresh concrete – Part 6: Density.
- [22] EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [23] SRPS U.M1.016:1992 Beton – Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza.
- [24] S. Marinković, I. Ignjatović, V. Radonjanin and M. Malešev, "Recycled Aggregate Concrete for Structural Use – An Overview of Technologies, Properties and Applications," *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, 2011.
- [25] V. Radonjanin, M. Malešev, S. Marinković and A. E. Sead Al Malt, "Green recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1503-1511, 2013.

ABSTRACT

The aggressive action of freeze-thaw cycles is one of the principal causes of degradation in concrete structures located in regions with harsh cold climatic conditions during the winter season, such as the territory of the Republic of Srpska.

The aim of this study is to experimentally investigate the influence of various types of recycled aggregates – obtained by crushing old waste concrete – on the extent of degradation in self-compacting concrete (SCC) when exposed to aggressive freeze-thaw conditions.

The experimental program involved the design of four SCC mixtures with aggregates of different origins available on the local market: natural river aggregate (NRA), crushed natural aggregate (NCA), and recycled concrete aggregates of known (RCA-K) and unknown provenance (RCA-U).

The evaluated properties included, for fresh concrete: temperature, entrapped air content, consistency, and bulk density; and for hardened concrete: compressive strength at 28 days and freeze-thaw resistance.

Although all tested mixtures satisfied the requirements of the national regulatory standards regarding freeze-thaw resistance after 150 and 200 cycles of alternate freezing and thawing, the type of aggregate used was found to have a non-negligible influence. Specifically, the choice between river and crushed natural aggregates showed no significant impact on frost resistance. In contrast, the recycled aggregate of known provenance (RCA-K) proved to be a viable substitute for natural aggregates under freeze-thaw exposure. The greatest reduction in frost resistance – on average approximately 10% compared to mixtures incorporating other aggregate types – was observed in SCC mixtures containing recycled aggregate of unknown provenance (RCA-U), particularly after 200 freeze-thaw cycles.

EFFECT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE APPLICATION ON THE FREEZE-THAW RESISTANCE OF CONCRETE

Gordana Broćeta, Marina Latinović Krndija, Anđelko Cumbo, Aleksandar Savić, Slobodan Šupić, Žarko Lazić