

Primljen / Received: 12.6.2015.

Ispravljen / Corrected: 17.2.2017.

Prihvaćen / Accepted: 18.5.2017.

Dostupno online / Available online: 10.10.2017.

Utjecaj letećeg pepela i smanjenja vodovezivnog omjera na svojstva betona s recikliranim agregatom

Autori:



¹Prof. dr. sc. **Mirjana Malešev**, dipl.ing. građ.
miram@uns.ac.rs



¹Prof. dr. sc. **Vlastimir Radonjanin**, dipl.ing. građ.
radonv@uns.ac.rs



¹Mr. sc. **Suzana Draganić**, dipl.ing. građ.
suzanav@uns.ac.rs



¹Mr. sc. **Slobodan Šupić**, dipl.ing. građ.
ssupic@uns.ac.rs



¹Doc. dr. sc. **Mirjana Laban**, dipl.ing. građ.
mlaban@uns.ac.rs

¹Sveučilište u Novom Sadu
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo

Prethodno priopćenje

Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin, Suzana Draganić, Slobodan Šupić, Mirjana Laban

Utjecaj letećeg pepela i smanjenja vodovezivnog omjera na svojstva betona s recikliranim agregatom

U radu su prikazani rezultati ispitivanja zajedničkog učinka djelomične zamjene cementa s letećim pepelom i upotrebe recikliranog agregata s ciljem poboljšanja održivosti betona. Ispitivano je devet betonskih mješavina, u kojima su varirani količina letećeg pepela i vodovezivni omjer, analizirani su: tlačna čvrstoća, kapilarno upijanje, vodopropusnost i otpornost na prodor klorida. Dobiveno je da se povećanjem količine letećeg pepela neznatno smanjuje tlačna čvrstoća, ali da se smanjenjem vodovezivnog omjera to može nadomjestiti.

Ključne riječi:

reciklirani agregat, leteći pepeo, održivost, tlačna čvrstoća, trajnost

Preliminary report

Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin, Suzana Draganić, Slobodan Šupić, Mirjana Laban

Influence of fly ash and decreasing water-powder ratio on performance of recycled aggregate concrete

Investigation results of the combined effect of partial cement replacement with fly ash, and the use of recycled concrete aggregate to improve the sustainability of concrete, are presented in this paper. The compressive strength, capillary water absorption, water permeability, and chloride ion penetration, are analysed by testing nine concrete mixtures, in which the fly ash content and water to powder ratio were varied. The results show that compressive strength slightly decreases as the fly ash content increases, but that this can be compensated by reducing the water to powder ratio.

Key words:

recycled aggregate, fly ash, sustainability, compressive strength, durability

Vorherige Mitteilung

Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin, Suzana Draganić, Slobodan Šupić, Mirjana Laban

Einfluss von Flugasche und der Reduktion des Wasserbindemittelwerts auf die Eigenschaften von Beton mit wiederverwertetem Aggregat

In der Arbeit werden die Prüfergebnisse der gemeinsamen Auswirkung eines Teilersatzes von Zement durch Flugasche und des Einsatzes von wiederverwertetem Aggregat zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Beton dargestellt. Es wurden neun Betonmischungen untersucht, bei welchen die Menge von Flugasche und das Verhältnis Wasser-Bindemittel variiert wurden, dabei wurden folgende Werte analysiert: Druckfestigkeit, kapillare Absorption und Beständigkeit auf die Durchdringung von Chloriden. Es hat sich gezeigt, dass eine Erhöhung des Anteils von Flugasche die Druckfestigkeit unbedeutend reduziert, was aber durch die Reduktion des Wasserbindemittelwerts ersetzt werden kann.

Schlüsselwörter:

wiederverwertetes Aggregat, Flugasche, Nachhaltigkeit, Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit

1. Uvod

Porast svjetske populacije doveo je do eksponencijalnog povećanja potrošnje prirodnih resursa i energije, posljedično dovodeći do povećanja količine otpada. Stoga, recikliranje otpada nastalog pri građenju i rušenju objekata predstavlja bitan korak prema održivosti u građevinskoj industriji [1]. Reciklirani krupni agregat se koristi više od 70 godina u građevinarstvu, a posebno agregat od recikliranog betona (eng. *Recycled Coarse Aggregate* - RCA). Rezultati istraživanja svojstava betona s krupnim recikliranim agregatom intenzivno su razmatrani u radovima [2-5]. Cjelokupni zaključak je da su čvrstoća i svojstva trajnosti betona sa RCA lošiji od istih svojstava betona s prirodnim agregatom. Postoji konsenzus u pregledu literature da uslijed povećanja udjela zamjene prirodnog agregata sa RCA, trajnosna svojstva opadaju [1]. Međutim, dobivena svojstva su još uvijek zadovoljavajuća za određene primjene u građevinskoj praksi.

Osim zamjene prirodnog agregata, otpadni materijali s cementirajućim svojstvima (SCMs) kao što su leteći pepeo, zgura visokih peći, silikatna prašina i pepeo od rižinih ljuski i metakaolin mogu se koristiti kao djelomična zamjena za portlandski cement. Ti materijali poboljšavaju trajnost betona, smanjuju rizik od toplinskih pukotina u masivnim betonima, osiguravaju manju potrošnju energije i emitiraju manje CO₂ u odnosu na cement [6-9]. Općenito je ustanovljeno da upotreba mineralnih dodataka ima pozitivan utjecaj na otpornost betona protiv prodora kloridnih iona. Ovo poboljšanje je ostvareno u betonu s recikliranim agregatom s povećanim udjelom zamjene i u odgovarajućem betonu s prirodnim agregatom u približno istom udjelu [1].

Prednosti upotrebe letećeg pepela u betonima s recikliranim agregatom opširno su istraživane tijekom protekla dva stoljeća. Autori ističu da je smanjena propusnost za vodu i agresivne tvari najvažniji ostvareni dobitak [7, 10-16]. Na primjer, Kou i ostali [16] su ispitivali 24 različite betonske mješavine, sa 0 %, 20 %, 50 % i 100 % zamjene prirodnog agregata sa RCA, uz 0 %, 25 % i 35 % zamjene cementa s letećim pepelom, pri čemu je variran vodocementni odnos (0,55 i 0,45). Zaključeno je da se s povećanjem udjela RCA smanjuje otpornost betona na prodor klorida. Međutim, pri zamjeni cementa sa letećim pepelom i smanjenju vodocementnog odnosa, otpornost je povećana.

Cilj je ovog istraživanja poboljšati čvrstoću i trajnost betona u kojem se koriste oba otpadna materijala: stopostotni agregat od recikliranog betona i velika količina letećeg pepela. Taj cilj je postignut smanjenjem vodovezivnog omjera.

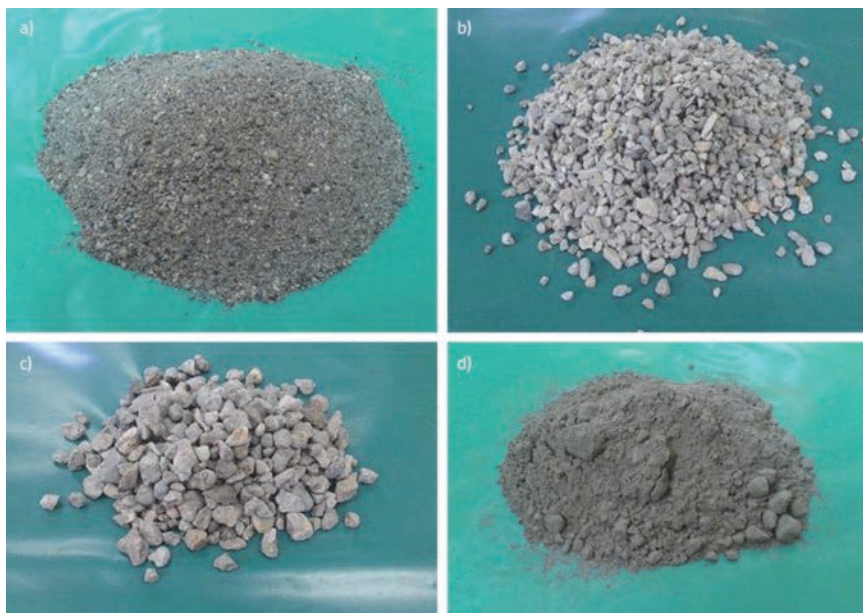
2. Eksperimentalno istraživanje

Na osnovi rezultata prethodnih istraživanja betona s recikliranim agregatom (eng. *Recycled Aggregate Concrete* - RAC) [17, 18], za daljnja istraživanja je izabran beton u kojem je 100 % krupnog prirodnog agregata zamijenjeno s agregatom od recikliranog betona i u kojem se koristi velika količina letećeg pepela (FA). U ovoj fazi, istraživani je utjecaj količine letećeg pepela i vodovezivnog omjera na tlačnu čvrstoću betona, kapilarno upijanje vode, otpornost na prodor klorida i dubinu prodora vode pod pritiskom. Sva svojstva su ispitana pri starosti od 28 dana. Radi utvrđivanja utjecaja velike količine letećeg pepela i niskog vodovezivnog omjera (v/v) na izabrana svojstva RAC, ispitano je devet betonskih mješavina. One su podijeljene u tri grupe. U prvoj grupi, nije se koristio leteći pepeo. U drugoj je grupi 30 % cementa zamijenjeno s letećim pepelom, a u trećoj je grupi 50 % cementa zamijenjeno s letećim pepelom. U svakoj grupi je variran vodovezivni omjer: 0,54, 0,40 i 0,30. Agregat od recikliranog betona je korišten kao krupni agregat u svim betonima. Za potrebe ispitivanja svojstava očvrstnalog betona pripremljen je ukupno 81 uzorak.

2.1. Materijali

Za izradu betonskih mješavina, u okviru istraživanja, korišteni su:

- portlandski cement CEM I 42.5R (Lafarge – BFC Srbija)
- sitan agregat (prirodni riječni agregat, rijeka Drina, frakcija 0/4 mm)
- krupni agregat (agregat od recikliranog betona, nepoznatog porijekla, frakcije 4/8 i 8/16 mm)
- leteći pepeo (Termoelektrana "Nikola Tesla B" Obrenovac – Srbija)
- superplastifikator HRWRA 1 ("Sika ViscoCrete 3070", "Sika"-Switzerland, $\gamma_s = 1090 \text{ kg/m}^3$)



Slika 1. Agregat i leteći pepeo: a) sitan riječni agregat (0-4 mm); b) RCA (4-8 mm); c) RCA (8-16 mm); d) leteći pepeo

Tablica 1. Kemijski sastav i specifična masa cementa i letećeg pepela

Materijal	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	TiO ₂ [%]	MgO [%]	P ₂ O ₅ [%]	SO ₃ [%]	LOI [%]	Specifična masa [g/cm ³]
Cement	21,25	5,55	25,30	61,60	0,25	0,72	-	2,37	-	3,75	1,77	3,1
Leteći pepeo	58,24	20,23	5,33	7,62	0,52	1,51	0,45	2,01	0,00	2,21	1,64	2,1

- superplastifikator HRWRA 2 ("Sika ViscoCrete 5500MP"; "Sika"- Switzerland, $\gamma_s = 1100 \text{ kg/m}^3$),
- voda iz gradskog vodovoda.
- Upotrebljeni agregat i leteći pepeo prikazani su na slici 1.

Kemijski sastav i specifična masa cementa i letećeg pepela određeni su u skladu s normama SRPS EN 196-2 i SRPS EN 196-6 [19]. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 1.

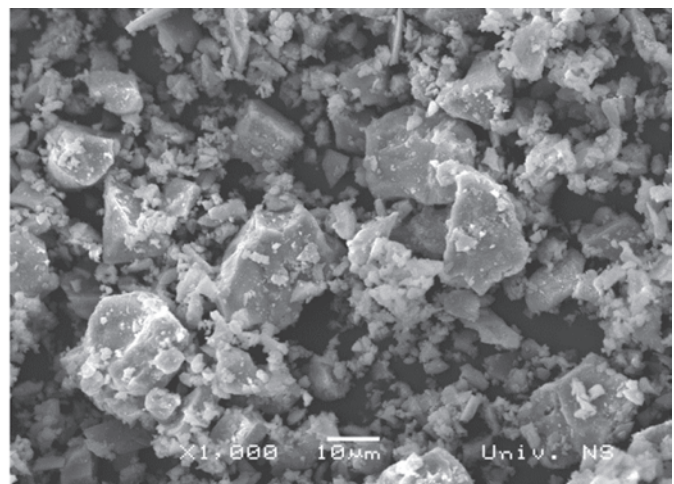
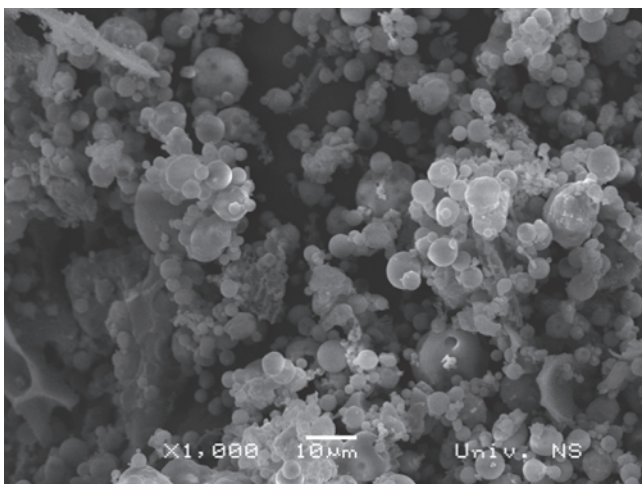
Na osnovi ispitivanja finoće, leteći pepeo je klasificiran u skladu s normom EN 450-1, kao pepeo tipa N. Radi utvrđivanja osnovnih fizikalnih karakteristika čestica cementa i letećeg pepela, primijenjena je metoda skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Na slici 2. su SEM slike koje prikazuju karakterističnu morfologiju letećeg pepela i cementa. Većina čestica letećeg pepela se sastoji od zrna sfernog oblika, dok čestice cementa imaju nepravilan poligonalni oblik. Čestice letećeg pepela mogu ispuniti unutrašnju strukturu cementa jer su mnogo sitnije od čestica portlandskog cementa, kao što je prikazano na slici 2.

Sadržaj stare očvrstnule cementne paste povezane s originalnim prirodnim agregatom u RCA je određen postupkom otapanja u 16-postotnoj klorovodoničnoj kiselini. Rezultati su pokazali

da 38 % recikliranog agregata čini vezani mort. Sva prikazana svojstva RAC ispitana su u skladu s europskim normama, osim otpornosti na drobljenje koja je određena u skladu s nacionalnom normom. Granulometrijski sastav upotrebljenih vrsta agregata je određen metodom prosijavanja (tablica 2.). Ostala ispitana svojstva agregata prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Svojstva upotrebljenih vrsta agregata

Vrsta agregata	Prividna volumenska masa [kg/m ³]	Udio klorida [%]	Udio sitnih čestica [%]	Upijanje vode nakon 60 min [mas. %]	Otpornost na drobljenje [%]
NA 0/4 mm	2650	-	0,64	<1	Ne zahtijeva se
RCA 4/8 mm	2350	0,03	0,03	5,1	17
RCA 8/16 mm	2350	0,03	0,04	3,5	20



Slika 2. SEM slike: čestice letećeg pepela i CEM I uvećane 1000 puta

Tablica 2. Granulometrijski sastav agregata [%]

Veličina sita [mm]	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
NA 0/4 mm	1	15	56	74	84	95	100	100	100
RCA 4/8 mm	1	1	1	2	2	4	90	100	100
RCA 8/16 mm	0	0	0	0	0	0	3	99	100

Prividna volumenska masa zadovoljava kriterij za RCA ($> 2100 \text{ kg/m}^3$). Udio sitnih čestica u RAC je zanemariv. Kriterij za otpornost na drobljenje RAC je također ispunjen ($< 30 \%$).

2.2. Projektiranje sastojaka betonskih mješavina

Projektiranje sastava betonskih mješavina provedeno je na osnovi sljedećih pretpostavki:

- Apsolutni volumen praškaste komponente i vode iznosi $0,3 \text{ m}^3$, a apsolutni volumen agregata oko $0,7 \text{ m}^3$ i te su komponente održavane konstantnim u svim mješavinama.
- Maksimalno zrno agregata $D_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$.
- Betonske mješavine su spravljene sa 50 % sitnog riječnog agregata (0/4 mm) i 50 % krupnog agregata od recikliranog betona (4/8 mm i 8/16 mm). Granulometrijski sastav mješavine agregata odgovara Fulerovoj kontinuiranoj krivulji.
- Dodatna količina vode određena je na osnovi upijanja vode recikliranog agregata.
- Količina superplastifikatora određena je radi postizanja potrebne konzistencije.
- Količina uvučenog zraka oko 1-2 %.

Na osnovi navedenih uvjeta izračunane su količine materijala potrebne za kubni metar betona. Potrebne količine materijala prikazane su u kg/m^3 u tablici 4.

2.3. Metode ispitivanja

Konzistencija svježeg betona je određena metodom slijeganja (EN 12350-2), a količina uvučenog zraka metodom pritiska prema normi EN 12350-7. Svi uzorci su vibrirani na vibrostolu. Tlačna čvrstoća betona je određena u skladu s uputama danim u normi SRPS ISO 4012 [20] na kockama $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$, kao što je prikazano na slici 3. Za svaku vrstu betona ispitana su po tri uzorka.



Slika 3. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Kapilarno upijanje vode referentnog betona i betona s letećim pepelom određeno je primjenom postupka opisanog u normi SRPS U.M8.300 [21]. Tri valjkasta uzorka, promjera 95 mm i debljine 50 mm korištena su za ispitivanje. Priprema uzoraka (kondicioniranje) provedeno je prema britanskoj normi BS 1881-122 [22]. Prije mjerenja mase kondicioniranih uzoraka, njihove bočne površine su zatvorene vodonepropusnom membranom. Zatim je donja strana uzorka potopljena u običnu vodu do maksimalne dubine od 5 mm. Upijanje vode, kapilarnim putem, izmjereno je na osnovi promjene mase uzorka, $m(t)$, u vremenskim intervalima 1, 2, 15, 30 minuta, 1 sat, 4 sata i 25 sati od kontakta s vodom.

Da bi se odredile otpornosti na prodor klorida, provedena su dva ispitivanja. U prvom ispitivanju beton je ispitivan na brzu penetraciju klorida (eng. *Rapid Chloride Penetration Test - RCPT*),

Tablica 4. Sastojci betonskih mješavina RAC u kg/m^3

Betonska mješavina	Cement m_c	Mineralni dodatak FA	Voda $m_{w,tot}$		Vodovezivni omjer	Agregat			Kemijski dodatak HRWRA
			m_w	$m_w + m_{w,add}^a$		NA 0/4	RCA 4/8	RCA 8/16	
E1	350	-	190	35,6	0,543	849	373	475	-
E2	412	-	165	35,6	0,404	849	373	475	2,5
E3	473	-	142	35,6	0,309	849	373	475	5,7 ^b
R11	255	76,8	180,7	35,6	0,543	849	373	475	-
R12	304	91	158	35,6	0,401	849	373	475	0,79
R13	348	104	135,6	35,6	0,304	849	373	475	2,71
R21	218	109	177,6	35,6	0,543	849	373	475	-
R22	257	129	154,4	35,6	0,403	849	373	475	1,54
R23	295	148	133	35,6	0,303	849	373	475	1,77

^a $m_{w,add}$ – dodatna količina vode određena na osnovi upijanja vode recikliranog agregata.

^b Količina superplastifikatora prelazi 3 kg/m^3 pa je dodatna količina vode uzeta u obzir u vodovezivnom omjeru.

prema ASTM C1202-2012 [23] dok drugi test predstavlja kolorimetrijsku metodu, opisanu u NT Build 492 [24].

RCPT ispitivanje obuhvaća dvije faze: fazu pripreme uzoraka i fazu ispitivanja. Test se sastoji od određivanja količine električne struje koja prođe kroz valjke (debljine 50 mm i promjera 95 mm) u roku 6 sati. Razlika potencijala od 60 V (dc) je održavana na krajevima uzoraka, pri čemu je jedan kraj potopljen u 3 postotnu otopinu NaCl, a drugi u 3N otopinu NaOH. Ukupna količina naboja koja prođe kroz uzorak, izražena u kulonima, predstavlja mjeru propusnosti i pokazatelj je otpornosti betona na prodor klorida. Ukupno 27 uzoraka je izloženo električnom polju s induciranom migracijom kloridnih iona (slika 4.).



Slika 4. Mjerenje elektropropusnosti betona

NT BUILD 492 metoda također obuhvaća fazu pripreme uzoraka i fazu ispitivanja. U okviru ispitivanja za svaku vrstu betona upotrebljena su tri valjkasta uzorka, promjera 95 mm i debljine 50 mm. Tijekom ispitivanja, vanjski električni potencijal je aksijalno nanijet kroz uzorke i time je izazvana migracija kloridnih iona. Nakon 24 sata, uzorci su aksijalno presječeni i poprskani srebrenim nitratom na jednu od svježe presječenih površina uzorka. Dubina prodiranja klorida izmjerena je na osnovi vidljivog taloga bijelog srebrnog klorida (slika 5.), nakon čega je izračunan nestacionarni koeficijent migracije klorida prema izrazu (1).



Slika 5. Kolorimetrijska test metoda

$$D_{\text{nssm}} = \frac{0.0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(x_d - 0.0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

gdje je:

- D_{nssm} - nestacionarni koeficijent migracije klorida, $\times 10^{-12}$ [m²/s]
- U - apsolutna vrijednost primijenjenog napona [V]
- T - prosječna vrijednost početne i krajnje temperature u anolitnoj otopini [°C]
- L - debljina uzorka [mm]
- x_d - prosječna vrijednost dubine penetracije [mm]
- t - vrijeme trajanja testa [sati].

Postupak za određivanje dubine prodiranja vode pod pritiskom u očvrslu beton proveden je prema normi SRPS EN 12390-8 [25]. Upotrebjeni su uzorci oblika kocke, brida 15 cm. Tijekom kondicioniranja uzorci su 7 dana izloženi vlažnosti od $60 \pm 5\%$ na temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Pri starosti od 28 dana, površina očvrslulog betona je izložena djelovanju vode pod tlakom od 500 kPa u trajanju od 72 sata (slika 6.). Nakon toga uzorak je presječen i izmjerena je dubina prodora vode pod tlakom (slika 7.).



Slika 6. Ispitivanje prodora vode pod tlakom



Slika 7. Vizualno određivanje dubine prodora vode

Uzorci upotrebjeni za ispitivanje tlačne čvrstoće, kapilarno upijanje vode i prodor kloridnih iona njegovani su u vodi (na temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$) do starosti 28 dana, a uzorci za ispitivanje prodora vode pod pritiskom njegovani su 21 dan pod istim uvjetima.

3. Rezultati i rasprava

3.1. Konzistencija i sadržaj uvučenog zraka u svježem betonu

Rezultati ispitivanja konzistencije i uvučenog zraka u svježem betonu prikazani su u tablici 5. Većina ispitanih betonskih mješavina ima konzistenciju S2 prema normi SRPS EN 206-1 [26] i zadovoljava uvjet za količinu uvučenog zraka. Analizom dobivenih rezultata zaključeno je da leteći pepeo nema negativan utjecaj na obradljivost i količinu uvučenog zraka.

3.2. Tlačna čvrstoća betona

Izmjerene tlačne čvrstoće betona pri starosti od 28 dana, ovisno o vodovezivnom omjeru i tzv. efektivnom vodovezivnom omjeru (v/v_{eff}), prikazane su u tablici 6. i na slici 8.

Efektivni vodovezivni omjer izračunan je prema konceptu k-vrijednosti. Prema konceptu k-vrijednosti, definiranom u normi SRPS EN 206-1, leteći pepeo se uzima u proračun zamjenom termina "vodocementni odnos" sa "voda/(cement + k × leteći pepeo) odnos". Maksimalna količina letećeg pepela koja se uzima u obzir za koncept k-vrijednosti treba zadovoljiti uvjet: leteći pepeo/cement $\leq 0,33$ po masi.

Ako se koristi veća količina letećeg pepela, višak se neće uzeti u obzir prilikom proračuna odnosa voda/(cement + k × leteći pepeo). Za beton koji sadrži cement tipa CEM I dopuštena k-vrijednost je 0,4 u skladu s normom EN 206-1 [26].

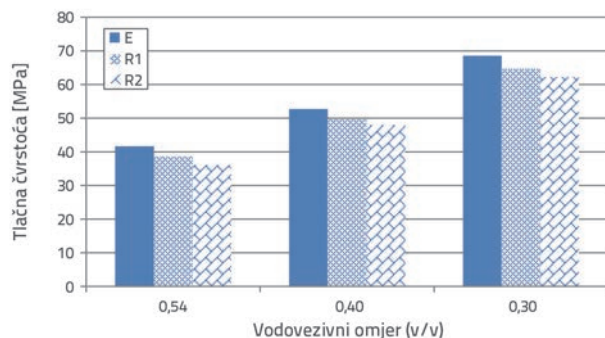
Tablica 5. Konzistencija i količina uvučenog zraka u svježem betonu

Vrsta betona	E1	E2	E3	R11	R12	R13	R21	R22	R23
FA [%]	0	0	0	30	30	30	50	50	50
v/v	0,543	0,404	0,309	0,543	0,401	0,304	0,543	0,403	0,303
SPC [%]	-	0,6*	1,2*	-	0,2**	0,6**	-	0,4**	0,4**
S [mm]	70	70	40	75	60	80	70	90	80
Δp [%]	1,8	2,2	2,5	2,0	1,8	2,5	2,2	2,0	2,2

* SIKA Viscocrete 3070, **SIKA Viscocrete 5500HP

Tablica 6. Tlačna čvrstoća, vodovezivni omjer (v/v) i efektivni vodovezivni omjer (v/v_{eff})

Vrsta betona	Referentni uzorci			RAC (30 % FA)			RAC (50 % FA)		
	E1	E2	E3	R11	R12	R13	R21	R22	R23
v/v	0,543	0,4	0,3	0,543	0,4	0,3	0,543	0,4	0,3
v/v_{eff}	0,543	0,4	0,3	0,63	0,46	0,35	0,72	0,53	0,4
$f_{c,28}$ [MPa]	41,63	52,73	68,53	38,6	49,6	64,7	36,1	47,9	62,27



Slika 8. Veza tlačne čvrstoće i vodovezivnog omjera betona s recikliranim agregatom

Na slici 8. može se vidjeti da ne postoje značajne razlike između referentnog betona i betona s letećim pepelom u okviru istog vodovezivnog omjera. Za beton s vodovezivnim omjerom 0,543 razlika između betona E1 i R11 je oko 3 MPa (7 %), dok je razlika između betona E1 i R21 oko 5 MPa (13 %). Za beton sa v/v omjerom 0,4 razlika između betona E2 i R12 je oko 3 MPa (6 %), dok je razlika između betona E2 i R22 oko 5 MPa (9 %). Ista razlika uočena je kod betona s vodovezivnim omjerom 0,3.

Značajno povećanje čvrstoće je zabilježeno prilikom smanjenja v/v omjera. Za E seriju, razlike između betona E1 i E2, E3 i E1 su 11 MPa (27 %) i 27 MPa (65 %). Za R1 seriju, razlike između betona R11 i R12, i R11 i R13 su 11 MPa (29 %) i 26 MPa (68 %). Za seriju R2, razlike između R21 i R22, i R21 i R23 su 12 MPa (33 %) i 26 MPa (72 %).

Tlačne čvrstoće nakon 28 dana mogu biti u rasponu od 36,1 MPa za 50 % FA mješavinu i vodovezivni omjer 0,54 (beton R21) do 68,53 MPa za 100 % PC mješavinu i vodovezivni omjer 0,3 (beton E3). Smanjenje tlačne čvrstoće zbog primjene određene količine letećeg pepela može se nadoknaditi odgovarajućim vodovezivnim omjerom. Na primjer, beton E1 je imao čvrstoću 41,63 MPa. Djelomičnom zamjenom cementa sa 30 % letećeg

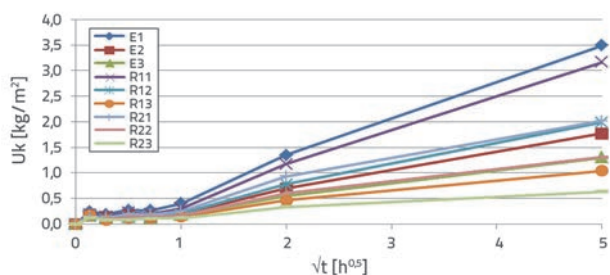
pepela i smanjenjem v/v omjera sa 0,543 na 0,4 možemo postići povećanje čvrstoće za 8 MPa (19 %). Ili, u najboljem slučaju, čvrstoća se može povećati za 23 MPa (55 %) ako se djelomično zamjeni cement s 30 % pepela i smanji v/v omjer s 0,543 na 0,3. Posljedično, radi postizanja zahtijevane ugradivosti, nužno je primijeniti superplastifikator.

Postignuta tlačna čvrstoća betona može biti promatrana i s aspekta v/v_{eff} odnosa (tablica 6.). Očigledno je da smanjenje v/v_{eff} omjera dovodi do povećanja tlačne čvrstoće. Pozitivan utjecaj letećeg pepela, kao posljedica boljeg pakiranja čestica i povećanja gustoće, može se vidjeti usporedbom betona E2 i R23. Beton R23 ima za 10 MPa veću čvrstoću pri istom v/v_{eff} omjeru.

Unatoč smanjenju tlačne čvrstoće betona u početnom periodu, pri zamjeni cementa s određenom količinom letećeg pepela, uslijed pucolanskih karakteristika pepela, mnogi istraživači su pokazali da leteći pepeo dovodi do porasta čvrstoće tijekom vremena.

3.3. Kapilarno upijanje vode

Kapilarno upijanje vode tijekom vremena prikazano je na slici 9., a koeficijenti kapilarnog upijanja za ispitane vrste betone na slici 10. (u odnosu na v/v omjer) i na slici 11. (u odnosu na v/v_{eff} omjer).

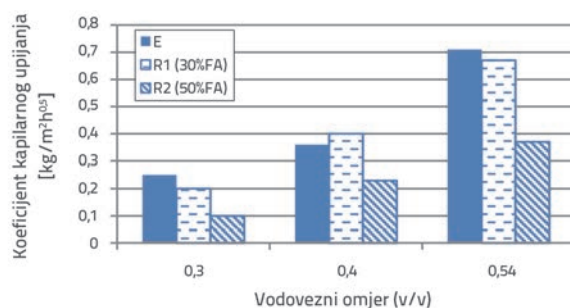


Slika 9. Zavisnost kapilarnog upijanja vode i kvadratnog korijena vremena

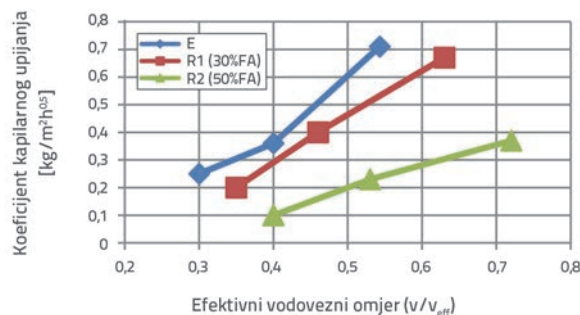
Bilo je teško vizualno ocijeniti linearnu zavisnost apsorbirane vode u različitim vremenskim intervalima, te su kroz promatrane skupove točaka provučene regresijske krivulje i dobiven je koeficijent korelacije čija je vrijednost iznosila približno 1, a što je potvrdilo linearno ponašanje kapilarnog upijanja.

Tijekom prvog sata uzorci su pokazali sporo kapilarno upijanje vode. Između prvog i četvrtog sata uočeno je intenzivno upijanje

i nakon toga, u preostalom periodu ispitivanja, apsorpcija je usporena. Sa smanjenjem v/v omjera, uočeno je da je došlo do smanjenja kapilarnog upijanja, kao što je prikazano na slikama 10. i 11. Također, mješavine u kojima je cement djelomično zamijenjen pepelom ostvarile su manje kapilarno upijanje vode (slika 11.). Općenito, veće količine pepela dovode do manje apsorpcije vode. Međutim, zabilježeno je odstupanje u rezultatima kod uzoraka serije R12, što je izazvano neobjašnjivim okolnostima.



Slika 10. Zavisnost koeficijenta kapilarnog upijanja i v/v omjera



Slika 11. Zavisnost koeficijenta kapilarnog upijanja i v/v_{eff} omjera

3.4. Otpornost betona na prodor klorida

Sve betonske mješavine pokazale su visoke RCPT (eng. *Rapid Chloride Penetration Test*) vrijednosti. Prema [13], prijenos iona kroz beton ovisi o strukturi pora, a električna provodljivost betona ili RCPT rezultati ovisi, osim o karakteristikama pora, i o električnoj provodljivosti otopine u njima, a koja je određena njegovim sastavom. Prema tome, ne preporučuje se upotreba vrijednosti električne provodljivosti betona ili RCPT rezultata pri ocjeni otpornosti na prodor klorida betona koji sadrže SCMs. Kako bi se izbjegli pogrešni zaključci, kao alternativni način ispitivanja otpornosti tih betona na prodor klorida odabrana je kolorimetrijska metoda.

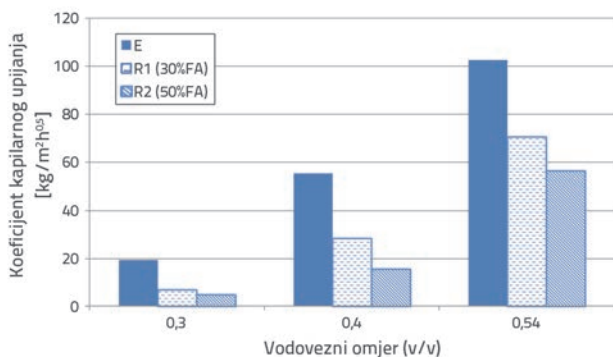
Tablica 7. Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije klorida od v/v i v/v_{eff} omjera za RAC

Vrsta betona	RAC			RAC (30 % FA)			RAC (50 % FA)		
	E1	E2	E3	R11	R12	R13	R21	R22	R23
v/v	0,543	0,4	0,3	0,543	0,4	0,3	0,543	0,4	0,3
v/v_{eff}	0,543	0,4	0,3	0,63	0,46	0,35	0,72	0,53	0,4
D_{nssm} [$\times 10^{-12}$ m ² /s]	102,76	55,18	19,38	70,67	28,44	6,90	56,37	15,42	4,82

U tablici 7. prikazane su izračunate vrijednosti koeficijenta migracije klorida betonskih mješavina dobiveni na osnovi izmjerenih vrijednosti dubine prodiranja klorida (slika 5.). Rezultati pokazuju da se vrijednosti koeficijenta migracije nalaze u opsegu od $(4,82-102,76) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Prema Nilssonovom kriteriju, svi betoni pokazali su vrlo malu otpornost na prodor klorida ($> 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), osim betona sa $v/v = 0,3$ i sa 30 % i 50 % letećeg pepela (R13 i R23) koji su pokazali visoku otpornost na prodor klorida i dobru kvalitetu betona. Tablica 7. pokazuje da zamjena dijela cementa letećim pepelom poboljšava otpornost betona na prodor klorida.

Na osnovi rezultata prikazanih u tablici 7. uočava se da do smanjenja prodora slobodnih iona klorida dolazi uslijed povećanja udjela letećeg pepela i/ili uslijed smanjenja vodovezivnog omjera. Međutim, zaključeno je da vodovezivni omjer značajno utječe na vrijednost koeficijenta migracije klorida.

Na slici 12. prikazana je zavisnost između nestacionarnog koeficijenta migracije klorida i vodovezivnog faktora za sve ispitane vrste betona, čime su ilustrirani navedeni zaključci. Prema procjeni otpornosti na prodor kloridnih iona, danoj u [12], betoni sa RCA (R13 i R23) mogu imati dobru otpornost ($2-8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) ako se upotrijebi leteći pepeo u kombinaciji s niskim v/v_{eff} omjerom (slika 13.). Ako se količina letećeg pepela povećava, otpornost na prodor klorida se može održati na prihvatljivom nivou ($8-16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) čak i s visokim efektivnim vodovezivnim omjerom (beton R22).

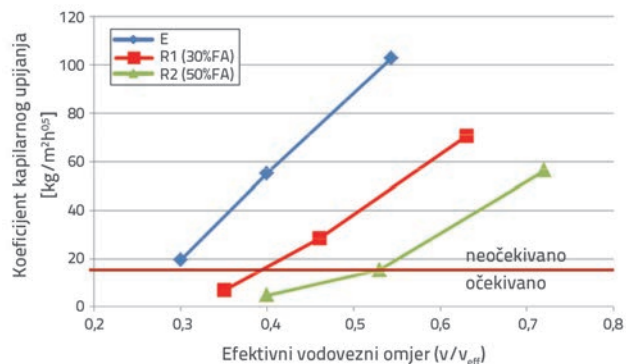


Slika 12. Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije klorida i v/v omjera

Prikazane vrijednosti određene su betonskim uzorcima pri starosti od 28 dana. Prema tome, očekuje se da će betoni prilikom ispitivanja pri većim starostima imati još veću otpornost na prodor klorida [1].

Tablica 8. Dubina prodora vode

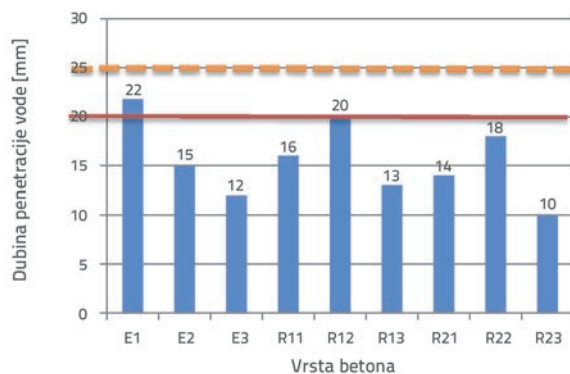
Vrsta betona	RAC			RAC (30% FA)			RAC (50% FA)		
	E1	E2	E3	R11	R12	R13	R21	R22	R23
v/v	0,543	0,4	0,3	0,543	0,4	0,3	0,543	0,4	0,3
v/v_{eff}	0,543	0,4	0,3	0,63	0,46	0,35	0,72	0,53	0,4
Dubina [mm]	22	15	12	16	20	13	14	18	10



Slika 13. Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije klorida i v/v_{eff} omjera

3.5 Dubina prodora vode pod pritiskom

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 8. Prikazane vrijednosti predstavljaju prosječnu vrijednost tri mjerenja. Najveća dubina prodiranja vode uočena je na uzorcima serije E1, a najmanja na R23 uzorcima. Dubina prodora vode za sve vrste betona, kao i kriterij vodonepropusnosti grafički su prikazani na slici 14.



Slika 14. Dubina prodora vode i kriterij vodonepropusnosti

Na osnovi dobivenih vrijednosti dubine prodora vode može se zaključiti da sve serije betona pripadaju najvećem razredu vodonepropusnosti, uz dopuštenu vrijednost dubine prodora vode $20 + 5 \text{ mm}$ prema normi SRPS EN 206-1/1. Smanjenje v/v omjera je dovelo do smanjenja vodopropusnosti u uzorcima E serije. U slučaju betona koji sadrži leteći pepeo može se primijetiti da nema korelacije između vodo-vezivnog omjera i dubine prodora vode. Najveći utjecaj upotrebe letećeg pepela

na dubinu prodora vode je primijećen u betonima s najvećom poroznošću ($v/v = 0,543$ ili $v/v_{\text{eff}} \geq 0,543$). U betonima ove grupe, leteći pepeo je poboljšao vodonepropusnost.

4. Zaključak

Istraživanje analizirano u ovom radu usredotočeno je na proizvodnju betona, poboljšanog s aspekta zaštite životne sredine, smanjenja upotrebe energije i emisije CO_2 . To je postignuto upotrebom recikliranog agregata za beton i djelomičnom zamjenom cementa s velikom količinom letećeg pepela. Osim različitih količina pepela, u okviru betonskih mješavina variran je i vodovezivni omjer, ali su sve mješavine imale istu vrstu makrostrukture.

Eksperimentalno istraživanje je obuhvatilo ispitivanje sljedećih svojstava: tlačne čvrstoće, kapilarnog upijanja vode, otpornosti na prodor klorida i vodonepropusnosti betonskih uzoraka pri starosti od 28 dana. Analizom dobivenih rezultata zaključeno je:

- Tlačna čvrstoća se djelomično smanjuje s povećanjem udjela letećeg pepela. Beton sa 50 % letećeg pepela i v/v omjerom = 0,543 ima tlačnu čvrstoću 36 MPa, što je za 13 % manje u odnosu na tlačnu čvrstoću odgovarajućeg referentnog betona, ali se ovo smanjenje može kompenzirati upotrebom niskih v/v i v/v_{eff} omjera. Na primjer, beton sa 50 % letećeg pepela i v/v omjerom = 0,3 ima za 50 % veću tlačnu čvrstoću od referentnog betona sa v/v omjerom 0,543. Također, poznato je da se smanjenje tlačne čvrstoća tijekom prvog mjeseca očvršćivanja može s vremenom promijeniti, jer leteći pepeo osigurava kasniji prirast čvrstoće betona u odnosu na beton bez letećeg pepela.
- Kapilarno upijanje vode se smanjuje sa smanjenjem v/v_{eff} omjera. Također, mješavine u kojima je cement djelomično zamijenjen s letećim pepelom pokazale su manje kapilarno upijanje vode.
- Otpornost na prodor klorida u velikoj mjeri zavisi od v/v_{eff} omjera i količine letećeg pepela. Sa smanjenjem v/v_{eff} omjera i/ili povećanjem količine letećeg pepela, prodor iona klorida se smanjuje. Betoni sa 100 % krupnog RCA mogu imati zadovoljavajuću ili čak dobru otpornost na prodor klorida pri

upotrebi velike količine letećeg pepela u kombinaciji s niskim vodo-vezivnim odnosom.

- Budući da svi betoni pokazuju male vrijednosti dubine prodora vode pod pritiskom, bilo je teško uspostaviti jasnu vezu između količine letećeg pepela, v/v omjera i dubine prodora vode (10-22 mm). Ipak, može se primijetiti da smanjenje v/v omjera dovodi do poboljšanja vodonepropusnosti u betonima bez letećeg pepela. Pozitivan utjecaj upotrebe letećeg pepela na dubinu prodora vode je primijećen i u betonima s najvećom poroznošću (v/v omjera 0,543 ili v/v_{eff} omjera $\geq 0,543$).

Ovo istraživanje je pokušaj da se napravi održiv beton koji pruža dvojaku korist životnoj sredini putem njegove proizvodnje i upotrebe. Prednost upotrebe bilo koje količine agregata od recikliranog betona pomoći će ograničiti količinu industrijskog otpada na deponijima [14]. U okviru eksperimentalnog istraživanja, zamijenjeno je 100 posto krupnog prirodnog agregata agregatom od recikliranog betona. Time dolazi do smanjenja građevnog otpada i otpada od rušenja, pretvarajući ga u prirodni resurs i ograničavajući veličinu naših odlagališta. Također je 30 % i 50 % letećeg pepela upotrebjeno kao zamjena cementa. Kako je cementna industrija među najvećim izvorima emisije CO_2 , zamjena dijela cementa s pepelom pridonijela bi smanjenju stvaranju CO_2 .

Mješavine spravljene u okviru istraživanja, s visokim udjelom letećeg pepela, pripremljene s niskim v/v omjerom i, između ostalog s moćnim superplastifikatorom, karakteriziraju visoke tlačne čvrstoće koje čak prekoračuju vrijednost od 60 MPa. Upotreba mineralnih dodataka, s aspekta njihovog potencijalno pozitivnog utjecaja na trajnost i održivost armiranog betona, također je obećavajuća.

Zahvala

U radu je prikazano istraživanje koje je pomoglo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR 36017 pod nazivom: "Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji".

LITERATURA

- [1] Silva, R.V., Brito, J., Neves, R., Dhir, R.: Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete, *Journal Materials Research*, 18 (2015) 2, pp. 427-440.
- [2] Hansen, T.C. Ed.: *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, Taylor and Francis, Oxfordshire, UK, pp. 316., 1992.
- [3] Rahal, K.: Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building Environment*, 1 (2007), pp. 407-415.
- [4] Yang, K.H., Chung, H.S., Ashour, A.: Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties, *ACI Materials Journal*, 3 (2008), pp. 289-296.
- [5] Sanchez, J.M., Gutierrez, P.A.: Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, *Proceeding of the International RILEM Conference "The Use of Recycled Materials in Building and Structures"*, Barcelona, Spain, pp. 545-553, 2004.
- [6] Berndt, M.L.: Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp. 2606-2613, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011>

- [7] Vyas, C., Pitroda, J.: Fly Ash and Recycled Coarse Aggregate in Concrete: New Era for Construction Industries - A Literature Review, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4 (2013) 5, pp. 1781-1787.
- [8] Inthata, S., Kowtanapanich, W., Cheerarot, R.: Prediction of chloride permeability of concretes containing ground pozzolans by artificial neural networks, *Materials and Structures*, 46 (2013), pp. 1707-1721, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-0009-x>
- [9] Obla, K.: Specifying Fly Ash for Use in Concrete, *Concrete InFocus*, pp. 60-66, 2008.
- [10] Wu, P., Wang, X., Huang, T., Zhang, W.: Permeability and Prediction of Free Chloride Ion in Recycled Aggregate Concrete with Fly Ash, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9 (2014), pp. 3513 – 3535.
- [11] Naik, T., Singh, S., Hossain, M.: Permeability of high-strength concrete containing low cement factor, *Journal of energy engineering*, 122 (1996), pp. 21-39.
- [12] Zych, T.: Test methods of concrete resistance to chloride ingress, *Technical Transactions – Civil Engineering*, 6-B/2014, pp. 117-139, 2014.
- [13] Shi, S.: Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004), pp. 537-545, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.007>
- [14] Huda, S.B.: Mechanical and durability properties of recycled and repeated recycled coarse aggregate concrete, February 2014, pp. 1.
- [15] Andrade, C., Prieto, M., Tanner, P., Tavares, F., d'Andrea, R.: Testing and modelling chloride penetration into concrete, *Construction and Building Materials*, 39 (2013), pp. 9–18, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012>
- [16] Shicong, K., Spoon, C.: Compressive Strength, Pore Size Distribution and Chloride-ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Class-F Fly Ash, *Journal of Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Ed.*, 21 (2006) 4, pp. 300–306.
- [17] Malešev, M., Radonjanin, V., Marinković, S.: Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production, *Sustainability*, pp. 1204-1225, 2010.
- [18] Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., Al Maly, A.E.S.: Green recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 1503–1511, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>
- [19] SRPS EN 196. Methods of testing cement
- [20] SRPS U.M8.300. Determination of the capillary water absorption of building material and coatings
- [21] BS 1881-122:2011 Testing concrete. Method for determination of water absorption.
- [22] ASTM C 1202-2012. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- [23] NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
- [24] SRPS EN 12390-8. Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure.
- [25] SRPS ISO 4012. Concrete - Determination of compressive strength of test specimens
- [26] SRPS EN 206-1. Concrete: Specification, performance, production & conformity
- [27] EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements