

MIKROSTRUKTURA I TRAJNOST BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

MICROSTRUCTURE AND DURABILITY RELATED PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

UDK: 666.972.12

Pregledni rad

Prof. dr Snežana MARINKOVIĆ, dipl. građ. inž.*

Mr Ivan IGNJATOVIĆ, dipl. građ. inž.*

Dr Anja TERZIĆ, dipl. građ. inž.**

Dr Ljubica PAVLOVIĆ, dipl. inž. tehnolog.**

REZIME

Aspekti očuvanja prirodne sredine, održivog razvoja, pravilnog raspolaganja prirodnim resursima i adekvatnog upravljanja građevinskim otpadom nameću recikliranje kao jedan od važnih postupaka u proizvodnji građevinskih materijala. Agregat dobijen recikliranjem otpadnog betona našao je veliku primenu kao podloga za puteve, nasipe i slično, ali njegova primena u konstrukcijskim betonima za sada je veoma ograničena. Osnovni razlozi su lošiji kvalitet ovog agregata u odnosu na prirodni, nedovoljno ispitana pojedina svojstva betona sa recikliranim agregatom, nedostatak tehničkih propisa i standarda. Najmanje poznata svojstva betona sa recikliranim agregatom su svojstva koja određuju trajnost ovih betona. U radu su prikazani rezultati dosadašnjih istraživanja mikrostrukture betona sa recikliranim agregatom, propustljivosti, otpornosti na karbonizaciju, otpornosti na dejstvo mraza, otpornosti na dejstvo hlorida i otpornosti na alkalno-agregatnu reakciju. Na osnovu analize postojećih rezultata može se zaključiti da je otpornost na karbonizaciju i otpornost na dejstvo hlorida betona sa recikliranim agregatom slična ovim svojstvima kod betona sa prirodnim agregatom, dok su za donošenje pouzdanih zaključaka o otpornosti na dejstvo mraza i alkalno-agregatnoj otpornosti ovih betona potrebna nova istraživanja.

Ključne reči: beton sa recikliranim agregatom, mikrostruktura, otpornost na karbonizaciju, otpornost na dejstvo mraza, otpornost na hloride, otpornost na alkalno-agregatnu reakciju.

SUMMARY

Aspects of environmental safety, sustainable development, natural resources preservation and proper disposal of construction and demolition waste impose recycling as an important production technology of the construction materials. Recycled concrete aggregates (RCA) are commonly used in lower quality product applications such as road base and backfills. However, this material is presently often not considered for higher quality product applications such as aggregate for structural concrete, because of many performance considerations and lack of proper codes and standards. Among all the properties of recycled aggregate concrete (RAC), microstructure and durability related properties are the most unknown ones. This paper presents the results of up-to-date research in this area. On the basis of analysis of test results it can be concluded that there is no major difference between the carbonization depth and chloride penetration of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete. No specific conclusions can be made for freezing and thawing resistance and susceptibility to alkali-aggregate reaction of RAC because of the lack of tests, so further research into these areas is needed.

Key words: recycled aggregate concrete, microstructure, carbonization depth, freezing and thawing resistance, chloride penetration, alkali-aggregate reaction.

1. UVOD

U promovisanju i ostvarivanju ciljeva održivog razvoja građevinarstvo, a naročito industrija betona, ima značajnu ulogu iz više razloga. Otpad danas predstavlja jedan od najvećih ekoloških problema u svetu, a veliki deo otpadnog materijala koji se skladišti na deponijama

Adrese autora:

* Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 11000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73, e-mail: sneska@imk.grf.bg.ac.rs

** Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, 11000 Beograd, Franša Deparea 86, e-mail: anja.terzic@gmail.com

čini upravo građevinski otpad. Na primer, svake godine se u zemljama Evropske unije proizvede oko 850 miliona tona građevinskog otpada što čini 31% ukupne količine otpada [1]. Na taj način se stvaraju ogromne površine pod deponijama i smanjuje poljoprivredno i građevinsko zemljište. S druge strane, godišnja proizvodnja betona danas u svetu je dostigla vrednost od oko 6 milijardi tona [2], što znači da je i potrošnja prirodnog agregata dostigla rekordan nivo. Prema podacima Evropske agencije za zaštitu životne sredine, svake godine se u zemljama Evropske unije proizvede oko 3 milijarde tona agregata [3]. Kao posledica javlja se problem iscrpljivanja prirodnih resursa agregata i njihove sve veće udaljenosti od urbanih sredina gde se najčešće koriste. To ujedno znači i povećanje troškova transporta i veću emisiju štetnih gasova iz transportnih sredstava.

Kao jedno od održivih rešenja za probleme građevinskog otpada i iscrpljivanje prirodnih nalazišta agregata, nameće se postupak recikliranja deponovanih građevinskih materijala, u prvom redu otpadnog betona, sa ciljem dobijanja recikliranih agregata. U zemljama EU se u proseku reciklira oko 28% građevinskog otpada. Razlike su međutim velike između pojedinih zemalja. Dok je u severoevropskim zemljama (Danska, Holandija, Finska) procenat recikliranja visok (oko 90%), dotle je u južноеvropskim zemljama koje još uvek imaju dovoljno kvalitetnog prirodnog agregata (Italija, Španija, Portugal, Grčka), ovaj procenat praktično zanemarljiv.

Agregat dobijen recikliranjem otpadnog betona uglavnom se koristi za izradu tampon slojeva i podloga kolovoznih konstrukcija. Primena recikliranog agregata kao agregata za konstruktivne betone do sada je bila veoma ograničena zbog lošijeg kvaliteta ovog agregata u odnosu na prirodni i zbog toga što, usled nedostatka istraživanja, pojedina svojstva betona na bazi recikliranog agregata još nisu dovoljno poznata.

Glavna karakteristika agregata dobijenih tradicionalnim postupcima recikliranja [4] je prisustvo sloja cementnog maltera koji obavlja zrna prirodnog agregata i utiče na fizičko-mehanička svojstva kako agregata, tako i betonskog kompozita, slika 1.

Kako je ovaj sloj starog cementnog maltera veoma porozan i manje zapreminske mase, to reciklirani agregati imaju značajno veće upijanje vode, manju zapreminsku masu i manju otpornost prema drobljivosti i habanju [4] u odnosu na prirodni agregat. Posebno je ovo izraženo kod sitne frakcije (0-4 mm) recikliranih agregata.

Svojstva betona spravljenih sa ovakvim agregatom pre svega zavise od kvaliteta recikliranog agregata. U praktičnim situacijama, kada se koristi mešoviti reciklirani agregat koji je dobijen recikliranjem otpadnih betona različitog kvaliteta, verovatno je da će svojstva betona sa recikliranim agregatom biti nešto lošija od svojstava betona sa prirodnim agregatom, spravljenog sa istim vodocementnim faktorom [4]. Veliki broj eksperimentalnih ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava betona sa različitim procentima zamene prirodnog agregata recikliranim, izvršen je do sada u svetu. Na osnovu ovih ispitivanja može se izvući nekoliko važnih zaključaka:



Slika 1. Izgled zrna recikliranog agregata [4]

- upotreba sitne frakcije recikliranog agregata u konstruktivnim betonima generalno se ne preporučuje,
- tehnički je moguće i opravdano spravljati konstrukcijske betone niske do srednje čvrstoće pri pritisku (30-35 MPa) sa krupnom recikliranom frakcijom, jer se ovakvi betoni mogu proizvesti nezavisno od kvaliteta recikliranog agregata.

Na žalost, malobrojna su ispitivanja reoloških svojstava i svojstava koja određuju trajnost ovakvih betona, pa se o ovim svojstvima mnogo manje zna. To je ujedno i jedan od razloga ograničene primene betona sa recikliranim agregatima u elementima armiranobetonskih konstrukcija. Ovaj rad posvećen je upravo svojstvima betona na bazi recikliranog agregata koja određuju trajnost armiranobetonskih elemenata. Kako ova svojstva značajno zavise od mikrostrukture, jedan deo rada bavi se specifičnostima mikrostrukture betona sa recikliranim agregatom.

1.1. Definicije i skraćenice

U daljem tekstu, pod recikliranim agregatom podrazumevaće se agregat od recikliranog betona, skraćeno ARB. Beton od recikliranog agregata kraće će se označavati sa BRA. Prirodni agregat označavaće se kraće sa PA, a beton od prirodnog agregata sa BPA. Prilikom poređenja svojstva BRA i BPA betona, BPA beton će se nazivati uporedni BPA beton i on ima isti efektivni vodocementni faktor kao BRA beton sa kojim se poredi. Ukoliko se u betonskoj mešavini nalazi samo krupna frakcija recikliranog agregata, za takve betone biće korišćene skraćenice BRAK. Procentualni iznos količine recikliranog agregata određene frakcije u betonskoj mešavini biće označen brojem, npr. ukoliko se radi o betonu koji sadrži 50% krupne frakcije recikliranog agregata, taj beton će imati oznaku BRAK50.

2. MIKROSTRUKTURA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

Analiza mikrostrukture betona vrši se uglavnom primenom metoda mikroskopske analize kao što su skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM), optička mikroskopija, termo-mikroskopija itd.

Upotreba SEM mikroskopije kao metode omogućava mnogostruko uvećan prikaz slike (i do 100.000 puta), vizuelno praćenje razvoja pora i mikroprslina unutar ispitivanog uzorka, uvid u faze i tvorevine nastale u mikrostrukтури ispitivanog uzorka [5]. SEM u kombinaciji sa EDS metodom (energetska disperziona analiza) omogućava i dobijanje kvalitativnih i kvantitativnih podataka vezanih za hemijski i fazni sastav uzorka u bilo kojoj izabranoj tački na uzorku (npr. ako na delu uzorka postoji promena u boji, ili je izraženija poroznost, i slično).

SEM mikrofotografije u kombinaciji sa nekim od programa za analizu slike (na primer Image Pro Plus Analysis, slika 2) omogućavaju približno kvantitativno kompjutersko određivanje parametara kao što su: veličina pora, sferičnost (oblik) pora, udeo pora u ukupnoj površini uzorka – poroznost, veličinu zrna ili vidljive faze, njihov oblik i udeo u odnosu na ukupnu površinu, veličinu i brojnost prslina i pukotina [5]. Rad većine programa za analizu slike se zasniva na identifikovanju razlike u boji na snimku. Programi za analizu slike mogu raditi sa snimcima bilo kog mikroskopskog uređaja (optički mikroskop, fluorescentni mikroskop, SEM, itd), bitno je da fotografija bude u digitalnom obliku.

Beton na bazi recikliranih agregata imaju složenu mikrostrukturu od betona sa prirodnim agregatom. Globalno posmatrano, beton je trofazni sistem koji se sastoji od krupnog agregata, cementne paste i kontaktne zone između njih. Kod betona sa recikliranim agregatom postoje tri kontaktne zone (slika 3): stari cementni malter– novi cementni malter, zrno prirodnog agregata– stari cementni malter, zrno prirodnog agregata– novi cementni malter. Ukoliko beton sadrži i izvestan procenat prirodnog agregata, postoji i kontaktna zona između zrna tog agregata i novog cementnog maltera. Ako se pretpostavi da je prosečna debljina kontaktne zone 40 μm , procenjeno je da ona zauzima oko 40% zapremine cementne matrice [6]. Kontaktna zona služi kao most između osnovnih komponenti. Čak i ako su sve komponente visokih čvrstoća, čvrstoća ali i otpornost betona sa recikliranim agregatom na agresivno dejstvo sredine, može biti mala usled postojanja šupljina i mikroprslina unutar kontaktne zone [7], utičući direktno na transportne karakteristike betona (propustljivost). Pored toga što stara kontaktna zona može biti lošeg kvaliteta, postoji opasnost da, zbog poroznosti i visoke absorpcione moći starog cementnog maltera, nova kontaktna zona bude loša i da prijanjanje između zrna recikliranog agregata i nove cementne paste bude ugroženo.

Na osnovu mikroskopske analize mikrostrukture betona sa različitim procentima zamene krupnog prirodnog recikliranim agregatom (0 %, 25 %, 50 % i 100 %), Etxeberria [8] je zaključio da je najslabija tačka u ovim be-

tonima stari cementni malter u okviru zrna recikliranog agregata. Etxeberria je koristio reciklirani krupni agregat sa reciklažnog postrojenja koji je bio mešavina otpadnih betona različitog i nepoznatog kvaliteta. Na svim ispitivanim uzorcima, istraživači su dobili veoma kvalitetnu kontaktnu zonu između nove cementne paste i zrna recikliranog agregata, slika 4. U kontaktnoj zoni je akumulirana velika količina cementa proizvedeci cementnu pastu velike gustine i niskog vodocementnog faktora. Naime, pri spravljanju betona korišćen je vlažan, ali ne potpuno zasićen reciklirani agregat, pa je u trenutku dodavanja cementa došlo do njegove akumulacije na površini agregata, a nakon dodavanja vode agregat je upio određenu količinu vode pošto nije bio potpuno zasićen, formirajući na taj način gustu cementnu pastu na svojoj površini.

Kako je stari cementni malter u ovom ispitivanju bio manje gustine, veće poroznosti i većeg vodocementnog faktora od novog cementnog maltera (svetlija boja na optičkom fluorescentnom mikroskopu, slika 4), a nova kontaktna zona dobrog kvaliteta, za očekivati je da će najslabija komponenta u betonu sa recikliranim agregatom biti upravo zrno recikliranog agregata, a ne kontaktna zona, kako je to najčešće slučaj kod betona sa prirodnim agregatom.

Svojstva betona koja određuju trajnost praktično su definisana propustljivošću betona za vodu i gasove, a ona zavisi od stepena i karaktera poroznosti betona. Primenom mikroskopskih metoda Etxeberria je ustanovio da je poroznost betona sa 25% i 50% zamene prirodnog agregata recikliranim, slična poroznosti betona sa prirodnim agregatom [8]. Međutim, beton sa 100% recikliranog krupnog agregata imao je 70% veću poroznost i više pora većeg prečnika od betona sa prirodnim agregatom. Pore su pravilno raspoređene, sfernog oblika i međusobno nepovezane, što je dobro, jer ne povećava propustljivost betona.

Nagataki i saradnici [9] su ispitivali uticaj recikliranja na mikrostrukturu agregata i uticaj mikrostrukture recikliranog agregata na mehanička svojstva betona sa krupnim recikliranim i sitnim prirodnim agregatom. Za razliku od Etxeberria [8] koji je koristio reciklirani agregat nepoznatog porekla i neujednačenog kvaliteta, dobijen sa reciklažnog postrojenja, Nagataki i sar. su koristili reciklirani agregat dobijen dvostrukim drobljenjem prethodno napravljenog laboratorijskog betona poznatih svojstava. Rezultati njihovog ispitivanja su drugačiji od rezultata koje je dobio Etxeberria [8]. Mikroskopskom analizom pomoću fluorescentnog mikroskopa i programa za analizu slike utvrdili su da originalni krupni agregat (peščar) ima značajne mikroprslina i defekte. Recikliranje betona spravljenog sa ovakvim agregatom dovelo je do smanjenja mikroprslina u originalnom zrnu eliminacijom delova sa mikrodefektima i šupljinama (jer je prilikom drobljenja betona lom nastajao po oslabljenim ravnima prirodnog agregata, tj. u pravcu mikroprslina). Sam proces recikliranja je doveo do pojave zanemarljivo malog broja novih prslina kako u starom cementnom malteru, tako i u staroj kontaktnoj zoni. Zaključak ovog ispitivanja je da proces recikliranja ne izaziva mehanička ošteće-

nja na zrnju recikliranog agregata i čak može da dovede do poboljšanja mikrostrukture originalnog zrna. Stari cementni malter ne mora da bude najlošija komponenta betona sa recikliranim agregatom ukoliko je on spravljen sa većim vodocementnim faktorom od vodocementnog faktora originalnog betona. Međutim, kada se radi o poroznosti, zaključci ovog ispitivanja su slični rezultatima Etxeberrie [8]. Betoni sa 100% recikliranog krupnog agregata imali su od 20-52% veću poroznost od kontrolnog betona sa prirodnim agregatom istog vodocementnog faktora [9].

Ispitivanjem kvaliteta kontaktne zone betona sa recikliranim agregatom, Otsuki i saradnici [7] su došli do zaključka da kvalitet recikliranog agregata, u smislu čvrstoće starog cementnog maltera, utiče na čvrstoću betona sa recikliranim agregatom samo ukoliko je njegov vodocementni faktor nizak. Kada se beton sa recikliranim agregatom spravlja sa visokim vodocementnim faktorom, kvalitet recikliranog agregata neće uticati na njegovu čvrstoću. Drugim rečima, kada je visok vodocementni faktor, stara kontaktna zona ima veću čvrstoću od nove i čvrstoća betona sa recikliranim agregatom biće jednaka čvrstoći odgovarajućeg betona sa prirodnim agregatom. Suprotno, kada je nizak vodocementni faktor betona sa recikliranim agregatom, stara kontaktna zona biće slabija od nove i čvrstoća betona sa recikliranim agregatom biće manja od čvrstoće odgovarajućeg betona sa prirodnim agregatom.

Kvalitet kontaktne zone zavisi od vlažnosti recikliranog agregata u toku spravljanja betona i samog postupka spravljanja. Prema nekim istraživačima, čak se i kvalitet starog cementnog maltera može poboljšati ako se primeni nešto drugačija procedura spravljanja betona od uobičajene. Tam i saradnici [6,10] su predložili da se u procesu spravljanja betona voda dodaje iz dva puta, tj. da se prvo agregat (i prirodni i reciklirani) meša 60 sekundi, zatim se dodaje polovina vode i meša 60 sekundi, dodaje se cement i meša 30 sekundi, pa se dodaje druga polovina vode i na kraju meša 120 sekundi. Ispitivanjem mikrostrukture betona sa recikliranim agregatom koji je spravljen ovim postupkom, autori su ustanovili da se od prve polovine vode i cementa formira tanak sloj cementne paste na površini zrna recikliranog agregata koji prodiru u stari cementni malter, popunjavajući stare prsline i šupljine. Takođe, nova kontaktna zona je gušća (manje porozna), sa manje šupljina nego u slučaju klasičnog postupka spravljanja betona, slika 5, u kom slučaju može da bude ugrožena kompletna hidratacija cementa usled nedostatka vode koju je upio porozni reciklirani agregat. Sličan efekat na novu kontaktnu zonu je postigao Etxeberria [8] korišćenjem vlažnog, ali ne potpuno vodom zasićenog agregata.

Ispitivanjem propustljivosti za vodu, vazduh i hloride, autori su zaključili [10] da sa povećanjem procenta zamene prirodnog agregata recikliranim, rastu i navedene propustljivosti, što je posledica veće poroznosti betona sa recikliranim agregatom. Predloženi postupak spravljanja smanjuje zapreminu velikih kapilarnih pora u starom cementnom malteru i donekle poboljšava ova

svojstva betona sa recikliranim agregatom, odnosno približava ih svojstvima betona sa prirodnim agregatom.

3. TRAJNOST BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

Savremeni koncept trajnosti betonskih konstrukcija bazira se na metodologiji projektovanja s obzirom na upotrebnii vek konstrukcije. Za primenu ove metode neophodni su dovoljno realistični modeli okruženja i materijala. Za formiranje pouzdanih modela najvažniji korak je poznavanje deterioracionih procesa (oštećenja koje propagiraju kroz vreme) i razumevanje mehanizama provođenja tečnih supstanci i gasova kroz beton. Podjednako važno je i razumeti kako se oštećenje razvija (propagira kroz vreme) i u kojoj meri.

Deterioracioni mehanizmi koji su analizirani u dosadašnjim istraživanjima betona sa recikliranim agregatom su: korozija armature usled karbonizacije zaštitnog sloja ili dejstva hlorida i oštećenja usled deterioracije betona uzrokovana ciklusima smrzavanja i odmrzavanja ili alkalno-agregatnom reakcijom.

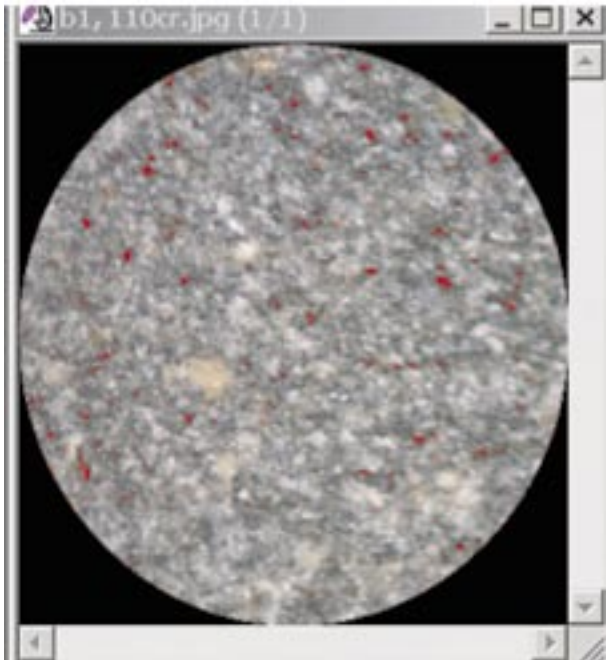
3.1 Prenosno karakteristike betona sa recikliranim agregatom

U osnovi mehanizama deterioracije nalaze se uglavnom hemijski procesi, a da bi do reakcije došlo, neophodan je transport jona ili molekula agresivne materije iz spoljašnje sredine do reaktivne supstance u betonu. Agresivna supstanca se može nalaziti i u samom betonu, ali je opet neophodan njen transport do reaktivne supstance kako bi došlo do reakcije. Ukoliko nema transporta, nema ni reakcije. Dakle, deterioracioni mehanizmi su uslovljeni prenosnim (transportnim) karakteristikama betona od kojih je najznačajnija propustljivost.

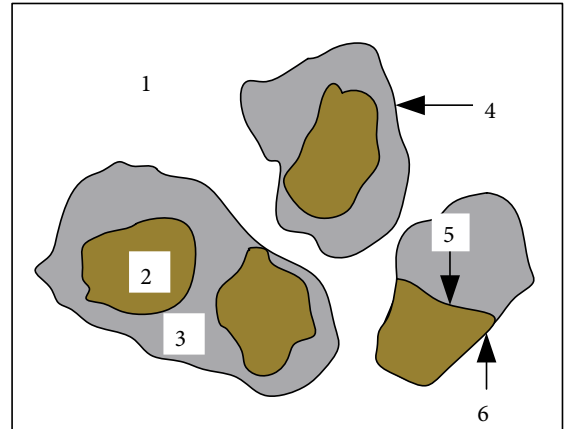
Propustljivost je karakteristika koja određuje stepen protoka fluida kroz čvrsto telo, tj. beton [10,11]. Razlikuje se propustljivost za vodu (determiniše otpornost na dejstvo mraza i značajna je kod alkalno-agregatne reakcije), propustljivost za gasove (najčešće CO₂ koja dovodi do karbonizacije betona) i propustljivost za hloridne jone (važna kod otpornosti betona na dejstvo soli iz vazduha, vode ili materijala za topljenje leda).

Kao i kod betona sa prirodnim agregatom, za određivanje propustljivosti betona od recikliranog agregata značajne su kapilarne pore koje mogu da upijaju i propuštaju vodu usled pritiska vode, kapilarnog upijanja, osmotskog efekta itd. [12,13]. Parametar više za definisanje poroznosti kod BRA betona, a samim tim i vodo-propustljivosti, je činjenica da se zrno ARB agregata sastoji delom od starog cementnog maltera koji ima svoj sistem pora, delimično narušen u procesu recikliranja.

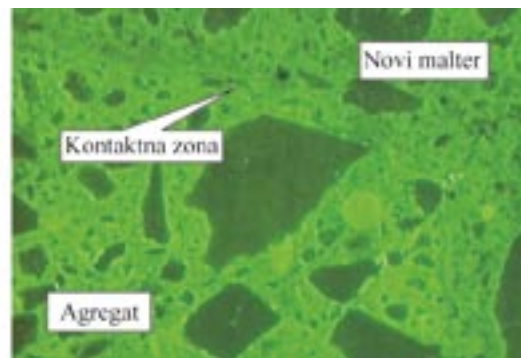
Rezultati istraživanja o upijanju vode betona sa recikliranim agregatom (BRA) koje su nezavisno sprovele Hansen i Kasai [14], ukazuju da upijanje vode BRA betona može biti i nekoliko puta (2 do 5) veće od upijanja uporednog betona sa prirodnim agregatom (BPA), sa istim vodocementnim faktorom. Pri tome, razlika u upijanjima je utoliko veća ukoliko je čvrstoća pri priti-



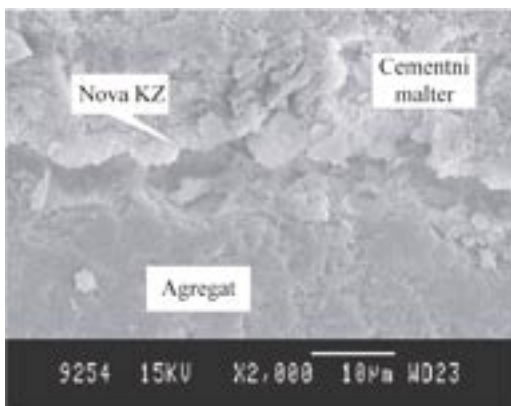
Slika 2. Označene pore (crveno) na uzorku betona (snimljeno optičkim mikroskopom) – Image Pro Plus Analysis [5]



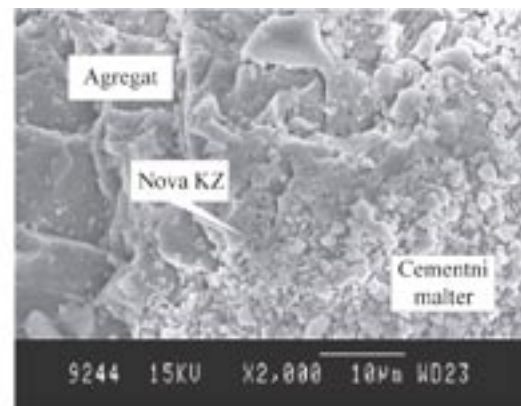
Slika 3. Struktura betona sa recikliranim agregatom; 1 – novi cementni malter, 2 – zrno prirodnog agregata iz originalnog betona, 3 – stari cementni malter, 4 – kontaktna zona između starog i novog cementnog maltera, 5 – kontaktna zona između starog cementnog maltera i zrna prirodnog agregata, 6 – kontaktna zona između novog cementnog maltera i zrna prirodnog agregata



Slika 4. Kontaktna zona između zrna recikliranog agregata i nove cementne paste, optički fluorescentni mikroskop [8]



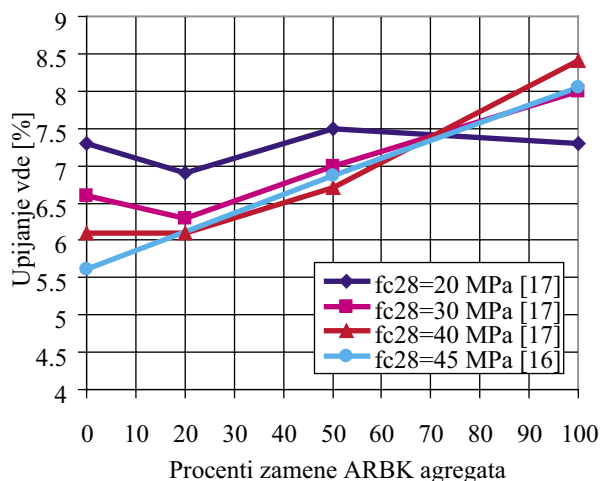
(a)



(b)

Slika 5. Nova kontaktna zona u betonu (a) spravljenom klasičnim postupkom i (b) spravljenom predloženim postupkom [6], SEM mikroskopija

sku betona koji je recikliran, veća od ciljane čvrstoće pri pritisku BRA betona, tj. čvrstoće pri pritisku uporednog BPA. Sagoe –Crenstil [15] je dobio da je upijanje betona sa 100% recikliranog krupnog agregata (BRAK1-00) za 25% veće od upijanja BPA betona sa istim sleganjem. Upijanje vode BRAK betona u funkciji količine ARBK agregata i čvrstoće BRAK betona, iz dva istraživanja [16,17], prikazano je na slici 6.



Slika 6. Upijanje vode BRAK betona u funkciji količine ARBK agregata i čvrstoće BRAK betona

Za do 20% zamene PA agregata sa ARBK, praktično nema razlike u upijanju ili je čak upijanje BRAK betona manje od upijanja BPA betona. Sa daljim porastom procenta zamene PA agregata sa ARBK (većim od 20%), raste i upijanje vode, za sve ispitivane čvrstoće BRAK betona, osim za 20 MPa. Odnos koji važi kod BPA, važi i kod BRA betona – betoni većih čvrstoća pri pritisku imaju manje upijanje vode, slika 6.

Ispitivanje propustljivosti betona za CO₂ i hloride sproveli su Olorunsogo i Padayachee [11]. Propustljivost betona za CO₂ razmatrana je preko indeksa propustljivosti za CO₂, OPI:

$$OPI = -\log k \quad (1)$$

gde je k– koeficijent propustljivosti. Analizirani su betoni sa 0, 50% i 100% ARBK agregata, spravljeni sa istim vodocementnim faktorom, $\omega=0,5$.

Prema rezultatima ovog istraživanja indeks OPI opada sa povećanjem procentualnog učešća ARBK agregata [11]. S obzirom na izraz (1), niže vrednosti indeksa OPI znači da propustljivost za CO₂ raste. Razlike indeksa OPI za BPA i BRAK100 betone iznosi od 10 do 16%, zavisno od dužine trajanja nege uzoraka. Za sve razmatrane BRAK betone, indeks OPI raste sa povećanjem dužine trajanja nege uzoraka.

U istraživanjima iz Kine [18] zaključeno je da se sa povećanjem sadržaja ARBK agregata od 0 do 60%, koeficijent propustljivosti vazduha kod BRA betona povećava za oko 50%. Takođe je utvrđeno da primena letećeg pepela ili zgure kao dodatka cementu mogu značajno smanjiti propustljivost BRAK betona za vazduh.

3.2 Otpornost na karbonizaciju

Karbonizacija betona je hemijski proces tokom koga reaguju kalcijum hidroksid iz betona i ugljen dioksid koji je difuzijom kroz porni sistem betona dospeo iz spoljašnje sredine. U reakciji se formira kalcijum karbonat čime se značajno smanjuje Ph faktor betona (ispod 9), a pomenuti proces propagira kroz zaštitni sloj betonskog elementa tokom vremena. Kada karbonizacija zahvati sloj filma feroksida koji obavija armaturu, kaže se da je armatura depasivizovana, odnosno, stvoreni su preduslovi za njenu koroziju.

U laboratorijskim istraživanjima koja će u daljem biti analizirana, određivanje otpornosti betona na karbonizaciju (karbonizaciona otpornost) vršeno je primenom ubrzanih karbonizacionih testova. Mera karbonizacione otpornosti je dubina nekarbonizovanog dela betona, što se utvrđuje nanošenjem rastvora fenol-ftaleina na uzorak, prethodno izložen standardom definisanim uslovima (temperatura, vlažnost, koncentracija CO₂) i merenjem dubine sloja koji je obojen karakterističnom ljubičastom bojom. Jasno, što je veća izmerena dubina karbonizovanog sloja, smatra se da je karbonizaciona otpornost betona manja.

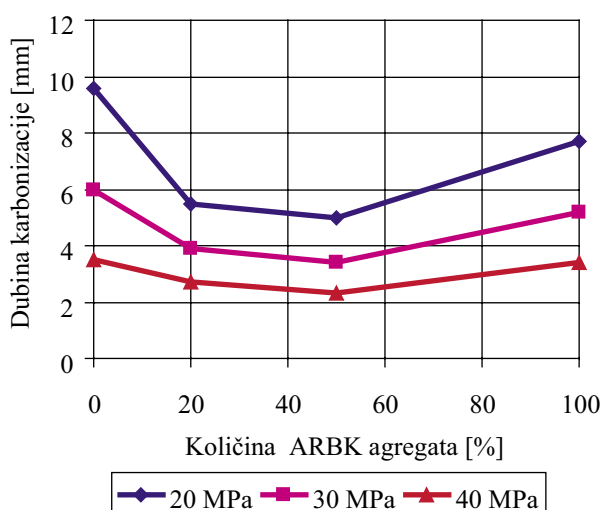
Prema Hansenu [14], pod normalnim uslovima sredine (20°C i 7 dana ciklusa vlaženja i sušenja) ne postoji (ili je vrlo mala) razlika u vremenu početka korozije šipki armature postavljenih u element od BRA i BPA betona. To znači da su karbonizacione otpornosti ovih betona vrlo slične. Takođe, utvrđeno je da kada korozija počne, stepen korozije je nezavistan od tipa agregata. U istraživanju Hansena [14] se navodi međutim da je dubina karbonizacije BRA betona spravljenog sa ARB agregatom od originalnog betona koji je u značajnoj meri bio karbonizovan, 65% veća od dubine karbonizacije uporednog BPA betona. Zato se karbonizovani delovi originalnog betona u ARB agregatu smatraju štetnim primesama te se izdvajaju tokom procesa recikliranja.

U istraživanjima iz Kine [18] je utvrđeno da sa povećanjem količine ARB agregata, opada karbonizaciona otpornost betona. Kod BRAK60 betona, dubina karbonizovanog sloja bila je 62% veća u odnosu na uporedni BPA beton.

Otsuki i ostali [7] sproveli su analizu otpornosti BRAK betona na karbonizaciju. Formirane su 4 mešavine BRAK100 i 4 mešavine uporednih BPA betona sa istim vodocementnim faktorima – 0,25, 0,4, 0,55 i 0,70 kojima odgovaraju količine cementa od 558, 425, 318 i 257 kg/m³, respektivno, za obe vrste betona. Sa povećanjem vodocementnog faktora raste dubina karbonizacije i kod BRAK i kod BPA betona, od oko 1 mm za $\omega=0,25$, do oko 18 mm za $\omega=0,7$ [7]. To je posledica većeg sadržaja cementa kod betona sa nižim vodocementnim faktorom. Više cementa u betonu znači više baznu sredinu (beton), što znači da je potrebno duže vreme kako bi se smanjio visok PH faktor betona izloženog dejstvu CO₂. Za isti vodocementni faktor, dubina karbonizovanog sloja BRAK betona kreće se od praktično iste (za $\omega=0,25$ i

$\omega=0,70$), do za oko 15% veće (za $\omega=0,55$) u odnosu na uporedni BPA.

Levy i Helene [17] su poredili dubinu karbonizacije kod BRAK i BPA betona istih čvrstoća pri pritisku. Prema njihovim rezultatima, sa povećanjem procenta ARBK smanjuje se dubina karbonizacije, tj. karbonizaciona otpornost je veća, nezavisno od čvrstoće pri pritisku (ali do određenog procenta zamene prirodnog agregata recikliranim), slika 7. To je posledica većeg sadržaja cementa kod BRAK betona (u odnosu na BPA) potrebnog da bi se postigla ista marka betona. Takođe, betoni kod kojih je upotrebljena veća količina cementa za dobijanje veće čvrstoće pri pritisku, nezavisno od vrste betona (BRAK ili BPA), imali su manje dubine karbonizacije, slika 7.



Slika 7. Dubina karbonizacije u funkciji količine ARBK agregata [17]

Sagoe-Crentsil [15] je takođe zaključio da će BRAK-100 i BPA betoni spravljani sa istom količinom cementa i sličnih čvrstoća pri pritisku, imati sličnu dubinu karbonizacije za iste uslove izloženosti.

Takođe, reciklirani agregat sadrži stari cementni malter koji se sastoji od cementa i kalcijum hidroksida što povećava alkalne rezerve (baznost) BRA betona. Ovo ukazuje da dubina karbonizacije izuzetno zavisi i od hemijskog sastava betona.

Na žalost, uporedna analiza rezultata iz različitih istraživanja nije moguća, kako zbog nedostatka numeričkih podataka, tako i zbog različitih uslova pod kojima su izvršeni ubrzani karbonizacioni testovi. Ipak, može se zaključiti da je ključni faktor koji determiniše karbonizacionu otpornost betona sa recikliranim agregatom količina cementa. Ukoliko su primenjene količine cementa slične, biće slične i karbonizacione otpornosti BRA i BPA betona. Dodatne alkalne rezerve (baznost) kod BRA betona obezbeđene su prisustvom mešavine cementa i kalcijum hidroksida u okviru starog cementnog maltera u zrnju recikliranog agregata.

3.3 Otpornost na dejstvo mraza

Kada temperatura vodom zasićenog očvrstlog betona spadne ispod nule, tada se voda sadržana u kapilarnim porama smrzne i javljaju se unutrašnji naponi u betonu. U gelskim porama betona, koje su veoma male $(1-3) \cdot 10^{-7}$ mm, voda se praktično nikada ne pretvara u led. Pojava unutrašnjih napona ima dva uzroka [13]. Prvo, voda pri svom prelasku u led povećava svoju zapreminu za oko 9%, a time se višak vode eliminiše iz šupljine (treba imati u vidu da je mržnjenje postepen proces). Hidraulički pritisak koji pri tome nastaje zavisiće od otpora kretanju vode – od dužine puta koji voda treba da pređe i od propustljivosti gela između šupljine gde se dešava mržnjenje i obližnje šupljine koja će prihvatiti višak vode. Drugi uzrok je difuzija vode usled osmotskog pritiska, koji potiče od lokalnog porasta koncentracije rastvora usled odvajanja smrznute i rastvorne vode. Dakle, osnov otpornosti, tj. neotpornosti betona na dejstvo mraza čine kapilarne pore, veličine preko 10^{-7} mm [12].

Određivanje otpornosti prema dejstvu mraza podrazumeva ispitivanje sposobnosti betona da, u stanju zasićenosti vodom, podnese višekratno smrzavanje i odmrzavanje [12] i izražava se (prema domaćem propisu) brojem ciklusa nakon kojeg čvrstoća pri pritisku takvih uzoraka nije manja od 75% čvrstoće etalonskih uzoraka.

U ispitivanjima koja je naveo Hansen [14] izneti su različiti podaci o otpornosti BRA betona na dejstvo mraza, odnosno, zaključci se kreću od onih da nije manja (čak u nekim slučajevima je i veća), do onih da je značajno manja, u odnosu na uporedne BPA betone. Na pomenutu otpornost, tj. odnos otpornosti kod BRA i BPA betona, utiče:

- 1) kvalitet originalnog betona,
- 2) količina i tip recikliranog agregata (samo krupna frakcija ili krupna i sitna zajedno),
- 3) prisustvo uvučenog vazduha kod BRA i uporednog BPA betona.

Ukoliko je originalni beton bio relativno visoke čvrstoće pri pritisku, na nivou uobičajenih konstrukcijskih betona, otpornost na dejstvo mraza BRA betona bila je slična otpornosti uporednih BPA. Kada su originalni betoni bili niskih čvrstoća, što je bilo karakteristično za japanska istraživanja 70-ih godina prošlog veka, otpornost na dejstvo mraza BRA betona bila je manja od otpornosti uporednih betona sa prirodnim agregatom. Pri zameni krupnog prirodnog agregata sa ARBK agregatom u iznosima do 30% i primenom sitne frakcije prirodnog agregata, praktično nema razlike u otpornosti BRA i uporednog BPA betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. U nekoliko istraživanja gde je primenjen samo krupni ARB agregat, otpornost na dejstvo mraza BRA betona je bila veća od iste veličine kod uporednog BPA. S druge strane, deterioracija BRA betona koji sadrži i krupnu i sitnu frakciju ARB agregata odvija se značajno brže nego u slučaju BRAK betona.

Velike razlike u otpornosti BRA i BPA betona na dejstvo mraza konstatovane su ukoliko se pri spravljanju ovih betona koristio uvučeni vazduh, što je uobičajeno

ni način poboljšanja otpornosti na dejstvo mraza kod betona sa prirodnim agregatom. U tom slučaju, BRA betoni su imali daleko nižu otpornost u poređenju sa BPA betonima. Oštećenja koja su dovela do loma kod BRA betona nakon određenog broja ciklusa, nalazila su se u kontaktnim zonama (slika 3) – na kontaktu novog cementnog maltera i originalnog agregata ili novog i starog cementnog maltera oko zrna prirodnog agregata. I pored mnogobrojnih obrađenih ispitivanja, raznorodnost rezultata i veliki broj faktora od kojih zavisi otpornost na dejstvo mraza BRA betona uticali su da u zaključku istraživanja Hansen [14] predloži dalja istraživanja u ovoj oblasti, naročito ispitivanja BRA betona sa uvučenim vazduhom i ARB agregatom koji potiče od betona različitih kvaliteta, tj. čvrstoća pri pritisku.

Takva uporedna istraživanja otpornosti BRA i BPA betona obavilo je nekoliko grupa istraživača [19,20]. Salem i ostali [19] analizirali su tri serije uzoraka BRAK100 i BPA betona. Prvu seriju (Serija I) činili su betonski uzorci sa vodocementnim faktorom $\omega=0,55$, drugu seriju (Serija II) uzorci sa $\omega=0,33$, dok su u trećoj seriji (Serija III) bili uzorci sa $\omega=0,55$ kojima je pomoću aeranata uvučeno 5% vazduha u beton. Da bi se obezbedila slična konzistencija, primenjen je superplasifikator. U svim serijama, količina zarobljenog vazduha bila je veća kod BRAK (2,5%; 3,0%; 2,5%) nego kod BPA betona (1,5%; 2,1%; 1,5%), što je rezultat veće poroznosti ARBK u odnosu na PA agregat. Očekivano, veće razlike u čvrstoćama pri pritisku BRAK i BPA betona dobijene su u drugoj nego u prvoj seriji. Najniže čvrstoće pri pritisku dobijene su u trećoj seriji, gde su čvrstoće pri pritisku niže za oko 24% u odnosu na čvrstoće uzoraka iz prve serije, tj. za po 4-5% za svaki procenat uvučenog vazduha. Otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja određivana je nedestruktivnom metodom, na osnovu relativnog dinamičkog modula elastičnosti, sračunatog prema sledećem izrazu:

$$RDM = \frac{n_c^2}{n^2} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

gde je:

RDM – relativni dinamički modul elastičnosti nakon c ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [%],

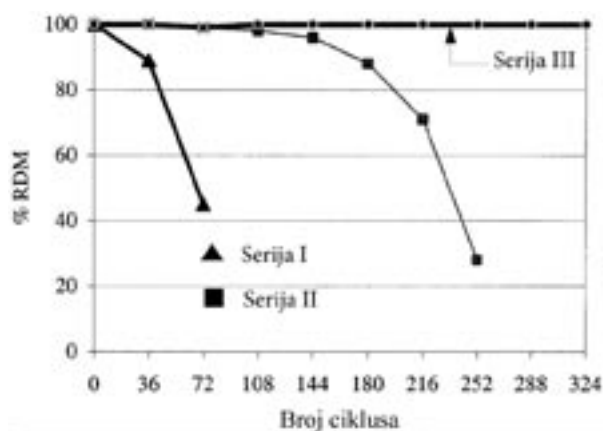
c – broj ciklusa tokom ispitivanja,

n_c – osnovna frekvencija nakon c ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [Hz],

n – osnovna frekvencija pre ispitivanja [Hz].

Promene dinamičkog modula tokom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja daju dobru indikaciju promena čvrstoće betonskih uzoraka, a promena čvrstoće se reflektuje na otpornost agresivnom dejstvu sredine. Uzorci BPA betona iz Serije I, nakon 36 ciklusa ostvarili su vrednost relativnog dinamičkog modula koja je iznosila 33% njegove inicijalne vrednosti, dok su uzorci BRAK betona “izdržali” 72 ciklusa ostvarivši pri tome 45% početne vrednosti relativnog dinamičkog modula, slika 8.

Uzrok za ovako nisku otpornost obe vrste betona je prisustvo značajne količine vode u kapilarnim pora-



Slika 8. Relativni dinamički modul elastičnosti u funkciji broja ciklusa smrzavanja-odmrzavanja za BRAK100 [19]

ma cementnog maltera (relativno visok vodocementni faktor), a koja pri zaleđivanju povećava zapreminu i stvara unutrašnje napone pritiska koji degradiraju beton. Pri nižem vodocementnom faktoru (Serija II), značajno je unapređena trajnost oba betona (BRAK i BPA). Kod BPA betona i nakon više od 300 ciklusa nije bilo smanjenja dinamičkog modula, dok BRAK beton nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pokazuje značajnu degradaciju dinamičkog modula, slika 8. Snižavanje vodocementnog faktora smanjuje broj i veličinu kapilarnih pora u cementnom kamenu (kod BPA), tj. u novom cementnom kamenu (kod BRAK), što znači manju količinu vode u njima koja može da pri smrzavanju proizvede značajne napone pritiska. Ipak, otpornost BRAK betona u seriji II izražena kroz dinamički modul značajno je niža u odnosu na BPA beton. Snižavanje vodocementnog faktora utiče na broj i veličinu kapilarnih pora u novom cementnom malteru, ali ne menja karakteristike kapilarnih pora u starom cementnom malteru koji se nalazi u zrnu ARB agregata. Voda koji upije porozni ARB agregat, u količini značajno većoj od one kod PA agregata, pri smrzavanju proizvodi značajne unutrašnje napone pritiska. Oni mogu prevazići zateznu čvrstoću ARB agregata i dovesti do njegovog loma ili uzrokuju potiskivanje vode iz unutrašnjosti ARB agregata ka okolnoj novoj cementnoj pasti, gde će pritisci uzrokovati njena oštećenja. U Seriji III, nezavisno od tipa betona (BRAK ili BPA), uzorci su pri više od 300 ciklusa imali 100% inicijalne vrednosti dinamičkog modula. Ovakva otpornost posledica je uvučenog vazduha, čime se povećava prostor koji može da zauzme voda pri zamrzavanju, tj. led.

Gokce i ostali [20] ispitivali su otpornost BRAK betona koji je sadržao uvučeni vazduh, na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, pri čemu su varirani parametri bili: količina uvučenog vazduha u originalnom betonu, količina cementnog maltera u zrnu ARB agregata, količina agregata koji potiče od betona sa uvučenim vazduhom i vodocementni faktor. Vodocementni faktor originalnog betona bio je 0,45. Trajnost betona, kao i u prethodnom radu, definisana je dinamičkim modulom elastičnosti. Otpornost BRAK betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, sa ARBK agregatom koji potiče od betona bez

uvučenog vazduha, bila je značajno lošija od uporednog BPA. Relativni odnos dinamičkih modula elastičnosti ovakvog BRAK i uporednog BPA iznosi 0,6, nakon 90 ciklusa. ARB agregat sa starim cementnim kamenom u kome se ne nalazi dovoljno vazdušnih pora, negativno utiče na ukupni porni sistem BRAK betona, koji je nosilac otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje. Primena ARB agregata sa manjom količinom cementnog maltera, samo delimično poboljšava trajnost betona. S druge strane, primena ARBK agregata od originalnog betona koji je imao izvesnu količinu uvučenog vazduha, rezultirao je otpornošću BRAK betona koja je čak i veća od otpornosti uporednog BPA [20]. Da bi se utvrdio uticaj uvučenog vazduha u originalnom betonu, formirana je serija uzoraka od BRAK betona u kojima je variran procenat ARBK agregata koji potiče od originalnog betona bez uvučenog vazduha – 12,5%, 25%, 50%, 75% i 100%. Rezultati su pokazali da i pri najmanjem sadržaju ARBK agregata koji potiče od originalnog betona bez uvučenog vazduha, dolazi do brzog opadanja otpornosti na ciklično smrzavanje i odmrzavanje. Povećanje čvrstoće novog cementnog kamena dovodi do izvesnog, ali ne i značajnog povećanja otpornosti na ciklično smrzavanje i odmrzavanje, ukoliko se radi sa ARBK agregatom koji potiče od originalnog betona bez uvučenog vazduha. Slična teza se može naći i kod Hansena [14].

Mikroskopskim pregledom utvrđeno je da je stari cementni kamen u zrnima ARB agregata koji nema odgovarajući sistem vazdušnih pora, glavni uzrok razvoja mikroporslina u BRAK betonu od ARB agregata izloženom ciklusima smrzavanja i odmrzavanja [20]. Stari cementni malter će imati značajno veću gustinu prslina ukoliko potiče od betona bez uvučenog vazduha. Razvoj tih prslina usled agresivnog dejstva sredine dovodi do potpunog gubitka veze između zrna PA agregata i "prikačenog" cementnog maltera. Kada se ta veza naruši, razdvojeni delovi predstavljaju lokalne defekte u novom cementnom malteru između kojih se formiraju nove prsline. Razvojem mreže takvih prslina, dešava se konačni lom čitavog sistema, tj. elementa od BRAK betona. S druge strane, ukoliko se primeni ARB agregat od betona koji je sadržao uvučeni vazduh, nema znakova oštećenja od mraza u analizi mikroporslina. Šta više, količina prslina je veća kod uporednog BPA betona – 60% kontaktne zone između cementnog maltera i zrna agregata je isprskalo kod BPA betona. Veća otpornost BRAK betona u ovom slučaju objašnjena je činjenicom da se tokom procesa recikliranja linije loma formiraju duž oslabljenih zona kao što su isprskali ili porozni delovi agregata, čime se smanjuje ukupan broj defekata i potencijalo slabih mesta.

Dakle, ne postoji jedinstven zaključak o otpornosti BRA betona izloženih dejstvu mraza. Šta više, ne radi se samo o nesaglasnosti za koliko je otpornost BRA betona manja od otpornosti betona sa prirodnim agregatom, već da li je uopšte manja ili veća. Presudnu ulogu u otpornosti ima porni sistem betona, koji može biti modifikovan primenom izvesne količine uvučenog vazduha. Iz prethodnih analiza je očigledno, da osim od količine uvučenog vazduha u novospravljenom betonu, otpornost na dejstvo

mraza zavisi i od prisustva i količine uvučenog vazduha u originalnom betonu koji je recikliran. Važan faktor je i mikrostruktura betona, tj. prisustvo inicijalnih defekata, a takođe i čvrstoća betona pri pritisku. Osim na ove, treba obratiti pažnju i na parametre poput nege uzoraka pre ispitivanja, stanja vlažnosti recikliranog agregata pri spravljanju mešavine, kao i na primenjenu metodu za ocenu otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja [21].

3.4 Otpornost na dejstvo hlorida

Hloridni joni, koji potiču od morske vode ili od soli protiv smrzavanja, mogu da kroz pore betona prodru u unutrašnjost betonskog elementa. Osim iz spoljašnje sredine, hloridni joni u beton mogu dospeti preko hloridima kontaminiranog agregata ili vode za spravljanje betonske smeše. Interesantno je da se i pored potencijalne opasnosti od korozije, često kao akceleratori procesa očvršćavanja betona koriste smeše na bazi kalcijum hlorida. Transport hloridnih jona odvija se putem difuzije ili kapilarnog upijanja. Da bi došlo do transporta hloridnih jona putem difuzije, neophodno je da postoji razlika u koncentraciji hloridnih jona u spoljašnjoj sredini i u betonu, kao i prisustvo tečne faze. Prenos hlorida putem kapilarnog upijanja dešava se kada je betonska konstrukcija izložena ciklusima sušenja i vlaženja vodom koja sadrži hloridne jone. Kritična koncentracija hlorida pri kojoj se dešava korozija armature zavisi od mnogih parametara i ne može se usvojiti kao konstantna veličina u opštem slučaju.

Procedure koje se primenjuju za određivanje otpornosti betona na prodor hlorida podrazumevaju držanje uzoraka potopljenih u rastvor natrijum-hlorida ili se uzorak izlaže cikličnom potapanju u rastvor NaCl-a i sušenju. S obzirom da su ovi postupci vremenski zametni, često se primenjuje neki od ubrzanih testova, npr. merenje električnog otpora [22].

Istraživanja otpornosti BRA betona na prodor hlorida vrlo su retka (Shayan i Xu [23], Otsuki i ostali [7]). Zaključak u oba bio je da BRAK beton ima nešto nižu otpornost prodoru hlorida u odnosu na BPA. Ipak, primenom ubrzanih testova Shayan i Xu [23] su dobili da svi BRA betoni, nezavisno od tipa ARB agregata, zadovoljavaju uslove standarda ASTM za primenu u konstrukcijama i prema klasifikaciji iz pomenutog standarda svi spadaju u grupu "niske propustljivosti" prodoru hlorida. Beton sa sitnom frakcijom ARB agregata imao je najnižu otpornost od svih BRA betona [23]. Svi uzorci betona koji su sadržali ARB agregat podvrgnut hemijskom tretmanu radi poboljšanja mikrostrukture (tretman natrijum silikatom), imali su niže vrednosti otpornosti prodoru hloridnih jona, nezavisno o kom se tipu BRA betona radi (sa kojom frakcijom ARB agregata) [23]. Takođe, pokušaj smanjenja propustljivosti betona sa recikliranim agregatom za hloridne jone, zasnovane na spravljanju betona "iz dva koraka" [10], nije se pokazao kao uspešan.

3.5 Otpornost na alkalno agregatnu reakciju

Trajnost betona može biti ugrožena ukoliko dođe do alkalno agregatne (silikatne) reakcije (skraćeno – AAR), tj. reakcije između aktivnog silicijuma iz agregata sa alkalijama iz cementa (alkalni hidroksidi – Na_2O , K_2O) [13]. U toj reakciji nastaje alkalno-silikatni gel (skraćeno – AS) koji upija vodu i tako povećava svoju zapreminu [13]. S obzirom da je gel ograničen okolnom strukturom betona, javljaju se unutrašnji naponi pritiska. Spoljašnja manifestacija AAR-a je mreža prslina na površini betona ili čak oljuskavanje betona, što se najčešće dešava na delovima konstrukcija izloženim vlaženju i sušenju.

S obzirom da je koncentracija alkalija u cementu praktično konstantna, potencijalna ugroženost betona alkalno agregatnom reakcijom determinisana je reaktivnošću agregata. Ona se određuje ispitivanjima u “realnom vremenu” ili putem ubrzanih testova, najčešće hemijskim metodama. Kod ubrzanih testova, alkalni potencijal betona povećava se odlaganjem uzoraka od cementnog maltera u rastvor NaOH. Meri se promena dužine uzoraka oblika tankih cilindara (šipki) od tako tretiranog cementnog maltera sa ARB agregatom.

Jedino istraživanje u ovoj oblasti trajnosti betona sa recikliranim agregatom, obavili su Shayan i Xu [23]. Ispitivanje obavljeno primenom ubrzanog testa dovelo je do zaključka da je ARB agregat podložan alkalno agregatnoj reakciji. Ipak, pozivajući se na činjenicu da su originalne stene od koje je dobijen PA agregat bazalt i dolorit, te da se dešava da ovakav agregat na ubrzanom AAR testu ne ispuni kriterijum, a da se u realnom vremenu ponaša zadovoljavajuće [13], ovakav test je ocenjen kao neodgovarajući [23]. Zato je sproveden postupak u kome se pratila promena dužine prizmatičnih uzoraka tokom godinu dana. Uzorci su napravljeni od BRA maltera, sa agregatom dobijenim usitnjavanjem ARB do propisane veličine zrna, a alkalni potencijal povećan je dodavanjem NaOH vodi prilikom spravljanja betona. Dobijene promene (povećanja) dužine uzoraka ocenjene su kao zadovoljavajuće, tj. ispunjen je kriterijum koji opisana metoda postavlja da bi se agregat ocenio kao “nereaktivan”. Ovaj način ispitivanja (definisano standardom ASTM) daje rezultate koji se dobro slažu s praktičnim iskustvom, ali se rezultati hemijskog ispitivanja ne smeju uopštavati [13]. Alkalno agregatna reakcija je složen proces koji zavisi od velikog broja parametara, pa se čak ni petrografskim ispitivanjem ne može utvrditi da li će neki mineral prouzrokovati abnormalno bubrenje [13].

4. ZAKLJUČAK

Svojstva betona koja određuju trajnost elemenata betonskih konstrukcija veoma su značajna sa aspekta njihove racionalnosti i održivosti. Kod betona na bazi recikliranih agregata ova svojstva su najmanje ispitana i poznata. Na osnovu do sada obavljenih eksperimentalnih istraživanja o mikrostrukтури i svojstvima koja određuju trajnost betona sa recikliranim agregatima, mogu se izvesti sledeći zaključci:

– Betoni na bazi recikliranih agregata imaju složeniju mikrostrukтуру od betona sa prirodnim agregatom.

– Pored agregata i cementne paste, ovi betoni imaju tri kontaktne zone: zrno prirodnog agregata – stari cementni malter (stara kontaktna zona), stari cementni malter – novi cementni malter (nova kontaktna zona), zrno prirodnog agregata – novi cementni malter (nova kontaktna zona).

– Koja će komponenta u mikrostrukтури betona sa recikliranim agregatom biti najslabija (stara ili nova cementna pasta, originalno zrno, stara ili nova kontaktna zona), zavisi od odnosa kvaliteta originalnog betona od koga je dobijen reciklirani agregat i kvaliteta novog betona koji se sa tim agregatom spravlja, i od vlažnosti recikliranog agregata odnosno procedure spravljanja betona.

– Ukoliko je vodocementni faktor novog betona koji se spravlja sa recikliranim agregatom niži od vodocementnog faktora originalnog betona (što je češći slučaj u praksi), i ukoliko se vodi računa o odgovarajućoj vlažnosti agregata pri spravljanju betona, stari cementni malter u okviru zrna recikliranog agregata biće najslabija komponenta. U tom slučaju, ova komponenta određuje i mehanička i svojstva trajnosti.

– Betoni sa recikliranim agregatom uvek imaju veću poroznost od betona sa prirodnim agregatom istog vodocementnog faktora, zbog prisustva starog cementnog maltera. Kakav će to stvarni efekat imati na transportne karakteristike ovih betona, zavisi od veličine, rasporeda i povezanosti pora.

– Trajnost betona, a svakako i elemenata konstrukcije od betona, dominantno zavisi od transportnih (prenosnih) karakteristika betona – propustljivosti za vazduh, vodu i hloride.

– Propustljivost dominantno zavisi od veličine, rasporeda i kontinuiteta kapilarnih pora u cementnom kamenu i kontaktnim zonama u strukтури BRA betona.

– Upijanje vode betona sa recikliranim agregatom raste sa povećanjem količine recikliranog agregata; ukoliko se primenjuje i sitan reciklirani agregat, upijanje ovih betona može biti i do 5 puta veće od upijanja uporednog betona sa prirodnim agregatom; betoni sa 100% recikliranog krupnog agregata imaju do 50% veće upijanje od uporednih betona sa prirodnim agregatom.

– Propustljivost vazduha raste sa povećanjem količine recikliranog agregata u BRA betonu; nema dovoljno podataka neophodnih za preciznije zaključke.

– Betoni sa recikliranim krupnim agregatom i uporedni betoni sa prirodnim agregatom (isti vodocementni faktori) imaju slične dubine karbonizacije;

– Postoje velike varijacije u otpornosti i ocenama otpornosti betona sa recikliranim agregatom na dejstvo mraza, s obzirom da ona zavisi od velikog broja parametara: prisustva (odsustva) uvučenog vazduha u originalnom i novom betonu, vodocementnog faktora originalnog i novog betona, načina negovanja uzoraka, primenjene metode ispitivanja; veća otpornost postiže se kod betona nižih vodocementnih faktora i kod betona koji sadrže uvučeni vazduh ili je beton koji je recikliran sadržao uvučeni vazduh.

– Otpornost betona sa recikliranim agregatom na dejstvo hlorida nije značajno niža od otpornosti betona sa prirodnim agregatom; manja je otpornost betona koji sadrži i krupnu i sitnu frakciju recikliranog agregata, od betona koji sadrži samo krupnu frakciju recikliranog agregata.

– Zbog složenosti procesa i malog broja ispitivanja, ne mogu se doneti konkretni zaključci o otpornosti betona sa recikliranim agregatom na alkalno-agregatnu reakciju.

5. ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: „Istraživanje savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama”.

LITERATURA

- [1] Fisher, C., Werge, M.: EU as a Recycling Society. ETC/SCP working paper 2/2009. Dostupno na sajtu: <http://scp.eionet.europa.eu.int>. [pristup 20. juna, 2009.]
- [2] ISO.: Business plan. ISO/TC 71 Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete. 2005. Dostupno na sajtu: http://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_071_Concrete_reinforced_concrete_and_prestressed_concrete_.pdf?nodeid=1162199&vernum=0. [pristup 21. avgusta, 2009.]
- [3] European Environment Agency.: Effectiveness of environmental taxes and charges for managing sand, gravel and rock extraction in selected EU countries. EEA Report. No 2/2008. Copenhagen: Schultz Grafisk; 2008. Takođe dostupno na sajtu: http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_2. [pristup 17. avgusta, 2009.]
- [4] Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I.: Betoni na bazi recikliranog agregata-tehnologija, svojstva i primena, Konferencija „Graditeljstvo i održivi razvoj“, DIMK i Građevinski fakultet u Beogradu, 04-05. jun, 2009, Beograd, Zbornik radova, str. 131-153.
- [5] Terzić, A., Pavlović, Lj.: Primena mikroskopskih metoda u analizi mikrostrukture različitih tipova betona sa recikliranim agregatom, Materijali i konstrukcije 1 (2009), str. 34-39.
- [6] Tam, V., Gao, X.F., Tam, C.M.: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research 35 (2005), str. 1195-1203.
- [7] Otsuki, N., Asce, M., Miyazato, S., Yodsudjai, W.: Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete, Journal of materials in civil engineering, September/October 2003, str. 443-451.
- [8] Etxeberria, M.: “Experimental study on microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete”, Doctoral Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2004.
- [9] Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., Hisada, M.: Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 965-971.
- [10] Tam, V., Tam, C.M.: Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach, Materials and structures 42 (2007), str. 3592-3602.
- [11] Olorunsogo, F.T., Padayachee, N.: Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, Cement and Concrete Research 32 (2002), str. 179-185.
- [12] Muravljev, M.: Građevinski materijali, DIP “ Građevinska knjiga ”, 1998, str. 486.
- [13] Nevil, A.M.: Svojstva betona, Građevinska knjiga, 1976, str. 530.
- [14] Hansen, T. C. : Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report 1945-1989 of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete), 1992, str. 157.
- [15] Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H. : Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Research 31 (2001), str. 707-712.
- [16] Malešev, M., Radonjanin, V., Dimča, M.: Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete – Part I, 4th International Scientific Conference “INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry”, Novi Sad, Proceeding, November 2006, str. 495-504.
- [17] Levy, S.M., Helene, P.: Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 1975-1980.
- [18] Li, X.: Recycling and reuse of waste concrete in China, Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete, Resources, Conservation and Recycling 53 (2008) 36-44.
- [19] Salem, R.M., Burdette, E.G., Jackson, N.M.: Resistance to Freezing and Thawing of Recycled Aggregate Concrete, ACI Materials Journal, Volume 100, No. 3, May-June 2003, str. 216-221.
- [20] Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., Hisada, M.: Freezing and Thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 799-806.
- [21] Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Wirguin, E.: Frost resistance of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 1927-1932.
- [22] NordTest Build 492: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordisk Innovations Center, 1999, str. 8.
- [23] Shayan, A., Xu, A.: Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate, ACI Materials Journal, Volume 100, No. 5, September-October 2003, str. 371-380.