

VLASTIMIR RADONJANIN¹, MIRJANA MALEŠEV¹,
SNEŽANA MARINKOVIĆ²

Originalni naučni rad
UDC:669.972.16

Mogućnosti primene starog betona kao nove vrste agregata u savremenom građevinarstvu

Karakteristika dvadesetog veka, sa aspekta građevinarstva, je intenzivna gradnja, pri čemu se nije dovoljno vodilo računa o očuvanju prirodnih resursa i o uticajima objekata na životnu sredinu u svim fazama eksploatacionog veka, zaključno sa rušenjem objekata i deponovanjem građevinskog otpada. Zbog toga je krajem dvadesetog veka otpad postao jedan od najvećih ekoloških problema u većini zemalja sveta. Kao održivo rešenje za probleme građevinskog otpada i iscrpljivanje nalazišta prirodnog agregata, prihvaćen je postupak recikliranja, u prvom redu "starog" betona. U prvom delu rada prikazani su tehnološki postupci za dobijanje recikliranog agregata od otpadnog betona, osnovna svojstva agregata dobijenog usitnjavanjem "starog" betona i svojstva betona na bazi recikliranog agregata. U drugom delu rada ukratko su prikazani rezultati sopstvenih komparativnih ispitivanja svojstava običnih i samougrađujućih betona sa prirodnim i sa recikliranim krupnim agregatom. Zaključeno je da se korišćenjem kvalitetnog čistog recikliranog agregata mogu dobiti betoni koji imaju zadovoljavajuće performanse koje se bitnije ne razlikuju od performansi betona sa prirodnim agregatom.

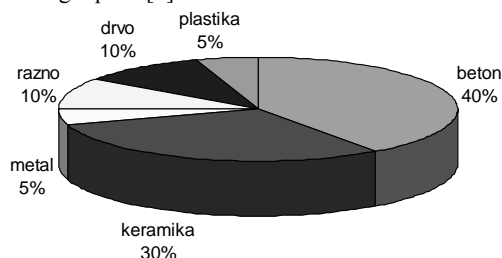
UVOD

Nakon održavanja Zemeljskog samita u Rio de Ženeiru 1992. godine i promovisanja Agende 21 [1], održivi razvoj (engl. *sustainable development*) i očuvanje životne sredine postali su ključni ciljevi modernog društva. Značajnu ulogu u održivom razvoju građene sredine, smanjenju zagađenja životne sredine, očuvanju prirodnih sirovina i uštedi energije svakako ima celokupno građevinarstvo, a pre svega industrija građevinskih materijala, a zatim i projektanti i izvođači. Projektovanje i građenje objekata zadovoljavajuće trajnosti u okviru planiranog životnog veka, kao i primena obnovljivih prirodnih resursa i alternativnih materijala za građenje, predstavljaju imperativ savremenog graditeljstva.

U tom kontekstu, jedan od osnovnih problema predstavlja neizbežno rušenje starih i dotrajalih objekata i njihova zamena novim objektima u velikim urbanim sredinama i u okviru saobraćajne infrastrukture. Razlozi rušenja objekata su promena njihove namene, starenje - dotrajalost objekata, preuređivanje delova gradova, proširenje putnih pravaca i povećanje saobraćajnog opterećenja, prirodne nepogode (zemljotresi, požari, poplave) itd.

Građevinski otpad, koji se javlja kao posledica građenja novih i rušenja postojećih objekata je jedan od najvećih ekoloških problema u zemljama Evropske unije, kao i u mnogim razvijenim zemljama sveta. Primera radi, procenjuje se da glavni građevinski otpad (materijali koji su dobijeni rušenjem zgrada i infrastrukturnih objekata) iznosi oko 180 miliona tona godišnje ili 480kg/po osobi/godišnje u EU [2]. Ovi alarmantni podaci o količini građevinskog otpada nakon rušenja predstavljaju razlog za globalnu zabrinutost, a njegovo rešenje mora se potražiti u okviru opšte prihvaćenih principa održivog razvoja. Prosečna struktura

otpada nastalog nakon rušenja objekta prikazana je na slici 1. Kao što se vidi, otpadni beton čini najveći deo građevinskog otpada [3].



Slika 1 - Prosečna struktura otpada nastalog rušenjem objekata [3]

Uobičajeni metod "upravljanja" građevinskim otpadom u bliskoj prošlosti bio je njegovo odlaganje na deponije. Na taj način stvorene su ogromne deponije građevinskog otpada, koje zauzimaju zemljište i predstavljaju ekološki problem, zato što su potencijalni zagađivači životne sredine.

Beton je već decenijama najkorišćeniji materijal na svetu, posle vode, a interesantan je podatak da je godišnja proizvodnja betona u svetu dostigla vrednost, koja se može izraziti sa jednom tonom betona po stanovniku planete [4]. Kada se uzme u obzir podatak da 1m³ betona sadrži više od 1m³ agregata, onda sve prisutniji trend prekomerne potrošnje agregata otvara pitanje iscrpljivanja prirodnih resursa agregata i potrebe pronalazačenja novih mogućnosti za dobijanje agregata.

Kao održivo rešenje za probleme građevinskog otpada i iscrpljivanje nalazišta prirodnih agregata, nametnuo se postupak recikliranja deponovanih građevinskih materijala, u prvom redu betona [5]. Recikliranje i očuvanje prirodnih resursa su bezrezervno prihvaćeni od strane građevinske industrije, ali pozitivni efekti takvog pristupa su donekle ograničeni, zato što nisu obezbeđeni svi uslovi za primenu [6]. Ovi uslovi obuhvataju nedostatak:

Adresa autora: ¹Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo, Novi Sad, Srbija, ²Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

- prostora i opreme za sortiranje građevinskog šuta,
- iskustva u postupcima recikliranja otpadnih materijala,
- obučениh radnika i kontrolora,
- znanja o tržištu sekundarnih materijala,
- zakonske regulative u oblasti zaštite životne sredine, itd.

Međutim, bez obzira na ove probleme, u pojedinim zemljama je ostvaren rekordni nivo reciklaže (Danska – 80%, Holandija – 75%, Japan 65%) [7]. Da bi ostvarili ovakav napredak, pomenute zemlje su organizovale selektivno rušenje objekata i sortiranje različitih materijala (opeke i blokovi, crepovi, beton, drvo, metali). Međutim, iako je u pojedinim delovima sveta evidentan visok stepen upotrebe recikliranih materijala, agregat od recikliranog betona se još uvek dominantno koristi za izradu tampona i podloga u putogradnji.

Izuzetak je Japan, gde se skoro 65% demoliranog betona koristi kao reciklirani agregat za proizvodnju novog betona. Sličan pokušaj čini se i u Velikoj Britaniji, gde je državna politika usmerena na povećanje primene recikliranog agregata, očuvanje prirodnih resursa i unapređenje zaštite okoline [8].

Zbog svega napred navedenog, i dalje se intenzivno istražuju mogućnosti primene recikliranih materijala (opeke, betona i stakla) za dobijanje novih građevinskih materijala. Kao rezultat dosadašnjih ispitivanja i praktičnih iskustava proizašla su dva osnovna pravca korišćenja agregata od recikliranog betona:

- kao nevezani izdrobljeni materijal za razne vrste nasipanja i podloga i
- kao separisani agregat za spravljanje novog betona

TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE RECIKLIRANOG AGREGATA

Postrojenja za proizvodnju recikliranog agregata (reciklažna ili drobilna postrojenja) u suštini se ne razlikuju značajno od postrojenja za proizvodnju prirodnog drobljenog agregata. Suština tehnološkog postupka je da se od komada otpadnog betona drobljenjem proizvede granularni materijal određenih veličina zrna, što znači da su dve osnovne operacije drobljenje i prosejavanje. U zavisnosti od kontaminiranosti otpadnog materijala i namene agregata koji se proizvodi, tehnološki proces se još sastoji od odvajanja metalnog materijala magnetnim separatorom, ručnog ili mehaničkog uklanjanja stranih materija i pranja ili vazdušnog prodivavanja finalnog proizvoda.

Proizvodnja recikliranog agregata od otpadnog betona počinje praktično rušenjem objekta. Od suštinskog značaja je selektivno rušenje objekta, da bi se u što je moguće većoj meri smanjilo mešanje raznovrsnog otpada (beton, opeka, drvo, staklo.). Ukoliko se ovo ne uradi tokom rušenja, sortiranje raznovrsnog otpada i odvojeno skladištenje se mora izvršiti u reciklažnom postrojenju. Na mestu rušenja još je potrebno usitniti velike otpadne komade na veličinu od 0.4 m do 0.8 m, što se obično radi pulverajzerima i hidrauličkim čekićima, slika 2.



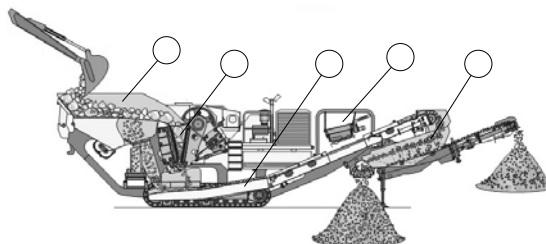
a)



b)

Slika 2 - Usitnjavanje velikih betonskih komada: a) pulverajzer i b) hidraulički čekić (Kompanija ŠUŠA)

Reciklažna postrojenja se dele na stacionarna i mobilna. Struktura jednog tipičnog mobilnog postrojenja je prikazana na slici 3. Postrojenje se sastoji od: 1 koša za prihvatanje otpadnog materijala, 2 uređaja za drobljenje, 3 transportne trake, 4 magnetnog separatora i 5. sita za odvajanje na različite frakcije. Osnovni nedostaci ove metode su: nemogućnost višestepenog drobljenja, pranja i prodivavanja agregata. Zato se ova postrojenja obično koriste u slučaju rušenja i ponovne upotrebe recikliranog agregata na istom mestu.

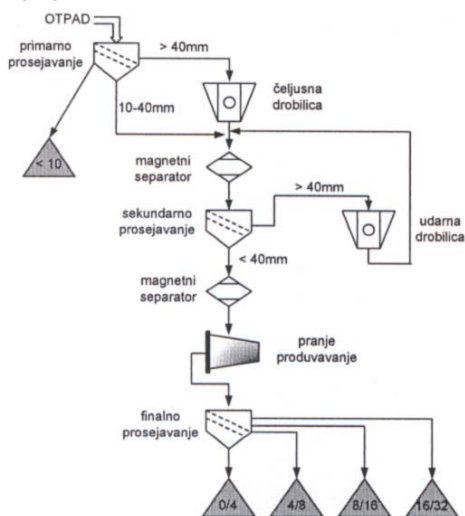


Slika 3. Struktura i izgled mobilnog reciklažnog postrojenja

Za razliku od mobilnih, stacionarna reciklažna postrojenja se prave kao centri za recikliranje u gusto naseljenim područjima, sa kapacitetom od oko 200000 tona agregata godišnje. U ovim postrojenjima nivo obrade otpadnog materijala nije ograničen, moguća je kontrola kvaliteta, te se

moгу dobiti reciklirani agregati različitog kvaliteta. Na slici 4 prikazana je struktura tipičnog stacionarnog postrojenja u kome se drobljenje vrši u dve faze [9], a na slici 5 izgled postrojenja.

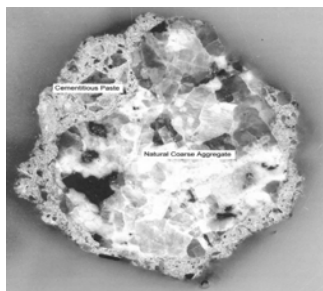
Zrno recikliranog agregata dobijeno ovakvim postupkom recikliranja sastoji se od zrna (ili dela zrna) prirodnog agregata i cementnog maltera originalnog betona, koji ga delimično ili potpuno obavija, slika 6 [10]. Prisustvo starog cementnog maltera, koji je manje zapreminske težine i veće poroznosti od zrna prirodnog agregata, značajno utiče na niz fizičko-mehaničkih svojstava kako recikliranog agregata, tako i betona na bazi recikliranog agregata. Odnosno, dovodi do "lošijih" svojstava recikliranog u odnosu na prirodni agregat.



Slika 4 - Struktura stacionarnog reciklažnog postrojenja



Slika 5 - Izgled stacionarnog reciklažnog postrojenja



Slika 6 - Izgled zrna recikliranog agregata [10]

Zbog toga su se u svetu u poslednjih nekoliko godina razvila istraživanja u smislu unapređenja tehnologije recikliranja i dobijanja recikliranog agregata koji bi po svojstvima, odnosno kvalitetu, bio praktično identičan prirodnom agregatu. Radi uklanjanja cementnog kamena sa zrna agregata razvijeno je nekoliko naprednih tehnologija recikli-

ranja, pre svega u Japanu. Jedna od tih tehnologija je takozvana "metoda zagrevanja i struganja" [11] [12]. Na ovaj način, dobija se 35% do 45 % čistog krupnog agregata, 30% do 35% čistog sitnog i 18% do 35% finog praha od cementnog maltera u zavisnosti od temperature zagrevanja (300-700⁰C).

Druga tehnologija je hemijski tretman klasično proizvedenog recikliranog agregata [13]. Prethodnim potapanjem recikliranog agregata u blage rastvore hlorovodonične, sumporne ili fosforne kiseline moguće je odstraniti deo cementnog maltera i poboljšati svojstva agregata, bez značajnijeg povećanja sadržaja hlorida i sulfata u njemu.

Sve navedene napredne tehnologije recikliranja, odnosno poboljšanja kvaliteta, iako omogućavaju proizvodnju kvalitetnog recikliranog agregata potpuno ekvivalentnog prirodnom, nemaju za sada širu primenu jer su značajno skuplje od tradicionalnih tehnologija. Metode sa termičkim tretmanom agregata su i energetski zahtevnije, što dovodi u pitanje korist od recikliranja i povoljan uticaj na zaštitu životne sredine [5].

SVOJSTVA AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA

Agregat od recikliranog betona se generalno sastoji od originalnog agregata i "zalepljenog" sloja maltera. Fizička i mehanička svojstva recikliranog agregata zavise kako od svojstava, tako i od količine preostalog maltera. Naime, poznato je da je "zalepljeni" malter oko zrna agregata porozan materijal, čija poroznost zavisi od vodocementnog faktora betona koji je recikliran [14].

Na količinu malterske komponente dominantno utiču proces drobljenja (usitnjavanja) "starog" betona i dimenzije recikliranog agregata [15]. Količina cementnog maltera u recikliranom agregatu kreće se od 25% do 65% (izraženo u zapreminskim procentima) i razlikuje se po pojedinim frakcijama – što je sitnija frakcija, veća je količina cementnog maltera [9,16]. U nastavku su prikazana neka svojstva recikliranog agregata.

Upijanje vode je svojstvo po kome se reciklirani agregat najviše razlikuje u odnosu na prirodni i zavisi od kvaliteta i debljine "zalepljenog" malterskog sloja oko zrna agregata. Upijanje vode krupnog recikliranog agregata kreće se od 3.5% do 10% [17], a sitnog od 5.5% do 13% [9]. Poređenja radi, prirodni rečni i drobljeni agregati imaju upijanje vode oko 1%. Povećano upijanje vode recikliranog agregata utiče na konzistenciju betona i na neka svojstva očvrstlog betona koja su bitna za trajnost (upijanje vode, otpornost na mraz, karbonizacija itd.). Pojedini istraživači, zbog toga, predlažu da se limitira učešće recikliranog agregata na 20-30% da bi se obezbedio uslov da upijanje vode ukupne količine agregata bude manje od 5%, kako bi se osigurala kvalitetna proizvodnja betona za konstrukcijsku primenu [18].

Zbog prisustva cementnog maltera, koji ima manju zapreminsku masu od zrna prirodnog agregata, zapreminska masa zrna recikliranog agregata manja je od zapreminske mase zrna prirodnog agregata u proseku za 10%. [9,17].

Oblik i tekstura recikliranog agregata zavise od vrste drobilice [19] i mogu nepovoljno uticati na obradljivost

betona sa recikliranim agregatom u odnosu na beton spravljen sa prirodnim rečnim agregatom.

Otpornost prema drobljivosti i habanju recikliranog agregata je manja od otpornosti prirodnog, pri čemu se razlike kreću u širokom granicama od 0% do 70%, u zavisnosti od kvaliteta originalnog betona [17].

Bez obzira na određene manje razlike u pogledu svojstva agregata od recikliranog betona, generalno reciklirani agregat u odnosu na prirodni agregat ima sledeća svojstva: veće upijanje vode, manju zapreminsku masu, veće habanje, veću drobljivost, veću količinu prašinih čestica, veći sadržaj organskih materija i moguć sadržaj hemijskih škodljivih materija.

Zbog mogućih varijacija u kvalitetu recikliranog agregata i generalno lošijeg kvaliteta u odnosu na prirodni agregat, mnoge zemlje koje su uvele u svoju praksu upotrebu recikliranog agregata, obavezuju proizvođače betona da pre upotrebe recikliranog agregata provere njegova svojstva. U nedostatku standarda u kome su specificirani zahtevi i uslovi kvaliteta za agregat od recikliranog betona, mogu se koristiti standardi za normalni - standardni agregat za proizvodnju betona. U zemljama EEZ je to standard EN 12620:2002.

SVOJSTVA BETONA SA AGREGATOM OD RECIKLIRANOG BETONA

U ovom poglavlju je dat kratak prikaz najvažnijih svojstva svežeg i očvrstlog betona sa recikliranim agregatom. Prikazani podaci su rezultati uporednih ispitivanja svojstva običnog betona i betona sa recikliranim agregatom drugih autora, kao i sopstvenih eksperimentalnih istraživanja autora ovog rada. Dostupni rezultati ispitivanja betona sa recikliranim agregatom variraju u širokim granicama, ponekad su i kontradiktorni, ali se generalno može uzeti da beton sa recikliranim krupnim agregatom u odnosu na obični beton sa prirodnim agregatom, ima sledeća svojstva:

- Vrsta krupnog agregata nema uticaja na količinu uvučenog vazduha [9, 20, 22];
- Sa povećanjem učešća recikliranog agregata smanjuje se zapreminska masa svežeg betona [9, 20, 22];
- Reciklirani agregat utiče na konzistenciju betona, tako što smanjuje pokretljivost betonske mešavine, zbog upijanja vode [9]. Način pripreme recikliranog agregata za spravljanje betonskih mešavina utiče na konzistenciju betona. U slučaju primene vodom zasićenog, površinski suvog recikliranog agregata konzistencija betona sa prirodnim i recikliranim agregatom se neće bitnije razlikovati. U slučaju upotrebe suvog recikliranog agregata i dodatne količine vode, može se postići ista konzistencija nakon zahtevanog vremena [20];
- Skupljanje betona se povećava sa povećanjem količine recikliranog agregata. Prema istraživanjima [23, 24] betoni sa različitim procentima zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim imaju veća skupljanja od uporednih sa prirodnim agregatom, od 4% do 70%, u zavisnosti od procenta zamene;
- Tečenje betona je proporcionalno količini cementnog maltera u betonu, a njega u betonu na bazi recikliranog agregata ima više u odnosu na uporedni beton sa

prirodnim agregatom. Dilatacije tečenja veće su što je veća količina recikliranog agregata. Tečenje betona koji ima 100% krupnog recikliranog agregata je veće za 25% do 60% [9, 23, 24];

- Upijanje vode zavisi od razlike između vodocementnih faktora novog i starog betona od koga je dobijen reciklirani agregat (ne razlikuje se ako novi beton ima veće "ω" od recikliranog betona) [9]. U najvećem broju slučajeva betoni sa recikliranim agregatom imaju veće upijanje vode [21];
- Čvrstoća betona pri pritisku zavisi prvenstveno od kvaliteta recikliranog agregata. Ukoliko se za spravljanje betona koristi kvalitetan agregat, dobijen drobljenjem betona viših marki, tada on neće uticati na smanjenje čvrstoće pri pritisku, bez obzira na procenat učešća u krupnom agregatu [21]. Prema [25] kod betona sa 100% recikliranog krupnog agregata pad čvrstoće u odnosu na čvrstoću uporednog betona sa prirodnim agregatom u proseku iznosi oko 13%, a kod betona sa 50% recikliranog krupnog agregata, u proseku oko 8%. Pad čvrstoće kod betona sa procentom zamene krupnog agregata manjim od 50% praktično se može smatrati zanemarljivim;
- Na vrednosti čvrstoća na zatezanje cepanjem i na zatezanje savijanjem, vrsta upotrebljenog agregata nema bitniji uticaj. Razlike u čvrstoćama se kreću od 0-10% [9, 21, 25];
- Modul elastičnosti betona na bazi recikliranog agregata manji je od modula elastičnosti betona na bazi prirodnog agregata zbog prisustva cementnog maltera. Kod betona sa 100% recikliranog krupnog agregata, pad modula elastičnosti u odnosu na beton sa prirodnim agregatom iznosi u proseku oko 20%, [21, 24];
- Na vodopropustljivost betona utiče kapilarna poroznost cementnog kamena novog betona i kapilarna poroznost cementnog kamena recikliranog betona. Ukoliko je agregat dobijen drobljenjem betona male poroznosti, tada vodopropustljivost novog betona zavisi od izbora granulometrijskog sastava i ostvarene strukture novog cementnog kamena [21];
- Količina recikliranog agregata utiče na otpornost betona prema habanju. Sa povećanjem količine recikliranog agregata smanjuje se otpornost betona prema habanju, zbog povećane količine cementnog kamena koji se lakše haba od zrna prirodnog agregata [9, 21];
- Na prionljivost između betona i armature agregat od recikliranog betona nema značajniji uticaj, jer se prionljivost ostvaruje preko novog cementnog kamena [21].

Trajnost betona zavisi od njegovih transportnih karakteristika – propustljivosti za vazduh, vodu i hloride. Propustljivost dominantno zavisi od veličine, rasporeda i kontinuiteta kapilarnih pora u cementnom kamenu i kontaktnim zonama u strukturi betona. Betoni na bazi recikliranog agregata, generalno, imaju veću propustljivost za vodu i vazduh od betona na bazi prirodnog agregata, zbog prisustva starog cementnog maltera i postojanja dve kontaktne zone. Međutim, generalni zaključci o svojstvima bitnim za trajnost betona sa recikliranim agregatom se ne mogu izvesti, zbog suprotnih zaključaka u postojećoj literaturi [9, 26];

SOPSTVENO EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE KONSTRUKCIJSKIH BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

U našoj zemlji ima veoma malo podataka o istraživanjima betona spravljenih sa agregatom od recikliranog betona. Prva ispitivanja mogućnosti proizvodnje betona sa agregatom od recikliranog "starog" betona, urađena su na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu [20, 21]. U nastavku su ukratko prikazana dva primera iz sopstvenih istraživanja u predmetnoj oblasti.

Primer 1: Obični betoni sa krupnim agregatom od recikliranog betona

Ovim istraživanjem su upoređena osnovna svojstva referentnog betona i betona od recikliranog agregata. Eksperimentalnim istraživanjem obuhvaćene su tri vrste beton-skih mešavina:

- I betonska mešavina je spravljena sa prirodnim rečnim sitnim i krupnim agregatom (R0),
- II betonska mešavina je spravljena sa prirodnim sitnim agregatom i sa 50% prirodnog rečnog krupnog agregata i 50% recikliranog krupnog agregata (R50),
- III betonska mešavina je spravljena sa prirodnim sitnim agregatom i sa 100% recikliranim krupnim agregatom (R100),

Kao komponentni materijali za spravljanje navedenih vrsta betona upotrebljeni su:

- Portland-kompozitni cement CEM II/A-M(S-L) 42.5R, (Lafarge -BFC)
- Sitan agregat (prirodni rečni agregat, savski, separacija Luka Leget, frakcija 0/4mm)
- Dve vrste krupnog agregata:
 - ♦ prirodni rečni agregat, savski, separacija Luka Leget, (frakcije 4/8, 8/16 i 16/31.5mm) i
 - ♦ agregat od recikliranog betona (frakcije 4/8, 8/16 i 16/31.5mm)
- Voda iz gradskog vodovoda.

Agregat od recikliranog betona dobijen je drobljenjem „starog“ betona MB30 i MB40. Kao sirovina poslužile su

Tabela 1 - Projektovane količine komponentnih materijala

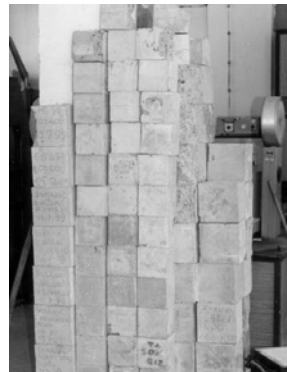
Vrsta betona	Količina cementa, (kg/m ³)	Količina vode, (kg/m ³)	Količina agregata, (kg/m ³)	Količina dodatne vode*, (kg/m ³)	Zapreminska masa, (kg/m ³)
R0	350	180	1857	0	2387
R50	350	180	1816	19	2365
R100	350	180	1776	37	2343

* Za spravljanje betonskih mešavina odabran je postupak sa suvim recikliranim agregatom, pa je zbog postizanja zahtevane konzistencije, sračunata dodatna količina vode koju reciklirani agregat upije u prvih 30 minuta od spravljanja betonske mešavine.

Tabela 2 - Projektovane količine frakcija agregata

Vrsta betona	Količina rečnog agregata po frakcijama, (kg/m ³)				Količina agregata od recikliranog betona po frakcijama, (kg/m ³)		
	0/4	4/8	8/16	16/32	4/8	8/16	16/32
R0	612	298	390	556	0	0	0
R50	600	145	191	272	118	136	354
R100	586	0	0	0	231	266	693

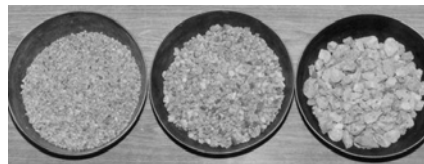
betonske kocke koje su korišćene za ispitivanje čvrstoće pri pritisku (slika 7) i jedan prefabrikovani AB stub (slika 8). Na slici 9 prikazane su frakcije recikliranog agregata.



Slika 7 – Betonske kocke



Slika 8 – Prefabrikovani AB stub



Slika 9 – Frakcije krupnog agregata od recikliranog betona

Sastavi betonskih mešavina prikazani su u tabeli 1, a učešće pojedinih frakcija agregata u tabeli 2. Prilikom određivanja sastava betonskih mešavina, vodilo se računa o upijanju vode recikliranog agregata. Za određivanje dodatne količine vode korišćeni su rezultati upijanja vode recikliranog agregata nakon 30 minuta.

U tabeli 3 prikazani su rezultati ispitivanja konzistencije (slika 10), količine uvučenog vazduha i zapremine mase svežeg betona.

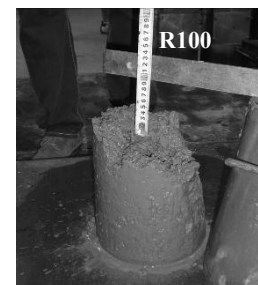
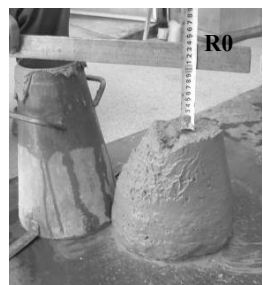
Tabela 3 - Rezultati ispitivanja svežeg betona

Vrsta betona	Sleganje nakon spravljanja (cm)	Sleganje nakon 30 minuta, (cm)	Sadržaj vazduha, (%)	Zapreminska masa, (kg/m ³)
R0	16	10	1.5	2399
R50	14.5	8.5	1.4	2378
R100	11	9	1.3	2329

Sleganje nakon spravljanja



Sleganje nakon 30 minuta



Slika 10 – Konzistencija (sleganje konusa) nakon 30 minuta

U tabeli 4 prikazani su rezultati ispitivanja svojstava očvrsllog betona pri starosti od 28 dana.

Tabela 4 – Rezultati ispitivanja svojstava očvrsllog betona pri starosti od 28 dana

Vrsta betona	R0	R50	R100
Upijanje vode, (%)	5.61	6.87	8.05
Čvrstoća pri pritisku, (MPa)	43.4	45.2	45.7
Čvrstoća na zatezanje pri cepanju, (MPa)	2.66	3.197	2.78
Čvrstoća pri savijanju, (MPa)	5.4	5.7	5.2
Modul elastičnosti, (GPa)	35.55	32.25	29.10
Otpornost prema habanju brušenjem, (cm ³ / 50 cm)	13.40	15.58	17.18
Athezija između betona i glatke armature, MPa	6.48	5.87	6.76
Athezija između betona i rebraste armature, MPa	8.22	7.50	7.75

Na osnovu komparativne analize rezultata sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja svojstava svežeg i očvrsllog betona sa prirodnim krupnim agregatom, kombinovanim krupnim agregatom i sa recikliranim krupnim agregatom, zaključeno je:

- Vrsta krupnog agregata nema uticaja na količinu vazduha u betonu,
- Sa povećanjem učešća recikliranog agregata smanjuje se zapreminska masa betona,

- Reciklirani agregat utiče na konzistenciju betona, tako što smanjuje pokretljivost betonske mešavine, smanjenjem slobodne količine vode u cementnoj pasti, zbog upijanja vode. Dodavanjem određene količine vode može se postići ista konzistencija kao kod betona sa prirodnim agregatom. Dodatna količina vode zavisi od vremena kada se želi postići ista konzistencija i određuje se na osnovu količine vode koju upije reciklirani agregat u istom vremenskom periodu.

- Čvrstoća betona pri pritisku zavisi prvenstveno od kvaliteta recikliranog agregata. Ukoliko se za spravljanje betona koristi kvalitetan agregat, dobijen drobljenjem betona viših marki, tada on neće uticati na smanjenje čvrstoće pri pritisku, bez obzira na procenat učešća u krupnom agregatu.
- Količina recikliranog agregata utiče na upijanje vode. Sa povećanjem količine recikliranog agregata proporcionalno se povećava količina upijene vode.
- Na vrednosti čvrstoća na zatezanje cepanjem i na zatezanje savijanjem, vrsta upotrebljenog agregata nema značajniji uticaj.
- Količina recikliranog agregata utiče na vrednost modula elastičnosti. Sa povećanjem količine recikliranog agregata smanjuje se modul elastičnosti betona.
- Količina recikliranog agregata utiče na otpornost betona prema habanju. Sa povećanjem količine recikliranog agregata smanjuje se otpornost betona prema habanju, zbog povećane količine cementnog kamena koji se lakše haba od zrna prirodnog agregata.
- Na prionljivost između betona i armature agregat od recikliranog betona nema značajniji uticaj, jer se prionljivost ostvaruje preko novog cementnog kamena.
- portland-kompozitni cement CEM II/A-M(V-L)42.5R (Lafarge-BFC)
- rečni agregat, pran i separisan u tri frakcije 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm ("DAK", Beočin)
- reciklirani agregat – dobijen drobljenjem "starog" betona, kao krupan agregat (4/8mm i 8/16mm). Korišćen je isti reciklirani agregat kao u istraživanju u primeru 1.
- leteći pepeo, kao mineralni dodatak (Termo elektrana "Nikola Tesla B", Obrenovac)
- mleveni krečnjak (Majdan Rudnik), kao mineralni dodatak
- superplastifikator-modifikovani polikarboksilat, Sika Viscocrete 3070, (SIKA, Beograd)
- voda iz gradskog vodovoda.

Od navedenih komponentnih materijala napravljeno je osam betonskih mešavina (tabela 5):

- PO – etalonska mešavina spravljena sa prirodnim agregatom bez mineralnog dodatka,
- RO – etalonska mešavina spravljena sa krupnim recikliranim agregatom bez mineralnog dodatka,
- PK – mešavina spravljena sa prirodnim agregatom i mlevenim krečnjakom,
- RK – mešavina spravljena sa recikliranim krupnim agregatom i mlevenim krečnjakom,
- PL – mešavina spravljena sa prirodnim agregatom i letećim pepelom,
- RL – mešavina spravljena sa krupnim recikliranim agregatom i letećim pepelom,
- PM – mešavina spravljena sa prirodnim agregatom i krečnjakom i letećim pepelom,
- RM – mešavina spravljena sa krupnim recikliranim agregatom i krečnjakom i letećim pepelom.

Primer 2: Samougrađujući betoni (SCC) sa krupnim agregatom od recikliranog betona

Eksperimentalnim istraživanjem proverena je mogućnost korišćenja sekundarnih sirovina i otpadnih materijala za spravljanje samougrađujućih betona. Kao sekundarna sirovina odabran je elektrofilterski (leteći) pepeo, a od otpadnih materijala drobljeni "stari" beton kao krupan agregat. "Stari" odnosno reciklirani beton se, prema podacima iz dostupne literature, može koristiti za spravljanje običnih betona, a u ovom eksperimentu je proverena i mogućnost njegove primene u samougrađujućim betonima, koji imaju drugačije zahteve od običnih u pogledu svojstava svežeg betona. Krečnjak je odabran kao "standardni" mineralni dodatak za samougrađujuće betone.

Za spravljanje betonskih mešavina, potrebnih za realizaciju predviđenog programa, upotrebljeni su sledeći komponentni materijali:

Tabela 5 - Projektovane količine komponentnih materijala za 1m³ betona

Vrste betona	m _c (kg)	m _v + m _{v,dod} (kg)	m _{kr} (kg)	m _{lp} (kg)	m _{spk} (kg)	m _{as} (kg)	m _{ak} (kg)	m _{ak,rec} (kg/m ³)	γ _{b,sv} (kg/m ³)
PO	485	200+0	-	-	7.3	703	948	-	2343
RO	485	200+17	-	-	7.3	703	-	878	2290
PK	400	200+0	85	-	6.0	701	948	-	2340
RK	400	200+17	85	-	6.0	701	-	878	2287
PL	400	225+0	-	86	6.0	648	918	-	2283
RL	400	225+17	-	86	6.0	648	-	850	2232
PM	400	205+0	42.8	42.8	6.0	686	942	-	2325
RM	400	205+17	42.8	42.8	6.0	686	-	873	2273

Na svežem betonu ispitana su svojstva koja su karakteristična za SCC, a to su:

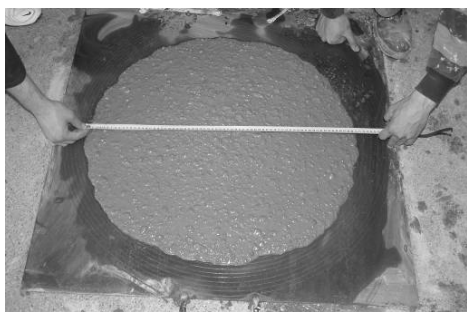
- rasprostiranje sleganjem (zahtevana je klasa SF2) pomoću Slump-flow testa (slika 11 i 12),
- viskoznost (izmerena vrednost VS) pomoću T500 Slump-flow testa,
- sposobnost prolaska (izmerena vrednost PA) pomoću L-boksa (slika 12) i

- otpornost na segregaciju (izmerena vrednost SR) pomoću sita.

U tabeli 5 prikazani su rezultati ispitivanja svojstava svežeg betona.

Tabela 5 - Rezultati ispitivanja svežeg samougrađujućeg betona

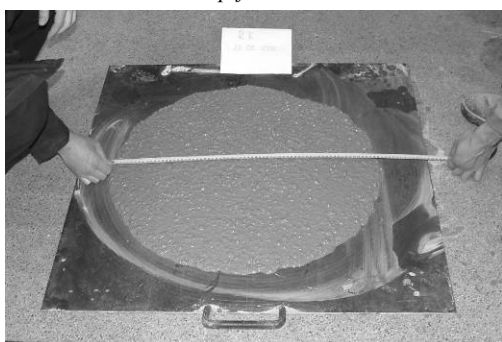
Vrsta betona	PO	RO	PK	RK	PL	RL	PM	RM
Rasprostiranje, cm	69	72	75	68	73	72	72	70
Sposobnost prolaska	0.823	0.454	0.972	0.509	0.823	0.722	0.875	0.522
Otpornost na segregaciju, %	7.2	5.8	12.5	6.8	12.5	5.1	12.5	6.0
Zapreminska masa, kg/m ³	2371	2296	2360	2311	2236	2194	2290	2241



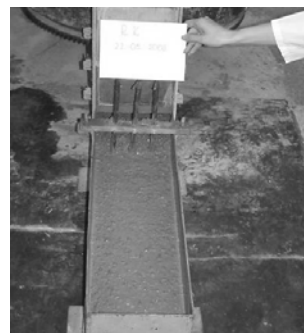
Slika 11- Shump-flow test betona PO



Slika 13 - Sposobnost prolaska betona PO



Slika 12- Shump-flow test betona RK



Slika 14 - Sposobnost prolaska betona RK

U tabeli 6 prikazani su rezultati ispitivanja svojstava očvrsllog betona pri starosti od 28 dana.

Tabela 6 - Rezultati ispitivanja očvrsllog samougrađujućeg betona

Vrsta betona	PO	RO	PK	RK	PL	RL	PM	RM
Efektivni m_v/m_c	0.412	0.412	0.500	0.500	0.562	0.562	0.512	0.512
Čvrstoća pri pritisku, MPa	55.8	60.1	50.3	53.6	44.4	47.6	49.3	53.7
Čvrstoća na zatezanje pri cepanju, (MPa)	2.94	3.19	2.88	2.99	2.76	2.89	2.90	3.06
Čvrstoća pri savijanju, (MPa)	6.8	6.9	7.0	7.2	6.6	7.0	7.0	7.2
Modul elastičnosti, (GPa)	34.5	30.8	32.0	29.3	29.4	26.2	30.7	27.4

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja i analize svojstava spomenutih betonskih mešavina u svežem i očvrslom stanju, zaključeno je sledeće:

- Vrsta mineralnog dodatka ima uticaja na potrebnu količinu vode za postizanje zahtevane klase konzistencije i promenu konzistencije kroz vreme. Mleveni krečnjak ne menja potrebnu količinu vode za razliku od elektrofilterskog pepela, koji zahteva veću količinu vode i ima direktnog uticaja na istu. Primenom letećeg pepela povećava se potrebna količina vode za ostvarivanje tražene klase konzistencije za približno 9%.

- Vrsta agregata utiče na potrebnu količinu vode da bi se dobila tražena konzistencija. Reciklirani agregat „zah-teva“ veću količinu vode nego prirodni. Razlog je veće upijanje vode kod starog maltera zalepljenog za zrna agregata.
- Sposobnost prolaska je bolja kod mešavina sa upotrebljenim mlevenim krečnjakom nego kod mešavina sa upotrebljenim letećim pepelom, kao mineralnim dodatkom.
- Vrsta krupnog agregata ima znatno veći uticaj na sposobnost prolaska od vrste mineralnog dodatka. Re-

ciklirani agregat, zbog drugačije teksture i oblika zrna, značajno smanjuje sposobnost prolaska SCC.

- Vrsta mineralnog dodatka nema veliki uticaj na otpornost ka segregaciji.
- Uticaj vrste krupnog agregata je daleko veći nego uticaj mineralnog dodatka pa su, uslovno, mešavine sa prirodnim agregatom sklonije segregaciji od mešavina sa agregatom od recikliranog betona.
- Mleveni krečnjak, kao mineralni dodatak, nema uticaja na vrednost zapreminske mase u svežem stanju. S druge strane, elektrofilterski pepeo, zbog manje zapreminske mase i veće potrebe za vodom, značajno smanjuje zapreminsku masu svežeg betona.
- Zapreminska masa mešavina sa agregatom od recikliranog betona je manja od iste kod mešavina spravljenim sa prirodnim agregatom, što je očekivano s obzirom na različitu količinu dodate vode i činjenicu da reciklirani agregat ima manju zapreminsku masu.
- Čvrstoća pri pritisku zavisi od vrste mineralnog dodatka. Mleveni krečnjak, kao mineralni dodatak, utiče na smanjenje čvrstoća pri pritisku; prosečno smanjenje se kreće oko 10%, dok elektrofilterski pepeo, zbog povećane potrebe za vodom radi ostvarivanja svojstva samougradljivosti, smanjuje čvrstoću pri pritisku za oko 20%.
- Betonske mešavine sa recikliranim agregatom imaju veću čvrstoću nakon 28 dana u odnosu na mešavine spravljene od prirodnog agregata za prosečno 8%.
- Na vrednosti čvrstoća na zatezanje cepanjem, kao i čvrstoća na zatezanje savijanjem, vrsta mineralnog dodatka nema značajniji uticaj.
- Uticaj vrste agregata na vrednosti spomenutih čvrstoća nema bitniji značaj.
- Vrednosti statičkog modula elastičnosti zavise od vrste mineralnog dodatka. Elektrofilterski pepeo ima izraženiji uticaj na smanjenje vrednosti statičkog modula elastičnosti (do 15%), dok je smanjenje uzrokovano mlevenim krečnjakom manje (do 7%).
- Vrsta agregata utiče na vrednost statičkog modula elastičnosti; mešavine spravljene sa prirodnim agregatom imaju veće vrednosti statičkog modula elastičnosti od mešavina spravljenih sa agregatom od recikliranog betona u proseku do 10%.

ZAKLJUČAK

Sve veća potrošnja agregata i ograničenja u eksploataciji prirodnih sirovina za proizvodnju agregata, dovela su do primene alternativnih materijala. Ovi materijali su najčešće industrijski sekundarni proizvodi ili građevinski otpad, čije deponovanje predstavlja veliki ekološki problem. Jedan od takvih materijala je betonski krš, nastao rušenjem objekata. Poslednjih dvadeset godina se u pojedinim zemljama Evrope, Severne Amerike i u Japanu, stimuliše upotreba agregata od recikliranog betona od strane državnih institucija. U ovim zemljama su uvedeni nacionalni standardi za ovu vrstu agregata, a kao rezultat višegodišnjih istraživanja proizašle su i preporuke za spravljanje i pri-

menu novih betona spravljenih sa agregatom od recikliranog betona. Na slikama 15-17 dati su primeri objekata u kojima je beton na bazi recikliranog agregata primenjen za noseću konstrukciju [5]. Na slici 15 prikazan je poslovni objekat Vilbeler Weg sa otvorenom višespratnom garažom, izgrađen u Darmštatu, 1997/1998. godine.



Slika 15 - Vilbeler Weg u Darmštatu, Nemačka

Poslovna zgrada BRE-a u Watfordu (UK) prva je zgrada Velikoj Britaniji u kojoj je primenjen beton na bazi recikliranog agregata u armiranobetonskoj konstrukciji. Objekat je izgrađen 1995/1996. godine i prikazan je na slici 16.



Slika 16 - Poslovna zgrada BRE, UK

Na slici 17 je prikazan jedan od objekata u okviru termocentrale u Yokohami čija AB konstrukcija je u potpunosti izgrađena od betona koji je imao 50% recikliranog agregata. Objekat je izgrađen 2005. g., a ukupna količina betona za armiranobetonsku konstrukciju iznosila je oko 1000 m³.



Slika 17 - Objekat za spaljivanje otpada, termocentrala Yokohama, Japa

U našoj zemlji, nisu istraživane mogućnosti primene agregata od recikliranog betona, što je navelo autore ovog rada da sopstvenim eksperimentalnim istraživanjem pokrenu primenu recikliranog agregata.

Uzimajući u obzir sva saznanja do kojih se došlo u ovom istraživanju, može se zaključiti:

- Primenom agregata od recikliranog betona za spravljanje novog betona mogu se dobiti betoni zadovoljavajućih, pa čak i visokih performansi, što prvenstveno zavisi od čvrstoće pri pritisku betona čijim drobljenjem je dobijen agregat, a zatim i od poznavanja

svih specifičnosti vezanih za projektovanje sastava i spravljanje ovih vrsta betona.

- Upotrebom krupnog agregata od drobljenog starog betona, bez obzira na vrstu mineralnog dodatka, mogu se proizvesti betoni koji ispunjavaju osnovne uslove za samougrađujuće betone (fluidnost, viskoznost, sposobnost prolaska i otpornost na segregaciju). Mehaničke karakteristike ovih betona zavise od vrste mineralnog dodatka. Ako se kao mineralni dodatak koristi leteći pepeo, što je sa ekološkog aspekta naročito povoljno, dobijaju se nešto niže mehaničke karakteristike u odnosu na „standardne“ samougrađujuće betone, međutim to ne osporava primenu ovih materijala - krupnog agerata od drobljenog betona i letećeg pepela kao mineralnog dodatka, za proizvodnu samougrađujućih betona zadovoljavajućih performansi.

Međutim, u praksi je za konstrukcijsku primenu, upotreba agregata od recikliranog betona limitirana prvenstveno zbog velikih varijacija u kvalitetu, što je direktna posledica porekla i stanja "starog" betona.

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] FIB Task Group 3.3 (2004): Environmental Design, International Federation for Structural Concrete, fib, Lausanne, Switzerland, pp. 74
- [2] Aggregates Advisory Service-UK, Digest no. 016 (1999): Construction and demolition waste management practices and their economic impacts- study for DGXI- European Commission.
- [3] Oikonomou ND (2005): Recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites 27, 2005, pp. 315-318.
- [4] www.ecosmartconcrete.com/enviro_index.cfm (podatak od 11.04.2010.)
- [5] Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I. (2009): Betoni na bazi recikliranog agregata - tehnologija, svojstva i primena, Konferencija Graditeljstvi i održivi razvoj, DIMK Srbije, Beograd, str. 131-154.
- [6] L.P. Chun, D.E. Scorpio, C.J. Kibert (1997): Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations, Journal of Construction Management and Economics 15 (1) (1997) pp. 49– 58.
- [7] Vivian W.Y. Tam, X.F. Gaob, C.M. Tam (2005): Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and concrete research, 35 (2005), 2005, pp. 1195– 1203.
- [8] R.J. Collins (1993): Reuse of demolition materials in relation to specifications in the UK, Demolition and reuse of concrete and masonry: guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry, RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete Masonry, Denmark, 1993, pp. 49–56.
- [9] Hansen TC (1992): Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report, pp. 157.
- [10] W.K. Fung (2005): Durability of Concrete using Recycled Aggregates, SCCT Annual Concrete Seminar, ppt presentation.
- [11] Mulder E, De Jong TPR, Feenstra L (2006): Closed Cycle Construction – An integrated process for the separation and reuse of C&D waste, Proceedings of Sixth International Conference WASCON 2006, Belgrade, pp. 17-25.
- [12] Tam V, Tam CM, Le KN (2007): Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, Resources, Conservation and Recycling 50, pp.82-101.
- [13] Etxeberria M, Vasquez E, Mari A, Barra M (2007): Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Research 37, 2007, pp. 735-742.
- [14] S. Nagataki (2000): Properties of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, International Workshop on Recycled Concrete.
- [15] T.C. Hansen, H. Narud (1983): Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, Concrete International—Design and Construction 5 (1), January 1983, pp. 79–83.
- [16] Sanchez de Juan M, Gutierrez PA (2009): Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials 23, 2009 pp. 872-877.
- [17] Poon CS, Lam CS (2008): The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on properties of pre-cast concrete blocks, Cement and Concrete Composites 30, 2008, pp. 283-289.
- [18] M. Kikuchi, T. Mukai, H. Koizumi (1988): Properties of concrete products containing recycled aggregate, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Reuse of Demolition Waste, Chapman and Hall, London, 1988, pp. 595–604.
- [19] Shokry Rashwan, Simaan Abou Rizk (1997): Research on an alternative method for reclaiming leftover concrete, Concrete International 19 (7).
- [20] Malešev, M., Radonjanin, V., Dimča, M. (2006): Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete – Part I, 4th International Scientific Meeting "INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry", Novi Sad, Proceeding, November 2006, pp. 495-504.
- [21] Radonjanin, V., Malešev, M., Dimča, M. (2006): Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete – Part II, 4th International Scientific Meeting "INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry", Novi Sad, Proceeding, November 2006, pp. 505-516.
- [22] Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH (2001): Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Research 31, pp. 707-712.

- [23] Tam V, Tam CM (2007): Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach, *Materials and structures* 42, pp. 3592-3602.
- [24] Domingo-Cabo A, Lázaro C, López-Gayarre F, Serrano-López MA, Serna P, Castaño-Tabares JO (2009): Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, In Press, Corrected Proof (Available online 13 March 2009).
- [25] Ignjatović I, Marinković S (2009): Mehaničke karakteristike betona na bazi recikliranog agregata, *Materijali i konstrukcije* 1, Beograd, 2009, str. 40-50.
- [26] S.M. Levy, P. Helene (2004): Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research* 34, 2004, pp. 1975–1980.

ABSTRACT

POSSIBILITY OF APPLICATION OF OLD CONCRETE AS A NEW KIND OF AGGREGATE IN MODERN CONSTRUCTION

Characteristic of the 20th century, in terms of civil engineering, is intensive construction without taking care about preservation of the natural resources and the impact of buildings on the environment in all stages of service life, especially after demolition of buildings and waste deposition. Because of that, at the end of the last century, generation of huge amounts of waste became one of the biggest environmental problems in the majority of the world. Recycling of "old" concrete is accepted as one of sustainable solutions for the problems of construction and demolition waste (C&D) and preservation of natural resources of aggregate. The first part of the paper presents technological procedure for recycled concrete aggregate production, basic properties of obtained aggregate and properties of recycled aggregate concrete. In the second part of the paper, results of own comparative investigation of properties of common and self-compacting concrete with coarse recycled concrete aggregate, are briefly presented. It was concluded that by using of quality uncontaminated recycled concrete aggregate it is possible to produce concrete with satisfactory performances that are not different from properties of ordinary concrete produced with natural aggregate.