

Primljen / Received: 29.9.2017.

Ispravljen / Corrected: 2.7.2018.

Prihvaćen / Accepted: 29.9.2018.

Dostupno online / Available online: 10.2.2023.

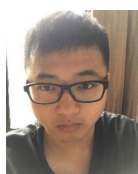
Analiza osnovnih mehaničkih svojstava mješavina recikliranog betona s recikliranim krupnozrnatnim agregatom

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Kai Wu**, dipl.ing.građ.
wukai19811240@163.com

Autor za korespondenciju



¹**Feng Chen**, dipl.ing.građ.
chenfeng160205@163.com



²**Chuyang Chen**, dipl.ing.građ.
ccy16@berkeley.edu



¹**Shiqi Lin**, dipl.ing.građ.
lsq1995.95@163.com



¹**Yang Nan**, dipl.ing.građ.
ny19931023@yeah.net

¹ Sveučilište Hohai, Nanjing, Kina

Visoka graditeljska i prometna škola

² Sveučilište Kalifornije, Berkeley, SAD

Odjel za građevinarstvo i inženjerstvo okoliša

Prethodno priopćenje

[Kai Wu, Feng Chen, Chuyang Chen, Shiqi Lin, Yang Nan](#)

Analiza osnovnih mehaničkih svojstava mješavina recikliranog betona s recikliranim krupnozrnatnim agregatom

Tri vrste recikliranog betona sa šest različitih udjela recikliranog agregata (RAC) ispitano je u četiri različite starosti kako bi se odredila njihova tlačna čvrstoća na uzorcima oblika kocke, odnosno kako bi se utvrdila njihova mehanička svojstva. Sustavno su analizirani oblici sloma, tlačna čvrstoća, krivulje naprezanja – deformacije, maksimalne deformacije te modul elastičnosti betona s recikliranim agregatom. Na temelju dobivenih rezultata predložena su tri izraza za RAC kako bi se opisao odnos između tlačne čvrstoće i udjela zamjene agregata. Razni izrazi za određivanje modula elastičnosti uspoređuju se s rezultatima ispitivanja, nakon čega se prikazuju tri najpovoljnija izraza za tri vrste RAC-a, uključujući i potrebne izmjene, naročito za RAC s miješanim recikliranim agregatom.

Ključne riječi:

otpadna opeka, miješani reciklirani agregat, tlačna čvrstoća, modul elastičnosti, mehanička svojstva

Research Paper

[Kai Wu, Feng Chen, Chuyang Chen, Shiqi Lin, Yang Nan](#)

Study of basic mechanical properties of recycled concrete with various recycled coarse aggregate mixes

Three kinds of recycled aggregate concretes (RACs), with six different replacement rates at four ages, are subjected to the standard cube axial compression test to study mechanical properties. Failure modes, compressive strength, stress-strain curves, peak strain, and elastic modulus of RACs are systematically analysed. In addition, three equations are proposed for RACs to describe the relationship between the compressive strength and replacement rate. Comparison between various equations of elastic modulus and test results is presented, and then three most suitable equations are established for three kinds of RACs, including necessary modifications, especially for RAC with mixed recycled aggregates.

Key words:

waste brick, mixed recycled aggregates, compressive strength, elastic modulus, mechanical properties

1. Uvod

Upotreba tradicionalnih materijala u građevinarstvu povezana je s nekoliko značajnih problema kao što su pretjerano iskorištavanje resursa, zagađivanje okoliša i pretjerano korištenje zemljišta. Procjenjuje se da se u Kini svake godine generira otprilike dvjesto milijuna tona otpadnog betona [1]. U novije se vrijeme velika pozornost pridaje mogućnostima recikliranja građevinskog otpada i otpada od rušenja, pri čemu se u politici upravljanja otpadom glavni naglasak stavlja na poticanje minimalizacije. Ustanovljeno je da razvoj betona s recikliranim agregatom (engl. *recycled aggregate concrete* - RAC) predstavlja učinkovit način za recikliranje otpadnog betona, što znatno doprinosi održivom razvoju u području građevinarstva [2, 3].

Posljednjih se godina provode opsežna istraživanja kako bi se potaknulo šire prihvaćanje RAC-a. Što se tiče čvrstoće recikliranog betona, eksperimentalni rezultati koje su objavili Bairagi i dr. [4] i Olorunsogo [5] pokazuju da se tlačna čvrstoća RAC-a smanjuje s povećanjem udjela recikliranog agregata (engl. *recycled aggregate* - RA). Na temelju opsežne analize rezultata ispitivanja koja su proveli brojni znanstvenici, Wesche i Schulz [6] utvrdili su da je tlačna čvrstoća RAC-a za deset posto niža od tlačne čvrstoće običnog betona. Međutim, Ridzuan i dr. [7] u svom su istraživanju pokazali da se čvrstoća RAC-a može povećati za 2 do 20 posto. Može se reći da tlačna čvrstoća RAC-a uvelike varira kada se usporedi s betonom koji sadrži prirodan agregat. Pereira i dr. [8] pokazuju da je povećanje čvrstoće betona s recikliranim sitnozrnatim agregatom usporedno s povećanjem zamjene agregata od 20-30 posto pa do 100 %. Xiao i dr. [9] utvrdili su da je tlačna čvrstoća RAC-a viša nego kod običnog betona kada udio zamjene (engl. *replacement rate* - *rr*) s recikliranim krupnozrnatim agregatom iznosi 50 %. Eksperimentalni rezultati koje je dobio Chang [10] pokazuju na nevjerojatno visoku čvrstoću RAC-a kada je udio zamjene krupnozrnatim recikliranim agregatom iznosio 50 i 70 %. Rezultati koje su postigli Sun i dr. [11] pokazuju da je tlačna čvrstoća RAC-a s udjelom zamjene agregata od 70 % i 100 % veća od tlačne čvrstoće RAC-a s udjelom zamjene agregata od 40 %. Za sada još nema jednoznačnog stajališta o tlačnoj čvrstoći pa su stoga potrebna dodatna ispitivanja i nove teoretske spoznaje kako bi se utvrdile zakonitosti glede promjene čvrstoće. Što se tiče modula elastičnosti, Xiao [12] i Hu i dr. [13] utvrdili su da RAC sa 100 % recikliranog agregata u betonu (RCA) ima i do 45 % niži modul elastičnosti u usporedbi s običnim betonom. Zhou i dr. [14] navode da je modul elastičnosti RAC-a za 15-26 % niži u odnosu na obični beton, što ovisi o kvaliteti betona i svojstvima RCA, tj. agregata od recikliranog betona (engl. *recycled concrete aggregate* - RCA) Kou i dr. [15] također zaključuju da se modul elastičnosti RAC-a smanjuje s povećanjem postotka zamjene s RCA, te da je modul elastičnosti RAC-a sa 100 % RCA za otprilike 40 % niži nego kod običnog betona. U radu Qasrawi i Marie [16] uvodi se jednostavni izraz za predviđanje modula elastičnosti betona s RCA. Istraživači poput Etxeberria i dr. [17] te Evangelista i Britoa [18] proveli su seriju eksperimentalnih istraživanja

različitih recikliranih agregata (RA) s različitim udjelima zamjene, a dobiveni rezultati pokazuju da udio zamjene agregata, maksimalni promjer, tlačna čvrstoća i količina vlage agregata, isto kao i vodocementni faktor (*v/c*), mogu utjecati na mehanička svojstva RAC-a. S povećanjem vrijednosti udjela zamjene i *v/c* dolazi do neznatnog smanjenja čvrstoće RAC-a, s tim da se može očekivati porast čvrstoće usporedo s povećanjem količine vlage. RAC s krupnijim i bolje građuiranim agregatom odlikuje se većom čvrstoćom. Chen i dr. [19] utvrdili su da je ukupna krivulja naprezanja – deformacije za RAC slična krivulji običnog betona: rastući segmenti uglavnom su isti dok je krivulja RAC-a strmija u silaznim segmentima. Uzimajući u obzir mehanička svojstva i ekonomske pokazatelje, ti autori predlažu da se 30 % do 40 % usvoji kao optimalna vrijednost udjela zamjene agregata za RAC. Rezultati ispitivanja nakon 20 dana njege, koja su proveli Poon i dr. [20], upućuje na slične čvrstoće betona pripremljene s različitim vrstama agregata (sušenog na zraku, sušenog u pećnici te zasićenog i površinski osušenog). Eksperimentalni rezultati koje je objavio Du [21] pokazuju da maksimalno naprezanje, te maksimalna deformacija na maksimalnoj točki i početnoj točki, rastu s porastom čvrstoće RAC-a.

Na temelju dosadašnjih spoznaja znanstvenici su izradili velik broj studija o ponašanju RAC-a, najčešće s agregatom od recikliranog betona (RCA), ali ponekad i zamjenom prirodnog agregata (engl. *natural aggregate* - NA) agregatom od reciklirane opeke (engl. *recycled brick aggregate* - RBA). Sustavnija istraživanja u tom su području vrlo rijetka. U normi BS 8500-2 [22], reciklirani agregat (RA) definira se kao agregat dobiven obradom anorganskog materijala koji je prethodno korišten u građevinarstvu, a to su npr. drobljeni beton, zidani materijal ili opeka. Dugo se vremena opeka vrlo često u Kini koristila kao nosivi materijal i kao materijal za vanjsku zaštitu građevina. S povećanjem gradnje novih građevina i rekonstrukcije u urbanim sredinama, zbog rušenja starih građevina nastat će velika količina otpadne opeke. Prema nepotpunim statističkim podacima [23], drobljena opeka i zidani blokovi čine 30 %~50 % od ukupnog građevinskog otpada i otpada nakon rušenja, što upućuje na brzi trend porasta korištenja opeka u Kini, naročito zbog dostupnosti otpadne opeke.

Do sada je nekoliko studija objavljeno o mogućnostima primjene drobljene opeke kao krupnozrnatog agregata u izradi betona. Miličević je temeljito istražio mogućnosti upotrebe betona u kojem se prirodni agregat djelomično zamjenjuje drobljenom opekrom i crijepom [24-26]. Općenito se može zaključiti da mješavina s najvećim postotkom zamjene prirodnog agregata drobljenom opekrom i crijepom ima najbolja fizikalna, mehanička i toplinska svojstva, što pogoduje primjeni takvog betona u predgotovljenim elementima izloženima visokim temperaturama, kako je to i prikazano u studiji koju su Miličević i dr. [25] izradili 2016. godine. Usporedbom eksperimentalnih rezultata gustoće, tlačne i savojne čvrstoće, te modula elastičnosti, utvrđeno je da se pomoću oba modela koja su prikazali Miličević i Kalman Šipoš [26] mogu generalizirati ulazne i izlazne varijable te postići realna predviđanja. Rezultati

ispitivanja koja su proveli Milovanović i dr. upućuju na mogućnost izrade betona s RCA i RBA, te na mogućnost široke primjene recikliranih agregata u građevinskim proizvodima [27]. Razlike između običnog betona i RAC-a u poroznosti, vodoupojnosti i sorpciji smanjuju se s povećanjem čvrstoće betona [28]. Što se tiče rezultata ispitivanja provedenih na očvrslom betonu, dobivene vrijednosti upućuju na realnu mogućnost korištenja miješanog recikliranog agregata, ali na štetu nešto nepovoljnijih mehaničkih karakteristika [29, 30]. Međutim, treba napomenuti da su u ovim ispitivanjima korištena samo dva različita reciklirana agregata kao zamjena za prirodni agregat, te da u istom betonu nisu korištene obje vrste recikliranog agregata.

Prema spoznajama autora, do sada se nisu provodila sustavna istraživanja mehaničkih svojstava RAC-a u kojem se koristi miješani reciklirani agregat, pa se stoga istraživanje provedeno u ovom radu može smatrati inovativnim. Rezultati ostvareni u velikom broju istraživanja pokazuju da su vrste recikliranog agregata, udio zamjene te razlike u starosti zapravo najvažniji faktori za određivanje svojstava RAC-a. Ipak, u ovom su području potrebna detaljnija istraživanja zbog velikih razlika u rezultatima postojećih istraživanja RAC-a s RBA ili RCA, te zato što je do danas objavljen tek mali broj istraživanja o RAC-u s mješovitim recikliranim agregatom. Što se tiče udjela zamjene, u ranijim se istraživanjima kao diferencijal u rasponu istraživanja koristila brojka od 30 % ili više, pa su stoga rezultati bili prilično nepouzdana, tj. za prikladnu primjenu trebaju se osigurati rezultati ispitivanja s točnijim diferencijalom. Što se tiče ostalih aspekata, može se spomenuti da razlike u duljini vremena njege također utječu na razna svojstva, a naročito na čvrstoću RAC-a. S obzirom na tri sljedeća aspekta: vrstu recikliranog krupnozrnatog agregata, udio zamjene i vrijeme njege, u ovom se radu kao reciklirani agregat koristi agregat od recikliranog betona i agregat od reciklirane opeke, a određena količina tih agregata koristi se i za potpunu zamjenu prirodnog agregata s miješanim recikliranim agregatom. Na taj se način mogu analizirati svojstva tih dviju vrsta recikliranih agregata kada se oni koriste zajedno.

2. Materijali i eksperiment

2.1. Materijali

U ovom je istraživanju korišten portlandski cement Hailuo 42.5R gustoće $\rho_c = 3100 \text{ kg/m}^3$. Kao sitnozrnat agregat korišten je prirodni riječni pijesak modula finoće MX 2,75, maksimalne veličine zrna 0,4 mm, te gustoće 2650 kg/m^3 . U izradi betonske mješavine korištena je obična voda iz slavine $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$. Kao krupnozrnat agregat korišten je prirodni agregat (NA), agregat od

recikliranog betona (RCA) i agregat od reciklirane opeke (RBA), s tim da su ova posljednja dva (slika 1.) dobivena od betonskih dijelova i zidova napuštene građevine koja se nalazi u blizini Sveučilišta Hohai u Nanjingu. Elementi s te građevine drobljeni su ali nisu prethodno navlaženi prije miješanja. Rezultati dobiveni ispitivanjem nasumice izbušenih jezgri pokazuju da čvrstoća otpadnog betona iznosi otprilike 38 do 42 MPa, a čvrstoća otpadne opeke iznosi otprilike 12 MPa. Pri odabiru prirodnog agregata, agregata od recikliranog betona i agregata od reciklirane opeke korištena su ista sita kako bi se dobile tri vrste krupnozrnatog agregata kontinuirano iste granulometrije. Tri su uzorka korištena za ispitivanje pojedinačnih svojstava krupnozrnatog agregata (granulometrija, nasipna gustoća, gustoća, vodoupojnost nakon 24 sata te koeficijent otpornosti na drobljenje) prema kineskoj normi JGJ 52 [31]. Prosječni su rezultati prikazani u tablici 1.



Slika 1. Reciklirani agregati: a) RCA; b) RBA

Vrijednosti nasipne gustoće i gustoće recikliranog agregata niže su od vrijednosti prirodnog agregata, a vrijednosti vodoupojnosti i poroznosti više su od vrijednosti zabilježenih za prirodni agregat. Razlog tome je činjenica da se dosta starog cementnog morta zadržalo na površini i više mikropukotina je registrirano unutar recikliranog agregata, što je u skladu s rezultatima ranijih ispitivanja [32]. Osim toga, zbog količine gline, svojstva RBA razlikuju se od svojstava NA više nego što je to slučaj kod RCA.

2.2. Izrada uzoraka

Uzorcima su izrađeni na način koji omogućuje istraživanje utjecaja sljedećih parametara: (1) vrstu krupnozrnatog agregata, tj. RAC s RBA (RACI), RAC s RCA (RACII) i RAC s mješavinom recikliranih agregata od opeke i betona (RACIII); (2) vrijednost udjela zamjene agregata, tj. 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % i 100 %; (3) vrijeme njege, tj. 7, 14, 21 i 28 dana. Navedeni udjeli u betonskim mješavinama projektirani su primjenom metode apsolutnog volumena pri čemu je pretpostavljeno da su svi agregati osušeni na zraku.

Tablica 1. Svojstva raznih krupnozrnatih agregata

Vrsta agregata	Kontinuirana granulometrija [mm]	Nasipna gustoća [kg/m^3]	Gustoća [kg/m^3]	Vodoupojnost [%]	Koeficijent otpornosti na drobljenje [%]
NA	10~30	1450	2800	0,3	1,5
RCA	10~30	1389	2452	3,1	7,0
RBA	10~30	1280	1967	14,6	45,0

Tablica 2. Sastavi betonskih mješavina za izradu uzoraka RAC-a (betona s recikliranim agregatom)

Skupina uzoraka	Udio krupnozrnatog agregata	Voda [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	Pijesak [kg/m ³]	NA [kg/m ³]	RBA [kg/m ³]	RCA [kg/m ³]
RACI-0	RBA(0 %), NA(100 %)	185,00	420,45	574,01	1295,73	0,00	0,00
RACI-20	RBA(20 %), NA(80 %)	185,00	420,45	550,22	1056,63	185,57	0,00
RACI-40	RBA(40 %), NA(60 %)	185,00	420,45	525,64	808,10	378,46	0,00
RACI-60	RBA(60 %), NA(40 %)	185,00	420,45	500,00	549,57	579,11	0,00
RACI-80	RBA(80 %), NA(20 %)	185,00	420,45	473,31	280,43	788,00	0,00
RACI-100	RBA(100 %), NA(0 %)	185,00	420,45	445,50	0,00	1005,64	0,00
RACII-0	RCA(0 %), NA(100 %)	185,00	420,45	574,01	1295,73	0,00	0,00
RACII-20	RCA(20 %), NA(80 %)	185,00	420,45	564,21	1044,87	0,00	228,75
RACII-40	RCA(40 %), NA(60 %)	185,00	420,45	554,26	789,96	0,00	461,19
RACII-60	RCA(60 %), NA(40 %)	185,00	420,45	544,14	530,92	0,00	697,40
RACII-80	RCA(80 %), NA(20 %)	185,00	420,45	533,86	267,63	0,00	937,47
RACII-100	RCA(100 %), NA(0 %)	185,00	420,45	523,41	0,00	0,00	1181,51
RACIII-0	RBA(0 %), RCA(100 %)	185,00	420,45	523,41	0,00	0,00	1181,51
RACIII-20	RBA(20 %), RCA(80 %)	185,00	420,45	508,55	0,00	191,77	956,21
RACIII-40	RBA(40 %), RCA(60 %)	185,00	420,45	493,35	0,00	388,05	725,60
RACIII-60	RBA(60 %), RCA(40 %)	185,00	420,45	477,78	0,00	589,01	489,49
RACIII-80	RBA(80 %), RCA(20 %)	185,00	420,45	461,83	0,00	794,81	247,70
RACIII-100	RBA(100 %), RCA(0 %)	185,00	420,45	445,50	0,00	1005,64	0,00

RAC - beton s recikliranim agregatom, NA - prirodni agregat, RCA - agregat od recikliranog betona, RBA - agregat od reciklirane opeke

U međuvremenu su pripravljena tri identična uzorka za svaku vrstu RAC-a.

Od betonskih mješavina pripravljene su uzorci oblika kocke (150 mm x 150 mm x 150 mm) prema razredu tlačne čvrstoće C40 za obični beton [33], vodocementnog omjera 0,44 te s omjerom sitnozrnatog i krupnozrnatog agregata od 0,307, kao što je to prikazano u tablici 2.

2.3. Priprema i njega uzoraka

Sve betonske mješavine mehanički su se pripremle u 50-litarskoj prisilnoj miješalici sljedećim redoslijedom: najprije se u miješalicu stavljaju odgovarajući udjeli cementa, suhog pijeska i vode kako bi se dobio cementni mort. Miješanje traje 1,5 minute. Nakon toga se dodaje krupnozrnati miješani agregat i sve zajedno se miješa još 2 minute. Odmah nakon toga, mješavina se ugrađuje u kalupe čije unutarnje stranice trebaju biti nauljene. Uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i njegovani prema standardnom postupku.

2.4. Provođenje eksperimenta

U ovom je istraživanju za nanošenje opterećenja korištena hidraulična preša kapaciteta 5000 kN (slika 2.). Eksperiment je proveden u skladu s kineskom normom GB/T 50081 [34]. Opterećenje je nanošeno s diferencijalom od 100 kN brzinom od 3 kN/s sve do sloma uzorka.

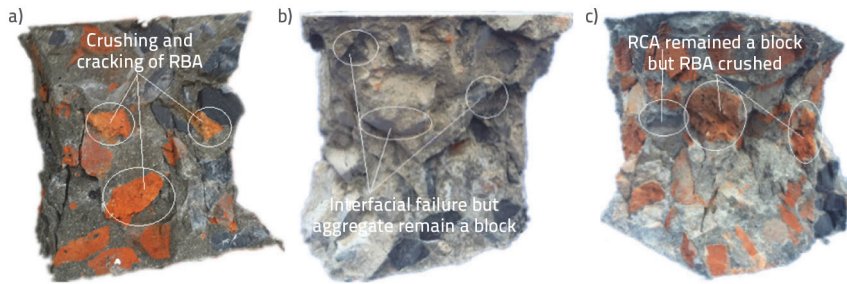


Slika 2. Preša za nanošenje opterećenja

3. Rezultati i rasprava

3.1. Ponašanje pri opterećenju i način popuštanja uzoraka RAC-a

Provedena je usporedba rezultata tlačnog opterećenja do sloma nakon 28 dana za tri RAC-a. Na početku opterećenja,



Slika 3. Oblici sloma: a) RACI; b) RACII; c) RACIII

deformacija je bila gotovo linearna s naprezanjem na površini u elastičnom stanju. Naprezanje je postupno raslo usporedo s nanošenjem opterećenja, što je dovelo do tlačne deformacije u vertikalnom smjeru te do ekspanzijske deformacije u bočnom smjeru. Gornji i donji krajevi uzoraka bili su fiksirani kako bi se postigao obodni efekt. Početne su se pukotine pojavile u vertikalnom smjeru u sredini, odakle su se širile prema oba kraja uzorka zbog bočne deformacije. Prve pukotine pojavile su se na uzorku RACI, a nakon toga i na uzorcima RACII i RACIII. U zoni blizu maksimalnog naprezanja, pukotine su se počele brzo širiti na uzorku RACI, nakon čega je naglo nastupio slom, te je zatim zabilježeno brzo otpuštanje naprezanja. Što se tiče preostalih dviju vrsta RAC-a, u srednjem se dijelu pojavila jedna pukotina ili više gotovo paralelnih uzdužnih pukotina, što je bilo popraćeno sve jačim zvukom pucanja. Pukotine su se postupno širile prema gornjim i donjim krajevima sve dok nisu došle do rubova. S porastom naprezanja, uzorci su ušli u stanje plastičnosti sve do postizanja ili prekoračenja maksimalnog naprezanja; tada su se brzo razvijale pukotine, a linije prolaza opterećenja unutar uzorka i dalje su se smanjivale, te je tako konačno naprezanje dovelo do tlačnog sloma.

Preostali uzorci nakon sloma dobiveni su nakon odstranjivanja ostataka na površini pomoću suhog ručnika. Tipičan oblik sloma za svaku od tri vrste betona RAC, tj. betona s recikliranim agregatom, prikazan je na slici 3. Preostali uzorci nakon sloma poprimili su oblik pješčanog sata, tj. vanjski dio betonskog uzorka se odvojio dok je srednji dio betonskog uzorka ostao nepromijenjen, što je slično ponašanju običnog betona. Vrsta i udio zamjene recikliranog krupnozrnatog agregata ne utječu znatno na oblik sloma uzoraka. Došlo je do prekida spoja između RBA i cementa i to tako da je dio RBA smrvljen u prah dok je

prirodni agregat uglavnom zadržao svoj oblik (slika 3.a). Utvrđeno je da je u RACI čvrstoća cementne matrice veća nego kod RBA. Dakle, do drobljenja je najprije došlo kod RBA gdje su se pod utjecajem tlačnog naprezanja formirale unutarnje šupljine, a neto presjek betonskog uzorka smanjen je zbog koncentracije naprezanja. Osim toga, u uzorku nije došlo do bačvastog loma jer uzorak nije bio upet na bočnim stranama. Te dvije

činjenice dovele su do konačnog tlačnog sloma RACI. Čvrstoća morta između agregata i cementa bila je niska, što je dovelo do sloma na kontaktu između agregata i cementne matrice, dok su uzorci RCA ili NA još uvijek zadržali oblik kocke iako je u nekim slučajevima dolazilo do loma (slika 3.b). Pukotine su se širile pod utjecajem tlačnog naprezanja, a najprije je popustila veza između agregata i cementne matrice, nakon čega je došlo do drobljenja agregata zbog male razlike u čvrstoći između krupnozrnatog agregata i cementne matrice. Površina uzorka RACIII ima obje karakteristike, što znači da je uočeno istovremeno tlačno popuštanje RBA i odvajanje između morta i RA (slika 3.c).

3.2. Tlačna čvrstoća betona s recikliranim agregatom (RAC)

3.2.1. Utjecaj starosti betona

Tlačne čvrstoće (f_{cu}) kocaka RACI, RACII i RACIII nakon 7, 14, 21 i 28 dana prikazane su u tablici 3. Vrijednost f_{cu} betona RAC postupno je rasla usporedo sa starenjem za svaku vrijednost udio zamjene agregata i za svaku skupinu RAC, što je slično kao i kod običnog betona.

U skupinama RACI i RACII, vrijednost f_{cu} viša je od 40 MPa nakon 28 dana kada je udio zamjene agregata ispod 20 %, što znači da se beton tih skupina RAC može zbog svoje čvrstoće koristiti kao i običan beton. Nakon 28 dana njege, kod svih je uzoraka RAC uočen pad tlačne čvrstoće za 23.48 % i 14.72 % za RACI tj. RACII. Kod uzoraka RACI i RACIII uočen je sličan trend promjene tlačne čvrstoće zbog istih faktora, tj. udjela RBA i vremena njege. Osim toga, svojstva materijala kod RCA i NA sličnija su u usporedbi s RBA, te su stoga razlozi popuštanja uglavnom isti:

Tablica 3. Tlačna čvrstoća betona RAC [MPa]

RAC	RACI				RACII				RACIII			
	Starost	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d	28 d	7 d	14 d	21 d
$rr = 0 \%$	11,42	21,29	33,35	42,12	11,42	21,29	33,35	42,12	11,05	18,94	30,01	40,43
$rr = 20 \%$	10,91	20,02	32,45	41,29	12,09	22,61	36,1	44,77	10,48	17,13	28,46	38,35
$rr = 40 \%$	9,99	19,22	31,04	39,76	10,69	20,38	32,69	38,56	9,78	15,59	27,73	36,22
$rr = 60 \%$	8,06	17,62	29,06	37,21	9,75	18,83	25,22	37,83	7,58	14,23	26,36	34,62
$rr = 80 \%$	7,14	15,33	26,40	35,54	8,89	16,83	22,45	35,92	6,51	13,67	25,10	33,44
$rr = 100 \%$	6,26	12,94	23,40	32,23	11,05	18,94	30,01	40,43	6,26	12,94	23,40	32,23

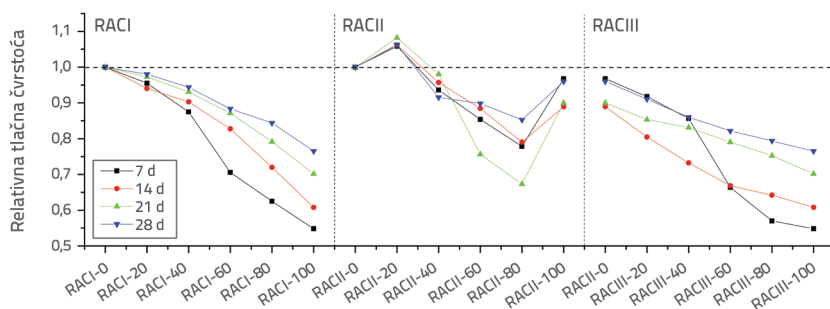
RAC - beton s recikliranim agregatom, rr - udio zamjene agregata, RACI = RAC + RBA, RACII = RAC + RCA, RACIII = RAC + RBA + RCA

- Čvrstoća RBA mnogo je niža nego kod NA, pa stoga RBA prvi popušta
- Veza između RBA i cementnog morta je slaba, jer površina opeke ima slabu sposobnost adsorpcije cementne paste pa se tako smanjuje obradivost svježeg betona, što se jasno može uočiti i u postupku miješanja
- Osim toga, slabo vezani ostaci morta na površini opeke dovode do koncentracije naprezanja tijekom nanošenja tlačnog naprezanja, što ubrzava popuštanje RAC-a
- Do sloma također dolazi zbog odvajanja agregata i cementnog morta uslijed slabe veze između površine starog morta povezanog s RBA-om i novog morta, što dovodi do posmičnog sloma u toj zoni.

U usporedbi s RACI-0, vrijednost f_{cu} nakon 7 dana smanjuje se kod RACI-20, RACI-40, RACI-60, RACI-80 i RACI-100 za, redom, 4,47 %, 12,52 %, 29,42 %, 37,48 % i 45,18 %, što potvrđuje da u ranoj starosti RAC-a s RBA dolazi do očitog pada tlačne čvrstoće. Kako RBA ima sličnu tlačnu čvrstoću kao i cementna pasta u ranoj starosti jer se može smatrati nekom vrstom lakog agregata, njegovu ranu čvrstoću zapravo određuje cementna pasta. Stoga se može reći da je primjena RAC-a s RBA limitirana u ranoj starosti te da bi se trebale usvojiti određene radnje praćenja i održavanja u slučaju korištenja te vrste RAC-a. Osim toga, tlačna čvrstoća skupine RACI i RACIII brzo raste u kasnijoj starosti i to zbog izrazite poroznosti i vodopojnosti RBA, čija apsorbirana voda se otpušta tijekom hidratacije cementa, pa stoga RAC zadržava određenu internu temperaturu, što pomaže pri njezi i dovodi do povećanja čvrstoće. U slučaju RACII, do koncentracije naprezanja ne dolazi u samom agregatu i to zbog izrazite čvrstoće RCA. Glavni razlog zbog kojeg dolazi do pada čvrstoće u skupini RACII se nalazi i u činjenici da stari cementni mort povezan s agregatom RCA ima nisku čvrstoću te slabu vezu između nove cementne paste i agregata; isto tako, unutarnje pukotine u betonu RAC nakon tlačnog naprezanja lakše se mogu širiti zbog tog jednoosnog naprezanja, što dovodi do smanjenja čvrstoće.

3.2.2. Utjecaj udjela zamjene agregata (rr)

Relativna tlačna čvrstoća može se definirati kao odnos tlačne čvrstoće RAC-a i običnog betona bez RA, kao što se to vidi na slici 4.



Slika 4. Relativna tlačna čvrstoća RAC-a

Na slici 4. možemo vidjeti da se vrijednost f_{cu} uzoraka RACI i RACIII najprije postupno smanjuje te se nakon toga naglo povećava zbog utjecaja RBA. Vrijednost f_{cu} smanjuje se samo u rasponu od 1,97 % do 23,48 % u usporedbi s običnim betonom za RACI kada se udio zamjene agregata povećava od 20 % do 80 %. Isto tako, f_{cu} se smanjuje u rasponu od 4,01 % do 23,48 % za beton RACIII. To smanjenje tlačne čvrstoće RAC-a moglo bi se npr. objasniti povećanjem poroznosti betona i slabom vezom između agregata i matrice. Međutim, ako je udio RBA manji od 40 %, tada utjecaj na tlačnu čvrstoću nije značajan. Značajan se pad može uočiti kada udio zamjene (rr) poraste na više od 60 % i to zbog niske čvrstoće RBA koji u tom slučaju postaje dominantan krupnozrnat agregat. U usporedbi s običnim betonom, vrijednost f_{cu} betona RACII-20, RACII-40, RACII-60, RACII-80 i RACII-100 smanjuje se nakon 28 dana za -6,29 %, 8,45 %, 10,19 %, 14,72 % and 4,01 %. Uzorak RACII-20 ima najvišu vrijednost f_{cu} koja je čak i veća od odgovarajuće vrijednosti običnog betona. Taj rezultat za nizak udio RCA u skladu je s rezultatima prethodnih istraživanja [8, 35]. Tako dobro ponašanje može se objasniti kako slijedi:

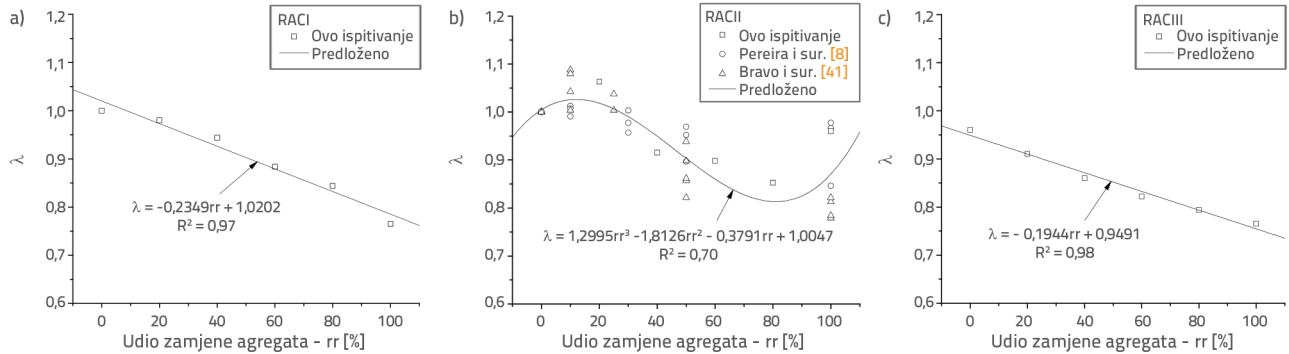
- veći sadržaj nehidratiziranog cementa u mješavini [36] što dovodi do dodatne hidrauličnosti [37]
- kontaktnoj prijelaznoj zoni između RCA i cementne paste pogodovalo je lokalno smanjenje poroznosti RCA, s vodocementnim faktorom koji omogućuje učinkovitije punjenje produktima hidratacije [38]
- utjecaj punila povezan s manjom veličinom RCA u odnosu na NA [39], ali samo za manji udio zamjene (oko 20 %).

Kombinacija te četiri pojave može prevagnuti nad posljedicama niže čvrstoće RCA, te se tako mogu potvrditi dobiveni rezultati. Pri većem udjelu zamjene, utjecaj slabijih mehaničkih karakteristika RCA veći je od kombiniranog djelovanja spomenutih pojava. Međutim, vrijednost f_{cu} uzorka RACII-100 (40,43 MPa) viša je od odgovarajuće vrijednosti RAC kada je rr veći od 40 %. Za uzorak RACII-80 zabilježena je najniža vrijednost f_{cu} . Ova se pojava također može uočiti u radovima koje su objavili Pereira i dr. [8] te Sun [11] koji navode da veza između agregata i cementnog morta nema velik utjecaj zato što se koristi samo jedna vrsta krupnozrnatog agregata, a koncentracija naprezanja nije očita. Stoga je vrijednost f_{cu} kod nekoliko vrsta agregata viša od odgovarajuće vrijednosti za RAC.

3.2.3. Odnos između tlačne čvrstoće i udjela zamjene

Poznato je da postoji bliska povezanost između tlačne čvrstoće betona i vodocementnog faktora. Povezanost između ta dva parametra može se prikladno iskazati Bolomeyevom jednadžbom:

$$f_{cu} = A \times f_{ce} \times (c/w - B) \quad (1)$$



Slika 5. Predloženi odnos između relativne tlačne čvrstoće i udjela zamjene agregata (rr): a) RACI; b) RACII; c) RACIII

gdje je f_{ce} tlačna čvrstoća cementa. A i B su empirijske konstante koje iznose 0,46 i 0,07 za cement 42.5R prema JGJ 55 [33], ili 0,448 i 0,094 prema Zhangu [40]. U ovom su istraživanju za A i B usvojene vrijednosti 0,45 i 0,0704 prema rezultatima ispitivanja za običan beton.

Zbog nesigurnosti karakteristika RAC-a, znanstveni krugovi još nisu definirali jednoznačno mišljenje o odnosu između tlačne čvrstoće i udjela zamjene, pa se zbog toga tradicionalne jednadžbe još uvijek analiziraju. Uzimajući u obzir te načelne pretpostavke, izrađen je empirijski izraz (2) kako bi se odredila tlačna čvrstoća uzorka oblika kocke (f_{cu}) u funkciji vodocementnog omjera i vrijednosti rr , s obzirom na činjenicu da ti faktori posredno definiraju višu ili nižu tlačnu čvrstoću. Koeficijent λ smatra se utjecajnim faktorom za rr kroz predloženi model nelinearne regresije, a smatra se valjanim za betonske mješavine koje se analiziraju u ovom radu.

$$f_{cu} = 0,45 \times f_{ce} \times (c/w - 0.0704) \times \lambda \quad (2)$$

Ti su parametri određeni na temelju odgovarajućih rezultata. Koeficijent λ za RACI nakon 28 dana predložen je u izrazu (3), a odgovara vrijednosti $R^2 = 0,97$. Navode se određeni eksperimentalni rezultati [8, 41] s istom varijacijom (povećanje varijacije tlačne čvrstoće s zamjenom agregata od 10 % do 30 % ili 100 %) kako bi se poboljšala pouzdanost predloženog izraza, pa je tako koeficijent λ za RACII nakon 28 dana predložen u izrazu (4), a odgovara vrijednosti od $R^2 = 0,70$. Koeficijent λ za RACIII nakon 28 dana predložen je u izrazu (5), a odgovara vrijednosti

od $R^2 = 0,98$. Grafički prikaz predloženog izraza, povezan s rezultatima ispitivanja ovog istraživanja, iskazan je na slici 5.

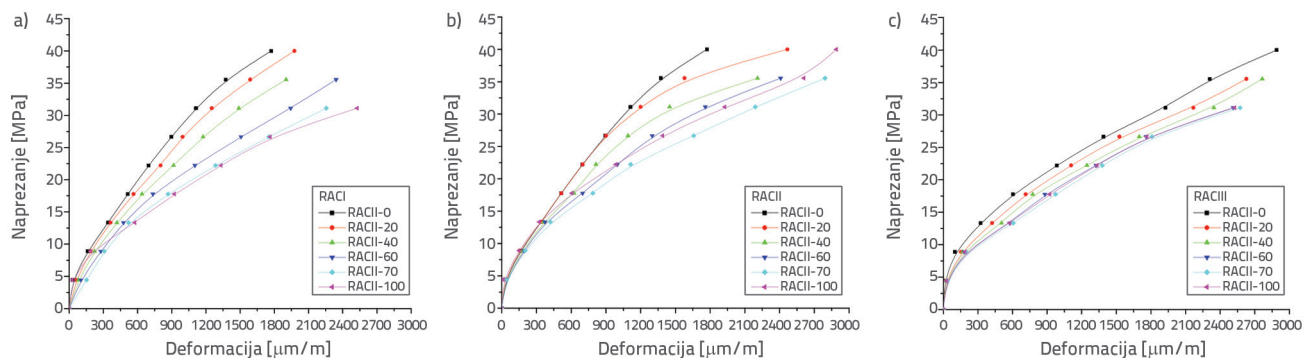
$$\lambda = -0,2349 \times rr + 1,0202 \quad (3)$$

$$\lambda = 1,2995 \times rr^2 - 1,8126 \times rr^2 + 0,3791 \times rr + 1,0047 \quad (4)$$

$$\lambda = -0,1944 \times rr + 0,9491 \quad (5)$$

3.3. Krivulje napreznja - deformacije

Krivulje napreznja – deformacija nakon 28 dana njege prikazane su na slici 6. za tri vrste betona RAC. Potrebno je napomenuti da se podaci za RACIII bitno razlikuju od onih iz prethodnih istraživanja u kojima se uglavnom ispitivao RAC sa samo jednom vrstom RA. Prikazan je samo uzlazni dio jer se ova krivulja koristi za analizu maksimalne deformacije i modula elastičnosti. Na slici 6. može se vidjeti da vrijednosti rr recikliranog agregata bitno utječu na krivulje RAC. Ipak, oblik krivulje napreznja – deformacije za sve je betone RAC sličan obliku takvih krivulja za običan beton, pa se iz toga može zaključiti da, u načelu, u okviru postupka projektiranja konstrukcija ne bi trebalo biti prepreka glede primjene teorije elastičnosti za te tri vrste RAC-a. Smatra se da su betoni RAC u elastičnom stanju s linearnim krivuljama, nakon čega prelaze u elastoplastično stanje s blažim nagibom krivulja. Vrijedi spomenuti da je beton RAC podložan većim deformacijama od običnog betona pri istoj jačini napreznja, a ta se pojava dodatno naglašava s vrijednostima udjela recikliranog

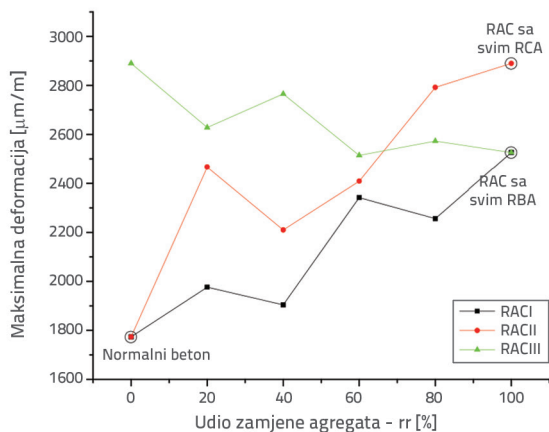


Slika 6. Krivulje "napreznja – deformacija" za betone RAC

zamjene agregata zbog nižeg modula elastičnosti recikliranog agregata. Osim toga, prisutnost morta na površini recikliranog agregata, što taj agregat čini osjetljivijim od prirodnog agregata, omogućuje povećanje deformacija u uzlaznom dijelu krivulje.

3.4. Maksimalna deformacija

Kao što možemo uočiti na slici 7., deformacija koja odgovara maksimalnom naprezanju smatra se maksimalnom deformacijom RAC-a. Kod običnog betona, najniža maksimalna deformacija iznosi samo 1773 $\mu\text{m/m}$, što je blizu općenito prihvaćenoj vrijednosti od 2000 $\mu\text{m/m}$ [42]. Vrijednost maksimalne deformacije RAC-a koji sadrži samo RCA za otprilike 60 % je viša od odgovarajuće vrijednosti običnog betona. Osnovni razlog povećanja maksimalne deformacije RAC-a leži u smanjenom modulu elastičnosti RAC-a, što dovodi do porasta deformacije. Osim toga, stara cementna matrica koji prijanja na površinu agregata zapravo povećava udio gela, što također postupno dovodi do porasta maksimalne deformacije. Na krivuljama za RACI i RACII možemo vidjeti da – kada se kao reciklirani agregat koristi isključivo RBA ili RCA – tada se maksimalna deformacija povećava usporedno s vrijednošću udjela zamjene agregata (rr). Međutim, RCA više potiče porast maksimalne deformacije nego RBA, što potvrđuju slijedeće dvije činjenice: maksimalna deformacija RACIII smanjuje se s povećanjem udjela RBA i smanjenjem udjela RCA, a RACII-100 ima višu maksimalnu deformaciju od RACI-100.



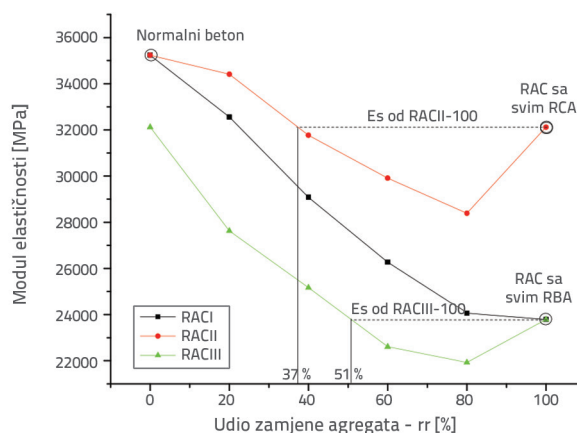
Slika 7. Maksimalna deformacija betona RAC

3.5. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti betona odraz je linearno elastičnog odnosa naprezanja – deformacije, što je vrlo značajno kako u statičkoj tako i u dinamičkoj analizi armiranobetonskih konstrukcija. Kako krivulja naprezanja – deformacije za beton sadrži stanja linearne i nelinearne deformacije, diljem svijeta se predlažu razne definicije modula elastičnosti. U ovom je istraživanju modul elastičnosti (E) RAC-a određen prema krivuljama naprezanja – deformacije:

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - 0.005 \%) \quad (6)$$

gdje je σ_2 naprezanje koje iznosi 40 % od maksimalnog opterećenja, σ_1 je naprezanje koje odgovara deformaciji od 0.005 %, a ε_2 je deformacija pri razini naprezanja od σ_2 . Odnos između modula elastičnosti RAC-a i postotka zamjene recikliranog betonskog agregata rr prikazan je na slici 8. Vrijednost E za RACI postupno se smanjuje s rr , a vrijednost E za RACII i RACIII u početku se smanjuje a zatim povećava. Vrijednost E za RACI-100 za 32,49 % je niža u odnosu na običan beton, dok je vrijednost E za RACII-80 niža za 19,45 %. RACIII ima najnižu vrijednost E u usporedbi s ostalim analiziranim betonima, a ta se vrijednost u usporedbi s običnim betonom smanjuje s 13,98 % na 31,72 % s porastom rr od 20 % do 80 %. Općenito uzevši, modul elastičnosti je usko povezan s parametrima betona kao što su rr recikliranog agregata u mješavinama, tlačna čvrstoća i modul elastičnosti agregata. U ovom kontekstu, nepovoljna svojstva recikliranog agregata, kao što su pojava pukotina i veća poroznost starog morta koji prijanja na površinu agregata, a koji obično ima niži modul elastičnosti, dovode do smanjenja modula elastičnosti betona s recikliranim agregatom (RAC).



Slika 8. Modul elastičnosti betona RAC

Na slici 8. vidimo da se vrijednost modula elastičnosti svih uzoraka RAC-a smanjuje s porastom udjela recikliranog agregata. Međutim, vidljiv je nagli porast E kada je rr između 80 % i 100 % u mješavinama RACII i RACIII. U uzorku RACII-100 vrijednost E je samo za 8,85 % niža od odgovarajuće vrijednosti za običan beton, a čak je i veća za RACII kod kojeg je rr veći od 37 %. Vrijednost E je kod RACIII-100 za 25,93 % niža u usporedbi s RACIII-0 (tj. 37,77 % niža u odnosu na običan beton) ali je veća od RACIII kada je rr veći od 51 %. Iako nema očitog obrata u krivulji za RACI, vrijednost E za RACI-100 bliska je vrijednosti za RACI-80, a krivulja pokazuje određeni trend rasta. To znači da vrijednost E za RAC u kojem se za potpunu zamjenu prirodnog agregata koristi samo jedna vrsta recikliranog agregata može biti viša nego kod RAC-a kod kojeg se koristi mješoviti reciklirani agregat. Kako su kod jedne vrste recikliranog agregata modul elastičnosti i poroznost relativno ujednačeni, tlačna čvrstoća je ravnomjerno raspoređena, a koncentracija naprezanja nije očita.

3.6. Odnos između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće

Do sada su predloženi brojni izrazi u svrhu opisivanja odnosa između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće (obje vrijednosti u MPa) običnog betona i to prema raznim normama, kao što je prikazano u izrazima (7) do (11). Ovdje treba napomenuti da je u izrazima (8) do (11) prihvaćen faktor 0,76 za konverziju tlačne čvrstoće s valjka na kocku (prema Guo i Shi [43]).

$$\text{GB/T 50010 [42]: } E_c = 10^5 / (2,2 + 34,7 / f_{cu}) \quad (7)$$

$$\text{ACI 318-02 [44]: } E_c = 4127 \times f_{cu}^{0.5} \quad (8)$$

$$\text{CEB-FIP [45]: } E_c = 2.15 \times 10^4 \times (0,8 + 0,1 \times f_{cu})^{1/3} \quad (9)$$

$$\text{CSA A23.3-04 [46]: } E_c = 3951 \times f_{cu}^{0.5} \quad (10)$$

$$\text{EN 1992-1-1 [47]: } E_c = 20498 \times (f_{cu} / 10)^{0.3} \quad (11)$$

Predloženi su i neki drugi izrazi kako bi se opisao odnos između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće (obje vrijednosti u MPa) za beton s recikliranim agregatom od otpadnog betona. Neki od tih izraza prikazani su u izrazima (12) do (19). Osim toga, u izrazu (14) prihvaćen je faktor 0,76 za konverziju tlačne čvrstoće s valjka na kocku (prema Guo i Shi [43]).

$$\text{Xiao i dr. [48]: } E_c = 10^5 / (2,8 + 40,1 / f_{cu}) \quad (12)$$

$$\text{Dhir i dr. [49]: } E_c = 370 \times f_{cu} + 13100 \quad (13)$$

$$\text{Dillmann [50]: } E_c = 634,43 \times f_{cu} + 3057,6 \quad (14)$$

$$\text{Mellmann [51]: } E_c = 378 \times f_{cu} + 8242 \quad (15)$$

$$\text{Corindalesi [52]: } E_c = 18800 \times ((0,83 \times f_{cu}) / 10)^{1/3} \quad (16)$$

$$\text{Miličević i dr. [53]: } E_c = 4735,7 \times f_{cu}^{0.4255} \quad (17a)$$

$$E_c = 4735,7 \times f_{cu}^{0.4255} \times (\rho / 2092)^{1.237} \quad (17b)$$

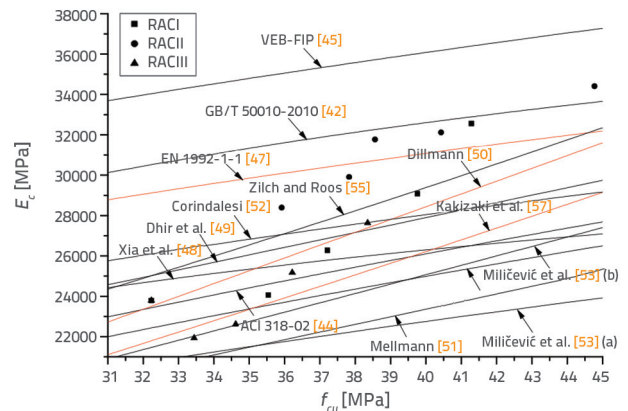
$$\text{Kakizaki i dr. [54]: } E_c = 1,9 \times 10^5 \times (\rho / 2300)^{1.5} \times (f_{cu} / 2000)^{1/2} \quad (18)$$

$$\text{Zilch i Roos [55]: } E_c = 9100 \times (f_{cu} + 8)^{1/3} \times (\rho / 2400)^2 \quad (19)$$

$$f_{cu} = 0,069 \times \rho - 116,1 \quad (20)$$

U izrazima (17b), (18) i (19), gustoća mase RAC-a može se izračunati pomoću izraza (20) [48]. Na slici 9. prikazani su izrazi (7) do (19) za odnos modula elastičnosti i tlačne čvrstoće RAC-a. Može se uočiti iznimno velika raznolikost rezultata. Razlog za takav raskorak vrlo je jednostavan: spomenute norme i autori predlažu svoje izraze samo da bi tako potvrdili svoje eksperimentalne rezultate. Iako su neki od objavljenih rezultata

dobiveni na malom broju ispitanih uzoraka ili ograničenim vrstama RA, sljedeći istraživači su potvrdili praktičnu uporabivost tih izraza pomoću rezultata dobivenih tijekom istraživanja betona s recikliranim agregatom.



Slika 9. Razni izrazi predloženi za modul elastičnosti običnog betona i betona s recikliranim agregatom

U tablici 4. prikazani su rezultati ispitivanja za standardizirani modul elastičnosti RAC-a ((E / E_c)) nakon njege od 28 dana. Može se uočiti da se u normama GB/T 50010 i CEB-FIP precjenjuje elastični modul u odnosu na eksperimentalne rezultate, dok se u CSA A23.3-04 modul elastičnosti podcjenjuje, a u normama ACI 318-02 i EN 1992-1-1 obično se definiraju vrijednosti koje su bliže eksperimentalnim rezultatima, kao što se može vidjeti u tablici 4. U izrazima koje predlažu istraživači, grubo se procjenjuje modul elastičnosti blizak rezultatima, a modul elastičnosti se podcjenjuje u izrazima (15) i (17a). Analizom tih izraza, može se utvrditi da izraz (14) ima najbolju konzistenciju za RAC I, dok izraz (11) ima najbolju konzistenciju za RAC II, a izraz (8) ima najbolju konzistenciju za RAC III.

Alternativna regresijska analiza za RAC I provedena je u ovom istraživanju na temelju rezultata ispitivanja i izraza (15). Primijenjena je sljedeća regresijska analiza:

$$E_c = a \times f_{cu} + b \quad (21)$$

gdje su a i b regresijski koeficijenti koji se trebaju odrediti. Kako bi se omogućila šira primjena ovog izraza, kao referenca se koriste eksperimentalni rezultati prikazani u Yu [56] i Zhang i Zong [57] za RAC s RBA kao zamjenskim agregatom (vidi sliku 10.a). Primjenom korelacijskog koeficijenta $R^2 = 0,89$ dobiveni su sljedeći regresijski koeficijenti: $a = 608,13$ i $b = 4744,8$. Dakle, predlaže se modificirani odnos za procjenu odnosa između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće RAC-a s RBA (slika 10.a):

$$E_c = 608,13 \times f_{cu} + 4744,8 \quad (22)$$

Isto tako je provedena i alternativna regresijska analiza za RAC II na bazi rezultata ispitivanja i izraza (11). Primijenjen je sljedeći regresijski izraz:

Tablica 4. Standardizirani modul elastičnosti RAC-a (E / E_c) prema raznim normama i autorima

RACs	f_{cu} [MPa]	E [MPa]	GB/T 50010	ACI 318-02	CEB-FIP	CSA A23.3-04	EN 1992-1-1	Xiao	Dhir i dr.	Dillmann	Mellmann	Corinaldesi	Miličević i dr. (a)	Miličević i dr. (b)	Kakizaki i dr.	Zilch i Roos
RACI-20	41,29	32560	0,99	1,23	0,92	1,28	1,04	1,23	1,15	1,11	1,37	1,15	1,41	1,27	1,21	1,08
RACI-40	39,76	29080	0,89	1,12	0,85	1,17	0,94	1,11	1,05	1,03	1,25	1,04	1,28	1,17	1,12	0,99
RACI-60	37,21	26270	0,82	1,04	0,81	1,09	0,86	1,02	0,98	0,99	1,18	0,96	1,19	1,11	1,07	0,95
RACI-80	35,54	24060	0,76	0,98	0,77	1,02	0,80	0,95	0,92	0,94	1,11	0,89	1,11	1,05	1,02	0,90
RACI-100	32,23	23790	0,78	1,02	0,83	1,06	0,82	0,96	0,95	1,01	1,16	0,91	1,15	1,11	1,09	0,95
RACII-20	44,77	34410	1,02	1,25	0,91	1,30	1,07	1,27	1,16	1,09	1,37	1,18	1,44	1,26	1,19	1,07
RACII-40	38,56	31770	0,98	1,24	0,95	1,29	1,03	1,22	1,16	1,15	1,39	1,15	1,42	1,30	1,25	1,11
RACII-60	37,83	29910	0,93	1,18	0,91	1,23	0,98	1,15	1,10	1,11	1,33	1,09	1,35	1,24	1,20	1,06
RACII-80	35,92	28390	0,90	1,15	0,90	1,20	0,94	1,11	1,08	1,10	1,30	1,05	1,31	1,23	1,19	1,05
RACII-100	40,43	32120	0,98	1,22	0,93	1,28	1,03	1,22	1,14	1,12	1,37	1,14	1,41	1,27	1,21	1,08
RACIII-20	38,35	27630	0,86	1,08	0,83	1,13	0,90	1,06	1,01	1,01	1,22	1,00	1,24	1,14	1,09	0,97
RACIII-40	36,22	25170	0,79	1,01	0,79	1,06	0,83	0,98	0,95	0,97	1,15	0,93	1,15	1,08	1,05	0,92
RACIII-60	34,62	22610	0,72	0,93	0,74	0,97	0,76	0,89	0,87	0,90	1,06	0,85	1,06	1,00	0,98	0,86
RACIII-80	33,44	21930	0,71	0,92	0,74	0,96	0,74	0,88	0,86	0,90	1,05	0,83	1,04	1,00	0,98	0,85
RACIII-100	32,23	23790	0,78	1,02	0,83	1,06	0,82	0,96	0,95	1,01	1,16	0,91	1,15	1,11	1,09	0,95

$$E_c = c \times (f_{cu} / 10)^{0.3} \tag{23}$$

gdje je c regresijski koeficijent koji se treba odrediti. Kako bi se postigla šira primjena izraza, kao referenca se koriste eksperimentalni rezultati za RAC s RCA prikazani u radovima Gupta i dr. [58], Casuccio i dr. [59], Kang i dr. [60], Corinaldesi [53], Du i dr. [61] i Etxeberria i dr. [17] (slika 10.b). Primjenom korelacijskog koeficijenta $R^2 = 0.86$, dobiven je regresijski koeficijent $c = 20647$. Dakle, predlaže se modificirani odnos za procjenu odnosa između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće RAC-a s RCA (slika 10.b):

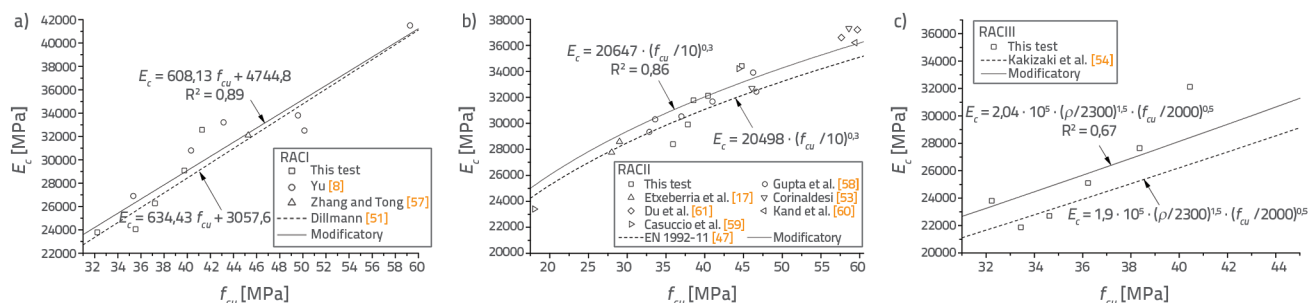
$$E_c = 20647 \times (f_{cu} / 10)^{0.3} \tag{24}$$

Provedena je alternativna regresijska analiza za RACIII na bazi (18) i u tu je svrhu korišten sljedeći regresijski izraz:

$$E_c = d \times (\rho / 2300)^{1.5} \times (f_{cu} / 2000)^{1/2} \tag{25}$$

gdje c predstavlja regresijske koeficijente koji se trebaju odrediti. Do sada nisu provedena sustavna ispitivanja kako bi se istražio modul elastičnosti RAC-a s miješanim recikliranim agregatom. Stoga se predlaže modificirani odnos kako bi se ocijenio odnos između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće RAC-a s miješanim agregatom od reciklirane opeke i recikliranog betona i to isključivo na bazi rezultata ovog ispitivanja, kako je to prikazano na slici 10.c. Uz korelacijski koeficijent $R^2 = 0.67$, regresijski koeficijenti iznose $d = 2,04 \times 10^5$. Potrebna su međutim dodatna istraživanja kako bi se povećala točnost izraza (26):

$$E_c = 2.04 \times 10^5 \times (\rho / 2300)^{1.5} \times (f_{cu} / 2000)^{1/2} \tag{26}$$



Slika 10. Modificirani izrazi modula elastičnosti betona RAC

4. Zaključak

U radu se eksperimentalnim putem sustavno analiziraju mehanička svojstva betona s recikliranim agregatom, pri čemu se kao agregat koristi reciklirani beton (RCA), reciklirana opeka (RBA), te naročito njihova mješavina. U nastavku se daju značajni zaključci:

- Postupci nanošenja tlačnog opterećenja do sloma betona s recikliranim agregatom slični su kao i kod običnog betona. Reciklirani agregat od opeke prvi se drobi što dovodi to krug tlačnog popuštanja uzorka RACI. Kod uzorka RACII popušta veza između agregata i cementa, dok se u slučaju RACIII bilježe oba gore navedena oblika popuštanja.
- Tlačna čvrstoća RAC-a povećava se s vremenom njege, a u slučaju skupina RACI i RACIII ta se čvrstoća naglo povećava u većoj starosti. Tlačna čvrstoća kod RACI i RACIII najprije se smanjuje postupno a zatim naglo kod RBA. Međutim, uočene su i naglašenije razlike u tlačnoj čvrstoći kod RACII, pri zamjeni 20 % ili 100 % agregata.
- Analiziran je odnos između tlačne čvrstoće i udjela zamjene agregata kod RAC-a; za tri vrste RAC-a predložene su tri izraza na bazi Bolomeyevog izraza.

- Krivulje naprezanja – deformacije kod RAC-a i kod običnog betona uglavnom su jednake u prvom segmentu. Udio RCA više utječe na maksimalnu deformaciju od udjela RBA, a modul elastičnosti se kod RACI postupno smanjuje usporedo s udjelom zamjene. Međutim, udio zamjene od 80 % najniža je točka u modulu elastičnosti kod RACII i RACIII, gdje se bilježi smanjenje od 19,45 % tj. 37,77 % u odnosu na obični beton.
- Analiziran je odnos između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće RAC-a. U ovom je radu prikazana usporedba raznih izraza za određivanje modula elastičnosti, a prezentirani su i odgovarajući rezultati ispitivanja; nakon toga su definirana tri najpovoljnija izraza za tri vrste RAC-a. Na kraju su na bazi eksperimentalnih rezultata provedene potrebne izmjene, naročito za RAC s miješanim recikliranim agregatom, što je u ovom području inovativan pristup.

Zahvala

Za ovaj rad dobivena je potpora Kineske zaklade za prirodne znanosti (potpora br. 51208175) i Fonda za fundamentalna istraživanja u centralnim sveučilištima (potpora br. 2015B17514; 2016B20514).

LITERATURA

- [1] Xiao, J.Z.: Recycled concrete, Beijing, 2008.
- [2] Koenders, E.A.B., Pepe, M., Martinelli, E.: Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates, *Cement and Concrete Research*, 56 (2014) 2, pp. 203-212.
- [3] Yang, Y.S., Wang, J.: Basic mechanical properties of fiber recycled concrete, *Journal of Liaoning Technical University*, 32 (2013) 12, pp. 1669-1672.
- [4] Bairagi, N.K., Ravande, K., Pareek, V.K.: Behavior of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates, *Resource Conservation and Recycling*, 9 (1993) 1-2, pp. 109-126.
- [5] Olorunsogo, F.T.: Early age properties of recycled aggregate concrete, *Proceeding of the international seminar on exploiting waste in concrete*, University of Dundee, Scotland, pp. 163-170, 1999.
- [6] Wesche, K., Schulz, K.: Beton aus aufbereitetem altbeton-technologie und eigenschaften, *Betontechnische Berichte*, 32 (1984), pp. 2-3.
- [7] Ridzuan, A.R.M., Diah, A.B.M., Hamir, R., Kamarulzaman, K.B.: The influence of recycled aggregate on the early compressive strength and drying shrinkage of concrete, *Proceedings of the international conference on structural engineering, Mechanics and Computation*, Cape Town, South Africa, 2-4 April, pp. 1415-1422, 2001.
- [8] Pereira, P., Evangelista, L., Brito, J.D.: The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 28 (2012) 1, pp. 722-729.
- [9] Xiao, J.Z., Li, J.B., Sun, Z.P.: Study on compressive strength of recycled aggregate concrete, *Journal of Tongji University*, 32 (2004) 12, pp. 1558-1561.
- [10] Chang, Y.Z.: Numerical simulation and equivalent compressive strength reduction coefficient study of recycled concrete, 2011, Department of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture Technology, Xi'an, China.
- [11] Sun, X.X., Zhao, J.K., Liang, J.G.: Experimental study of compressive strength of recycled concrete, *Low Temperature Architecture Technology*, 11 (2011), pp. 4-7.
- [12] Xiao, J.Z.: Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading, *Journal of Tongji University*, 35 (2007) 11, pp. 1445-1449.
- [13] Hu, Q., Song, C., Zou, C.Y.: Experimental research on the mechanical properties of recycled concrete, *Journal of Harbin Institute of Technology*, 41(4), pp. 33-36, 2009.
- [14] Zhou, J.H., He, H.J., Meng, X.H., Yang, Y.Z.: Basic Mechanical Properties of Recycled Concrete Experimental Study, *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 26 (2010) 3, pp. 464-468.
- [15] Kou, S.C., Poon, C.S., Dixon, C.: Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007) 9, pp. 709-717.
- [16] Qasrawi, H., Marie, I.: Towards better understanding of concrete containing recycled concrete aggregate, *Advances in Materials Science and Engineering*, 43 (2013), pp. 10413-10420.
- [17] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marlacute, A., Barra, M.: Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007) 5, pp. 735-742.
- [18] Evangelista, L., Brito, J.D.: Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 32 (2010) 1, pp. 9-14.
- [19] Chen, Z.P., Xu, J.J., Zheng, H.H., Su, Y.S., Xue, J.Y., Li, J.T.: Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relation of recycled concrete, *Journal of Building Materials*, 16 (2013) 1, pp. 1270-1274.
- [20] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C.: Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1, pp. 31-36.

- [21] Du, T.: The complete stress-strain curve of recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading, *Journal of Wuhan University of Technology*, 25 (2010) 5, pp. 862-865.
- [22] BS 8500-2.: Concrete—complementary British Standard to BS EN 206-1—Specification for constituent materials and concrete, Milton Keynes: Brltky Standards Institutions, 2006.
- [23] Zhang, M.X., Zhang, X.L., Wang, W.Q., Wu, G.Q., Xue, Q.F.: Development and application of construction waste brick, *Brick & Tile World*, 8 (2006), pp. 19-21.
- [24] Milicevic, I., Štirmer, N., Bjegović, D.: Optimization of concrete mixtures made with crushed clay bricks and roof tiles, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015) 3, pp. 109-120.
- [25] Miličević, I., Štirmer, N., Banjad Pečur, I.: Residual mechanical properties of concrete made with crushed clay bricks and roof tiles aggregate after exposure to high temperatures, *Materials*, 9 (2016) 4, pp. 295.
- [26] Miličević, I., Kalman Šipoš, T.: Prediction of properties of recycled aggregate concrete, *Građevinar*, 69 (2017) 5, pp. 347-357, <https://doi.org/10.14256/JCE.1867.2016>.
- [27] Milovanović, B., Pecur, I.B., Štirmer, N.: Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015) 11, pp. 575-584.
- [28] Padmini, A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M.S.: Relative moisture movement through recycled aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, 54 (2002) 5, pp. 377-384.
- [29] Guerra-Romero, M.I., Rodríguez-Robles, D., García-González, J., Juan-Valdés, A., Pozo, M.D.: Effect of mixed recycled aggregates on mechanical properties of recycled concrete, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015) 5, pp. 247-256.
- [30] Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herrero, C., Pérez-Ordóñez, J.L.: Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 37 (2012) 3, pp. 171-176.
- [31] JGJ 52-2006.: Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete, Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [32] Laserna, S., Montero, J.: Influence of natural aggregates typology on recycled concrete strength properties, *Construction and Building Materials*, 115 (2016), pp. 78-86.
- [33] JGJ 55-2011.: Specification for mix proportion design of ordinary concrete, Beijing: China Building Industry Press, 2011.
- [34] GB/T 50081-2002.: Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete, Beijing: China Building Industry Press, 2002.
- [35] Evangelista, L., Brito, J.D.: Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007) 5, pp.397-401.
- [36] Katz, A.: Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003) 5, pp. 703-711.
- [37] Braga, M., Brito, J.D., Veiga, R.: Reduction of the cement content in mortars with fine concrete aggregates, *Materials and structures*, 47 (2014) 1-2, pp. 171-182.
- [38] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L.: Effect of microstructure of ITZ term on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 6, pp. 461-468.
- [39] Braga, M., Brito, J.D., Veig, R.: Incorporation of fine concrete aggregates in mortars, *Construction and building materials*, 36 (2012) 6, pp. 960-968.
- [40] Zhang, Q.X.: Study on regression coefficients a and b value in bowromi formula, *Concrete*, 1 (2001), pp. 21-24.
- [41] Bravo, M., Brito, J.D., Pontes, J., Evangelista, L.: Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *Journal of Cleaner Production*, 99 (2015), pp. 59-74.
- [42] GB/T 50010-2010.: Code for Concrete Design of Structure, Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [43] Guo, Z.H., Shi, X.D.: Theory and analysis of reinforced concrete, Tsinghua Press, Beijing, 2003.
- [44] ACI Committee 318, ACI 318-02.: Building Code Requirements for Structural Concrete, Farmington Hills (MI, USA): American Concrete Institute, 2002.
- [45] CEB-FIP: Mode Code for Concrete Structures Design, France, 1990.
- [46] CSA A23.3-04: Design of concrete structures, Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association, 2010.
- [47] EN1992-1-1: 2004.: Design of Concrete Structure. Part1-1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [48] Xiao, J.Z., Li, J.B., Zhang, C.: On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview, *Materials and Structures*, 39 (2006) 6, pp. 655-664.
- [49] Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., Leelawat, T.: Suitability of recycled aggregate for use in BS 5328 designated mixes, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 134 (1999) 3, pp. 257-274.
- [50] Dillmann, R.: Concrete with recycled concrete aggregate, Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, Proceedings of the International Symposium Held at Department of Trade And Industry Conference Centre, University of Dundee, Scotland, 11-12 November, pp. 239-253, 1998.
- [51] Mellmann, G.: Processed concrete rubble for the reuse as aggregate, Proceeding of the International Seminar on Exploiting Waste in Concrete, University of Dundee, Scotland, 7 September, pp. 171-178, 1999.
- [52] Corinaldesi, V.: Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 9, pp. 1616-1620.
- [53] Miličević, I., Štirmer, N., Bjegović, D.: Relation between the compressive strength and modulus of elasticity of concrete with crushed brick and roof-tile aggregates, *Structural concrete*, 18 (2017) 25, pp. 366-375.
- [54] Kakizaki, M., Harada, M., Soshiroda, T., Kubota, S., Ikeda, T., Kasai, Y.: Strength and elastic modulus of recycled aggregate concrete, Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Tokyo, Japan, 7-11 November, pp. 565-574, 1988.
- [55] Zilch, K., Roos, F.: An equation to estimate the modulus of elasticity of concrete with recycled aggregates, *Civil Engineers*, 76 (2001) 4, pp. 187-191.
- [56] Yu, Q.: Study on the preparation methods and the performance of recycled brick aggregate concrete, 2013, Department of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, China.
- [57] Zhang, SP., Zong, L.: Properties of concrete made with recycled coarse aggregate from waste brick, *Environmental progress and sustainable energy*, 33 (2013) 4, pp.1283-1289.
- [58] Gupta, P., Khaudhair, Z., Ahuja, A.: A new method for proportioning recycled concrete, *Structural concrete*, 17 (2015), 4 pp. 677-687.
- [59] Casuccio, M., Torrijos, M.C., Giaccio, G., Zerbino, R.: Failure mechanism of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 7, pp. 1500-1506.
- [60] Kang, H.K., Kim, W., Kwak, Y.K., Hong, S.G.: Flexural testing of reinforced concrete beams with recycled concrete aggregates, *ACI Structural Journal*, 111 (2014) 3, pp. 607-616.
- [61] Du, T., Zhou, Y.F., Xiang, W.P., Lin, H.L., Zhou, Z.Q.: Experimental research on the basic behaviors of recycled high performance concrete, *Journal of Wuhan University of Technology*, 28 (2006) 8, pp. 34-38.