

## Скупљање бетона на бази рециклираног агрегата

НИКОЛА Д. ТОШИЋ, Универзитет у Београду,

Грађевински факултет, Београд

ИВАН С. ИГЊАТОВИЋ, Универзитет у Београду,

Грађевински факултет, Београд

ДРАГИЦА Љ. ЈЕВТИЋ, Универзитет у Београду,

Грађевински факултет, Београд

ЈЕЛЕНА С. ДРАГАШ, Универзитет у Београду,

Грађевински факултет, Београд

Прегледни рад

UDC: 628.477.6.043:691.32 ; 666.972.12

*Примена рециклираног агрегата у армирано-бетонским конструкцијама је нужна ако се жели постићи одржива градња и смањење негативних утицаја експлоатације природних ресурса на животну околину. У овом раду су представљена значајна истраживања феномена скупљања бетона на бази рециклираног агрегата. Истраживања у овој области су и даље релативно малобројна. У овом раду је извршено њихово груписање, презентација, као и анализа резултата. Показано је да су скупљања бетона на бази рециклираног агрегата по правилу већа од упоредних бетона на бази природног агрегата и да расту са процентом замене природног агрегата рециклираним. Анализиран је и утицај водоцементног фактора на скупљање.*

**Кључне речи:** агрегат од рециклираног бетона, бетон на бази рециклираног агрегата, скупљање

### 1. УВОД

#### 1.1 Основни појмови о бетону на бази рециклираног агрегата

Последњих година је у свету приметан пораст свести о проблемима везаним за животни циклус бетонских конструкција. Један од главних проблема је често краћи животни век бетонских конструкција од пројектованог, услед функционалне застарелости и дејства различитих детериорационих процеса. По истеку животног века долази до рушења конструкција. Проблем који тако настаје је одлагање грађевинског отпада након рушења. Депоније грађевинског отпада су све веће, а проблем представља и формирање тзв. дивљих депонија. Све ово је навело бројне државе у свету да се окрену рециклирању грађевинског, углавном бетонског, отпада као извору производње агрегата за различите примене. Добијени агрегат од рециклираног бетона може представљати економски

исплативу алтернативу природном речном и дробљеном агрегату услед смањења трошкова транспорта, као и елиминисања потребе за плаћањем такси за одлагање отпада на депоније.

У Србији су истраживања примене агрегата добијеног рециклирањем бетона за производњу конструкцијских бетона актуелна већ неколико година и обављају се на Грађевинском факултету Универзитета у Београду и Техничком факултету Универзитета у Новом Саду [1, 2].

У овом раду су анализирана светска достигнућа у истраживању скупљања бетона на бази рециклираног агрегата као својство које може битно да утиче на могућност примене оваквих бетона у елементима армирано-бетонских конструкција.

#### 1.2 Специфичности бетона на бази рециклираног агрегата

Све специфичности бетона на бази рециклираног агрегата потичу од компоненте по којој се он разликује од бетона на бази природног агрегата – агрегата од рециклираног бетона. Дефинишућа карактеристика агрегата од рециклираног бетона је присуство заосталог цементног малтера (residual mortar) који остаје везан за зрна агрегата и чини до 50% запремине рециклираног агрегата [3]. Ус-

Адреса аутора: Никола Тошић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Београд, Булевар краља Александра 73

Рад примљен: 05.07.2013.

Рад прихваћен: 17.07.2013.

лед присуства заосталог цементног малтера рециклирани агрегат у односу на природни показује веће упијање воде, мању запреминску масу, већу дробљивост, мању чврстоћу, већу порозност. Оваква својства агрегата за узврат утичу на својства бетона на бази рециклираног агрегата. Последично, RAC (Recycled Aggregate Concrete) поседују мање чврстоће при притиску и затезању, мањи модул еластичности, веће деформације скупљања и течења и нешто другачије особине везане за трајност.

Услед знатно већег упијања воде рециклираног агрегата (3-10% [4]) као и знатно различитог временског развоја упијања у односу на природни агрегат потребно је кориговати и процедуре справљања RAC бетона.

RAC бетони се обично пројектују према истом водоцементном фактору са упоредним NAC (Natural Aggregate Concrete) бетоном. Ако се повећано упијање рециклираног агрегата не би узело у обзир значајан део воде у мешавини би био утрошен на упијање агрегата што смањује количину воде доступне за процес хидратације. Решење је увођење ефективног водоцементног фактора (effective water to cement ratio) који представља однос слободна вода-цемент, а затим додавање одређене количине воде одређене из вредности упијања агрегата. Тада се мешавине RAC и NAC пројектују тако да се водоцементни фактор NAC бетона изједначи са ефективним водоцементним фактором RAC.

Аргумент неких истраживача [5] је да због заосталог цементног малтера укупна количина цементног малтера на крају справљања RAC бетона бива већа него у NAC бетонима. Предложени су и одређени модификовани поступци справљања бетона: нпр. одређивањем еквивалентне запремине малтера (EMV – енгл. equivalent mortar volume) одн. справљањем RAC тако да укупна количина цементног малтера буде идентична количини цементног малтера у NAC [5]. Постоје и друге предложене модификације поступака справљања RAC бетона [6] попут поступка “мешања у два корака” (енгл. two-stage mixing approach) у коме се укупна количина воде раздваја на два дела и меша прво са агрегатом па тек онда са цементом.

## 2. ФИЗИЧКО ПОРЕКЛО СКУПЉАЊА БЕТОНА

### 2.1 Компоненте скупљања бетона

Под скупљањем бетона подразумевају се временске деформације у виду смањивања димензија неоптерећених бетонских елемената у току времена, у свим правцима [7]. Укупна деформација скупљања састоји се од:

- Скупљања услед контракције продуката хидратације (хидратационо скупљање или аутогено скупљање, енгл. autogenous shrinkage)
- Скупљање услед испаравања воде током периода везивања цемента (пластично скупљање)
- Скупљање након завршетка процеса везивања цемента (хидраулично скупљање) или скупљање услед сушења (енгл. drying shrinkage)

Пластично скупљање је највеће у поређењу са друга два, али правилном негом бетона може да се надокнади вода која из њега испарава, те се на тај начин могу елиминисати његови штетни ефекти. Мерена скупљања очврслог бетона дакле представљају збирне ефекте хидратационог и хидрауличног скупљања [7].

### 2.2 Хидратационо (аутогено) скупљање

Хидратација цемента се наставља дуго времена након почетка везивања, услед чега и долази до даљег раста механичких карактеристика бетона током времена. Међутим тај део хидратације троши веома мали део почетне количине воде. Ово је главни разлог велике порозности обичних бетона.

Упркос овом вишку воде, наставак хидратације, од почетка очвршћавања, доводи до сушења унутар материјала (названог самоисушивањем, да би се разликовало од “сушења” под којим се подразумева губитак воде према спољашњости). Разлог овој појави је чињеница да је смањење запремине услед губитка воде веће од повећања запремине настанком чврсте матрице. Запреминска једначина показује дисбаланс од око 10%. Смањење запремине течне фазе у порам доводи до деформације минералне матрице. Затезање у течној фази доводи до скупљања матрице. Ефекат капиларног затезања у минералној матрици очито преовлађује у односу на друга механичка дејства и управо је оно узрок појаве хидратационог скупљања [8]. Хидратационо скупљање је углавном мање од 0.1% за бетоне са водоцементним фактором већим од 0.45, али расте брзо ако водоцементни фактор падне испод 0.4 и може достићи и 0.3%. Ово је последица величине пора јер је затезање у течној фази обрнуто пропорционално величини пора.

Закон промене хидратационог скупљања кроз време је у директној вези са кинематиком хидратације цемента, која утиче и на развој механичких карактеристика попут чврстоће. Параметри који делују на ову кинематику су исти они који делују и на развој чврстоћа: врста и финоћа цемента пре свега, након тога водоцементни фактор. Временска крива развоја хидратационог скупљања је афина са кривом која описује развој чврстоће: вр-

ло брз прираст у првим данима, достижући 60 - 90% коначне вредности након 28 дана. Крајња величина хидратационог скупљања остаје умерене величине, али кад се сабере са осталим скупљањима може бити незанемарљива.

Хидратационо скупљање је у суштини унутрашњи феномен, који се скоро увек може сматрати унормним у запремини елемента, макар у зони која одговара једном бетонирању. То значи да у префабрикованом елементу или елементу који је бетониран само у једној фази и чије деформације нису спречене ослонцима и оплатом, хидратационо скупљање не изазива никакве утицаје. С друге стране, када је скупљање спречено или макар само отежано, од почетка очвршћавања, обично чини незанемарљиву компонентну у раном настанку прслина. Треба нагласити да у условима потпуне спречености развоја деформација увек долази до лома узорка чак и у одсуству сушења и раста температуре. Упркос релаксацији напона, напони услед хидратационог скупљања могу брзо достићи вредности веће од чврстоће бетона при затезању.

### 2.3 Хидраулично скупљање (скупљање услед сушења)

Процес сушења почиње тек након уклањања оплате (осим на страни са које се врши бетонирање, која управо због тога захтева посебну негу). Могу наступити два облика формирања прслина. Први облик настаје током првих сати и одговара домену течне фазе који је и даље непрекинут, а манифестује се плитким и неправилним прслинама, близу површине бетона. Други облик настаје услед дуготрајног сушења; тај процес је изузетно спор, око 10 година за цилиндар пречника 16 cm или за плочу дебљине 12 cm, а дужина процеса расте са квадратом дебљине. За дебљине веће од 50 cm трајање сушења се мери вековима. Прслине настају нешто касније, правилније су и условљене су геометријом елемента и граничним условима. За разлику од самоисушивања, кинематика хидрауличног скупљања не одржава у потпуности микромеханизам који га узрокује у материјалу (фазна промена течности у гас праћена капиларним затезањем). Степен сушења у елементу варира по дебљини између максималне вредности на површини и минималне у средини. Измерено скупљање је у вези са средњом вредношћу овог степена сушења. Треба имати у виду да вредности дилатација укључују и површинске прслине (које не постоје увек у конструктивним елементима, услед спољашњих дејстава нпр.).

Тако измерено хидраулично скупљање има вредности 0.2-0.6‰ и зависи од мноштва параметара. Њихов редослед по значају је следећи [8]:

- дебљина елемента,
- порозност или слободна вода у бетону, односно количина воде која преостаје након хидратације цемента,
- запремина цементне пасте  $w+c$ ,
- финоћа млива везива (најситније честице везива, цемент или неки пуниоц финијег млива).

## 3. ПРЕГЛЕД ИСТРАЖИВАЊА СКУПЉАЊА БЕТОНА НА БАЗИ РЕЦИКЛИРАНОГ АГРЕГАТА

### 3.1 Дефинисање базе података

За потребе овог рада формирана је база података која укључује све доступне радове, у електронском или писаном облику, који се баве скупљањем RAC бетона. У базу су уврштени радови објављени у научним часописима, радови објављени на научним конференцијама, као и тезе одн. завршни радови, у периоду од 1998 до 2013. године. Од електронских база претраживани су сервиси ISI Web of Science и SciVerse SCOPUS.

За потребе овог рада извршена је претрага радова по кључним речима: recycled aggregate concrete, shrinkage, creep, time-dependant properties, long-term properties. Тако је дефинисана база од свега 6 радова (3 рада објављена у научним часописима, 2 рада презентована на научним скуповима и једна докторска дисертација) чији ће резултати бити анализирани.

Резултати свих анализираних радова су систематизовани у базу података у коју су укључене вредности процента замене крупног агрегата рециклираним, водоцементни фактори мешавина, чврстоће при притиску, температуре и релативне влажности као и вредности дилатација скупљања у одређеним временима.

### 3.2 Преглед резултата истраживања

У раду [9] је испитиван утицај замене 30% крупног агрегата рециклираним. Поред контролне мешавине NAC справљене су две мешавине RAC, једна са максималном величином зрна  $D_{max}=12$  mm, а друга са  $D_{max}=22$  mm. Бетони су пројектовани према истом водоцементном фактору који је износио 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 и 0.60.

Скупљање је мерено на призматичним узорцима димензија 100x100x500 mm који су након једног дана неговања у води остављени да стоје на температури од  $20\pm 2^\circ\text{C}$  при релативној влажности од  $50\pm 2\%$ . Скупљање је мерено током 180 дана.

Након 180 дана дилатације скупљања су у случају NAC износиле од 0.44 до 0.64‰ (за  $w/c$  од 0.4 до 0.6), а у случају RAC-1 ( $D_{max}=12$  mm) од 0.54 до 0.73‰ и у случају RAC-2 ( $D_{max}=22$  mm) од 0.58 до

0.68%. Приметне су повећане дилатације скупљања у случају RAC, али и њихов сличан развој у току времена као у случају NAC.

Рад [10] је значајан са више аспеката. Бави се искључиво питањем скупљања RAC са заменом крупног агрегата рециклираним (у количинама 0, 15, 30, 60 и 100%). Све мешавине су справљене са константним водоцементним фактором од 0.52.

Оно што је јако значајно у овом раду је раздвајање скупљања на хидратациону и хидрауличну компоненту.

Табела 1. Дилатације услед хидратационог скупљања, [10]

Крупни рец. агр. (%)	$\epsilon_{sh,a}$ 28 дана (‰)	$\epsilon_{sh,a}$ 90 дана (‰)	$\epsilon_{sh,a}$ 180 дана (‰)	$\epsilon_{sh,a}$ 270 дана (‰)
0	-0.019	-0.022	-0.021	-0.016
15	-0.012	-0.008	-0.005	-0.002
30	-0.0017	-0.004	-0.006	-0.003
60	-0.0283	0.031	0.0879	0.056
100	-0.01	0.0138	0.028	0.04

Узорци за мерење скупљања су били цилиндри димензија  $\varnothing 150 \times 450$  мм. Након вађења из калуца узорци су 28 дана неговани на температури  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и релативној влажности  $90 \pm 5\%$ . Након тог периода су остављани на температури од  $20^\circ\text{C}$  и релативној влажности 50% током 270 дана. Да би се остварило мерење хидратационог скупљања, након периода неге од 28 дана неки узорци су премазивани слојем парафина дебљине 3 мм и умотавани у три слоја алуминијумске фолије. Тиме је спречена размена воде са спољашњом средом. У табелама 1 и 2 приказане су дилатације услед хидратационог и хидрауличног скупљања узорака [10].

Приметно је да дилатације скупљања расту са процентом замене крупног агрегата рециклираним, како за хидратациону тако и за хидрауличну компоненту. Ова разлика је израженија у случају хидратационог скупљања.

Табела 2. Дилатације услед хидрауличног скупљања, [10]

Крупни рец. агр. (%)	$\epsilon_{sh,d}$ 28 дана (‰)	$\epsilon_{sh,d}$ 90 дана (‰)	$\epsilon_{sh,d}$ 180 дана (‰)	$\epsilon_{sh,d}$ 270 дана (‰)
0	0.225	0.374	0.45	0.445
15	0.249	0.376	0.432	0.443
30	0.232	0.352	0.431	0.425
60	0.251	0.41	0.434	0.481
100	0.24	0.403	0.482	0.488

У раду [11] је испитиван утицај примене крупног рециклираног агрегата на својства RAC бетона. Рециклирани агрегат је добијен из једног

комерцијалног рециклажног постројења. Процент замене крупног агрегата је износио 0, 20, 50 и 100%.

Справљене су две серије узорака, серија I са водоцементним фактором 0.45 и 400 kg цемента. Такође је вршено додавање летећег пепела као пуниоца у количини од 35% масе цемента. Друга серија (II) је справљена са водоцементним фактором 0.55 и 410  $\text{kg/m}^3$  цемента, а летећи пепео је додаван у количини од 25% масе цемента.

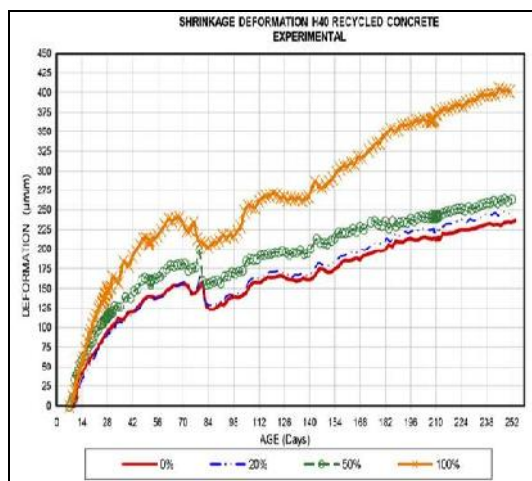
Развој скупљања је праћен на призматичним узорцима димензија  $70 \times 70 \times 280$  mm. Након вађења из калуца узорци су чувани на температури од  $55^\circ\text{C}$  при релативној влажности од 95%, током 112 дана.

Дилатације скупљања се крећу у границама 0.30 до 0.55‰. Присуство рециклираног агрегата повећава скупљање бетона јер повећава укупну количину цементног малтера, док присуство летећег пепела смањује скупљање јер замена дела цемента летећим пеплом доводи до смањења укупне количине цементног малтера у бетону.

Рад [12] је међу првима који се искључиво бави реолошким својствима RAC. У испитивањима је примењиван само крупни рециклирани агрегат и то у процентима замене 0, 20, 50 и 100. Значајно је да је у испитивању одређен садржај заосталог цементног малтера у рециклираном агрегату, поступком наизменичног загревања и хлађења. Пронађено је да фракција 4/8 mm садржи 31.5% заосталог цементног малтера, а фракција 8/20 mm 18%. Све мешавине су справљене са водоцементним фактором 0.5, а коришћен је и суперпластификатор.

За испитивање скупљања су коришћени цилиндрични узорци димензија  $\varnothing 150 \times 300$  мм. Након вађења из калуца узорци су 7 дана неговани на температури од  $20^\circ\text{C}$  при релативној влажности од 95%. Осмог дана су пренети на температуру од  $23^\circ\text{C}$  при релативној влажности од 65%. Дилатације скупљања су мерене до старости од 252 дана. Крећу се у границама од 0.2 до 0.4‰ и показују тенденцију раста са порастом количине рециклираног агрегата (пораст од 100% за проценат замене 100%), слика 1.

Истраживање у [13] се састојало од следећег: прво су справљене 3 бетонске мешавине, а као агрегат је коришћен кварцит – речни агрегат, дробљени гранит и дробљени базалт. Од тих мешавина су бетонирани лабораторијски узорци (чврстоће при притиску од око 38 МПа за кварцит, 44 МПа за гранит и 85 МПа за базалт). Узорци су затим дробљени и од њих је произведен рециклирани агрегат.



Слика 1 – Развој дилатација скупљања у [12]

Након тога је справљено нових 9 мешавина, по 3 од сваке врсте агрегата (кварцит (Q), гранит (G), базалт (B)) и по 3 процента замене: 0%, 100% крупног (нпр. QRN) и 100% крупног и ситног агрегата (нпр. BRR). У мешавинама са базалтом је коришћен суперпластификатор и силикатна прашина у количини од 10% масе цемента.

Реолошка својства су испитивана на призмама димензија 100x100x500 mm. Након уклањања из калуца узорци су чувани на температури од  $18\pm 2^\circ\text{C}$  при релативној влажности од 70%.

Резултати приказани у табели 3 показују повећање дилатација скупљања при употреби рециклираног агрегата, нарочито у случају замене и крупног и ситног агрегата рециклираним.

Табела 3. Карактеристике мешавина и скупљања у [13]

Мешавина	Крупни рец. агр. (%)	Ситни рец. агр. (%)	$f_{cm28}$ МПа	$\epsilon_{sh, 365}$ дана (%)
QNN	0	0	42.61	0.48
QRN	100	0	45.19	0.5
QRR	100	100	41.61	0.55
NN	0	0	53.64	0.29
GRN	100	0	54.4	0.33
GRR	100	100	53.36	0.41
BNN	0	0	103.2	0.29
BRN	100	0	107.7	0.33
BRR	100	100	101.1	0.41

У својој докторској дисертацији [14] ауторка је развила поступак „мешања у два корака“ (two-stage mixing approach, TSMA) и упоређивала карактеристике RAC бетона справљених на тај начин са RAC справљеним на „конвенционалан“ начин (normal mixing approach, NMA). Вршена је замена крупне фракције рециклираним агрегатом у износивама од 0, 20 и 100%. Водоцементни фактор је био константан и износио је 0.45.

Табела 4. Дилатације скупљања у [14]

Крупни рец. агр. (%)	$\epsilon_{sh, 28}$ дана (‰)	$\epsilon_{sh, 56}$ дана (‰)	$\epsilon_{sh, 90}$ дана (‰)	$\epsilon_{sh, 112}$ дана (‰)	$\epsilon_{sh, 180}$ дана (‰)
TSMA0	0.19	0.62	0.78	0.95	1.21
TSMA20	0.15	0.75	0.8	0.95	1.23
TSMA100	0.22	0.7	0.91	1.03	1.31
NMA0	0.21	0.64	0.83	0.95	1.24
NMA20	0.14	0.62	0.83	0.95	1.22
NMA100	0.14	0.62	0.89	1	1.29

Скупљање је мерено током 200 дана, али нажалост није пружена никаква информација о начину неге, димензијама узорака, нивоу оптерећења при испитивању течења и сл.

У резултатима (табела 4) је видљив пораст деформација пропорционално проценту замене крупног агрегата рециклираним, али и мањи ниво деформација свих мешавина справљених TSMA поступком у односу на конвенционални начин справљања мешавина.

#### 4. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

##### 4.1 Упоредна анализа RAC и NAC бетона

Услед различитих начина неге, водоцементних фактора, чврстоће и др. резултати истраживања се не могу поредити у апсолутним вредностима, али је могуће из базе података формирати односе дилатација скупљања RAC и упоредног NAC бетона, а затим те односе груписати по временима мерења дилатација (28, 56, 90, 112 и 180 дана) и по процентима замене крупног агрегата (15, 20, 30, 50, 60 и 100%).

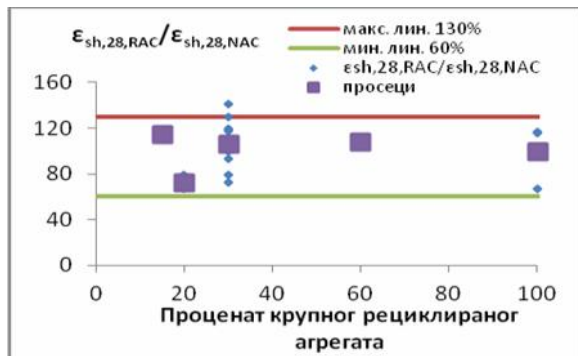
##### 4.2 Однос скупљања RAC и NAC бетона у различитим временима

За свако време мерења скупљања су одређене „граничне области“ одн. односи скупљања RAC/NAC у оквиру којих се налази 95% свих података за одређено време мерења скупљања. У оквиру једног времена мерења одређене су средње вредности за сваки проценат замене крупног агрегата.

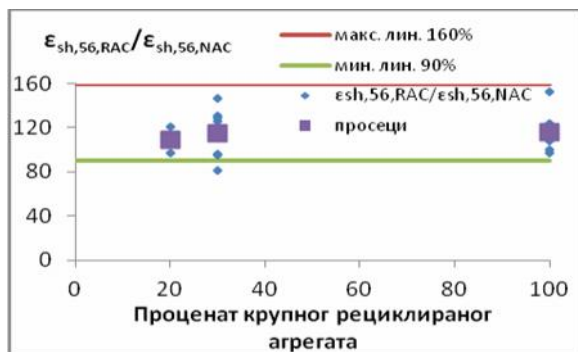
На слици 2 су односи скупљања после 28 дана који се крећу између 0.6 и 1.3, али је видљиво и да се средње вредности по процентима замене крећу између 1.0 и 1.2 осим за проценат замене 20% за који средња вредност односа износи 0.7.

Слика 3 приказује однос скупљања RAC/NAC после 56 дана. Ови односи леже у границама 0.9-1.6 док средње вредности по процентима замене леже у доста уској граници 1.0-1.1.

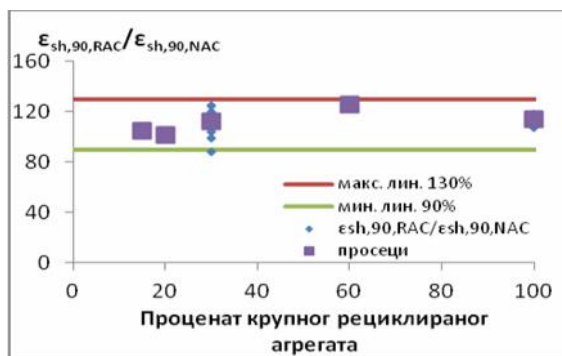
Слика 4 приказује однос скупљања RAC/NAC после 90 дана. Односи леже у границама 0.9-1.3, а средње вредности по процентима замене заузимају практично идентичну област.



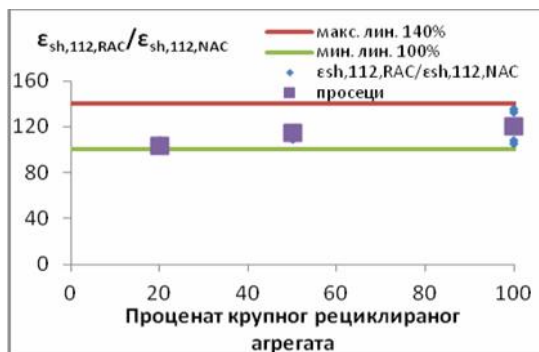
Слика 2 – Однос скупљања RAC/NAC после 28 дана



Слика 3 – Однос скупљања RAC/NAC после 56 дана



Слика 4 – Однос скупљања RAC/NAC после 90 дана

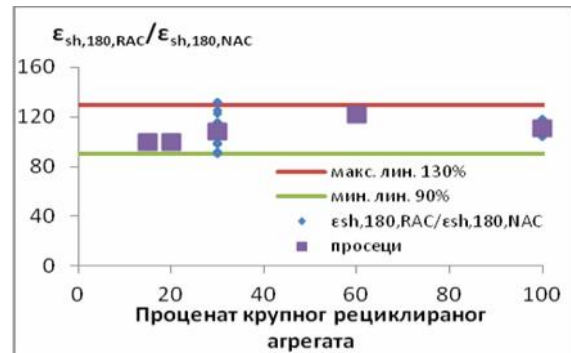


Слика 5 – Однос скупљања RAC/NAC после 112 дана

На слици 5 је однос скупљања RAC/NAC после 112 дана. Односи леже у границама 1.0-1.4, а

средње вредности по процентима замене у нешто ужој области 1.0-1.2.

На слици 6 су приказани односи скупљања RAC/NAC након 180 дана. Односи леже у границама 0.9-1.3, а средње вредности по процентима замене заузимају практично идентичну област.

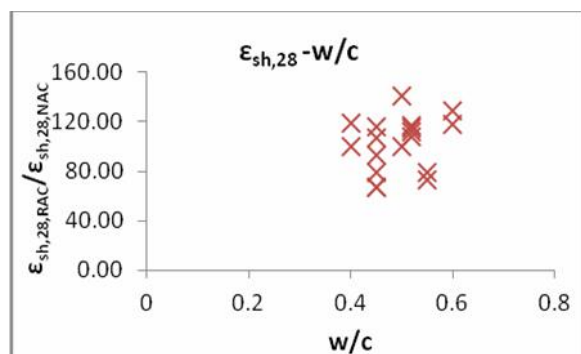


Слика 6 – Однос скупљања RAC/NAC после 180 дана

Из претходно изложеног се може закључити да коначна дилатација скупљања RAC неће прелазити 150% дилатације скупљања NAC без обзира на проценат замене крупног агрегата рециклираним.

#### 4.3 Утицај водоцементног фактора на однос скупљања RAC/NAC

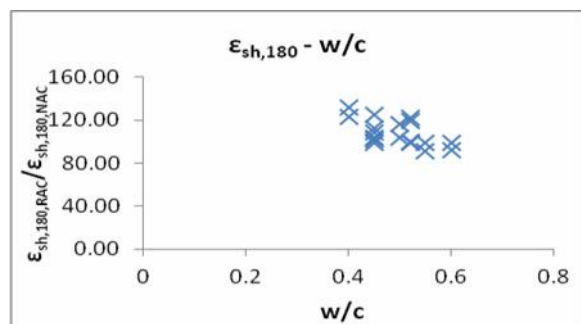
На сликама 7 и 8 је приказана зависност односа скупљања RAC/NAC у односу на водоцементни фактор (за времена од 28 и 180 дана) за све проценте замен. Са слике 7 је јасно да између водоцементног фактора и односа скупљања после 28 дана не постоји практично никаква корелација те да, независно од водоцементног фактора, однос скупљања RAC/NAC може узети различите вредности.



Слика 7 – Однос скупљања RAC/NAC после 28 дана у односу на водоцементни фактор

Након 180 дана (слика 8) постоји блага негативна корелација одн. вишим водоцементним факторима одговара нижи однос скупљања RAC/NAC. При довољно високим водоцементним факторима RAC ће имати мање скупљање од NAC.

Један од разлога томе може лежати у чињеници да наведени водоцементни фактори нису ефективни. У случају RAC део слободне воде ће бити утрошен на засићење агрегата тако да директно поређење у том случају није најтачније. Разлика је израженија при већим старостима када хидраулично скупљање постане јасно доминантно у односу на хидратационо.



Слика 8 – Однос скупљања RAC/NAC после 180 дана у односу на водоцементни фактор

## 5. ЗАКЉУЧАК

Скупљање бетона је сложен процес који зависи од многих параметара. С обзиром на феноменологију процеса нема сумње да одређени параметри још израженије утичу на скупљање RAC бетона. Резултати истраживања који су тренутно доступни су и даље сувише малобројни за извођење тачних законитости. Оно што се са сигурношћу може рећи је да због присуства заосталог цементног малтера рециклирани агрегат има веће упијање воде, мањи модул еластичности и последично показује веће скупљање од NAC.

Глобални закључак би био да у случају два бетона, једног RAC и једног NAC справљених са истим ефективним водоцементним фактором, укупна количина воде ће бити већа у случају RAC, а самим тим ће и деформације скупљања RAC бити веће. На основу претходних разматрања може се закључити и следеће:

- Скупљање RAC расте са повећањем количине крупног рециклираног агрегата, до 30% за проценат замене 100%.
- Ако је проценат замене крупног агрегата рециклираним мањи од 30% деформације скупљања су незнатно веће него код NAC.
- На основу постојећих испитивања се не може закључити како водоцементни фактор утиче на скупљање RAC бетона.
- Сви закључци су изведени посматрањем RAC бетона на нивоу материјала. У реалним армирано-бетонским елементима ефекти особина RAC бетона нису тако лако предвидљиви.

Чињеница да RAC бетони имају веће скупљање, а мањи модул еластичности од NAC бетона значи да ће услед мање крутости елементата од RAC бетона, утицаји које скупљање у њима изазива бити и мањи од оних у елементима од NAC бетона. Из тог разлога је неопходно испитивати и конструкције.

- Потребна су даља истраживања да би се стекао детаљнији увид у реолошке особине RAC бетона као и конструктивних елемената од тих бетона.

## ЗАХВАЛНОСТ

У раду је приказан део истраживања које је помогло Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру технолошког пројекта TR 36017 под називом: “Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији”.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ignjatović I., Marinković S., Mišković Z., Savić A., Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading, *Materials and Structures*, 46(6), p. 1045-1059, 2013.
- [2] Marinković S., Radonjanin V., Malešev M., Ignjatović I., Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Management*, 30, p. 2255-2264, 2010.
- [3] Sanchez de Juan M., Gutierrez P.A.: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials* 23 , p. 872-877, 2009.
- [4] Hansen T. C. : Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report 1945-1989 of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete), 1992, s. (p) 157
- [5] Fathifazl G. et al.: New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate, *Journal of materials in civil engineering* 21 , p. 601-611, 2009.
- [6] Tam V., Gao X.F., Tam C.M.: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement and Concrete Research* 35 , p. 1195-1203, 2005.
- [7] Muravljov M., *Грађевински материјали*, DIP “Грађевинска knjiga”, 1998, 486 s. (p)
- [8] Acker P., Ulm F.J., Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements,

- Nuclear engineering and design 203 , p. 143-158, 2001.
- [9] Corinaldesi V.: Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates, Construction and Building Materials 24, p. 1616-1620, 2010.
- [10] Gomez-Soberon J.M.: Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate, SP-209: 5th International conference on innovation in design, Cancun, Proceeding, decembar 2002.
- [11] Kou S.C. et al.: Influence of Fly Ash as Cement Replacement on the Properties of Recycled Aggregate Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering 19, p. 709-717, 2007.
- [12] Domingo-Cabo A. et al.: Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials 23, p. 2545-2553, 2009.
- [13] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: Structural recycled aggregate concrete - Instantaneous and long-term properties, FIB Symposium: Concrete Structures for Sustainable Community, Stockholm, Proceeding, jun 2012
- [14] Tam W.Y.V.: Recycled aggregate from concrete waste for higher grades of concrete construction, Doktorska teza, Hong Kong, 2005, s. (p) 698

## SUMMARY

### SHRINKAGE OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

*The application of recycled concrete aggregate in concrete structures is necessary for the achievement of sustainable construction and a reduction in the negative environmental impacts. This paper presents the most significant research into the phenomenon of shrinkage of recycled aggregate concretes. Since the amount of research is still relatively small, this paper presents an attempt to systematize them, present their results and analyze them. It is shown that the shrinkage of recycled aggregate concrete is mostly larger than the shrinkage of the reference natural aggregate concrete and that this difference increases as the percentage of recycled concrete aggregate increases. The effect of the water-to-cement ratio has also been analysed.*

**Key words:** recycled concrete aggregate, recycled aggregate concrete, shrinkage