

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ivan S. Ignjatović

**GRANIČNA NOSIVOST  
ARMIRANOBETONSKIH GREDNIH  
NOSAČA OD BETONA SA  
RECIKLIRANIM AGREGATOM**

doktorska disertacija

Beograd, 2013.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivan S. Ignjatović

**ULTIMATE STRENGTH OF  
REINFORCED RECYCLED CONCRETE  
BEAMS**

doctoral thesis

Beograd, 2013.

Mentor:

Prof. dr Snežana Marinković, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije:

Prof. dr Dejan Bajić, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Prof. dr Dušan Najdanović, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Docent dr Zoran Mišković, dipl.inž.građ.  
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Prof. dr Vlastimir Radonjanin, dipl.inž.građ.  
Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Datum odbrane:

## **ZAHVALNOST**

Osim samostalnog rada autora, na izradi ove doktorske teze uloženi su, na direktan ili indirektan način, trud i energija većeg broja ljudi. Uz te, dobre ljude, ja sam učio, napredovao ka cilju i shvatio značaj i snagu timskog rada, naspram koga individualizam ostaje tek kao prkos i biva osuđen na propast. Zato koristim priliku da se moje reči zahvalnosti tim ljudima nađu među koricama ove knjige.

Veliko hvala mojoj mentorki, profesorki Snežani Marinković, za sve savete, komentare, podršku, kritiku, za sve. Ova doktorska teza je u najvećoj meri njena “krivica”. Hvala mom kolegi i vernom saradniku Aleksandru Saviću čije su me dijalektičke misli nekoliko puta prvo bacale u očajanje, a zatim u meni pokretale razmišljanja koja su proizvodila, ispostaviće se, odlična rešenja. Takođe, zahvalnost dugijem i mladom kolegi Nikoli Tošiću koji se svojski potrudio da formiramo jedinstvenu bazu podataka iz ove oblasti. Deo analiza koje sam sproveo i važni zaključci baziraju se upravo na tim podacima. Dragocene konsultacije u vezi dispozicije eksperimenta i pomoć u ispitivanju dobio sam od kolega sa predmeta Ispitivanje konstrukcija, profesora Zorana Miškovića i Vladete Matovića.

Za ogromnu materijalnu pomoć u vidu oplata i armature za izradu grednih nosača koji predstavljaju centralnu temu istraživanja i iskazano interesovanje i razumevanje za postavljene ciljeve istraživanja, zahvalnost upućujem preduzeću “Ratko Mitrović - Dedinje”, odnosno tehničkim direktorima Goranu Milovanoviću i Goranu Mitiću. Za kompletnu količinu recikliranog agregata, separaciju i transport, ali i za spemnost za saradnju i promociju rezultata istraživanja, zahvaljujem se kompaniji “ŠUŠA d.o.o.” iz Novog Sada. Prirodni agregat za sprovedena ispitivanja obezbedila su preduzeća “Vodogradnja Pukovac” iz Doljevca i “Branko Moravac d.o.o.” iz Požarevca, na čemu im se srdačno zahvaljujem. Hvala Institutu za puteve, tačnije osoblju Zavoda za građevinske materijale, Nevenki Vukelić i Tanji Stanković, koje su ljubazno dozvolile da se deo ispitivanja betonskih uzoraka iz probnih serija obavi pomoću njihove opreme.

Reči iskrene zahvalnosti upućujem laborantima Instituta za materijale i konstrukcije, Savi Stavnjaku i Mladenu Joviću koji su mi uvek izlazili u susret za pomoć, ostajali na poslu prekovremeno, radili subotom i nedeljom da bi se u roku koji

je predviđen dinamikom završio posao na betoniranju greda, pripremi ispitivanja ili samom ispitivanju. Hvala i svim mojim kolegama i prijateljima koji su mi pomagali prilikom betoniranja i ispitivanja.

Veliki podstrek za rad dobijao sam kroz saradnju i druženje sa nekada mojim diplomcima, a sada doktorantima na prestižnim univerzitetima, Mirom Vasić i Mladenom Luković. Njihova odlučnost i rešenost da uspeju, hrabrost u suočavanju sa vrhunskim naučnim izazovima i zarazni optimizam, prenosili su se i na moj rad.

Veliko hvala mojim roditeljima, za svu podršku, brigu i usađenu želju za stalnim podizanjem granice sopstvenih očekivanja. Najzad, veliko hvala mojoj Bojani, koja mi je svojom ljubavlju, verom u konačni uspeh i posvećenošću porodici i našoj deci neopisivo puno pomogla da ovaj posao na izradi doktorske teze, naš posao, uspešno privedem kraju.

## **GRANIČNA NOSIVOST ARMIRANOBETONSKIH GREDNIH NOSAČA OD BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM**

### ***Rezime:***

Recikliranje betonskog otpada je jedno od održivih rešenja za rastuće probleme sa deponijama građevinskog otpada i nekontrolisano iskorišćavanje prirodnih resursa. Rezultat procesa je agregat od recikliranog betona koji se trenutno dominantno koristi za podloge puteva i nekonstruktivne betonske elemente. Sa stanovišta zaštite resursa, smanjenja energije i razvoja ekološke svesti, važno je istražiti da li se beton na bazi recikliranog agregata može koristiti za elemente armiranobetonskih konstrukcija. Predmet istraživanja u ovoj disertaciji su elementi konstrukcije, tačnije gredni nosači napravljeni od betona na bazi recikliranog agregata (RAC) i njihovo ponašanje pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja do loma savijanjem ili smicanjem. Formirana je baza podataka i obavljena statistička analiza o mehaničkim svojstvima RAC betona u odnosu na uporedne betone sa prirodnim agregatom (NAC). Eksperimentalni rad obuhvatio je ispitivanje recikliranog agregata, betona na bazi recikliranog agregata i grednih nosača napravljenih od takvog betona. Rezultati ispitivanja svojstava agregata i probna ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava serija RAC i NAC betona poslužili su kao ulazni parametar za projektovanje sastava 3 betonske mešavine sa 0%, 50% i 100% recikliranog agregata krupne frakcije, iste projektovane čvrstoće pri pritisku. Ukupno je do loma ispitano 18 greda, statičkog sistema prosta greda, raspona 3.0 m. Od toga, napravljene su 3 serije od po 3 grede sa različitom količinom podužne armature (0.28%, 1.46% i 2.54%). Koncept ispitivanja postavljen je tako da se faznim povećanjem opterećenja dođe do loma nosača usled savijanja u sredini raspona. Takođe, napravljene su 3 serije od po 3 grede od betona sa 0%, 50% i 100% krupnog RAC i sa različitom količinom poprečne armature (0%, 0.14% i 0.19%), predviđenih za ispitivanje smičuće nosivosti. Izvršeno je poređenje zavisnosti sila-pomeranje, slika prslina, ugiba, dilatacija u betonu i armaturi, oblika loma i graničnih nosivosti greda od klasičnog i RAC betona, bazirano na sopstvenim i drugim rezultatima ispitivanja. Testirana je mogućnost primene savremenih propisa koji se odnose na NAC betone na gredne RAC elemente, kroz poređenje analitičkih predikcija i eksperimentalnih vrednosti momenta savijanja pri pojavi prve prslina, ugiba, graničnih momenata savijanja i granične smičuće sile. Takođe, izvršeno je poređenje sopstvenih i drugih rezultata eksperimentalnih ispitivanja

osnovnih parametara nosivosti greda koje su dominantno izložene savijanju ili smicanju.

Iz statističke analize baze podataka proistekle su analitičke zavisnosti odnosa osnovnih mehaničkih svojstava kod RAC i uporednih NAC betona. Izvršen je pregled literature koja se odnosi na dosadašnja istraživanja ponašanja armiranih RAC grednih nosača i utvrđen prostor za dalja istraživanja. Na osnovu sopstvenog eksperimentalnog istraživanja zaključeno je da betoni sa 50% krupnog RCA mogu imati iste čvrstoće pri pritisku i modul elastičnosti kao i uporedni NAC spravljen sa istim efektivnim vodocementnim faktorom, dok za RAC sa 100% krupnog RCA istih svojstava treba primeniti 3% više cementa. Analizom sopstvenih i drugih eksperimentalnih podataka zaključeno je da se gredni RAC nosači ponašaju slično uporednim NAC nosačima pri eksploatacionom i graničnom opterećenju. Moguće je primeniti aktuelne propise i na RAC grede, ali su predikcije manje konzervativne nego kod NAC greda. Po pitanju granične nosivosti na savijanja i smicanje, svi podaci i analize ukazuju da nema bitne razlike između NAC i RAC elemenata bez obzira na količinu krupnog recikliranog agregata u betonu. Presentovane analize i zaključci potvrđuju da je primena RAC u armiranobetonskim gredama tehnički izvodljiva, komparativna i kompetitivna primeni betona od prirodnog agregata. Time je sa tehničke strane pružen podsticaj otvaranju velikog polja za primenu recikliranog agregata, što predstavlja napredak u promociji održivog razvoja u građevinarstvu.

***Ključne reči:*** beton na bazi recikliranog agregata, armiranobetonske grede, savijanje, smicanje, kratkotrajno opterećenje, eksperimentalno ispitivanje

***Naučna oblast:*** građevinarstvo

***Uža naučna oblast:*** betonske konstrukcije

***UDK broj:*** 624:624.072.2(043.3)

**ULTIMATE STRENGTH OF REINFORCED RECYCLED CONCRETE  
BEAMS**

***Abstract:***

Recycling of waste concrete is one of the sustainable solutions for the growing waste disposal crisis and depletion of natural aggregate sources. As a result, recycled concrete aggregate (RCA) is produced, and so far it has mostly been used in low-value applications such as for the pavement base. But, from the standpoint of promoting resource and energy savings and environmental preservation, it is essential to study whether a concrete made of recycled aggregates - recycled aggregate concrete (RAC) can be effectively used as a structural material. Structural reinforced concrete elements were in the focus of this investigation, i.e. beam girders made of RAC and their behaviour up to flexural and shear failure under short-time loading. A very wide data base was formed and statistic analysis of relations between mechanical properties of RAC and corresponding natural aggregate concrete (NAC) was performed. The experimental research consisted of investigations of recycled concrete aggregate, recycled aggregate concrete and structural behaviour of beams made of RAC. Test results of RCA investigation and trial investigations of physical and mechanical properties of RAC were used as basic parameters for the design of 3 concrete mixtures with 0%, 50% i 100% of coarse RCA with the same compressive strength. Full-scale tests were performed on 18 simply supported beams with span of 3.0 m until the failure load due to flexure or shear was reached. Firstly, three series of beams made of three types of concrete and different ratio of flexural reinforcement (0.28%, 1.46% and 2.54%) were formed. Experiment on beams was performed by increasing the load level until flexural failure in the middle of span occurred. Furthermore, three series of beams with different ratio of shear reinforcement (0%, 0.14% i 0.19%) and concrete with 0%, 50% and 100% of coarse RCA were prepared to examine shear behavior. Comparison of load-deflection behavior, crack patterns, service deflections, strains in concrete and reinforcement, failure modes and ultimate flexural and shear capacity of NAC and RAC beams was made. The possibility of using equations from NAC codes to RAC beams was tested by comparison of an analytical expressions and experimental results related to cracking moments, deflections, ultimate bending moments and ultimate shear



capacity. The analysis of own and other authors' test results was performed both on flexural and shear behavior of RAC reinforced concrete beams.

The analytic expressions related to the ratio of the basic mechanical properties of NAC and RAC were drawn from conducted statistics and regression analysis of data base. The insight in literature dealing with experimental research of structural behavior of reinforced RAC beams had been performed and the room for improvement was found. Based on own experimental results it was concluded that RAC with 50% of RCA had the same compressive strength and modulus of elasticity as corresponding NAC with the same effective water-to-cement ratio. The production of RAC with 100% of RCA having the above mentioned properties the same compared to the corresponding NAC was possible with increase in cement content for about 3%. The results of conducted analysis showed that the flexural and shear behavior of RAC and comparative NAC beams were very similar for both the service and ultimate loading. Presented analysis and conclusions proved that the use of RAC in reinforced concrete beams is technically feasible, comparable and competitive with the use of conventional reinforced concrete. The stimulus for recycled concrete aggregate use in a wide field of high-value application has been given, which can be considered as improvement in promotion of sustainable construction development.

**Keywords:** *recycled aggregate concrete, reinforced concrete beams, flexure, shear, short-term loading, experimental investigation*

**Science field:** *Civil Engineering*

**Narrow science field:** *Concrete structures*

**UDK number:** *624:624.072.2(043.3)*

SADRŽAJ

|  |      |
|--|------|
| ZAHVALNOST .....   | ii   |
| REZIME .....   | iv   |
| ABSTRACT .....   | vi   |
| SADRŽAJ .....  | viii |
| 1. Uvod.....   | 1    |
| 1.1 Pozadina i predmet istraživanja .....  | 1    |
| 1.2 Cilj istraživanja i metodologija .....   | 4    |
| 1.3 Definicije pojmova i oznake .....  | 5    |
| 1.4 Struktura rada.....  | 7    |
| 2. Pregled istraživanja.....   | 9    |
| 2.1 Uvod.....  | 9    |
| 2.2 Fizičko-mehanička svojstva betona sa recikliranim agregatom .....                      | 9    |
| 2.2.1. Uvod .....  | 9    |
| 2.2.2. Čvrstoća pri pritisku .....   | 10   |
| 2.2.2.1 Uticaj kvaliteta originalnog betona.....   | 10   |
| 2.2.2.2 Uticaj količine i vrste recikliranog agregata .....                                | 12   |
| 2.2.2.3 Uticaj primene mineralnih dodataka.....  | 16   |
| 2.2.3. Čvrstoća pri zatezanju.....   | 18   |
| 2.2.4. Modul elastičnosti .....  | 21   |
| 2.2.5. Čvrstoća prijanjanja betona i armature .....  | 24   |
| 2.2.6. Naponsko-deformacijski dijagram .....   | 27   |
| 2.2.7. Zaključak.....  | 28   |
| 2.3 Ponašanje elemenata konstrukcija napravljenih od betona sa recikliranim agregatom..... | 30   |
| 2.3.1. Ispitivanja ponašanja armiranobetonskih RAC greda na savijanje .....                | 30   |
| 2.3.2. Ispitivanja ponašanja armiranobetonskih RAC greda na smicanje .....                 | 33   |
| 2.3.3. Ostala ispitivanja vezana za ponašanje konstruktivnih RAC elemenata .....           | 36   |
| 2.3.4. Zaključak.....  | 39   |
| 2.4 Tehnička regulativa .....  | 40   |
| 2.4.1. Uvod .....  | 40   |
| 2.4.2. Velika Britanija .....  | 41   |
| 2.4.3. Preporuke RILEM-a .....   | 41   |
| 2.4.4. Japan .....   | 43   |
| 2.4.5. Hong Kong .....   | 45   |
| 2.4.6. Nemačka .....   | 46   |
| 2.4.7. Kina.....   | 47   |
| 2.4.8. Mađarska.....   | 48   |
| 2.4.9. Holandija.....  | 50   |
| 2.4.10. Rezime o tehničkoj regulativi .....  | 51   |
| 2.5 Zaključak .....  | 54   |
| 3. Sopstvena eksperimentalna ispitivanja .....   | 55   |
| 3.1 Uvod.....  | 55   |
| 3.2 Ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava agregata .....                                | 55   |
| 3.2.1. Priprema ispitivanja .....  | 55   |
| 3.2.2. Oblik zrna agregata.....  | 57   |
| 3.2.3. Zapreminska masa u rastresitom i zbijenom stanju.....                               | 58   |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 3.2.4.  | Stvarna zapreminska masa i upijanje vode .....                                       | 59  |
| 3.2.5.  | Drobljivost agregata .....   | 61  |
| 3.2.6.  | Sadržaj sitnih čestica u agregatu .....  | 62  |
| 3.2.7.  | Sumarni prikaz rezultata i zključak .....  | 62  |
| 3.3     | Ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika betona sa recikliranim agregatom ..... | 63  |
| 3.3.1.  | Uvod .....   | 63  |
| 3.3.2.  | Projektovanje sastava mešavina u probnim ispitivanjima .....                         | 64  |
| 3.3.3.  | Fizičko-mehanička svojstva betona sa različitim sadržajem RCA .....                  | 69  |
| 3.3.4.  | Zaključak.....   | 75  |
| 3.4     | Princip projektovanja sastava betonskih mešavina .....                               | 76  |
| 3.5     | Ispitivanje ponašanja ab greda pri savijanju pod kratkotrajnim opterećenjem          | 77  |
| 3.5.1.  | Uvod .....   | 77  |
| 3.5.2.  | Receptura za beton.....  | 78  |
| 3.5.3.  | Karakteristike materijala .....  | 80  |
| 3.5.3.1 | Beton .....  | 80  |
| 3.5.3.2 | Konzistencija i zapreminske mase betona.....   | 80  |
| 3.5.3.3 | Čvrstoća pri pritisku.....   | 81  |
| 3.5.3.4 | Statički modul elastičnosti .....  | 82  |
| 3.5.3.5 | Čvrstoća pri zatezanju.....  | 82  |
| 3.5.3.6 | Armaturni čelik.....   | 82  |
| 3.5.4.  | Opis grednih elemenata .....   | 82  |
| 3.5.5.  | Izrada i nega grednih nosača .....   | 83  |
| 3.5.6.  | Dispozicija ispitivanja i instrumenata.....  | 85  |
| 3.5.7.  | Ponašanje pri savijanju .....  | 88  |
| 3.5.7.1 | Lom.....   | 90  |
| 3.5.7.2 | Ugibi .....  | 94  |
| 3.5.7.3 | Prsline .....  | 98  |
| 3.5.7.4 | Dilatacije u betonu .....  | 99  |
| 3.5.7.5 | Dilatacije u armaturi .....  | 104 |
| 3.5.8.  | Zaključak.....   | 108 |
| 3.6     | Ispitivanje ponašanja ab greda pri smicanju pod kratkotrajnim opterećenjem           | 109 |
| 3.6.1.  | Uvod .....   | 109 |
| 3.6.2.  | Receptura za beton.....  | 110 |
| 3.6.3.  | Karakteristike materijala .....  | 111 |
| 3.6.3.1 | Beton .....  | 111 |
| 3.6.3.2 | Konzistencija i zapreminske mase betona.....   | 111 |
| 3.6.3.3 | Čvrstoća pri pritisku.....   | 112 |
| 3.6.3.4 | Statički i dinamički modul elastičnosti .....  | 112 |
| 3.6.3.5 | Dinamički Poasonov koeficijent.....  | 114 |
| 3.6.3.6 | Čvrstoća pri zatezanju.....  | 116 |
| 3.6.3.7 | Armaturni čelik.....   | 117 |
| 3.6.4.  | Opis grednih elemenata .....   | 118 |
| 3.6.5.  | Izrada i nega grednih nosača .....   | 119 |
| 3.6.6.  | Dispozicija ispitivanja i instrumenata.....  | 119 |
| 3.6.7.  | Ponašanje pri smicanju .....   | 122 |

|                        |  |     |
|------------------------|--|-----|
| 3.6.7.1                | Oblik loma.....  | 122 |
| 3.6.7.2                | Granična nosivost na smicanje .....  | 125 |
| 3.6.7.3                | Ugibi .....  | 126 |
| 3.6.7.4                | Dilatacije u betonu.....   | 128 |
| 3.6.7.5                | Dilatacije u podužnoj armaturi.....  | 132 |
| 3.6.7.6                | Dilatacije u poprečnoj armaturi.....   | 135 |
| 3.6.7.7                | Stanje prslina .....   | 139 |
| 3.6.8.                 | Zaključak.....   | 140 |
| 4.                     | Analiza eksperimentalnih rezultata.....  | 143 |
| 4.1                    | Uvod.....  | 143 |
| 4.2                    | Mehanizmi i modeli ponašanja pri savijanju i smicanju elemenata<br>konstrukcija od klasičnog betona..... | 143 |
| 4.2.1.                 | Savijanje.....   | 144 |
| 4.2.1.1                | Granična nosivost .....  | 144 |
| 4.2.1.2                | Ugibi .....  | 145 |
| 4.2.1.3                | Moment savijanja pri pojavi prslina .....  | 147 |
| 4.2.2.                 | Smicanje.....  | 149 |
| 4.2.2.1                | Mehanizmi i modeli prihvatanja smičućih sila kod greda .....   | 149 |
| 4.2.2.2                | Pregled propisa .....  | 151 |
| 4.3                    | Poređenje eksperimentalnih i računskih veličina.....   | 157 |
| 4.3.1.                 | Uvod .....   | 157 |
| 4.3.2.                 | Moment savijanja pri formiranju prslina kod savijanih elemenata .....                                    | 157 |
| 4.3.2.1                | Proračun prema BAB'87.....   | 158 |
| 4.3.2.2                | Proračun prema EC2.....  | 159 |
| 4.3.2.3                | Proračun prema ACI .....   | 159 |
| 4.3.3.                 | Granična nosivost na savijanje .....   | 160 |
| 4.3.4.                 | Deformacije pod kratkotrajnim opterećenjem .....   | 164 |
| 4.3.5.                 | granična nosivost na smicanje.....   | 167 |
| 4.3.6.                 | Zaključak.....   | 170 |
| 4.4                    | Uporedna analiza sopstvenih i drugih eksperimentalnih rezultata.....                                     | 172 |
| 4.4.1.                 | Savijanje greda pod kratkotrajnim opterećenjem.....  | 172 |
| 4.4.2.                 | Smicanje greda pod kratkotrajnim opterećenjem.....   | 179 |
| 4.4.3.                 | Zaključak.....   | 181 |
| 5.                     | Zaključci i smernice za buduća istraživanja.....   | 185 |
| 5.1                    | Zaključci .....  | 185 |
| 5.2                    | Smernice za buduća istraživanja .....  | 188 |
| 6.                     | Literatura .....   | 189 |
| PRILOG A .....         |  | 201 |
| PRILOG B.....          |  | 220 |
| BIOGRAFIJA AUTORA..... |  | 237 |

## 1. Uvod

### 1.1 POZADINA I PREDMET ISTRAŽIVANJA

Građevinska industrija koristi ogromne količine prirodnih resursa i istovremeno proizvodi značajne količine građevinskog otpada, što znači i da ima veliki uticaj na životnu sredinu i da predstavlja izazov održivom razvoju. Sa godišnjom proizvodnjom od oko 10 mlrd tona na globalnom nivou ([Meyer, 2009](#)), beton je najzastupljeniji građevinski materijal. Uticaj betona na životnu okolinu je složeni mehanizam i postoji tokom čitavog životnog ciklusa betonske konstrukcije, slika 1.



Slika 1. Životni ciklus betonske konstrukcije

Beton je kompozitni materijal kod koga oko 70% zapremine čini agregat, pa ogromna proizvodnja betona ujedno znači i potrebu za obezbeđivanjem enormnih količina agregata, procenjene na oko 10 do 11 mlrd tona godišnje ([Meyer, 2002](#)). To neumitno dovodi do iscrpljivanja prirodnih izvora rečnog i drobljenog agregata i velikog uticaja na životnu sredinu. Nekontrolisana eksploatacija agregata iz reka dovodi do promena vodenih ekosistema i staništa. S druge strane, orijentacija na proizvodnju drobljenog prirodnog agregata nosi sa sobom povećanu emisiju gasova, u prvom redu CO<sub>2</sub>, odgovornih za efekat staklene bašte. Oni se javljaju kao rezultat miniranja i procesuiranja stena, kao i prilikom transporta od kamenoloma do obično udaljenih gradskih sredina gde se proizvodi beton.

Količina građevinskog otpada od rušenja objekata, ali i otpada nastalog tokom građenja, iznosi 2 do 3 mlrd t godišnje na globalnom nivou prema podacima iz 2001. godine ([Lauritzen, 2006](#)) – 200-300 mil. t u SAD-u ([Meyer, 2002](#)) i isto toliko u Evropi ([Lauritzen, 2004](#)), 83 mil. t u Japanu itd. Samo u Evropi, količina građevinskog otpada

je povećana četiri puta u poređenju sa podacima sa početka 1990-ih ([Hansen, 1992](#)). Zavisno od razmatranog područja (zemlje) varira i struktura građevinskog otpada, ali istraživanja pokazuju da značajan deo čini betonski otpad (Japan 42%, Evropa 50% ([Lauritzen, 2004](#)), koji se odlaze na za to predviđene ili “divlje“ deponije. Sa stanovišta uticaja na okolinu betonski otpad nije problem, ali njegova količina dostiže neodrživ nivo. Naročito veliki problemi sa odlaganjem betonskog otpada postoje u visoko urbanim zonama, npr. Njujork ([Meyer, 2002](#)) i uopšte u zemljama u razvoju, gde su velike površine “skupog” zemljišta pod deponijama građevinskog otpada.

Jedno od rešenja za probleme odlaganja građevinskog otpada i isrepljivanje prirodnih nalazišta agregata je postupak recikliranja deponovanih građevinskih materijala, u prvom redu betona. Tim postupkom može se proizvesti agregat koji je moguće iskoristiti na više načina, od podloge kolovoznih konstrukcija do proizvodnje konstrukcijskih betona. Naravno, recikliranje betona nije cilj sam po sebi, to je tehnološka inovacija koja ima potencijalne ekološke i ekonomske prednosti ([Marinković i ost. 2010](#)). Za ovaj proces najviše interesovanja pokazale su zemlje koje imaju problema sa nalazištima prirodnog agregata (npr. Holandija, Belgija, Danska) i zemlje poput Japana gde su kapaciteti deponija procenjeni na još svega nekoliko godina ([Meyer, 2009](#)). Podaci ukazuju da se u njima proces recikliranja građevinskog otpada odvija na visokom nivou - Japan 98% ([Sakai 2005](#)), Holandija 90% ([Symonds i ost.1999](#)). U okviru EU-27 zemalja, 2006. godine recikliralo se 55% ukupne količine građevinskog otpada, sa ciljem da do 2020. to bude 70%. ([Final Report, 2010](#))

I pored visokog stepena recikliranja betona u pojedinim zemljama, agregat od recikliranog betona dominantno se koristi za izradu tampon slojeva i podloga kolovoznih konstrukcija, ispunu iza potpornih zidova i izradu nekonstruktivnih betonskih elemenata (ivičnjaka, staza, ograda), a u malom procentu se koristi kao konstitutivni element konstrukcijskih betona. Postoji više razloga za to, a neki od najznačajnijih su tehnički razlozi koji se odnose na kvalitet recikliranog agregata. Tu se pre svega misli na veće upijanje vode i nižu zapreminsku masu u poređenju za prirodnim agregatom, kao i veći nivo raznih primesa kao nus proizvoda u procesu reciklaže mešovitog građevinskog otpada. Ova svojstva agregata od recikliranog betona mogu značajno da utiču na svojstva betona spravljenog s njim ([Yang i ost. 2008](#)). Osim njih, na svojstva betona takođe mogu da utiču oblik i tekstura zrna recikliranog

agregata, kvalitet stare i nove kontakne zone ([Chakradhara Rao i ost. 2011](#); [Tam&Tam 2008](#)), poroznost agregata ([Angulo i ost. 2010](#)) i stanje vlažnosti agregata pri spravljanju betonske mešavine ([Poon i ost. 2007](#)). Iako su u poslednje tri decenije obavljena opsežna istraživanja svojstava betona na bazi recikliranog agregata (npr. [Hansen 1992](#); [Ajdukiewicz&Kliszczewicz 2002](#); [Rahal 2007](#); [Xiao&Falkner 2007](#); [Domingo i ost. 2010](#)), određena svojstva koja se tiču trajnosti, reologije kao i ponašanja elemenata konstrukcije od takvog betona nisu još uvek dovoljno istražena. Takođe, širu primenu takvih “zelenih” betona sprečava i nedostatak odgovarajuće tehničke regulative – propisa, standarda i pravilnika ([Marinkovic i ost. 2012](#)). Osim toga, u pojedinim zemljama na proces recikliranja se gleda s nepoverenjem i postoji sumnja u kvalitet materijala koji je proizveden na takav način. Ovo takođe može uticati na primenu betona od recikliranog agregata kao održivo rešenje za stalni rast industrije betona i betonskih proizvoda.

Predmet istraživanja u ovom radu su elementi konstrukcije, tačnije gredni nosači napravljeni od betona na bazi recikliranog agregata i njihovo ponašanje pod dejstvom kratkotrajnog opterećenja do loma. Ovakvi podaci su veoma važni zato što je teško predvideti uticaj svojstava betona sa recikliranim agregatom na ponašanje elemenata konstrukcije samo na osnovu rezultata ispitanih svojstava betona kao materijala. Iako se recikliranjem građevinskog otpada može dobiti raznorodan agregat (od betona, opeke, keramike, mešoviti itd.), ovim radom su tretirani isključivo konstrukcijski betoni na bazi agregata proizvedenog recikliranjem otpadnog betona. Iz dosadašnjih malobrojnih istraživanja ([Sato i ost. 2007](#); [Ajdukiewicz&Kliszczewicz 2007](#); [Fathifazl 2008](#)) može se zaključiti da su granične nosivosti grednih nosača od betona na bazi recikliranog agregata, kod kojih je do loma došlo usled savijanja, slične nosivostima uporednih greda od betona sa prirodnim agregatom. Pri tome, pod uporednim grednim nosačima uglavnom su podrazumevani nosači armirani istom količinom podužne i poprečne armature, napravljeni od betona sa prirodnim i betona sa recikliranim agregatom koji imaju isti vodocementni faktor. To međutim ne znači nužno i da imaju iste čvrstoće pri pritisku ili bilo koje drugo mehaničko svojstvo, što može da predstavlja određenu prepreku u izvođenju validnih zaključaka. Razlika je zabeležena u ponašanju armiranobetonskih grednih elemenata pod eksploatacionim opterećenjem, pri čemu elementi od betona sa recikliranim agregatom imaju veće širine prslina i veće ugibe od

uporednih elemenata od betona sa prirodnim agregatom. Osim toga, prateći modeli za dimenzionisanje grednih armiranobetonskih elemenata od betona sa recikliranim agregatom prema momentima savijanja nisu razvijeni, a pitanje je mogu li se primeniti modeli koji važe u slučaju greda od klasičnih betona. Još veću nepoznanicu predstavlja mehanizam prenosa sila smicanja. Iako nekoliko dosadašnjih istraživanja ([Etxeberria i ost. 2007](#); [González-Fonteboa&Martínez-Abella 2007](#); [Fathifazl 2008](#)) ukazuju da su granične nosivosti grednih armiranobetonskih elemenata od betona na bazi recikliranog agregata kod kojih je do loma došlo usled smicanja, slične nosivostima uporednih elemenata od betona sa prirodnim agregatom, udeo pojedinih mehanizama pri prihvatanju smičućih sila ne mora biti isti. Nije utvrđeno da li se do izvesnog procenta zamene prirodnog agregata recikliranim može smatrati da ne postoji, ili je zanemarljivo mala razlika u ponašanju između grednih elemenata od ove dve vrste betona, odnosno kada se gredni nosači od betona sa recikliranim agregatom mogu dimenzionisati na osnovu postojećih modela za betone sa prirodnim agregatom. Konačno, ne postoji uporedni pregled numeričkih podataka (rezultata) dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja na onovu koga bi mogli da se izvuku opšti zaključci o ponašanju greda od betona na bazi recikliranog agregata.

## 1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA I METODOLOGIJA

Opšti, širi cilj sprovedenog istraživanja je definisanje smernica za primenu betona na bazi recikliranog agregata u grednim konstrukcijskim elementima, čime bi se sa tehničke strane pružio podsticaj otvaranju velikog polja za primenu recikliranog agregata, što bi bio napredak u promociji održivog razvoja u građevinarstvu. Konkretno posmatrano, na bazi postojećih i sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja planirano je ostvarenje sledećih ciljeva:

- 1) formiranje baze podataka koja se odnosi na konstrukcijske betone na bazi recikliranog agregata i njihovu primenu u elementima armiranobetonskih konstrukcija,
- 2) sistematizaciju postojećih znanja koja se odnose na osnovna fizičko-mehanička svojstva betona sa recikliranim agregatom, a koja su važna za razmatranje fenomena u ponašanju elemenata konstrukcija; definisanje karakterističnih odnosa između posmatranih svojstava kod betona sa recikliranim i uporednog



betona sa prirodnim agregatom; uočavanje parametara koji utiču na pojedina svojstva betona sa recikliranim agregatom,

- 3) sistematizaciju postojećih znanja koja se odnose na ponašanje grednih armiranobetonskih elemenata od betona sa recikliranim agregatom pod kratkotrajnim opterećenjem,
- 4) eksperimentalno ispitivanje ponašanja armiranobetonskih greda od betona sa recikliranim agregatom pod kratkotrajnim opterećenjem, u fazi eksploatacije i fazi loma, u funkciji:
  - a. procenta zamene prirodnog agregata recikliranim,
  - b. procenta armiranja grede podužnom i poprečnom armaturom,
- 5) testiranje mogućnosti primene modela ponašanja koji važe za grede od klasičnog betona na grede od betona sa recikliranim agregatom, kroz poređenje rezultata dobijenih sopstvenim eksperimentalnim ispitivanjima i numeričkih rezultata određenih veličina (graničnog momenta i sile loma, ugiba, momenta savijanja pri pojavi prsline) određenih primenom propisa koji važe za klasične betonske grede,
- 6) donošenje opštih zaključaka o stanjima granične nosivosti i upotrebljivosti greda sa recikliranim agregatom, uzimajući u obzir numeričke podatke iz sopstvenih i drugih eksperimentalnih ispitivanja.

Od naučnih metoda istraživanja primenjena je sinteza i kritička analiza postojećih rezultata iz ove oblasti. Primenjena je statistička i regresiona analiza nad podacima iz literature koji se odnose na odnos svojstava RAC i uporednih NAC. a zatim je definisano i sprovedeno sopstveno eksperimentalno ispitivanje. Nakon prikupljanja podataka izvršena je njihova sistematizacija, kritička analiza i statistička obrada. Izvođenje zaključaka nakon analize ponašanja grednih elemenata od klasičnog i betona na bazi recikliranog agregata bazirana je na komparativnoj metodi.

### **1.3 DEFINICIJE POJMOVA I OZNAKE**

Terminologija koja se koristi u literaturi iz oblasti betona na bazi recikliranog agregata može da bude zbunjujuća. Kako bi se čitaocu olakšalo praćenje teksta ovde će biti napravljen pregled osnovnih pojmova. S obzirom da je ta tema u domaćim okvirima još uvek u povoju i da ne postoji koncenzus oko domaćih naziva za termine iz ove

oblasti, uz objašnjenje pojma biće dat i naziv na engleskom jeziku. Takođe, na samom početku biće uvedene skraćene oznake izvesnih termina kako bi se tekst relaksirao čestog ponavljanja složenica.

**Građevinski otpad** (engl. *Construction and Demolition Waste*) – otpad koji nastaje tokom proizvodnje konstruktivnih elemenata, tokom građenja ili nakon rušenja objekta

**Otpadni beton** (engl. *Waste concrete*) – beton iz građevinskog otpada dobijen nakon rušenja betonske konstrukcije ili kao neupotrebljen beton iz stacionarnih ili gradilišnih fabrika betona ili fabrika montažnih betonskih elemenata, u svežem ili očvrslom stanju

**Originalni beton** (engl. *Original concrete*) – beton koji se reciklira pri čemu se dobija agregat za nove betone

**Agregat od Recikliranog Betona – RCA** (engl. *Recycled Concrete Aggregate*) – agregat dobijen recikliranjem originalnog betona; osim ako drugačije nije navedeno, u radu će se govoriti samo o ovom agregatu i on će se nazivati **Reciklirani agregat**; krupna frakcija recikliranog agregata podrazumevaće zrna agregata nazivnog prečnika većeg od 4 mm, a sitna manjeg od 4 mm).

**Beton na bazi Recikliranog Agregata – RAC** (engl. *Recycled Aggregate Concrete*) – u opštem slučaju, beton koji je spravljen sa recikliranim agregatom ili mešavinom recikliranog i prirodnog agregata; ukoliko drugačije nije rečeno, skraćenicom **RAC** podrazumevaće se beton koji je spravljen samo sa krupnom frakcijom recikliranog agregata i prirodnim sitnim agregatom; ukoliko je poznat procenat zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim, procenat zamene se piše u nastavku oznake, npr. beton koji je spravljen sa 50% krupne frakcije recikliranog agregata se obeležava sa RAC50.

**PA** – Prirodni Agregat – rečni ili drobljeni

**RA** – Reciklirani agregat od mešovitog otpada

**NAC** – Beton na bazi Prirodnog Agregata (engl. *Natural Aggregate Concrete*)

**Stari cementni kamen** (engl. *Original mortar*) – očvrsla mešavina cementa, vode i sitne frakcije agregata iz originalnog betona; deo starog cementnog kamena gotovo uvek se nalazi oko zrna prirodnog agregata i zajedno čine zrno recikliranog agregata

**Novi cementni kamen** (engl. *New mortar*) - očvrsla mešavina cementa, vode i sitne frakcije agregata (prirodnog, recikliranog ili mešavine) u betonu na bazi recikliranog agregata

**Uporedni Beton na bazi Prirodnog Agregata** – beton na bazi prirodnog agregata sa kojim se poredi neka/neke karakteristika betona na bazi recikliranog agregata; kraće će se pisati – Uporedni NAC; ukoliko drugačije nije navedeno, smatra se da uporedni NAC ima isti efektivni vodocementni faktor kao beton na bazi recikliranog agregata sa kojim se poredi

**Efektivni vodocementni faktor** (engl. *effective water to cement ratio*) – vodocementni faktor sračunat na osnovu količine vode koja je dostupna cementu za proces hidratacije; ova količina vode predstavlja razliku ukupne količine vode u mešavini i dela vode koju će upiti reciklirani agregat.

## 1.4 STRUKTURA RADA

Doktorska teza je organizovana u 4 glavne celine.

U prvoj glavi prikazana je pozadina istraživanja u kojoj je objašnjen značaj recikliranja otpadnog betona i primene recikliranog agregata sa stanovišta održivog razvoja. Definisani su predmet i ciljevi istraživanja, a prikazana je i struktura teze. Dat je pregled osnovnih termina koji se koriste u ovoj oblasti i skraćenice koje su uvedene radi lakšeg praćenja teksta.

Druga glava sadrži pregled dosadašnjih istraživanja iz domaće i svetske literature. Prikazana su osnovna svojstva RAC betona u smislu poređenja sa uporednim NAC i definisane oblasti očekivanih rezultata za pojedina svojstva RAC u funkciji procenta zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim. Dat je pregled dosadašnjih istraživanja na polju ponašanja RAC elemenata konstrukcija ispitivanih do loma, prvenstveno grednih nosača, ali i ostalih poput stubova, ramova i prefabrikovanih elemenata. Prezentovana je tehnička regulativa (propisi, standardi, preporuke itd.) koja se odnosi na klasifikaciju recikliranog agregata i zahteve koje mora da ispuni kako bi se primenio u konstrukcijskim betonima.

Treća glava je centralno poglavlje koje se odnosi na sopstvena eksperimentalna istraživanja. Ispitivanja su sprovedena na tri nivoa- ispitivanje agregata, betona spravljenog sa tim agregatom i ispitivanje greda od betona na bazi recikliranog agregata. Rezultati ispitivanja agregata upoređeni su sa zahtevima standarda koji se odnose na prirodni agregat koji se upotrebljava za spravljanje betona. Da bi bila sastavljena receptura betona za izradu greda, sprovedena su probna ispitivanja fizičko-

mehaničkih svojstava NAC, RAC50 i RAC100 betona sa po 3 različita efektivna vodocementna faktora. Za svaki od betona uspostavljena je zavisnost između čvrstoće pri pritisku i recipročne vrednosti vodocementnog faktora. Time je omogućeno sastavljanje receptura za betone iste (slične) čvrstoće pri pritisku. Opisani su eksperimenti sprovedeni na serijama greda od betona sa različitim sadržajem RCA koje su armirane različitom količinom podužne i poprečne armature. U zavisnosti od izabranog načina armiranja, projektovan je lom usled savijanja ili usled smicanja. Prezentovani su rezultati ispitivanja ponašanja u fazi eksploatacije u fazi loma i data objašnjenja uočenih pojava. Određena je granična nosivost svih grednih nosača.

U četvrtoj glavi analizirani su podaci iz sprovedenih eksperimenata na gredama u smislu poređenja sa proračunskim vrednostima dobijenih na osnovu odredbi savremenih propisa. Ovim je testirana mogućnost primene propisa koji se odnose na NAC elemente konstrukcija na RAC gredne nosače. Takođe, izvršena je analiza sopstvenih i ostalih podataka iz literature u cilju donošenja opštih zaključaka koji se odnose na graničnu nosivost i ponašanje u eksploataciji RAC grednih elemenata konstrukcije.

Na kraju svake od pomenutih glava dati su odgovarajući zaključci. Opšti zaključci istraživanja kao i preporuke za buduća istraživanja dati su u glavi 5. Nakon spiska primenjene literature, u aneksima su dati numerički podaci iz ispitivanja ponašanja greda pri savijanju i pri smicnju.

## 2. Pregled istraživanja

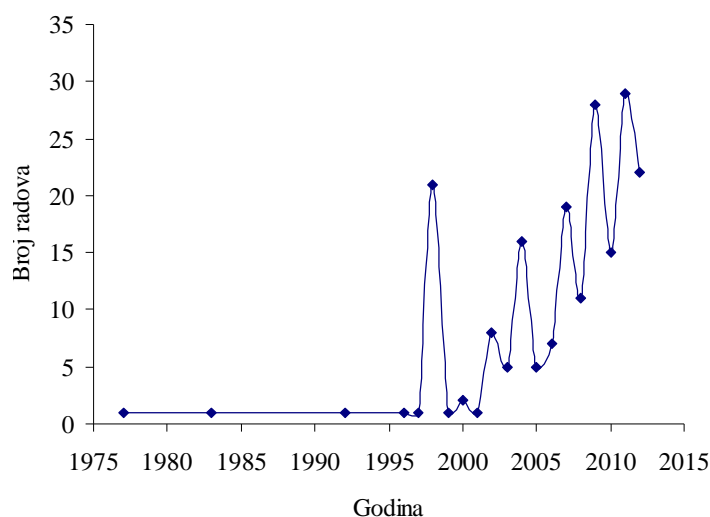
### 2.1 UVOD

Pregled postojeće literature sastoji se iz tri dela. S obzirom na temu teze, osnovni deo čine radovi koji se odnose na eksperimentalno ispitivanje ponašanja elemenata konstrukcija napravljenih od betona sa recikliranim agregatom. Osnovne razlike u ponašanju NAC i RAC greda pod opterećenjem, mogle bi da postoje zbog razlika u izvesnim fizičko-mehaničkim svojstvima betona sa i bez recikliranog agregata. S obzirom na to, prvi deo pregleda literature odnosi se na bazična fizičko-mehanička svojstva betona sa recikliranim agregatom. Treći deo pregleda literature odnosi se na postojeću tehničku regulativu (propise, standarde, pravilnike, preporuke itd.) iz oblasti recikliranog agregata i betona na bazi recikliranog agregata.

### 2.2 FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

#### 2.2.1. UVOD

Predmet analize bila su ona svojstva koja mogu bitno da utiču na ponašanje greda od betona sa recikliranim agregatom pri eksploatacionom opterećenju i lomu. To su čvrstoća betona pri pritisku, čvrstoća pri zatezanju, modul elastičnosti, naponsko-deformacijski dijagram i čvrstoća prijanjanja betona i armature. Baza postojećih istraživanja formirana je pretraživanjem web baza ISI Web of Knowledge i SciVerse SCOPUS.



Slika 2. Broj radova koji su obuhvaćeni analizom, po godinama

Ovako formirana baza sadrži radove u referentnim časopisima, radove prezentovane na naučnim skupovima, kao i rezultate prikazane u okviru master i doktorskih teza. Ukupan broj radova iz baze koji su korišćeni u ovoj analizi je 201, pri čemu se dominantan broj odnosi se na vremenski period 1998.-2013. godine, slika 2.

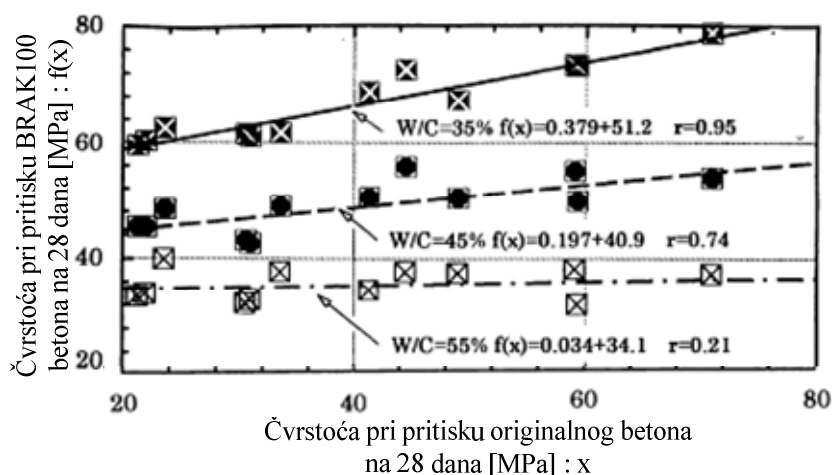
## 2.2.2. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU

Čvrstoća pri pritisku je možda i najznačajnija mehanička karakteristika betona, svojstvo koje utiče na niz drugih fizičko-mehaničkih svojstava betona i svojstvo na koje se najčešće misli kada se govori o kvalitetu betona. Čvrstoća pri pritisku betona na bazi recikliranog agregata zavisi od velikog broja parametara, a ovde su detaljno analizirani uticaj čvrstoće pri pritisku originalnog betona, kao i uticaj primenjene frakcije i količine recikliranog agregata. Takođe, u cilju istraživanja mogućnosti poboljšanja svojstava RAC betona i eventualne primene u sopstvenim eksperimentalnim istraživanjima, analiziran je uticaj mineralnih dodataka u RAC mešavinama. Uticaj stanja vlažnosti recikliranog agregata prilikom spravljanja betona analiziran je ranije ([Ignjatović, 2009](#)) i nije izvedena pouzdana veza sa čvrstoćom pri pritisku.

### 2.2.2.1 Uticaj kvaliteta originalnog betona

Kada se govori o meri kvaliteta originalnog betona najpre se misli na njegovu čvrstoću pri pritisku. Parametar koji definiše odnos čvrstoće RAC i uporednog NAC betona je odnos čvrstoće betona koji se reciklira- originalnog betona i čvrstoće koja se projektuje- ciljane čvrstoće. Ukoliko je čvrstoća originalnog betona koji se reciklira veća ili ista od ciljane čvrstoće, tada će čvrstoća betona na bazi recikliranog agregata biti ista ili veća od čvrstoće uporednog NAC betona ([Hansen, 1992](#)). Uticaj čvrstoće originalnog betona raste sa snižavanjem efektivnog vodocementnog faktora novog betona, tj. sa povećanjem zahtevane čvrstoće pri pritisku novog betona ([Hansen&Narud, 1983](#); [Dosho i ost., 1998](#)), što se vidi iz nagiba pravih linija na dijagramu, slika 3. Rezultati još nekoliko istraživanja idu u prilog prethodnim tvrdnjama da je čvrstoća RAC ista ili veća u odnosu na uporedni NAC ukoliko je ciljane čvrstoća niža od čvrstoće originalnog betona ([Tavakoli&Soroushian, 1996](#); [Padmini i ost., 2009](#)). S druge strane, [Kerkhof&Siebel \(2003\)](#) navode da nije bilo razlika u čvrstoćama pri pritisku između RAC100 i uporednog NAC ( $\omega_{\text{eff}}=0.55$ ), nezavisno od čvrstoća

originalnih betona koje su bile 15 MPa ( $\omega=0.68$ ) u jednom i 45 MPa ( $\omega=0.48$ ) u drugom slučaju.



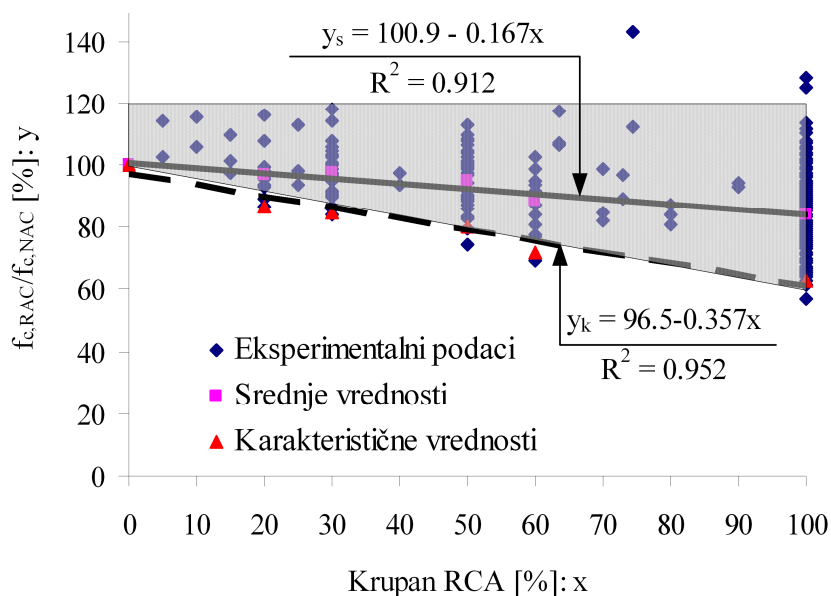
Slika 3. Dijagram čvrstoće pri pritisku RAC100 betona, na 28 dana, u funkciji čvrstoće pri pritisku originalnog betona i vodocementnog faktora ([Dosho i ost., 1998](#))

U situacijama iz prakse, kada se reciklirani agregat obezbeđuje iz reciklažnih postrojenja u koje se deponuje, a zatim reciklira betonski otpad različitog porekla i svojstava, čvrstoća pri pritisku originalnog betona ostaje nepoznata veličina. O kvalitetu originalnog (ili originalnih) betona samo posredno se pretpostavlja na osnovu ispitivanja svojstava recikliranog agregata, u prvom redu zapreminske mase, upijanja ili testova drobljivosti. Ipak, direktna veza između fizičko-mehaničkih svojstava recikliranog agregata i čvrstoće pri pritisku originalnog betona nije moguća. Neki rezultati iz literature ukazuju da se od originalnih betona različite čvrstoće dobija reciklirani agregat sličnog upijanja ([Hansen&Narud, 1983](#); [Katz, 2003](#)), dok drugi, ukazuju da veće upijanje RCA znači čak i veću čvrstoću originalnog betona (!) ([Padmini i ost., 2009](#)). Ovo je moguće, jer na vrednost upijanja RCA ne utiče samo čvrstoća, tj. vodocementni faktor originalnog betona, već njegov kompletan sastav (uključujući količinu uvučenog vazduha i mineralnih dodataka), kompaktnost (zapreminska masa), izloženost atmosferskim uticajima tokom eksploatacije, kao i način recikliranja, tj. vrsta upotrebene drobilice (npr. udarne ili čeljusne). Zato se upijanje vode recikliranog agregata, uz zapreminsku masu, najčešće koristi kao mera kvaliteta originalnog betona. Opisani uticaj kvaliteta originalnog betona u velikoj meri se može generalizovati i na ostala mehanička svojstva RAC betona – bolji kvalitet originalnog betona u principu znači i veće čvrstoće pri zatezanju, veći modul elastičnosti, manje skupljanje i tečenje itd.

### 2.2.2.2 Uticaj količine i vrste recikliranog agregata

Uticaj količine recikliranog agregata (procenat zamene prirodnog) i vrste recikliranog agregata (samo krupan ili samo sitan) analiziran je koristeći numeričke podatke iz formirane baze eksperimentalnih ispitivanja. Ukupno je izdvojeno 50 radova sa 722 podatka. Zajednički podatak za RAC i NAC betone bio je isti efektivni vodocementni faktor, koji se kretao u granicama od 0.24-1.01.

Na slici 4 prikazana je zavisnost odnosa čvrstoća pri pritisku RAC i NAC betona u funkciji količine krupnog recikliranog agregata. Prikazani podaci odnose se na betone sa efektivnim vodocementnim faktorom u granicama 0.33-0.68, spravljenih bez dodataka tipa silikatne prašine, letećeg pepela, zgure i sl. koji bi mogli da utiču na čvrstoću pri pritisku. Prikazano je 305 rezultata iz 39 istraživanja.

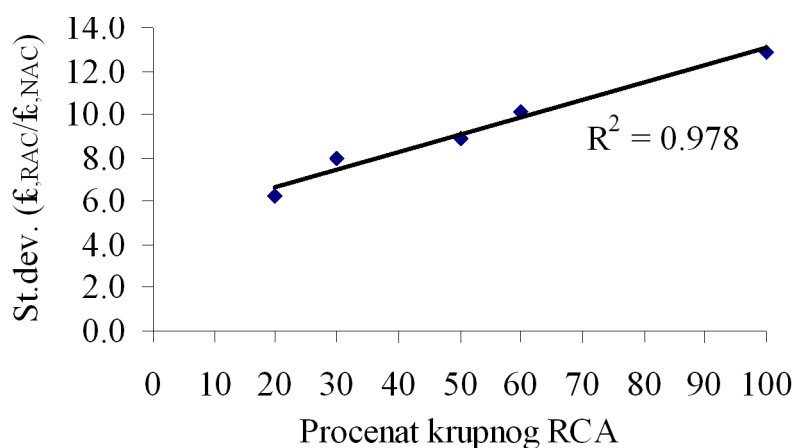


Slika 4. Odnos čvrstoće pri pritisku RAC i NAC betona u funkciji količine krupnog recikliranog agregata

U okviru šrafirane oblasti na slici 4 nalazi se više od 95% rezultata. Dakle, van oblasti je maksimalno 5% rezultata pa se ova oblast može nazvati *oblast poverenja* ili oblast očekivanih vrednosti odnosa čvrstoća pri pritisku RAC i uporednih NAC betona. Time je za svaki procenat zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim definisana minimalna i maksimalna očekivana vrednost odnosa čvrstoće pri pritisku RAC i uporednog NAC betona. Za 50% i 100% krupnog RCA, minimalne ordinate šrafirane oblasti su 80% i 60%. Sa gornje strane, oblast je ograničena vrednošću od 120% za sve procenat zamene, tj. bez obzira na količinu krupnog RCA čvrstoća pri pritisku RAC može biti do 20% veća od čvrstoće uporednog NAC. Rasipanje rezultata, za određeni



procenat krupnog RCA, uzrokovano je relativno širokim rasponom vrednosti parametara koji definišu kvalitet RCA u analiziranim ispitivanjima, kao što su npr. upijanje (3.2%-9.25%) i zapreminska masa zrna ( $2310 \text{ kg/m}^3 - 2640 \text{ kg/m}^3$ ). Rezultati statističke analize za svaku količinu krupnog RCA gde ima veći broj rezultata (20%, 30%, 50%, 60% i 100%) ukazuju da standardna devijacija raste sa porastom učešća RCA u mešavini, slika 5. Standardna devijacija ovde je upotrebljena kao mera rasipanja rezultata, čime je pokazano da sa porastom količine krupnog RCA raste uticaj kvaliteta recikliranog agregata.



Slika 5. Standardna devijacija odnosa čvrstoće pri pritisku RAC i NAC betona u funkciji količine krupnog recikliranog agregata

Ako se kao reprezentativne vrednosti odnosa čvrstoća za gore navedene procenat zamene usvoje srednje vrednosti i izvrši linearna regresiona analiza, dobiće se puna linija prikazana na slici 4 i definisana jednačinom:

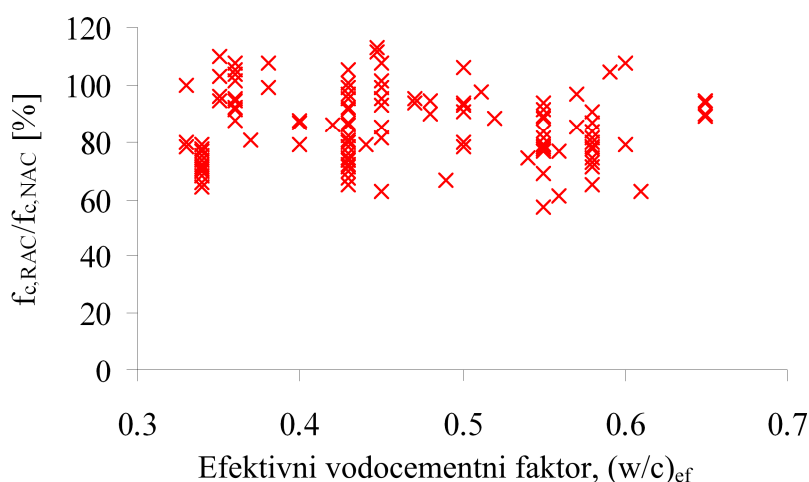
$$\left( \frac{f_{c,RAC}}{f_{c,NAC}} \right)_S = 100.9 - 0.167 \cdot RCA(\%) \quad (1)$$

Ona, dakle, predstavlja prosečnu zavisnost čvrstoća pri pritisku RAC ( $f_{c,RAC}$ ) i uporednog NAC betona ( $f_{c,NAC}$ ) u funkciji količine krupnog recikliranog agregata –  $RCA(\%)$ . Za 50% i 100% krupnog RCA, ordinate iznose 92.55% i 84.2%. Relativno visoka vrednost koeficijenta determinacije ( $R^2=0.912$ ) ukazuje na dobru aproksimaciju srednjih vrednosti datom linijom, sa relativno malom standardnom devijacijom. Ukoliko je, pak, potreban odnos čvrstoća pri pritisku kao računski podatak (npr. prilikom sastavljanja recepture za beton), treba raditi sa karakterističnim vrednostima odnosa čvrstoća, izraz (2):

$$\left( \frac{f_{c,RAC}}{f_{c,NAC}} \right)_K = 96.5 - 0.357 \cdot RCA(\%) \quad (2)$$

One su sračunate (sa fraktilom od 5%) pod pretpostavkom normalne raspodele rezultata (odnosa čvrstoća) u okviru svakog od izabranih procenata zamene. Ova pretpostavka (nulta hipoteza) testirana je putem Kolmogorov-Smirnov testa ([Kottegoda&Rosso, 2008](#)) i pokazano je da se na pragu značajnosti od 5% ova hipoteza ne može odbaciti, tj. da odnosi čvrstoća pri pritisku RAC i NAC betona prate normalnu raspodelu. Linearnom regresijom karakterističnih vrednosti dobijena je isprekidana linija na *slici 4*, sa faktorom determinacije od  $R^2=0.952$ . Ordinate ove linije za 50% i 100% krupnog RCA iznose 78.6% i 60.8%. Dakle, ovom linijom su definisani odnosi čvrstoća RAC i NAC, ispod kojih se može očekivati maksimalno 5% rezultata, za svaki procenat učešća krupnog RCA.

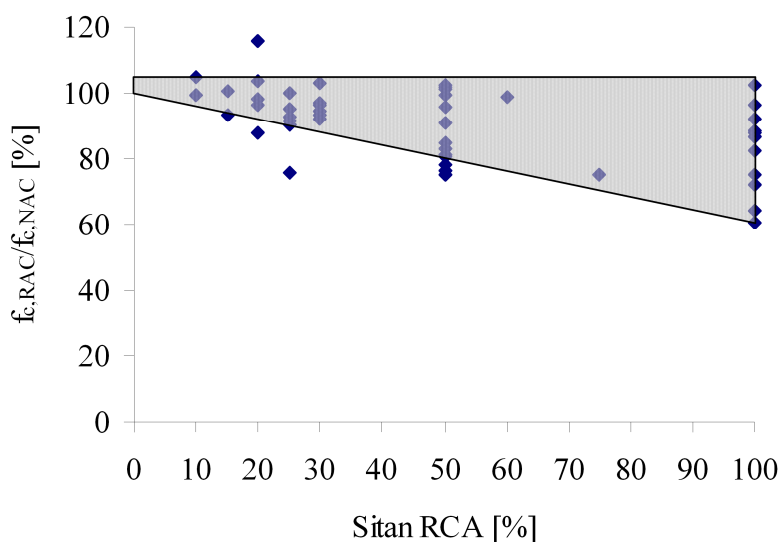
Uticaj efektivnog vodocementnog faktora na odnos čvrstoća pri pritisku RAC100 i NAC betona prikazan je na *slici 6*. Rasipanje rezultata je izuzetno veliko i nije moguće uspostaviti pouzdanu vezu između ovih veličina. Za nekoliko testiranih regresionih krivih, dobijeni su izuzetno niski faktori korelacije. Slično se dobija i za druge procenat zamene prirodnog agregata recikliranim. Činjenica da je za jedan izabrani efektivni vodocementni faktor moguće dobiti veoma različite odnose čvrstoća pri pritisku RAC i uporednog NAC, ponovo naglašava značaj kvaliteta primenjenog recikliranog agregata.



Slika 6. Uticaj efektivnog vodocementnog faktora na odnos čvrstoće pri pritisku RAC100 i NAC betona

Uticaj primene sitne frakcije (0/4 mm) recikliranog agregata u betonskim mešavinama, uz prirodni krupan agregat, može se sagledati na osnovu *slike 7* gde su

prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja i definisana oblast poverenja. Radi poređenja, donja granica ove oblasti ima isti nagib i iste ordinate kao na slici 4.



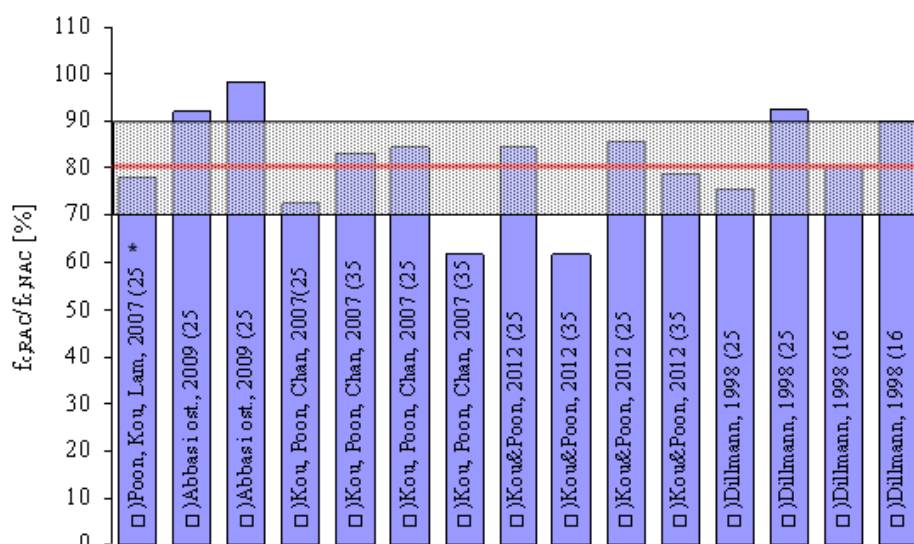
Slika 7. Odnos čvrstoće pri pritisku RAC i NAC betona u funkciji količine sitnog recikliranog agregata

Iako sličnog oblika kao za betone sa samo krupnim RCA, oblast poverenja za betone sa samo sitnim recikliranim agregatom bitno se razlikuje. Prvo, van oblasti je 7 rezultata od ukupno 49 koliko ih je prikazano na dijagramu, dakle oko 15%, što je više od 5% koliko je bilo na slici 4. Praktično svi ti rezultati su sa donje strane definisane oblasti. Očigledno je sa slike 7 da u količini do 50% zamene prirodnog agregata, sitan RCA ima veći negativan efekat, tj. rezultat je veći pad čvrstoće RAC u odnosu na uporedni NAC, nego ako se primeni krupan RCA. Drugo, ne treba zaboraviti da je udeo sitne frakcije u ukupnoj količini agregata na nivou od oko jedne trećine, što znači da se u najboljem slučaju isti pad čvrstoće pri pritisku ostvaruje primenom duplo manje količine RCA, posmatrano u odnosu na ukupnu količinu agregata u mešavini. Treće, sa gornje strane oblast poverenja je ograničena vrednošću od 105%, tj. nezavisno od procenta zamene sitnog prirodnog agregata recikliranim, mogu se očekivati maksimalno do 5% veće čvrstoće pri pritisku RAC betona u odnosu na uporedne NAC. Ipak, treba naglasiti da ograničenost primene betona sa sitnim RCA nije uzrokovana toliko lošim rezultatima čvrstoća pri pritisku, koliko problemima obezbeđivanja potrebne ugradljivosti svežeg betona i sprečavanja pojave izdvajanja vode na površini svežeg betona (engl. *bleeding*).

### 2.2.2.3 Uticaj primene mineralnih dodataka

Kao mineralni dodaci u betonskim mešavinama na bazi recikliranog agregata korišćeni su dominantno silikatna prašina (engl. *silica fume*, *SF*) ([Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2002, 2012](#); [Gonzalez-Fonteboa&Martinez-Abella, 2008, 2009](#); [Malešev i ost. 2012](#); [Corinaldesi&Moriconi, 2009](#)) i leteći pepeo (engl. *fly ash*, *FA*). Procentualno učešće silikatne prašine u navedenim istraživanjima je 8-15% mase cementa, dok je leteći pepeo usvajan u znatno širem opsegu u odnosu na masu cementa. Dominiraju količine zamene cementa letećim pepelom u iznosima od 25% do 35%: 16% ([Dillmann, 1998](#)), 25% ([Dillmann, 1998](#); [Kou&Poon, 2012](#); [Kou i ost. 2007](#); [Abbas i ost., 2009](#); [Poon i ost., 2007](#)), 30% ([Corinaldesi&Moriconi, 2009](#)), 35% ([Kou&Poon, 2012](#); [Kou i ost. 2007](#)) i 50% ([Malešev i ost. 2012](#)).

Na slici 8 prikazan je odnos čvrstoća pri pritisku RAC betona sa 100% krupnog RCA (RAC100) i uporednih NAC betona, sa različitim sadržajem letećeg pepela. Prosečna vrednost odnosa čvrstoća iznosi 81%, što je nešto manje od srednje vrednosti odnosa za betone bez mineralnih dodataka (Slika 4), uz standardnu devijaciju od 10.5%.



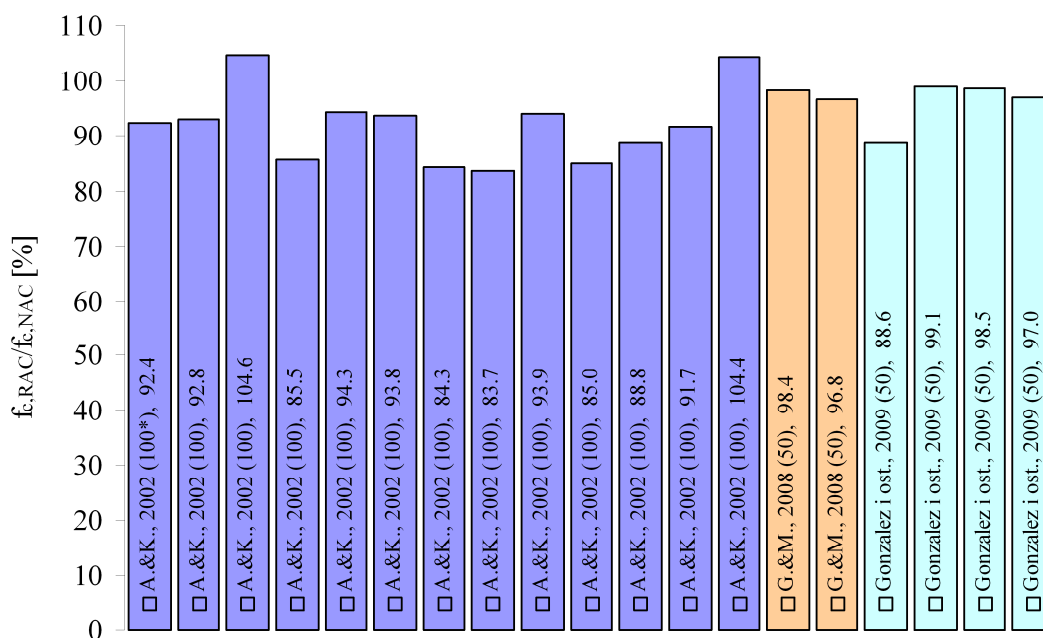
\* U zagradama su data procentualna učešća FA u masi cementa

Slika 8. Odnos čvrstoće pri pritisku RAC100 betona i uporednih NAC betona, spravljenih sa dodatkom letećeg pepela

Ni u jednom istraživanju RAC sa dodatkom FA nisu imali istu ili veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na uporedni NAC. RAC betoni spravljeni sa većom količinom FA, npr. 50%, mogu imati čvrstoću pri pritisku koja je za preko 40% manja od čvrstoće uporednog RAC bez dodataka FA ([Malešev i ost. 2012](#)). [Kou i ost. \(2011\)](#) dobili su da je čvrstoća pri pritisku NAC sa dodatkom 35% FA značajno manja od čvrstoće

uporednog NAC bez dodatka. Isti zaključak dobiili su da važi i kod RAC50 i RAC100 betona. Takođe, [Berndt \(2009\)](#) je sa 50% FA dobio skoro 50% manju čvrstoću, poredeći betone sa prirodnim agregatom. Ipak, u literaturi ima i drugačijih zaključaka- [Corinaldesi&Moriconi \(2009\)](#) su dobili da RAC sa 30% dodatka FA ima veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na uporedni RAC (isti w/c) bez dodatka FA. Dakle, imajući u vidu da primena letećeg pepela kod klasičnih betona može značajno da smanji čvrstoću pri pritisku, kao i da se odnosi čvrstoća betona sa i bez RCA ne popravljaju upotrebom FA, ne može se preporučiti primena letećeg pepela u konstrukcijskim RAC betonima. Naravno, aktivnost letećeg pepela zavisi od njegove granulacije. Ako se koristi u prirodnom stanju, veličina čestica može da bude znatno krupnija od veličine čestica cementa i aktivnost mu je mala, pa u tom slučaju ima ulogu punioca (filera), a ne veziva. S obzirom da analiziranim istraživanjima nije istaknuta bilo kakva dodatna obrada letećeg pepela kojom bi mu se promenila granulacija (npr. mlevenje), zaključak se odnosi na primenu letećeg pepela u prirodnom stanju.

S druge strane, analiza rezultata primene silikatne prašine ukazuje na povoljan efekat koji ovaj mineralni dodatak ima na čvrstoću pri pritisku. Na *slici 9* su prikazani odnosi čvrstoća pri pritisku RAC betona (RAC100 i RAC50) i uporednih NAC, sa dodatkom SF.



\* u zagradama je dat procenat RCA u betonskoj mešavini

Slika 9. Odnos čvrstoće pri pritisku RAC i uporednih NAC betona, spravljenih sa dodatkom silikatne prašine

Srednje vrednosti ovih odnosa iznose 96% i 93% za RAC50 i RAC100 respektivno, što je bolje od odnosa koji su uspostavljeni na osnovu *slike 4*, kod betona bez dodatka SF. Nekoliko istraživanja upućuju da su čvrstoće RAC50 i RAC100 betona veće ukoliko se kod njih primeni dodatak silikatne prašine ([Kou i ost., 2011<sup>a</sup>](#); [Corinaldesi&Moriconi, 2009](#); [Melešev i ost., 2012](#)). Sličan efekat, tj. povećanje čvrstoće kod RAC betona, proizvodi i dodatak meta kaolina ([Kou i ost., 2011<sup>a</sup>](#); [Melešev i ost., 2012](#)). Njegovom primenom kod RAC betona dobijaju se čvrstoće vrslo slične čvrstoćama uporednih NAC betona bez dodataka.

Kontradiktorni rezultati odnose se na primenu zguze iz visokih peći betonima sa RCA. S jedne strane, zamena cementa zgurom u iznosu od 30% do 50% rezultovala je izvesnim povećanjem čvrstoće pri pritisku ([Berntd, 2009](#); [Abbas i ost., 2009](#)), uz izražena pucolanska svojstva, tj. značajnim prirastom čvrstoća nakon 28 dana ([Ann i ost., 2008](#)). U drugom istraživanju, dodatak 55% zguze RAC50 i RAC100 betonima proizveo je isti pad čvrstoće kao 35% letećeg pepela ([Kou i ost., 2011<sup>a</sup>](#)).

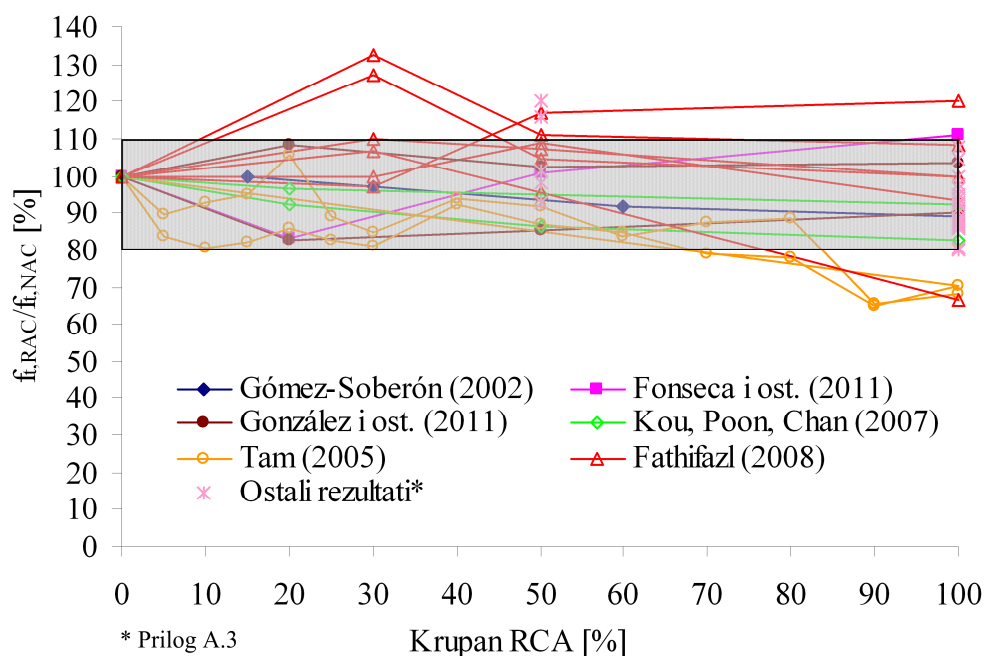
Dodatak, tačnije zamena cementa sa 30% crvene granitne prašine (engl. *red granite dust*) ima isti efekat na NAC i RAC betone- smanjenje čvrstoće pri pritisku za oko 10% ([Abukersh&Fairfield, 2011](#)).

Postoje istraživanja koja analiziraju uticaj raznih vrsta pepela- *municipal solid waste bottom ash* ([Jurić i ost., 2006](#)), *bagasse ash* ([Somna i ost., 2012](#)), *pulverized fuel ash* ([Ann i ost., 2008](#)). U svima su za betone sa recikliranim agregatom dobijene čvrstoće pri pritisku na 28 dana nešto niže u odnosu na uporedne RAC betone bez takvih dodataka.

### 2.2.3. ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU

Prilikom analize čvrstoće pri pritisku betona sa recikliranim agregatom, iz baze podataka izdvojeni su rezultati ispitanih čvrstoća pri zatezanju cepanjem, koji se odnose samo na betone sa krupnim RCA, ispitanim u starosti od 28 dana i koji su negovani na standardni način. Odnosi čvrstoća pri zatezanju cepanjem RAC i uporednih NAC u funkciji procenta zamene prirodnog krupnog agregata recikliranim prikazani su na *slici 10*. Ukupno je analizirano 17 radova i prikazano 107 rezultata. Šrafirana oblast na *slici 10* predstavlja oblast u kojoj se nalazi najveći broj rezultata – oblast poverenja. Van ove

oblasti nalazi se po 5% rezultata sa gornje i donje strane. Ona je pravougaonog oblika, sa ordinatama na 80% i 110%, što znači da se bez obzira na količinu krupnog recikliranog agregata, može očekivati da čvrstoća pri zatezanju cepanjem RAC bude do 20% manja i do 10% veća od čvrstoće uporednog NAC betona.

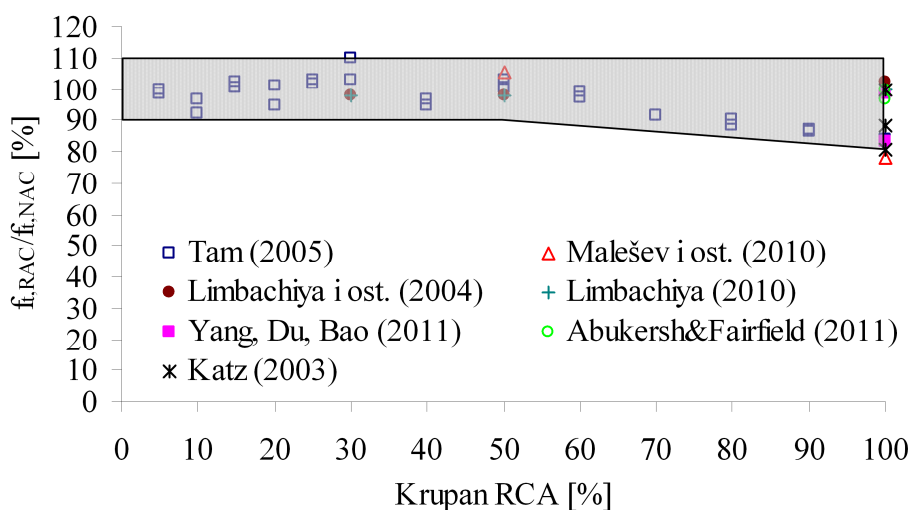


Slika 10. Odnos čvrstoće pri zatezanju cepanjem RAC i uporednih NAC betona u funkciji procenta zamene prirodnog krupnog agregata recikliranim

U prilog ovom zaključku idu i rezultati još nekih istraživanja iz kojih nisu bili dostupni numerički podaci: [Tavakoli&Sosoushian \(1996\)](#)- čvrstoća RAC ista ili veća u odnosu na NAC; [Safiuddin i ost. \(2011\)](#) – bez značajne promene čvrstoće pri zatezanju cepanjem, [Sagoe-Crentsil i ost. \(2001\)](#) - bez redukcije čvrstoće RAC u odnosu na NAC; [Sanchez de Juan& Gutierrez \(2004\)](#) – redukcija čvrstoće RAC od 2% do 10%. Iz ovoga sledi da čvrstoća pri zatezanju ne zavisi dominantno od količine starog cementnog kamena, već od veze zrna agregata (prirodnog i/ili recikliranog) i novog cementnog kamena, odnosno kvaliteta nove kontaktne zone (engl. *interfacial transition zone*). Iako relativno uska (oko 40  $\mu\text{m}$ ), procenjuje se da ova zona čini čak 20% do 40% ukupne zapremine cementne matrice ([Tam&Tam, 2008](#))..

Rezultati iz 7 istraživanja (ukupno 41 numerički podatak) koji se odnose na čvrstoću betona pri zatezanju savijanjem, prikazani su na *slici 11*.. Primetno je relativno malo rasipanje rezultata. Do 50% zamene prirodnog agregata recikliranim, odnosi čvrstoća pri zatezanju savijanjem RAC i NAC betona nalaze se u granicama od  $\pm 10\%$ . Sa

povećanjem količine RCA do 100%, čvrstoća RAC opada za dodatnih 10% u odnosu na NAC. Izvan oblasti ostao je jedan rezultat. U ovako definisanu oblast poverenja uklapaju se i zaključci [Grdića i ost. \(2010\)](#) – do 14% manje čvrstoće za RAC100 i [Safiuddin i ost. \(2011\)](#) – bez značajne promene čvrstoće pri zatezanju savijanjem pri upotrebi 100% krupnog RCA.



Slika 11. Odnos čvrstoće pri zatezanju savijanjem RAC i uporednih NAC betona u funkciji procenta zamene prirodnog krupnog agregata recikliranim

Primena silikatne prašine kao mineralnog dodatka cementu kod RAC i uporednog NAC, rezultovala je odnosima čvrstoća pri zatezanju cepanjem koji se uklapaju u oblast poverenja na slici 10.. Kod betona sa 50% RCA odnos čvrstoća je 88% ([González-Fonteboá&Martinez-Abella, 2008](#)), a kod betona sa 100% odnos čvrstoća je 86% ([Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2002](#)) i 83% ([Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2012](#)). S obzirom da je oblast poverenja relativno široka i pokriva odnose čvrstoća od 30%, efekat dodavanja silikatne prašine testiran je kroz odnos čvrstoća pri zatezanju RAC betona sa i bez dodatka. Kod RAC100, [Ajdukiewicz&Kliszczewicz \(2002\)](#) su dobili povećanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem od čak 30%, [Kou i ost. \(2011\)](#) oko 20%, dok u istraživanju [Malešev i ost. \(2012\)](#) nije bilo promene u čvrstoći.

Sa dodatkom 15% meta kaolina, zabeleženo je povećanje čvrstoće RAC betona od 10% ([Malešev i ost., 2012](#)) i oko 15% ([Kou i ost. 2011](#)).

Dodavanje letećeg pepela i zgure iz visokih peći imalo je različiti efekat na čvrstoću pri zatezanju u različitim istraživanjima sumarno prikazanim u tabeli 1. Očigledno, poboljšanja čvrstoće pri zatezanju praktično nema, štaviše, u nekim istraživanjima su zabeležena vrlo značajna smanjenja.



Tabela 1. Uticaj dodatka FA i BFS na čvrstoću pri zatezanju RAC betona

| Istraživanje               | Oznaka betona | leteći pepeo, FA [%] |       |     | zgura, BFS [%] |     |       |
|----------------------------|---------------|----------------------|-------|-----|----------------|-----|-------|
|                            |               | 25                   | 30-35 | 50  | 35             | 50  | 65-70 |
| Kou, Poon, Chan (2007)     | RAC20         | ≈0                   | 16↓   | -   | -              | -   | -     |
|                            | RAC50         | ≈0                   | 22↓   | -   | -              | -   | -     |
|                            | RAC100        | 13↓                  | 20↓   | -   | -              | -   | -     |
| Kou, Poon, Argela (2011)   | RAC50         | -                    | ≈10↓  | -   | ≈2↓            | ≈0  | -     |
|                            | RAC100        | -                    | ≈0    | -   | -              | -   | -     |
| Malešev i ost. (2012)      | RAC100        | -                    | -     | 42↓ | -              | -   | -     |
| Tangchirapat i ost. (2010) | RAC50         | -                    | ≈0    | ≈0  | -              | -   | -     |
|                            | RAC100        | -                    | ≈0    | ≈0  | -              | -   | -     |
| Ann i ost. (2008)          | RAC100        | -                    | ≈4↓   | -   | -              | -   | ≈4↓   |
| Berndt (2009)              | RAC100        | -                    | -     | -   | -              | 17↑ | 3↓    |

#### 2.2.4. MODUL ELASTIČNOSTI

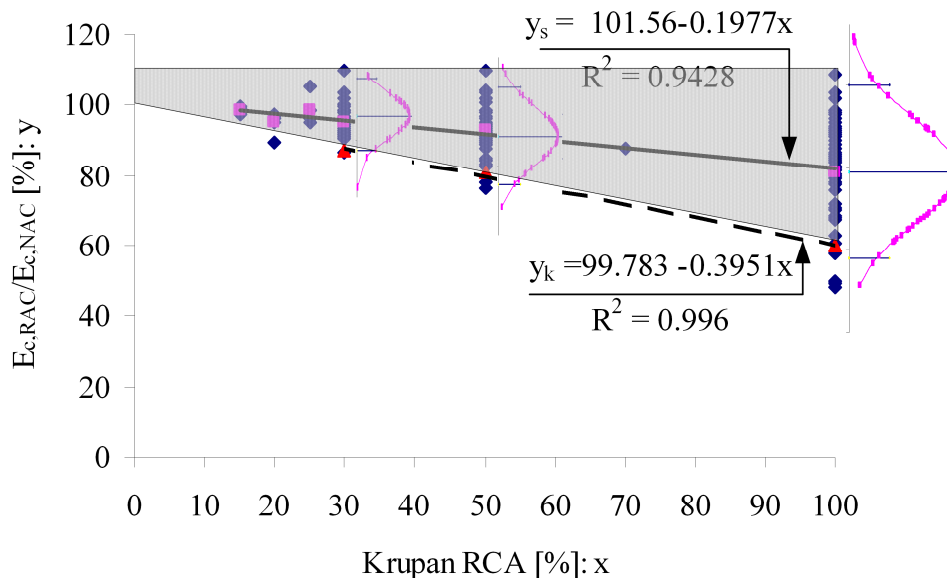
Odnos modula elastičnosti betona sa recikliranim agregatom i uporednog NAC betona, u funkciji količine krupnog recikliranog agregata prikazani su na slici 12. Ukupno je analizirano 27 radova sa 167 numeričkih podataka. Oblast poverenja koja uključuje 95% rezultata definisana je ordinatama od 80% i 60% za količinu RCA od 50% i 100% respektivno. Gornja granica oblasti je konstantna na 110%, dakle, bez obzira na procenat zamene maksimalne očekivane vrednosti modula elastičnosti RAC mogu biti do 10% veće od modula uporednog NAC. Statistička analiza upućuje da se rezultati odnosa modula elastičnosti, kao i kod čvrstoće pri pritisku, mogu predstaviti normalnom raspodelom, za procenat zamene RCA od 30%, 50% i 100%. U sva tri slučaja zadovoljen je uslov Kolmogovor-Smirnov testa ([Kottegoda&Rosso, 2008](#)). Srednje vrednosti za izabrane procenat zamene iznose 95%, 93% i 81%, a karakteristične 87%, 81% i 60%, respektivno. Linearnom regresijom srednjih i karakterističnih vrednosti dobijene su linije funkcija srednjih i karakterističnih vrednosti odnosa modula elastičnosti, jednačine (3) i (4).

$$\left( \frac{E_{c,RAC}}{E_{c,NAC}} \right)_S = 101.6 - 0.198 \cdot RCA(\%) \quad (3)$$

$$\left( \frac{E_{c,RAC}}{E_{c,NAC}} \right)_K = 99.78 - 0.395 \cdot RCA(\%) \quad (4)$$

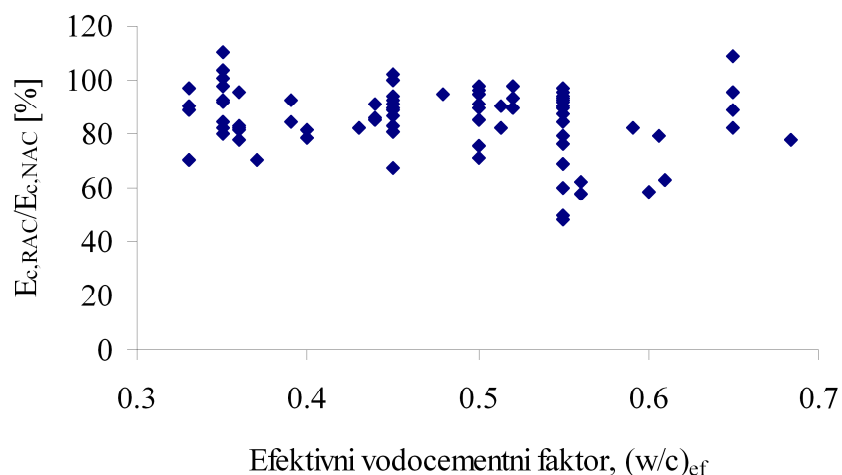
U oba slučaja relativno visoki koeficijenti determinacije ukazuju na relativno male standardne devijacije u odnosu na regresionu liniju. Primenjujući dobijene izraze na

procente krupnog RCA od 50% i 100%, dobija se prosečan pad modula elastičnosti od 8.3% i 18.2%, odnosno karakteristične vrednosti odnosa od 80% i 60.3% respektivno. Trend smanjivanja modula elastičnosti RAC sa porastom količine RCA koji se može uočiti na slici 12 direktno je povezan sa količinom starog cementnog kamena u zrnju recikliranog agregata. Cementni kamen u zrnju RCA najčešće ima značajno niži modul elastičnosti u odnosu na zrno prirodnog agregata sa kojim je povezan.



Slika 12. Odnos modula elastičnosti RAC i uporednih NAC betona u funkciji procenta zamene prirodnog krupnog agregata recikliranim

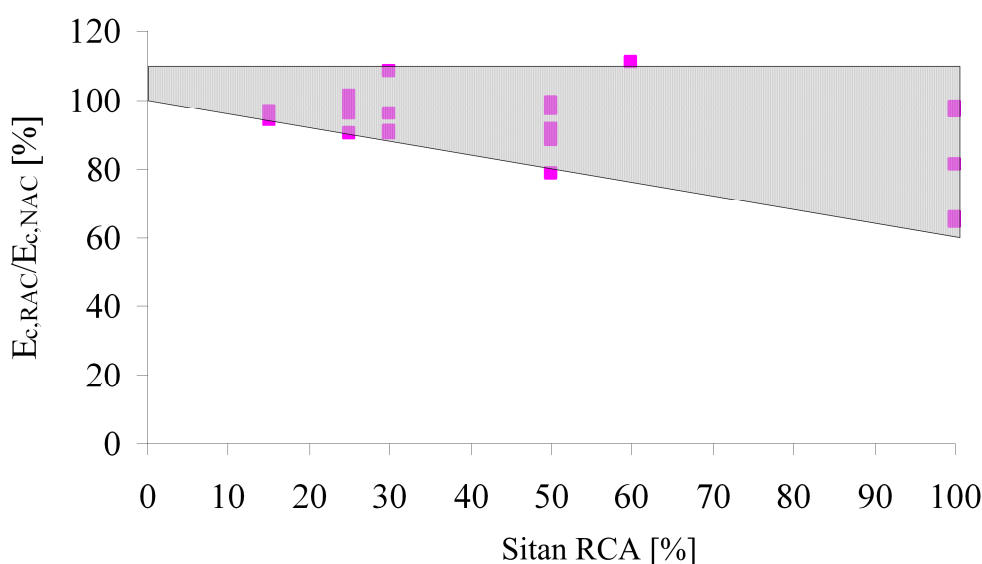
Odnos modula elastičnosti betona sa recikliranim agregatom (različiti procenti krupnog RCA) i uporednog NAC betona u funkciji vodocementnog faktora prikazan je na slici 13.



Slika 13. Odnos modula elastičnosti RAC i uporednih NAC betona u funkciji efektivnog vodocementnog faktora

Ne može se uspostaviti neka očigledna zavisnost ovih veličina, tj. može se reći da, globalno posmatrano, odnos modula elastičnosti RAC i NAC ne zavisi od primenjenog vodocementnog faktora.

Na slici 14 prikazana je zavisnost odnosa modula elastičnosti RAC i uporednih NAC u funkciji količine sitnog RCA. Očigledno je da se rezultati dobro uklapaju u oblast poverenja definisanu na isti način kao kod razmatranja uticaja krupnog agregata, slika 12. Dakle, primena sitne frakcije RCA ne dovodi do većeg pada modula elastičnosti nego što je to kod primene krupnog RCA, ali isti efekat, tj. pad ostvaruje se sa značajno manjom količinom RCA u odnosu na ukupnu količinu agregata u mešavini.



Slika 14. Odnos modula elastičnosti RAC i uporednih NAC betona u funkciji procenta zamene prirodnog sitnog agregata recikliranim

Dodatak silikatne prašine u iznosu 8%-10% ne uzrokuje bitnu promenu modula elastičnosti RAC betona – smanjenje od 3%-4% utvrdili su [Malešev i ost. \(2012\)](#) i [Gonzalez&Martinez \(2008\)](#). U radu [Ajdukiewicz&Kliszczewicz \(2002\)](#) može se naći prosečno povećanje modula od 16%, ali RAC sa dodatkom silikatne prašine imao je značajno niži vodocementni faktor od RAC bez dodatka, tako da ovo povećanje modula pre treba pripisati nižem w/c nego efektu dodatka SF. [Corinaldesi&Moriconi \(2009\)](#) su dobili povećanje tangentnog modula elastičnosti za oko 25%. Primena meta kaolina nije dovela do promene modula elastičnosti RAC ([Malešev i ost., 2012](#)).

[Kou i ost. \(2007\)](#) zaključili su da kod RAC sa istim procentom RCA modul elastičnosti opada sa povećanjem količine letećeg pepela. Smanjenje modula elastičnosti RAC100 od 17%-25% pri primeni FA od 50% prijavili su [Malešev i ost. \(2012\)](#).

### 2.2.5. ČVRSTOĆA PRIANJANJA BETONA I ARMATURE

Jedan od osnovnih parametara koji definišu efikasnost armiranog betona kao materijala za izvođenje konstrukcija je sadejstvo između betona i armature, tj. mogućnost prenosa sile iz jednog u drugi materijal. Zato je od suštinske važnosti istražiti funkcionisanje veze armatura-beton u slučaju betona od recikliranog agregata, tj. ispitati čvrstoću (napon) prijanjanja RAC i armature (engl. *bond stress*). Računski podatak koji proističe iz ponašanja ove veze je dužina sidrenja armature u RAC elementima konstrukcije. U zavisnosti od veličine aplicirane sile kojom se “vuče” šipka armature, postoji nekoliko različitih faza interakcije između betona i armaturene šipke ([Xiao&Falkner, 2007](#)):

- Nema klizanja između šipke i betona, prijanjanje je obezbeđeno hemijskom adhezijom,
- Narušena hemijska adhezija, početak klizanja armaturene šipke, pojava poprečnih prslina u betonu,
- Klizanje između armature i betona se značajno povećava, pojava podužnih prslina u betonu; čvrstoća prijanjanja je obezbeđena “interlocking” efektom između armature, poprečnom armaturom utegnutog betona i neoštećenim spoljnim betonskim prstenom,
- Dostizanje maksimalne čvrstoće prijanjanja nakon čega vrednost značajno opada, klizanje se povećava dok se šipka armature potpuno ne iščupa iz betona.

Analiza literature obuhvatila je sledeće radove: Ajdukiewicz&Kliszczewicz (2002), Xiao&Falkner (2007), Reis i ost. (2009), Malešev i ost. (2006), Butler i ost. (2011), Fathifazl (2008), Roos (1998) i Yagishita i ost. (1994). Ispitivanje veze armatura-beton obično se vrši preko testa izvlačenja (engl. *pull out*) i u pomenutim radovima uglavnom je korišćen RILEM standard (RILEM TC, 1983), osim u radu Xiao&Falkner (2007) koji su koristili Kineski standard za to ispitivanje. U dva istraživanja primenjen je drugačiji test za ispitivanje veze, korišćeni su uzorci koji simuliraju kraj grednog elementa, tzv. *beam-end bond* test (Butler i ost., 2011; Fathifazl, 2008).

[Ajdukiewicz&Kliszczewicz \(2002\)](#) su prema stepenu uticaja na veličinu napona prijanjanja,  $\tau_b$ , parametre rangirali sledećim redom: vrsta armature (glatka ili rebrasta),

sadržaj silikatne prašine u betonskoj mešavini i vrsta betona. Više nego 2.5 puta veći napon dobijen je primenom rebraste armature ( $f_y=410$  MPa) u odnosu na glatku armaturu ( $f_y=220$  MPa). Dodatak silikatne prašine (10% mase cementa) doneo je povećanje napona za oko 20% bez obzira na vrstu betona (NAC ili RAC). U odnosu na uporedni NAC, RAC sa 100% krupnog RCA imali su za oko 8% manji napon, dok je kod betona sa potpuno recikliranim agregatom zabeležen pad od oko 20%. Uzimajući u obzir i čvrstoću betona pri pritisku, tj. poredeći normalizovanu vrednost napona,  $\tau_b/\sqrt{f_c'}$  (gde je  $f_c'$  čvrstoća betona pri pritisku), dobija se pad napona kod RAC100 od 23,5% i 6% za glatku i rebrastu armaturu respektivno.

[Yagishita, Sano, Yamada \(1994\)](#) analizirali su uticaj nekoliko parametara uključujući vrstu RCA, čvrstoću betona, pravac ugrađivanja betona i debljinu zaštitnog sloja. Razlika u naponu pri lomu proklizavanjem između RAC i NAC betona opada sa povećanjem vodocementnog faktora i za betone sa relativno visokim odnosom w/c ( $w/c=0,61$ ) praktično nema uticaja RCA, pretpostavlja se zbog boljeg kvaliteta novog cementnog maltera u odnosu na stari cementni malter u zrnju recikliranog agregata. Kod svih betona, napon je za oko 30-50% manji ukoliko se debljina zaštitnog sloja smanji sa 8 cm na 4 cm, ali ovaj zaključak i nema naročiti praktični značaj.

Ispitujući vezu armature i različitih betona (NAC, RAC50, RAC100) , [Xiao&Falkner \(2007\)](#) su zaključili da u slučaju primene rebraste armature, uticaj količine krupnog RCA u mešavinama praktično ne postoji. Uzorci od betona RAC50 i RAC100, sa glatkom armaturom, imali su za 12% i 6% respektivno manji napon prijanjanja. Ipak, kada se uporede normalizovani naponi,  $\tau_b/\sqrt{f_c'}$ , RAC50 imali su za 7.4% manji i 4.2% veći, a RAC100 betoni za 5.2% i 12% veći normalizovani napon za glatku i rebrastu armaturu respektivno. Utvrđen je sličan rad veze čelik-beton kod RAC i NAC betona, tj. slična pomeranja (proklizavanja) pri povećanju sile.

[Reis, Leite, Lima \(2009\)](#) istakli su značaj prečnika profila armature za funkcionisanje veze sa betonom, analizirajući uzorke od običnog betona i betone sa 25% i 50% sitne frakcije RCA. U slučaju profila  $\varnothing 10$  redukcija napona prijanjanja kod RAC betona u odnosu na NAC bila je do 10%, a sa profilom  $\varnothing 16$  redukcija je iznosila do 30%.

Normalizacijom napona  $\tau_b$  sa čvrstoćom pri pritisku primenjenih betona (NAC, RAC100 i RAC sa kompletno recikliranim agregatom), tj. poređenjem vrednosti  $\tau_b/f_c'$ , [Roos \(1998\)](#) je zaključio da su granični naponi prijanjanja vrlo slični. Ipak, pri nižim

nivoima naprezanja, pri istim vrednostima normalizovanog napona, uzorci od obe vrste RAC betona imali su veća proklizavanja u odnosu na uporedni NAC.

[Malešev i ost. \(2006\)](#) su zaključili da razlika između najmanje i najveće vrednosti čvrstoće prijanjanja kod ispitivanih betona (0, 50, 100% RCA) i armature iznosi oko 10%, nezavisno od vrste armature.

[Butler, West, Tighe \(2011\)](#) analizirali su uticaj kvaliteta dve vrste recikliranog agregata na vezu RAC betona i armature. U oba slučaja, normalizovani napon  $\tau_b/\sqrt{f_c}$  bio je veći kod NAC u poređenju sa RAC betonom, od 10% do 20%, zavisno od dužine sidrenja šipke i projektovane čvrstoće pri pritisku betona. Sugerisana je dobra korelacija, tačnije linearna zavisnost između drobljivosti agregata i normalizovanog napona prijanjanja, koja važi za različite vrste betona (NAC ili RAC) i dužine sidrenja. Pri tome, manja drobljivost agregata znači veći normalizovani napon.

[Fathifazl \(2008\)](#) je analizirao uticaj vrste recikliranog agregata, načina projektovanja sastava RAC betona (klasičan postupak ili metoda ekvivalentne zapremine cementnog kamena), vrste betona (NAC i RAC) i prečnika armature ( $\emptyset 15$  i  $\emptyset 30$ ) na čvrstoću prijanjanja betona i armature. Zaključak je da najveći uticaj ima prečnik armature, da manjem prečniku odgovara veća vrednost normalizovanog graničnog napona. U okviru grupe uzoraka sa istim prečnikom armature, sve vrednosti normalizovanog graničnog napona su slične bez obzira na vrstu RCA, vrstu betona ili način projektovanja sastava.

Iz prethodnog se može zaključiti da se veza armatura-beton u testovima izvlačenja čeličnog profila iz betonskog uzorka ponaša na sličan način kod NAC i RAC betona. U slučaju glatke armature čvrstoća prijanjanja dominantno je uslovljena adhezijom betona i armature, koja, kako je pokazano, opada sa porastom količine recikliranog agregata. U slučaju primene rebraste armature, čvrstoća prijanjanja je prvenstveno određena mehaničkim sidrenjem armature u beton (engl. *mechanical interlocking*, Taylor, 1983) koje ne zavisi bitno od sadržaja RCA u betonu. Dakle, ukoliko je greda napravljena od betona sa krupnim RCA, dužina sidrenja armatre će biti slična kao kod grede od NAC iste čvrstoće pri pritisku. Generalno, zaključak svih istraživanja je da između RAC i NAC betona suštinske razlike u gore pobrajanim fazama interakcije između betona i armature ne postoje.

#### 2.2.6. NAPONSKO-DEFORMACIJSKI DIJAGRAM

Za proračun i dimenzionisanje, kao i nelinearnu analizu elemenata konstrukcije od RAC betona, neophodno je poznavanje stvarnog naponsko-deformacijskog dijagrama RAC betona. Nažalost, postoji svega nekoliko istraživanja (dostupnih) sa eksperimentalnim podacima i odgovarajućim zaključcima- [Ajdukiewicz&Kliszczewicz \(2002\)](#), [Xiao i ost. \(2005\)](#), [Fathifazl \(2008\)](#), [Gonzalez i ost. \(2011\)](#).

Glavni parametri koji definišu oblik naponsko-deformacijskog dijagrama betona su: početni, linearni nagib uzlazne grane dijagrama (modul elastičnosti), nelinearni deo uzlazne grane, dilatacija pri maksimalnom naponu, nagib silazne grane i granična dilatacija (dilatacija pri lomu). U svim pomenutim radovima postoji saglasnost po pitanju uzlaznog dela dijagrama – u poređenju sa NAC, nagib početnog, linarnog dela dijagrama je manji kod RAC betona i opada sa povećanjem količine RCA. To znači da je modul elastičnosti RAC betona manji nego kod NAC i opada sa povećanjem količine RCA, što je u saglasnosti sa nalazima u poglavlju 2.2.4. Kontaktne zone, stara i nova, između zrna prirodnog agregata i starog cementnog kamena i između zrna recikliranog agregata i novog cementnog kamena, najslabije su karike u trofaznom sistemu kakav je RAC beton. U tim zonama dolazi do razvoja prvih mikroprslina sa porastom opterećenja. To znači da sa povećanjem količine RCA raste ukupna količina (zapremina) kontaktne zone, a to znači i veći broj mikroprslina. Na kraju, više mikroprslina znači i veće dilatacije za istu vrednost napona. Takođe, postoji saglasnost da su dilatacije pri maksimalnom naponu veće kod RAC nego kod uporednih NAC i da razlike rastu sa povećanjem količine RCA. Za RAC100 utvrđeno je povećanje te dilatacije za oko 20% u odnosu na uporedne NAC ([Xiao i ost., 2005](#); [Gonzalez i ost., 2011](#)). Što se tiče silazne grane naponsko-deformacijskog dijagrama, zaključci su različiti. [Xiao i ost. \(2005\)](#) su utvrdili značajno strmiji nagib silazne grane RAC u odnosu na NAC, a pad raste sa povećanjem količine RCA agregata. Sasvim suprotno, zaključci [Gonzalez i ost. \(2011\)](#) i [Fathifazl \(2008\)](#) ukazuju da sa povećanjem količine RCA opada nagib silazne grane naponsko-deformacijskog dijagrama. U skladu sa prethodnim su i zaključci vezani za vrednosti graničnih dilatacija i duktilnost. Dilatacije pri lomu su veće kod NAC ([Xiao i ost., 2005](#)), ili su veće kod RAC ([Fathifazl, 2008](#); [Gonzalez i ost., 2011](#)). Manji nagib opadajuće grane i veće razlike u graničnim dilatacijama (u odnosu na NAC) nego u dilatacijama pri maksimalnom naponu kod

RAC znače i njegovu veću duktilnost. [Ajdukiewicz&Kliszczewicz \(2002\)](#) nisu uspjeli da izvrše merenja kojim bi se formirao opadajući deo dijagrama. Razlike u obliku silazne grane  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama u različitim isptivanjima mogu se objasniti i različitim tipovima uređaja koji su korišćeni tom prilikom. Krutost sistema za ispitivanje mora biti dovoljno velika da obezbedi da oslobođena energija iz uređaja kada sila opada (nakon dostizanja maksimalne sile) bude manja od one koju uzorak može da absorbuje ([Gettu i ost., 1996](#)). U protivnom, dolazi do naglog loma uzorka i praktično vertikalne opadajuće grane  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama.

### 2.2.7. ZAKLJUČAK

Na osnovu prethodno iznetih analiza o fizičko-mehaničkim svojstvima betona sa i bez recikliranog agregata, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Čvrstoća pri pritisku RAC betona zavisi od čvrstoće pri pritisku originalnog betona - ukoliko je čvrstoća originalnog betona veća ili ista od ciljane čvrstoće novog RAC, tada će čvrstoća betona na bazi recikliranog agregata biti ista ili veća od čvrstoće uporednog NAC betona,
- Uticaj kvaliteta originalnog betona opada sa povećanjem efektivnog vodocementnog faktora novog betona, tj. sa snižavanjem zahtevane marke RAC betona - čvrstoća pri pritisku RAC spravljenog sa relativno visokim vodocementnim faktorom (većim od 0.55), praktično ne zavisi od čvrstoće pri pritisku originalnog betona,
- RAC betoni sa 100% krupnog recikliranog agregata imaju prosečno za 16%, a RAC sa 50% zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim prosečno za 8% nižu čvrstoću pri pritisku, u odnosu na uporedni NAC,
- Karakteristična vrednost odnosa čvrstoća pri pritisku RAC i NAC, sa 5% fraktila, iznose 78.6% i 60.8%, za betone sa 50% i 100% krupnog RCA respektivno,
- Maksimalna vrednost odnosa čvrstoća pri pritisku RAC i uporednog NAC betona, bez obzira na procenat zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim, iznosi 120%, tj. gornja, maksimalna očekivana vrednost čvrstoće pri pritisku RAC betona u odnosu na čvrstoću pri pritisku uporednog NAC, veća je do 20% bez obzira na procenat zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim,



- Zamena cementa silikatnom prašinom u betonskim mešavinama, u iznosu od 10%, dovodi do povećanja čvrstoće pri pritisku RAC i povećanja prosečnog odnosa čvrstoća RAC i uporednog NAC,
- Primena mineralnih dodataka tipa letećeg pepela ili zgure ne doprinosi povećanju čvrstoće pri pritisku RAC betona,
- Očekivana vrednost odnosa čvrstoća pri zatezanju cepanjem RAC i uporednog NAC je između 0.8 i 1.1, bez obzira na količinu krupnog recikliranog agregata, tj. očekivana vrednost čvrstoće pri zatezanju cepanjem je do 20% manja i do 10% veća od čvrstoće pri zatezanju cepanjem uporednih NAC, bez obzira na količinu krupnog recikliranog agregata,
- U slučajevima zamene prirodnog krupnog agregata recikliranim do 50%, odnosi čvrstoća pri zatezanju savijanjem RAC i NAC betona nalaze se u granicama od  $\pm 10\%$ ; sa povećanjem količine RCA do 100%, čvrstoća RAC opada za dodatnih 10% u odnosu na NAC,
- RAC betoni sa 100% krupnog recikliranog agregata imaju prosečno za 18.2%, a RAC sa 50% zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim prosečno za 8.3% manji modul elastičnosti, u odnosu na uporedni NAC,
- Karakteristična vrednost osnosa modula elastičnosti RAC i NAC, sa 5% fraktila, iznose 80% i 60,3%, za betone sa 50% i 100% krupnog RCA respektivno,
- Čvrstoća prijanjanja betona sa recikliranim agregatom i armature dominantno zavisi od tipa armature (glatka ili rebrasta), a mnogo manje od tipa i količine recikliranog agregata; dužina sidrenja rebraste armature u RAC100 betonu ista je kao kod NAC betona iste čvrstoće pri pritisku,
- U odnosu na uporedni NAC, naponsko-deformacijski dijagram betona sa recikliranim agregatom karakteriše blaži nagib uzlazne grane i do 20% veća dilatacija pri maksimalnom naponu,
- Nagib silazne grane naponsko-deformacijskog dijagrama RAC, vrednosti dilatacija pri lomu i duktilnost RAC do sada nisu nedvosmisleno utvrđeni zbog relativno malog broja eksperimentalnih ispitivanja i uticaja merne opreme.

## 2.3 PONAŠANJE ELEMENATA KONSTRUKCIJA NAPRAVLJENIH OD BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

### 2.3.1. ISPITIVANJA PONAŠANJA ARMIRANOBETONSKIH RAC GREDA NA SAVIJANJE

Ispitivanje ponašanja greda izloženih savijanju i smicanju, pri statičkom i dinamičkom opterećenju obavili su [Yagishita i ost. \(1994\)](#). Oni su koristili reciklirani krupni agregat različitog kvaliteta koji je bio uslovljen načinom proizvodnje. Kvalitet primenjenog agregata može se kvantifikovati parom podataka koji označavaju specifičnu zapreminsku masu (u  $\text{kg/m}^3$ ) i upijanje (u %) – 2620, 1.29; 2560, 2.22; 2490, 3.64 i označiti sa  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ , respektivno. Vodocementni faktori tri betona sa agregatima  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  i betona bez recikliranog agregata bili su različiti. Čvrstoće pri pritisku betona sa RC agregatom bile su od 3% do 10% manje od čvrstoća uporednog NAC betona, dok su čvrstoće pri zatezanju kod svih betona bile praktično iste. Grede su bile dužine 1.5 m, a dimenzije poprečnog preseka 12/18 cm, armirane sa  $2\text{Ø}13$ . Moment savijanja pri pojavi prslina kod grede sa  $R_3$  agregatom bio je za oko 20% manji u poređenju sa gredom od običnog betona, dok su druge dve grede sa recikliranim agregatom  $R_1$  i  $R_2$  imale za 6% manji i 6% veći moment savijanja pri pojavi prsline u odnosu na referentnu gredu. Oblici dijagrama sila-pomeranje kod greda sa i bez RC agregata koje su operećivane i rasterećivane nekoliko puta, bili su praktično isti. Na osnovu dijagrama moment-krivina zaključeno je da je krutost na savijanje grede sa  $R_3$  agregatom manja od ostalih. Pri statičkom ispitivanju ponašanja na savijanje, nisu uočene bitne razlike između greda od NAC i RAC100 betona u pogledu stanja prslina pri eksploatacionom opterećenju, niti u vrednostima graničnih nosivosti. Razlika između ovih veličina kod različitih greda nije bilo ni nakon 300000 ciklusa opterećenje-rasterećenje, tj. pri ispitivanju na zamor.

Obimno eksperimentalno ispitivanje greda napravljenih od RAC betona, izloženih kratkotrajnom opterećenju, obavljeno je na Hirošima Univerzitetu ([Sato i ost. 2007](#)). Serije uzoraka razlikovale su se prema procentu armiranja greda podužnom armaturom – 0.59%, 1.06% i 1.65%, a parametar koji je variran u okviru jedne serije bio je vrsta betona, tj. količina prirodnog agregata zamenjenog recikliranim - beton od prirodnog agregata (NAC), beton sa krupnim recikliranim agregatom (RAC), beton sa kompletno recikliranim agregatom, dakle i krupni i sitni (CFR) i beton sa recikliranim sitnim agregatom (FR). Betoni su spravljeni po principu jednakih efektivnih vodocementnih

faktora. Grede su bile raspona 2.2 m, poprečnog preseka 15/20 cm, opterećene koncentrisanim silama u trećinama raspona i ispitivane u različitim starostima, između 41. i 142. dana. Razlika u čvrstoćama pri pritisku između betona sa RC agregatom i NAC betona rasle su sa porastom sadržaja recikliranog agregata u betonu, pri čemu su veće čvrstoće imali NAC betoni. Ugibi greda pri eksploatacionom nivou opterećenja bili su veći kod greda sa recikliranim agregatima u odnosu na uporednu NAC greda, a kao razlog se navodi manji modul elastičnosti betona sa RC agregatom. Za procenu veličine ugiba greda u eksploataciji, nezavisno od količine RC agregata u betonu, sugerisana je primena Bransonovog izraza ([Sato i ost. 2007](#)), dok je za veće nivoe opterećenja ovaj izraz dao niže vrednosti od izmerenih. Ovo je objašnjeno slabijom adhezijom čelik-beton kod betona sa recikliranim agregatom. Zaključeno je da količina i vrsta recikliranog agregata nemaju uticaja na srednje rastojanje prslina, dok širina prslina raste sa povećanjem udela RC agregata u mešavini i može biti veća do 30% kod greda od RAC, odnosno do 70% kod greda od CFRC betona. Takođe je zaključeno da između greda od betona sa različitim sadržajem RC agregata nema razlika u duktilnosti, kao meri odnosa ugiba pri lomu i ugiba na granici tečenja. Granični momenti kod svih greda sa istim procentom armiranja i od betona sa jednakim efektivnim vodocementnim faktorom, ne zavise od količine i vrste RC agregata. Granični momenti praktično su isti ukoliko se obezbedi da lom bude duktilan, nastao nakon velikih izduženja armature.

Još jedno izuzetno vredno ispitivanje delo je poljskih istraživača ([Ajdukiewicz & Kliszczewicz 2007](#)), izvršeno sa ciljem da se utvrdi razlika u ponašanju greda od NAC i RAC betona, spravljenih sa različitim vrstama prirodnog i recikliranog agregata. Serije elemenata za ispitivanje napravljene su od tri vrste betona- sa prirodnim (NAC), krupnim recikliranim (RAC) i kompletno recikliranim agregatom (CFR). Sva tri betona spravljeni su sa istim efektivnim vodocementnim faktorom od 0.49 ili 0.36. Takođe, variran je procenat armiranja podužnom armaturom u iznosima od 0.87% i 1.55%, tako da je jedna serija definisana vrstom (količinom) recikliranog, odnosno prirodnog agregata, vodocementnim faktorom i procentom armiranja. Dispozicija eksperimenta je bila ista kao u prethodno pomenutom eksperimentu, sa nešto drugačijim dimenzijama elemenata - raspon 2.4 m, poprečni presek greda  $b/d = 20/30$  cm. Rezultati pokazuju da su nosivosti RAC greda u proseku za oko 2.2% manje od nosivosti grede od NAC betona iz iste serije, dok je nešto veći prosečni pad od 2.9% registrovan kod greda od

CFR betona. Vrsta loma za sve tri grede iz jedne serije je ista- grede sa manjim procentom armiranja imale su tipičan duktilan lom usled savijanja sa relativno malim oštećenjem pritisnutog betona, dok su jače armirane grede pokazale krte smičući oblik loma. Prve prsline javljale su se nešto ranije kod RAC greda, ali generalno posmatrano grede iz iste serije imale su veoma slične slike prsline. Ugibi pri eksploatacionom opterećenju su kod betona sa krupnim RC agregatom u proseku za oko 10% veći od ugiba odgovarajuće NAC grede. Negativni uticaj sitne frakcije recikliranog agregata ogledao se kroz prosečno 30% veće ugibe greda od CFR betona u poređenju sa ugibima uporedne NAC grede.

Najnovije eksperimentalno istraživanje ponašanja armiranobetonskih greda od recikliranog agregata izloženih savijanju i smicanju, obavljeno je u Kanadi ([Fathifazl 2008](#)). Projektni sastav recikliranog betona određen je na osnovu sopstvene metode – izjednačavanjem količine (zapremine) cementnog maltera u betonu sa prirodnim agregatom sa ukupnom količinom starog i novog cementnog maltera u betonu sa recikliranim agregatom (engl. *Equivalent Mortar Volume*, EMV). Serije elemenata za ispitivanje napravljene su od dve vrste recikliranog i dve vrste prirodnog agregata. Svi analizirani betoni su spravljani sa prirodnom sitnom frakcijom – peskom, a procentualno učešće krupnog RC agregata u mešavini bio je 63.5% i 74.3%. Sve betonske mešavine imale su isti efektivni vodocementni faktor, ali različitu količinu cementa, a kao rezultat proistekle su različite čvrstoće pri pritisku betona sa i bez RC agregata. Eksperiment savijanja greda obavljen je na gredama slobodno oslonjenim na krajevima, širine poprečnog preseka  $b=20$  cm i visine od 35 do 39 cm. Čist raspon greda između oslonaca bio je 2.2 m, a odnos smičućeg raspona i statičke visine preseka bio je 2.7. Osim vrste betona, parametar u analizi bio je i procenat armiranja zategnutom armaturom- 0.493%, 1.991% i 3.256%. Ispitano je ukupno 12 greda, ali samo su dvema RAC gredama sa srednjim procentom armiranja (1.991%) napravljene uporedne NAC grede. Osnovni zaključak je da ponašanje pri savijanju nije uslovljeno prisustvom recikliranog agregata i da su primećene razlike relativno male i bez praktičnog značaja. Moment savijanja pri pojavi prsline kod greda sa srednjim procentom armiranja, manji je u proseku za oko 25% u odnosu na istu veličinu kod NAC greda. Zabeleženo je nešto manje rastojanje prsline kod RAC u pređenju sa NAC gredama, dok širine prsline nisu merene osim što je vizuelno konstatovano da su sličnih dimenzija. Ugibi greda od

betona sa RC agregatom bili su za 1.9% i 11% veći, odnosno 1.9% i 6% manji od ugiba uporednih NAC greda armiranih na isti način. Moment nosivosti RAC greda prosečno je za oko 7% veći u odnosu na granični moment savijanja kod NAC greda.

Uporedno ispitivanje ponašanja NAC i RAC greda na savijanje obavili su [Santos i ost. \(2004\)](#). Osim NAC, spravljeni su dva RAC betona- jedan sa istim vodocementnim faktorom kao NAC (oznaka RAC-1), a drugi spravljen tako da ima istu meru sleganja kao NAC (oznaka RAC-2). Očekivano, čvrstoća RAC-1 bila je ista, a čvrstoća RAC-2 niža od čvrstoće NAC i to za 15%. Zabeležena je ranija pojava prslina kod RAC greda, ugib RAC-1 i RAC -2 greda pri eksploatacionom opterećenju bio je 10 % i 24%, a granična nosivost 7% i 9% respektivno veći/veća nego kod uporedne NAC grede.

### 2.3.2. ISPITIVANJA PONAŠANJA ARMIRANOBETONSKIH RAC GREDA NA SMICANJE

Ekperimentalno ispitivanje armiranobetonskih greda napravljenih od betona na bazi recikliranih agregata obavljeno je na Univerzitetu u Barseloni u sklopu doktorske disertacije ([Etxeberria 2004](#)). Formirane su četiri serije greda sa različitim procentom poprečne armature - bez uzengija, sa minimalnim uzengijama prema španskim propisima (u ovom slučaju, UØ6/17), sa manjim razmakom uzengija (UØ6/13) i sa većim razmakom uzengija (UØ6/24) nego što je definisano minimalnim procentom armiranja. Ukupna dužina slobodno oslonjenih greda bila je 3.05 m, raspona 2.6 m, dimenzija poprečnog preseka b/d= 20/35 cm. Svaku od serija činile su grede sa različitim sadržajem krupnog recikliranog agregata - sa potpuno prirodnim agregatom, sa 25%, 50% i 100% krupnog recikliranog agregata, dok je kod svih betona za sitnu frakciju korišćen prirodni rečni pesak. Čvrstoća pri pritisku kod svih betona bila je slična, oko 40 MPa. Količina i vrsta podužne zategnute armature u svim gredama bila je ista (2,92%), u meri potrebnoj da obezbedi da do loma grede dođe pri smicanju. Utvrđeno je da kod svih RAC greda bez poprečne armature do pojave prslina dolazi pri nižem opterećenju u odnosu na uporednu NAC gredu. Granična nosivost greda od betona sa 50% i 100% RC agregata bez uzengija bila je za oko 12% i 17% respektivno manja od nosivosti uporedne NAC grede, koja je, pak, bila za oko 4% manja od nosivosti grede sa 25% RC agregata. Kod greda sa uzengijama takođe je registrovana ranija pojava prslina kod svih RAC greda u poređenju sa odgovarajućom NAC gredom.

Zaključeno je da ugibi i granična nosivost greda sa uzengijama praktično ne zavise od količine recikliranog agregata u betonu.

Još jedan opit smicanja na gredama izvršen je u Španiji, na Univerzitetu u La Korunji ([Gonzalez&Martinez 2007](#)). Napravljene su četiri serije greda, sa različitim procentima armiranja uzengijama: 0%, 0.117%, 0.166% i 0.217%, odnosno isto kao u prethodno opisanom ispitivanju. Svaku seriju činile su dve grede: jedna od betona na bazi prirodnog agregata i jedna od betona kod koga je 50% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim, dok je kao sitna frakcija korišćen rečni pesak. Receptura oba betona pripremljena je tako da se dobiju betoni sa istom merom sleganja, između 5 i 10 cm, a dobijena čvrstoća pri pritisku svih uzoraka iznosila je oko 40 MPa. Isti program ispitivanja isti autori ponovili su nešto kasnije ([Gonzalez&Martinez 2009](#)), ali je u spravljanju obe vrste betona (NAC i RAC) primenjen dodatak silikatne prašine (engl. *silica fume*). Osnovni zaključak prvog istraživanja bio je da su uočene relativno male razlike po pitanju deformacija i nosivosti između greda sa i bez RC agregata. Šta više, iz rezultata se može uočiti sasvim prilična rezerva, tj. višak nosivosti od 17% do 28% koje pokazuju RAC u odnosu na NAC grede koje imaju poprečnu armaturu, dok je za grede bez uzengija ta razlika samo 2% na strani RAC grede. Sile pri formiranju kose prsline kod svih greda sa uzengijama veće su u proseku za oko 9% kod RAC u odnosu na NAC grede, a jedino je u slučaju greda bez uzengija sila pri formiranju kose prsline veća kod NAC nego kod RAC grede i to za oko 5%. Glavne razlike u ponašanju greda (sa i bez RC agregata) odnose se na pojavu prsline duž podužne armature u gredama sa recikliranim agregatom. Poređenjem merenih nosivosti sa prediktivim vrednostima iz aktuelnih propisa zaključeno je da propisi daju konzervativne vrednosti, te da se isti mogu koristiti i u slučaju RAC greda. Rezultate bliže eksperimentalnim propisi daju u slučaju greda bez poprečne armature. Metodologija određivanja nosivosti na smicanje poznata kao MCFT (engl. Modified Compression Field Theory) dala je rezultate koji se bolje slažu sa eksperimentalnim nego što to čine propisi. Ipak, u slučaju greda bez uzengija, MCFT je dala nekonzervativna rešenja. U slučaju primene silicijumske prašine, granične nosivosti NAC greda bile su veće od nosivosti RAC greda za sve procenat armiranja uzengijama. Razlike kod greda sa poprečnom armaturom su 1.8%, 3.4% i 8% i rastu sa porastom procenta armiranja, dok je razlika u nosivosti kod greda

bez uzengija čak 16.6%. Povoljni uticaj primenjenog dodatka vidljiv je samo na eliminisanju podužnih prslina u betonu duž zategnute armature.

Važan doprinos razumevanju ponašanja greda opterećenih poprečnim silama dao je i rad korejskih istraživača ([Han i ost. 2001](#)). Ukupno je testirano 12 greda. Parametri koji su varirani su: odnos smičućeg raspona ( $a$ ) i statičke visine preseka ( $h$ )  $a/h = 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$ , tip agregata – reciklirani i prirodni, procenat armiranja poprečnom armaturom: 0, 0.089%, 0.244%, 0.507% i 0.823%. Dimenzije poprečnog preseka greda bile su  $b/d=17/30$  cm. Grede bez uzengija armirane su sa 1.11% podužne armature, a grede sa uzengijama (nezavisno od količine uzengija) armirane su sa 2.21% zategnute podužne armature. Rasponi greda bili su od 1.65 m do 3.0 m, u zavisnosti od primenjenog odnosa smičućeg raspona i statičke visine preseka. Napravljene su tri vrste betona – beton sa prirodnim agregatom, beton u kome je 100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim krupnim agregatom i beton u kome je 100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim, ali opranim krupnim agregatom. Kao sitna frakcija korišćen je rečni pesak. Čvrstoća pri pritisku svih pomenutih vrsta betona od kojih su napravljene grede bila je oko 36 MPa. Posmatranjem krivih sila-pomeranje za grede sa odnosom  $a/h=2$  i poprečnom armaturom, zaključeno je da NAC grede imaju veću duktilnost od RAC greda, a kao objašnjenje naveden je bolji agregat “interlock“ efekat kod NAC betona. Oblik loma svih greda sa odnosom  $a/h=2$  bez uzengija bio je sličan, tj. nije zavisio od količine RC agregata u betonu. Ipak, uočene su razlike u teksturi betona na mestu prslina. U slučaju RAC greda, površina betona na mestu prslina je bila glatkija kao posledica manje razlike u čvrstoći između agregata i cementnog kamena. Predikcija sile pri pojavi kose prsline data u propisu ACI (ACI, 1999) za odnose  $a/h=3$  ili 4, pokazala se kao konzervativna, dok je suprotan zaključak donet za slučajeve  $a/h=1.5$  ili 2 kod RAC greda bez poprečne armature. Granična nosivost svih greda bez uzengija bila je veća u odnosu na definicije iz ACI-a, s tim da pomenuti propisi nude veću rezervu sigurnosti kod odnosa  $a/h=1.5$  ili 2, dok je za odnose  $a/h=3$  ili 4 razlika između merenih i računskih vrednosti relativno mala.

Još jedno istraživanje obavljeno na Hirošima Univerzitetu bavi se elementima konstrukcije od recikliranog agregata, ovoga puta ponašanjem pri smicanju ([Sogo i ost. 2004](#)). Ispitano je ukupno 10 armiranobetonskih RAC greda ( $L=1.8(3.0)m$ ,  $b/d=15/16(33.5)cm$ ,  $a/d=3.1$ ), a varirani parametri bili su poreklo i količina (samo

krupni ili krupni i sitni) RC agregata, vodocementni faktor, (ne)primena ekspanzivnog aditiva i visina poprečnog preseka. Generalni zaključak je da RAC grede imaju istu sliku prslina i oblik loma kao i uporedne NAC grede. Sila pri kojoj je zabeležena pojava prvih kosih prslina opada sa povećanjem količine recikliranog agregata. Nosivost RAC greda bez uzengija manja je za 10%-20% kada su betoni sadržali samo krupan RC agregat, odnosno 10%-30% kada su spravljeni sa kompletno RC agregatom. Nosivost RAC greda sa uzengijama praktično je ista kao nosivost uporednih NAC greda. Primena ekspanzivnog aditiva rezultovala je povećanjem granične nosivosti od 10% kod svih greda, sa i bez recikliranog agregata.

Istu metodologiju projektovanja sastava betona kao kod ispitivanja ponašanja RAC greda na savijanje, primenio je [Fathifazl \(2008\)](#) ispitujući ponašanja RAC greda pri smicanju. Analizirajući efekat odnosa smičućeg raspona i statičke visine preseka i efekat veličine poprečnog preseka, ukupno je ispitano 20 greda, ali su samo za RAC grede sa odnosom  $a/d=2.59$  napravljene i uporedne NAC grede, ukupno 2 para greda. Nisu uočene bitne razlike po pitanju oblika loma, slike prslina i ponašanja pri smicanju između NAC i RAC greda napravljenih od betona po EMV metodi. RAC grede pokazale su ponašanje pri smicanju koje je uobičajeno za NAC grede: povećanje nosivosti sa smanjenjem odnosa  $a/d$ , smanjenjem visine poprečnog preseka i povećanjem količine poprečne armature.

### 2.3.3. OSTALA ISPITIVANJA VEZANA ZA PONAŠANJE KONSTRUKTIVNIH RAC ELEMENATA

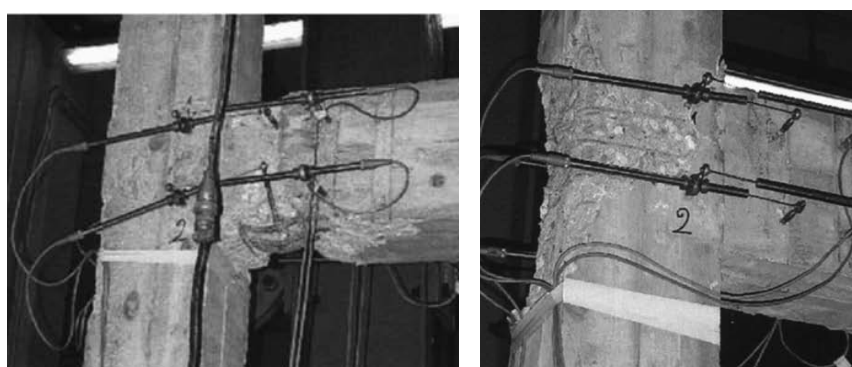
Ispitivanje stubova od betona na bazi recikliranog agregata pri dejstvu aksijalnog pritiska, obavili su [Ajdukiewicz&Kliszczewicz \(2007\)](#). Svaka serija sastojala se od uzoraka napravljenih od tri vrste betona- NAC, RAC i CFRC, a serije su se razlikovale po vrsti (poreklu) primenjenog agregata. Opterećenje pri pojavi horizontalne prsline kod stubova od RAC i CFRC betona je u proseku 6% i 24% respektivno manje nego kod NAC stubova. Sila pri formiranju prve vertikalne prsline bila je za 3% i 9% manja kod RAC i CFRC stubova respektivno u odnosu na uporedne NAC stubove. Oblici loma, oblik dijagrama sila-pomeranje i granična nosivost uzoraka od RAC i CFRC betona praktično su isti kao kod uporednih NAC stubova. Ovo je takođe i zaključak dva nezavisna eksperimentalna ispitivanja obavljena u Kini ([Li 2009](#)).



Komparativno ispitivanje nosivosti stubova od čeličnih profila (kružnih i kvadratnih) ispunjenih NAC, RAC25 i RAC50 betonom, obavili su [Yang&Han \(2006\)](#). Dobljene granične nosivosti stubova sa RAC25 betonom bile su od 1.7% do 9.1% manje od nosivosti čeličnih profila ispunjenih NAC betonom istog vodocementnog faktora (0.5). Nosivost RAC50 u odnosu na NAC stubove bila je manja između 1.4% i 13.5% respektivno. Granična nosivost, dakle, opada sa povećanjem procentualnog učešća RC agregata, dok oblici loma kao i krive sila-pomeranje ne zavise od procenta RC agregata.

[Bassan i ost \(2009\)](#) ispitivali su mogućnosti proizvodnje konstrukcijskog betona od agregata nastalog recikliranjem prefabrikovanih betonskih elemenata. Zaključili su da primena recikliranog agregata, čije je upijanje vode u granicama od 5-6%, u iznosu do 30% ne utiče bitno na proces proizvodnje ošupljenih prednapregnutih ploča (HCS). Nakon 24 časa, kada se seku kablovi, čvrstoća pri pritisku ovih betona veoma je slična čvrstoći betona sa prirodnim agregatom. Deformacije HCS ploča od RAC betona bile su manje, a granična sila veća nego kod klasičnih HCS ploča.

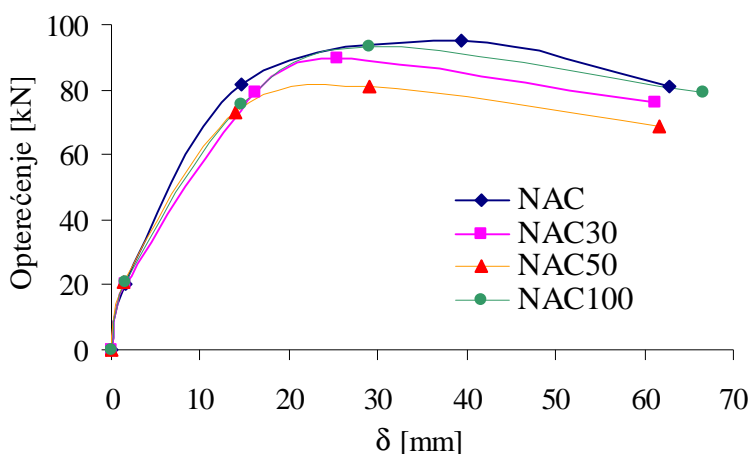
Ispitivanja ponašanja elemenata konstrukcije od betona na bazi recikliranog agregata na dejstvo cikličnog opterećenja sprovedena su u smislu ispitivanja veze stub-greda izložene prinudnim deformacijama ([Corinaldesi&Moriconi 2011](#)) i ispitivanja ponašanja ab rama od RAC betona izloženog horizontalnoj sili alternativnog znaka ([Xiao i ost. 2006](#)). Corinaldesi&Moriconi su dobili različito ponašanje u čvorovima elemenata od NAC i CFRC betona pod dejstvom prinudnih deformacija koje simuliraju seizmičko opterećenje. U slučaju primene NAC betona, oštećenje je koncentrisano na gredi u blizini veze sa stubom (*slika 15* levo).



*Slika 15. Oštećenja registrovana u čvoru elemenata od NAC (levo) i CFRC (desno) betona ([Corinaldesi&Moriconi 2011](#))*

Kada je primenjen CFRC, greda je imala kapacitet da izdrži značajne deformacije bez pojave prsline, ali rotacija grede nije mogla da bude “ispraćena” od strane stuba na kome je došlo do odljuskavanja betona, *slika 15* desno. Objašnjenje je nađeno u različitim oblicima  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama primenjenih betona, gde je CFRC pokazao manji modul elastičnosti (oko 35%), ali i značajno veću duktilnost u odnosu na uporedni NAC.

[Xiao i ost. \(2006\)](#) su ispitivali četiri jednospratna armiranobetonska rama u razmeri 1:2, od betona koji su sadržali 0%, 30%, 50% ili 100% RC agregata. Neuobičajeno, razmatrani betoni imali su različite ukupne i efektivne vodocementne faktore, kao i količine cementa. Praktično jedino zajedničko bila je količina slobodne vode. Na osnovu eksperimentalnih podataka o karakterističnim parovima izmerenih sila i pomeranja formirani su dijagrami sila-pomeranje za ramove od NAC i različitih RAC betona, *slika 16*.



*Slika 16. Dijagrami sila-pomeranje za ramove od NAC i različitih RAC betona ([Xiao i ost. 2006](#))*

Kod svih ramova, formiranje prve prsline zabeleženo je pri gotovo istom opterećenju, svi su imali sličnu duktilnost i gotovo isti oblik loma – prvo je došlo do plastifikacije krajeva grede, a zatim plastifikacije preseka stuba na kontaktu sa temeljem. Granična nosivost ramova od RAC betona bila je u proseku za oko 7.5% manja nego kod uporednog NAC rama. Na osnovu formiranih histerezisnih krivih i iz njih sračunatih disipacija energija, zaključeno je da nema bitnih razlika između ponašanja ramova od NAC i različitih RAC betona. Iz prethodno navedenih podataka može se zaključiti da je seizmičko ponašanje ramova od RAC betona slično ponašanju ramova od NAC betona, nezavisno od količine krupnog recikliranog agregata u njima.

#### 2.3.4. ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetog pregleda radova koji se odnose na ponašanje armiranobetonskih RAC elemenata konstrukcije, u prvom redu greda opterećenih na savijanje i smicanje, prikaza mehanizama i modela prihvatanja takvog opterećenja i uvida u trenutno stanje propisa u delu koji se odnosi na proračun nosivosti greda od klasičnog betona, mogu se doneti sledeći zaključci:

- Istraživanja koja se odnose na ponašanje RAC greda pri savijanju i smicanju ima relativno malo, a još manje u obliku da se rezultati mogu preuzeti i dalje analizirati; potrebno je proširiti aktuelnu bazu eksperimentalnih podataka koji se odnose na ponašanje RAC greda,
- Istraživanja koja se odnose na uporednu analizu ponašanja RAC i NAC greda pri savijanju i smicanju, bazirana su na različitim definicijama uporednih betona (betoni iste čvrstoće pri pritisku ili zatezanju, betoni istog vodocementnog faktora, iste zapremine cementnog maltera) što kompromituje donošenje opštih zaključaka o sličnostima i razlikama RAC i NAC greda opterećenih poprečnim silama,
- Pri eksploatacionom kratkotrajnom opterećenju, širina prslina ista je ili veća kod greda od betona sa recikliranim agregatom u odnosu na uporedne grede od betona sa prirodnim agregatom,
- Sama slika prslina u smislu mesta formiranja prslina i njihovog razmaka ne zavisi značajno od vrste agregata, mada je uočeno formiranje nešto većeg broja prslina kod greda od betona na bazi recikliranog agregata,
- Ugibi greda pod kratkotrajnim opterećenjem do 25% su veći kod RAC greda u odnosu na uporene NAC grede; osnovno tumačenje je da su razlike posledica nižeg modula elastičnosti RAC betona,
- Granične nosivosti na savijanje greda od betona sa recikliranim agregatom za nekoliko procenata se razlikuju od graničnih nosivosti uporednih greda od betona na bazi prirodnog agregata, nezavisno od procenta zamene prirodnog agregata recikliranim,
- Od pretpostavki proračunskog modela sa savijanje NAC greda, u slučaju primene na RAC grede, može se postaviti pitanje opravdanosti Bernulijeve

hipoteze o ravnim preseccima kao i oblika radnog naponsko-deformacijskog dijagrama RAC betona,

- Kod RAC greda bez poprečne armature, do formiranja kose prsline dolazi pri nižem opterećenju nego kod uporedne NAC grede; razlike u sili pri formiranju prsline rastu sa porastom količine RC agregata,
- Granična nosivost na smicanje RAC greda bez poprečne armature, manja je do 20% od nosivosti uporednih NAC greda,
- Granična nosivost na smicanje RAC greda sa poprečnom armaturom većom od minimalne, neznatno se razlikuje od nosivosti uporedne NAC grede,
- Potrebno je ispitati mogućnost primene postojećih modela za proračun nosivosti na smicanje RAC greda, kao i doprinosa pojedinih mehanizama u prenošenju sile smicanja u slučaju RAC greda.

## **2.4 TEHNIČKA REGULATIVA**

### **2.4.1. UVOD**

Tehnička regulativa u koju spadaju pravilnici, standardi, tehnička uputstva ili preporuke relevantnih institucija, a koja se generalno odnosi na upotrebu agregata od recikliranog betona, nalazi se na različitim nivoima izgrađenosti gledano po raznim zemljama i oblastima koje pokriva. Najveći broj dokumenata odnosi se na klasifikaciju recikliranog agregata u smislu porekla, tj. materijala od koga potiče i uslova kvaliteta koje mora da ispuni taj agregat za dalju, različitu primenu. Značajno manji broj tehničke regulative odnosi se na konstrukcijske betone od recikliranog agregata, ograničenja u primeni recikliranog agregata u betonima, na fizičko-mehanička svojstva takvih betona, relacije između tih svojstava i relacije sa svojstvima betona od prirodnog agregata. Konačno, tek jedan poznati propis (Kineski- DG/TJ07-008; [Li, 2008](#)) o elementima konstrukcija od recikliranog agregata, njihovom proračunu granične nosivosti, ukazuje na relativno loše stanje tehničke regulative u ovoj oblasti. U ovom poglavlju biće prezentovani tehnički uslovi koji se mogu naći u literaturi, a koji se odnose na reciklirani agregat i na konstrukcijske betone od recikliranog agregata.

#### 2.4.2. VELIKA BRITANIJA

Agregati koji se primenjuju za spravljanje betona definisani su u standardu [BS EN 12620 \(2002\)](#). U njemu se navodi da je moguća primena recikliranog agregata u betonima, ukoliko takav agregat ispunjava sve zahteve pomenutog standarda za prirodne agregate. 2006. godine objavljen je standard [BS 8500-2 \(2006\)](#) koji detaljnije definiše kvalitet krupnog recikliranog agregata koji je moguće primeniti u betonu, *tabela 2*.

*Tabela 2. Zahtevi za kvalitet krupnog RCA i RA u betonu prema [BS 8500-2 \(2006\)](#)*

| Tip agregata         | Maksimalni sadržaj primesa (u masenim procentima) |                                    |                               |        |                        |                            |
|----------------------|---|------------------------------------|-------------------------------|--------|------------------------|----------------------------|
|                      | opeke   | sitne čestice ( $d \leq 0.063$ mm) | laki materijali <sup>B)</sup> | asfalt | ostale strane materije | sulfata (SO <sub>3</sub> ) |
| RCA <sup>A),C)</sup> | 5   | 5                                  | 0.5                           | 5      | 1                      | 1                          |
| RA                   | 100   | 3                                  | 1                             | 10     | 1                      | <sup>D)</sup>              |

<sup>A)</sup> Kada se materijal dobija recikliranjem betona poznatog sastava koji nije korišćen (npr. višak prefabrikovanih elemenata ili neiskorišćeni svež beton) i koji nije zagađen tokom skladištenja i obrade, zahtevi koji treba da se ispune odnose se na granulometrijski sastav i sadržaj sitnih čestica

<sup>B)</sup> Materijali sa zapreminskom masom manjom od 1000 kg/m<sup>3</sup>

<sup>C)</sup> Odredbe za RCA mogu da se primene i na mešavinu prirodnog i recikliranog krupnog agregata

<sup>D)</sup> Odgovarajuće granične vrednosti i procedure ispitivanja treba da budu određene od slučaja do slučaja

*Tabela 3. Ograničenja u primeni betona koji sadrži krupan reciklirani agregat prema [BS 8500-2 \(2006\)](#)*

| Tip agregata      | Maksimalna klasa čvrstoće <sup>A)</sup> | Klase izloženosti <sup>B)</sup> |
|-------------------|---|---------------------------------|
| RCA <sup>A)</sup> | C40/50                                  | X0,XC1,XC2,XC3,XC4,XF1          |

<sup>A)</sup> Ako je materijal dobijen recikliranjem betona poznatog sastava koji nije korišćen i koji nije zagađen tokom skladištenja i obrade, može se projektovati bilo koja klasa čvrstoće

<sup>B)</sup> Krupan RCA agregat može se koristiti i za betone u drugim klasama izloženosti ukoliko se dokaže da je predmetni beton odgovarajući za razmatrane uslove sredine (npr. otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ili otpornost na dejstvo sulfata)

Isti standard definiše još neka ograničenja koja se odnose na krupni reciklirani agregat. U *tabeli 3* definisana je maksimalna klasa čvrstoće, kao i dozvoljene klase izloženosti betona koji sadrži krupni RCA. Konačno, jedna od odredbi standarda [BS 8500-2 \(2006\)](#) ograničava sadržaj krupnog agregata od recikliranog betona i krupnog recikliranog agregata na 20% kod betona klasa čvrstoće od C20/25 do C40/50 (nazivi klasa čvrstoća dati su prema definiciji Evrokoda 2 ([Eurocode 2, 2004](#))).

#### 2.4.3. PREPORUKE RILEM-a

Međunarodno udruženje laboratorija za ispitivanje materijala i konstrukcija (RILEM) je 1994. godine objavilo specifikacije vezane za reciklirane agregate u betonu ([RILEM Recommendation, 1994](#)). Reciklirani agregat klasifikovan je u sledeće kategorije:

Tip I: agregat koji potiče uglavnom od zidarskog otpada

Tip II: agregat koji potiče uglavnom od betonskog otpada

Tip III: agregat koji se uglavnom sastoji od mešavine recikliranog agregata (max 20%) i prirodnog agregata (obavezni min 80%). U okviru recikliranog dela agregata, max 10% može biti reciklirani agregat tipa I. Za klasifikaciju recikliranog agregata u kategoriju “Tip I“ ili “Tip II“, obično je dovoljan vizuelni pregled. U slučaju nedoumica, klasifikacija se vrši za osnovu zapreminskih masa i drugih ograničavajućih faktora, *tabela 4*.

*Tabela 4. Obavezni zahtevi kvaliteta recikliranog agregata za pojedine tipove prema [RILEM Recommendation \(1994\)](#)*

| Obavezni zahtevi  | Tip I | Tip II | Tip III |
|---|-------|--------|---------|
| Minimalna zapremina zrna agregata u suvom stanju (kg/m <sup>3</sup> )       | 1500  | 2000   | 2400    |
| Maks. % agregata sa zapreminskom masom u ZPS stanju <2200 kg/m <sup>3</sup> | -     | 10     | 10      |
| Maks. % agregata sa zapreminskom masom u ZPS stanju <1800 kg/m <sup>3</sup> | 10    | 1      | 1       |
| Maks % agregata sa zapreminskom masom u ZPS stanju <1000 kg/m <sup>3</sup>  | 1     | 0.5    | 0.5     |
| Maks. % sadržaja stranih materija (metala, stakla, asfalta...)              | 5     | 1      | 1       |
| Max sadržaj metala (% m/m)  | 1     | 1      | 1       |
| Max sadržaj organskih materija (% m/m)                                      | 1     | 0.5    | 0.5     |
| Max sadržaj sitnih čestica manjih od 0.063 mm (% m/m)                       | 3     | 2      | 2       |
| Max sadržaj peska (<4 mm) (% m/m)   | 5     | 5      | 5       |
| Max sadržaj sulfata (% m/m)   | 1     | 1      | 1       |

Reciklirani agregat ne sme sadržati bilo kakve materije ili supstance koje usporavaju vezivanje betona za više od 15% u poređenju sa vezivanjem betona identičnog sastava sa prirodnim agregatom, ili koje su štetne za beton po bilo kom osnovu.

Maksimalno dozvoljene klase čvrstoće date su u *tabeli 5*. Reciklirani agregat koji zadovoljava prethodno iznete zahteve, može se koristiti u nearmiranim i armiranim betonima, ako se obezbedi da ti betoni zadovoljavaju sve ostale zahteve trajnosti koje propisuje RILEM ili CEN regulativa. Naglašeno je da primena sitnog recikliranog agregata u betonu nije dozvoljena, što se moglo zaključiti iz ograničenja sadržaja frakcija sitnijih od 4 mm na 5%, *tabela 4*. Ukoliko je beton spravljen sa gore definisanim tipom recikliranog agregata i zadovoljena je neka od klasa betona (prema nomenklaturi [Evrokoda 2 \(2004\)](#)), izvesna mehanička svojstva mogu se sračunati prema odredbama

[Evrokoda 2 \(2004\)](#) za beton sa prirodnim agregatom, množeći dobijene vrednosti korekcionim koeficijentima, *tabela 6*.

*Tabela 5. Maksimalno dozvoljene klase čvrstoće za određene tipove recikliranog agregata prema [RILEM Recommendation \(1994\)](#)*

|              | Tip I  | Tip II | Tip III         |
|--------------|--------|--------|-----------------|
| Klasa betona | C16/20 | C50/60 | Bez ograničenja |

*Tabela 6. Koeficijenti kojima se množi svojstvo RAC sračunato prema EC2 ([RILEM Recommendation, 1994](#))*

|          | Proračun prema EC2     | Korekcionni koeficijenti |        |         |
|----------|------------------------|--------------------------|--------|---------|
|          |                        | Tip I                    | Tip II | Tip III |
| Svojstvo | Čvrstoća pri zatezanju | 1                        | 1      | 1       |
|          | Modul elastičnosti     | 0.65                     | 0.8    | 1       |
|          | Koeficijent tečenja    | 1                        | 1      | 1       |
|          | Skupljanje             | 2                        | 1.5    | 1       |

#### 2.4.4. JAPAN

Reciklirani agregat za beton je klasifikovan u tri kategorije prema svojim fizičkim karakteristikama: agregat visokog kvaliteta, Klasa H (engl. *Class-H*), srednjeg kvaliteta, Klasa M (engl. *Class-M*) i niskog kvaliteta (engl. *Class-L*), *tabela 7*.

*Tabela 7. Fizičke karakteristike recikliranog agregata prema [Noguchi \(2010\)](#)*

|  | Klasa - H |       | Klasa - M |       | Klasa - L |       |
|--|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|  | krupan    | sitan | krupan    | sitan | krupan    | sitan |
| Zapreminska masa u suvom stanju [kg/m <sup>3</sup> ] | ≥2500     | ≥2500 | ≥2300     | ≥2200 | -         | -     |
| Absorpcija vode [%]                                  | ≤3        | ≤3.5  | ≤5        | ≤7    | ≤7        | ≤13   |
| Masa materijala koji prolazi kroz sito 0.075 mm [%]  | ≤1        | ≤7    | ≤1.5      | ≤7    | ≤2        | ≤10   |

Agregat Klase H može se primeniti u betonima maksimalne nominalne čvrstoće 45 MPa za bilo koji element konstrukcije. Agregat koji spada u Klasu M ne bi trebalo da se primenjuje kod elemenata konstrukcije izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Oblast primene ovih betona su šipovi, elementi konstrukcija koji su u zemlji ili beton za ispunu čeličnih profila u okviru spregnutih stubova. Agregat najniže Klase L može se primeniti za nekonstruktivne betone- betone tampon slojeva ili betone za izravnavanje površina. S obzirom da najširu primenu u konstrukcijskim betonima ima agregat Klase H, u daljem će biti izloženi delovi standarda [JIS A 5021 \(2005\)](#) koji se odnosi na ovu vrstu recikliranog agregata. Reciklirani agregat klase H može biti i krupan ( $d \geq 5$  mm) i

sitan ( $d \leq 5$  mm). Krupan reciklirani agregat razvrstan je na nekoliko vrsta u zavisnosti od veličina zrna (*tabela 8*) i za svaku od vrsta definisan je granulometrijski sastav, *tabela 9*.

*Tabela 8. Klasifikacija i oznake krupnog i sitnog recikliranog agregata Klase H prema JIS A 5021 (2005)*

| Tip recikliranog agregata | Veličina zrna agregata [mm] | Oznaka   |         |
|---------------------------|-----------------------------|----------|---------|
| Krupan<br>RCA             | H2505                       | 25 do 5  | RHG2505 |
|                           | H2005                       | 20 do 5  | RHG2005 |
|                           | H1505                       | 15 do 5  | RHG1505 |
|                           | H4020                       | 40 do 20 | RHG4020 |
|                           | H2515                       | 25 do 15 | RHG2515 |
|                           | H2015                       | 20 do 15 | RHG2015 |
| Sitan RCA                 | 5 ili manje                 | RHS      |         |

*Tabela 9. – Granulometrijski sastav recikliranog agregata Klase H prema JIS A 5021 (2005)*

| Tip recikliranog agregata | Maseni prolazi kroz odgovarajuće sito [%] |     |            |            |            |            |           |          |     |     |     |      |   |
|---------------------------|---|-----|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|-----|-----|-----|------|---|
|                           | Nominalni naziv sita [mm]                 |     |            |            |            |            |           |          |     |     |     |      |   |
|                           | 50  | 40  | 25         | 20         | 15         | 10         | 5         | 2.5      | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.15 |   |
| Krupan<br>RCA             | H2505                                     | -   | 100        | 95-<br>100 | -          | 30-<br>70  | -         | 0-<br>10 | 0-5 | -   | -   | -    | - |
|                           | H2005                                     | -   | -          | 100        | 90-<br>100 | -          | 20-<br>55 | 0-<br>10 | 0-5 | -   | -   | -    | - |
|                           | H1505                                     | -   | -          | -          | 100        | 90-<br>100 | 40-<br>70 | 0-<br>15 | 0-5 | -   | -   | -    | - |
|                           | H4020                                     | 100 | 90-<br>100 | 20-<br>55  | 0-<br>15   | -          | 0-5       | -        | -   | -   | -   | -    | - |
|                           | H2515                                     | -   | 100        | 95-<br>100 | -          | 0-<br>10   | 0-5       | -        | -   | -   | -   | -    | - |
|                           | H2015                                     | -   | -          | 100        | 90-<br>100 | -          | 0-<br>10  | 0-5      | -   | -   | -   | -    | - |

Osim ograničenja fizičkih karakteristika prikazanih u *tabeli 7*, reciklirani agregat Klase H mora da zadovolji zahtev standarda koji se odnosi na prisustvo nečistoća, *tabela 10*.

*Tabela 10. – Dozvoljeni sadržaj nečistoća recikliranog agregata Klase H prema JIS A 5021 (2005)*

| Klasifikacija | Sadržaj nečistoća            | Gornja granica [%] |
|---------------|------------------------------|--------------------|
| A             | Pločice, cigle, asfalt beton | 2                  |
| B             | Komadi stakla                | 0.5                |
| C             | Gips i komadi gipsanih tabli | 0.1                |
| D             | Ostale neorganske materije   | 0.5                |
| E             | Komadi plastike              | 0.5                |
| F             | Komadi drveta, papira        | 0.1                |
|               | Ukupna količina nečistoća    | 3                  |



Takođe, reciklirani agregat Klase H treba da bude neškodljiv sa stanovišta alkalno-agregatne reakcije, da sadrži hloride u iznosu manjem od 0,04% i da ima zrna odgovarajućeg oblika. Za svaku od navedenih karakteristika, JIS A 5021 (2005) definiše odgovarajuću proceduru ispitivanja.

#### 2.4.5. HONG KONG

Upotreba recikliranog agregata bila je zabranjena u Hong Kongu do 2001 godine, osim kao materijala za nasipe kod melioracija i umesto zemljane ispune ([Poon i ost., 2003](#)). Tada je izvršena revizija Opštih specifikacija za građevinske poslove (engl. *General Specifications for Civil Engineering Works, GSCE*), čime je omogućeno korišćenje recikliranog agregata u zemljanim radovima, drenažama i poslovima u priobalju. 2002. godine dozvoljena je primena RCA agregata u proizvodnji betona i kao posteljice puteva. Specificirana je receptura za RAC beton sa 20% i 100% krupnog RCA. Zahtevi po pitanju kvaliteta RCA definisani su u *tabeli 11*. Kao poseban zahtev, navodi se da reciklirani agregat bude vlažan prilikom spravljanja betona. Primena RAC betona ograničena je na nekonstruktivne elemente (RAC100) ili određene konstruktivne elemente (RAC20). Izričito je zabranjeno korišćenje RAC za rezervoare tečnosti, prednapregute konstrukcije, transfer konstrukcije.

Jedno od ograničenja iz *tabele 11* odnosi se na maksimalni sadržaj peska, tj. agregata čije je zrno sitnije od 4 mm, što ukazuje da je u Hong Kongu dozvoljena primena samo krupnog agregata od recikliranog betona.

*Tabela 11. – Obavezni zahtevi kvaliteta recikliranog agregata koji se primenjuje u betonu prema GSCE ([Poon i ost., 2003](#))*

| Obavezni zahtevi  | Granice                    |
|---|----------------------------|
| Minimalna zapreminska masa suvih zrna agregata  | 2000 [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| Maksimalno upijanje vode  | 10%                        |
| Maksimalni sadržaj drveta i ostalih materijala lakših od vode                                     | 0.50%                      |
| Maksimalni sadržaj drugih materijala (metala, plastike, glinenih grudvica, asfalta, katrana itd.) | 1%                         |
| Maksimalni sadržaj sitnih čestica   | 4%                         |
| Maksimalni sadržaj peska (<4 mm) [% m/m]  | 5%                         |
| Maksimalni sadržaj sulfata [% m/m]  | 1%                         |
| Flakiness index   | 40%                        |
| Drobljivost (10% fines test)  | 100kN                      |
| Granulometrija  | Tabela 2, BS EN 12620:2002 |
| Maksimalni sadržaj hlorida  | 0.05% mase hloridnih jona  |

#### 2.4.6. NEMAČKA

Prema odredbi standarda za reciklirane agregate [DIN 4226-100 \(2002\)](#), reciklirani agregat se deli po tipovima u zavisnosti od sastava, tj. od kog materijala potiče, *tabela 12*.

*Tabela 12. Tipovi recikliranog agregata prema [DIN 4226-100 \(2002\)](#)*

| Oznaka recikliranog agregata | Originalni materijal koji se reciklira |
|------------------------------|--|
| Tip 1                        | Betonski otpad                         |
| Tip 2                        | Otpad nakon rušenja objekta            |
| Tip 3                        | Opekarski otpad                        |
| Tip 4                        | Mešoviti otpad                         |

Svaki od četiri tipa agregata iz *tabele 12*, treba da zadovolji uslove sastava (*tabela 13*) i fizičkih karakteristika (*tabela 14*). Što se tiče hemijskog sastava, standard zahteva da sadržaj hlorida ne bude veći od 0.04 %m/m za agregate tipa 1,2,3, tj. 0.15 %m/m za agregat tipa 4. Svi ostali zahtevi standarda koji se odnose na granulometriju, oblik zrna, sadržaj sitnih čestica i otpornosti agregata na različita dejstva, isti su kao za prirodne agregate.

*Tabela 13. Sastav recikliranog agregata pa tipovima prema [DIN 4226-100 \(2002\)](#)*

| Sastojak u agregatu                      | Maksimalni ili minimalni sadržaj u % mase, za tip agregata |       |       |       |
|--|--|-------|-------|-------|
|  | Tip 1  | Tip 2 | Tip 3 | Tip 4 |
| Beton i agregat saglasan sa DIN 4226-1   | ≥ 90   | ≥ 70  | ≤ 20  |       |
| Klinker, puna opeka                      |  |       | ≥ 80  | ≥ 80  |
| Krečni peščar                            | ≤ 10   | ≤ 30  | ≤ 5   |       |
| Ostali mineralni materijali <sup>1</sup> | ≤ 2  | ≤ 3   | ≤ 5   | ≤ 20  |
| Asfalt                                   | ≤ 1  | ≤ 1   | ≤ 1   |       |
| Strane materije <sup>2</sup>             | ≤ 0.2  | ≤ 0.5 | ≤ 0.5 | ≤ 1   |

<sup>1)</sup> šuplja opeka, laki betoni, gips, malter, porozni betoni

<sup>2)</sup> staklo, keramika, gips, guma, plastika, drvo, papir itd.

*Tabela 14. Fizička svojstva recikliranog agregata pa tipovima prema [DIN 4226-100 \(2002\)](#)*

| Karakteristika  | Maksimalni ili minimalni sadržaj u % mase, za tip agregata |       |       |                 |
|---|--|-------|-------|-----------------|
|   | Tip 1  | Tip 2 | Tip 3 | Tip 4           |
| Minimalna zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ]                                     | 2000   |       | 1800  | 1500            |
| Maksimalna odstupanja od deklarisanе prosečne zapreminske mase [kg/m <sup>3</sup> ] | ±150   |       |       | Nije definisano |
| Maksimalno upijanje vode (nakon 10 min) [%]   | 10   | 15    | 20    | Nije definisano |

Nemački komitet za armirani beton (DafStb) objavio je 1998. godine tehničko uputstvo za primenu recikliranih agregata u betonima ([DafStb, 1998](#)).

Tabela 15. Maksimalni procenti zamene prirodnog agregata recikliranim, prema [DafStb \(1998\)](#)

| Oblast primene*   |                                    |                                   | Udeo krupnog ( $d \geq 2\text{mm}$ ) RCA** |           |
|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|-----------|
| Klasa izloženosti | Dejstvo                            | Sredina                           | Tip 1                                      | Tip 2     |
| XC1               | Karbonizacija                      | suva                              |  |           |
| X0                | Bez agresivnog dejstva             |                                   | $\leq 45$                                  | $\leq 35$ |
| XC1 do XC4        | Karbonizacija                      | suva do vlažna                    |  |           |
| XF1 i XF3         | Smrzavanje i odmrzavanje, bez soli | srednja i visoka zasićenost vodom | $\leq 35$                                  | $\leq 25$ |
| XA1               | Hemijsko dejstvo                   | blago korozivna                   | $\leq 25$                                  | $\leq 25$ |

\* klase izloženosti su date prema Evrokodu 2

\*\* zapreminski procenti, u odnosu na količinu krupnog agregata

U njemu se navode maksimalno dozvoljena učešća recikliranog agregata u okviru betonske mešavine u odnosu na klasu izloženosti betona koji se projektuje, *tabela 15*. Svojstva betona na bazi recikliranog agregata se mogu sračunati na osnovu izraza koje definiše [DIN 1045-1 \(2001\)](#), *tabela 16*. U tim izrazima kao parametri se pojavljuju: čvrstoća pri pritisku ( $f_{cm}$ ), čvrstoća pri zatezanju ( $f_{ctm}$ ), zapreminska masu svežeg betona ( $\rho$ ), zapreminski procenat učešća agregata od drobljene opeke ( $A_z$ ).

Tabela 16. Analitički izrazi za mehanička svojstva betona sa recikliranim agregatom, prema [DIN 1045-1 \(2001\)](#)

| Svojstvo betona  | Analitički izraz  |
|--|---|
| Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju                      | $f_{ctm} = 0.29 \cdot f_{cm}^{2/3} \cdot \left(\frac{r}{2400}\right)^3$                                       |
| Karakteristična vrednost čvrstoće pri zatezanju, fraktil 5%  | $f_{ctk,0.05} = 0.6 \cdot f_{ctm}$  |
| Karakteristična vrednost čvrstoće pri zatezanju, fraktil 95% | $f_{ctk,0.95} = 1.4 \cdot f_{ctm}$  |
| Modul elastičnosti   | $E_{cm} = 9100 \cdot f_{cm}^{1/3} \cdot \left(\frac{r}{2400}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{A_z}{500}\right)$ |

#### 2.4.7. KINA

Kineski tehnički propis za primenu betona na bazi recikliranog agregata (engl. *Technical Code for Application of Recycled Aggregate Concrete*) DG/TJ07-008, dozvoljava primenu samo krupnog ( $d > 5 \text{ mm}$ ) recikliranog agregata u betonu ([Li, 2008](#)). Nije poznato da li pomenuti propis ograničava količinu recikliranog agregata u betonskoj

mešavini. Linija prosejavanja krupnog RCA mora da bude u okviru granica koje nacionalni standard (JGJ 52-2006) definiše za prirodni agregat (Li, 2008). U zavisnosti od zapreminske mase u vodom zasićenom površinski suvom stanju (ZPS stanje), upijanja i sadržaja opeke, standard definiše dva tipa recikliranog agregata, *tabela 17*.

*Tabela 17. Tipovi ARB agregata prema kineskom propisu (Li, 2008)*

| Karakteristika                                    | RCA         |             |
|---|-------------|-------------|
|   | Tip 1       | Tip 2       |
| Zapreminska masa u ZPS stanju [ $\text{kg/m}^3$ ] | $\geq 2400$ | $\geq 2200$ |
| Absorpcija [%]                                    | $\leq 7$    | $\leq 10$   |
| Sadržaj opeke [%]                                 | $\leq 5$    | $\leq 10$   |

Za konstruktivne betone se primenjuje samo RCA označen sa Tip 1, a zahtevi nacionalnog standarda po pitanju fizičkih i hemijskih svojstava RCA prikazani su u *tabeli 18*. Pomenuti propis DG/TJ07-008 (Li, 2008) daje analitičke veze između karakteristične čvrstoće pri pritisku kocke RAC ( $f_{cuk}$ ) i čvrstoće RAC betona pri zatezanju savijanjem ( $f_t$ ), *tabela 19*. Takođe, u istom propisu uspostavljena je zavisnost između čvrstoće pri pritisku ( $f_{cu}$ ) i modula elastičnosti RAC betona ( $E_c$ ), *tabela 19*.

*Tabela 18. Propisana fizičko-hemijska svojstva ARB agregata Tip 1 prema kineskom propisu (Li, 2008)*

| Uslov kvaliteta   | Zahtevi propisa DG/TJ07-008 za RCA agregat Tip 1 |
|---|--|
| Čvrstoća agregata (engl. <i>crushing value</i> ) [%]              | $\leq 30$  |
| Sadržaj sulfata (engl. <i>soundness</i> ) [% gubitak mase]        | $\leq 18$  |
| Faktor oblika (engl. <i>flakiness index</i> )                     | $\leq 15$  |
| Sadržaj gline [%]   | $\leq 4$   |
| Sadržaj sulfata $\text{SO}_3$ [% m/m]                             | $\leq 1$   |
| Sadržaj hlorida [%]   | $\leq 0.25$                                      |
| Sadržaj organskih materija [%]                                    | $\leq 0.5$                                       |
| Sadržaj nečistoća (metala, plastike, stakla, asfalta, drveta) [%] | 1%   |

*Tabela 19. Analitičke veze između mehaničkih svojstava RAC prema kineskom propisu (Li, 2008)*

| Svojstvo betona                   | Analitički izraz                         |
|-----------------------------------|--|
| Čvrstoća pri zatezanju savijanjem | $f_t = 0.75 \cdot \sqrt{f_{cuk}}$        |
| Modul elastičnosti                | $E_c = \frac{10^5}{2.8 + 40.1 / f_{cu}}$ |

#### 2.4.8. MAĐARSKA

Mađarska *fib* grupa, objavila je 2005. godine tehničko uputstvo za betone sa recikliranim agregatom (Balazs i ost., 2008). U njemu je, osim principa projektovanja

RAC betona i lakoagregatnih RAC betona, izvršena klasifikacija recikliranih agregata. Prva podela kao kriterijum koristi zapreminske mase recikliranih agregata, *tabela 20*.

*Tabela 20. Klasifikacija recikliranih agregata prema zapreminskim masama (Balazs i ost., 2008)*

| Reciklirani agregat               | Specifična zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ] | Zapreminska masa u zbijenom stanju [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-----------------------------------|--|---|
| Agregat normalne zapreminske mase | od 2000 do 3000                                  | -   |
| Laki agregat                      | do 2000  | do 1200   |

Uputstvo dozvoljava primenu samo krupne frakcije recikliranog agregata ( $d > 4$  mm). Prema fizičkim karakteristikama, reciklirani agregat je klasifikovan u 7 kategorija, *tabela 21*. Što se tiče dozvoljenih količina zamene prirodnog agregata recikliranim, to je funkcija klase recikliranog agregata određene na osnovu *tabele 21* i projektovane marke betona sa recikliranim agregatom, *tabela 22*.

*Tabela 21. Klasifikacija recikliranih agregata prema fizičkim svojstvima (Balazs i ost., 2008)*

| Test metoda                       | Frakcija agregata [mm] | Fr-0               | Fr-A                    | Fr-B                    | Fr-C                    |                         | Fr-D                    |                         |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                   |                        |                    |                         |                         | Fr-C1                   | Fr-C2                   | Fr-D1                   | Fr-D2                   |
| Los Angeles [%]                   | 3-80                   | $a_{LA15} \leq 15$ | $15 < a_{LA20} \leq 20$ | $20 < a_{LA25} \leq 25$ | $25 < a_{LA30} \leq 30$ | $30 < a_{LA35} \leq 35$ | $35 < a_{LA40} \leq 40$ | $40 < a_{LA45} \leq 45$ |
| Mikro Deval [%]                   | 3-20                   | $a_{MD10} \leq 10$ | $10 < a_{MD15} \leq 15$ | $15 < a_{MD20} \leq 20$ | $20 < a_{MD25} \leq 25$ | $20 < a_{MD25} \leq 25$ | $25 < a_{MD30} \leq 30$ | $25 < a_{MD30} \leq 30$ |
| Magnezijum-sulfatni [%]           | 2-80                   | $a_{Mg5} \leq 5$   | $5 < a_{Mg10} \leq 10$  | $10 < a_{Mg15} \leq 15$ | $15 < a_{Mg18} \leq 18$ | $18 < a_{Mg21} \leq 21$ | $21 < a_{Mg25} \leq 25$ | $25 < a_{Mg30} \leq 30$ |
| Maksimalna projektna klasa betona |                        | C35/45             | C30/37                  | C25/30                  | C20/25                  | C16/20                  | C12/15                  | C8/10                   |

*Tabela 22. Dozvoljene količine zamene prirodnog agregata recikliranim, u % mase (Balazs i ost., 2008)*

| Klasa betona prema EN 206-1 | Klasa recikliranog agregata |      |      |       |       |       |       |
|-----------------------------|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                             | Fr-0                        | Fr-A | Fr-B | Fr-C1 | Fr-C2 | Fr-D1 | Fr-D2 |
| C8/10                       | 100                         | 100  | 100  | 100   | 100   | 100   | 100   |
| C12/15                      | 100                         | 100  | 100  | 100   | 100   | 100   | 70    |
| C16/20                      | 100                         | 100  | 100  | 100   | 100   | 70    | 30    |
| C20/25                      | 100                         | 100  | 100  | 100   | 70    | 30    | -     |
| C25/30                      | 100                         | 100  | 100  | 70    | 30    | -     | -     |
| C30/37                      | 100                         | 100  | 70   | 30    | -     | -     | -     |
| C35/45                      | 100                         | 70   | 30   | -     | -     | -     | -     |
| C40/50                      | 70                          | 30   | -    | -     | -     | -     | -     |
| C45/55                      | 30                          | -    | -    | -     | -     | -     | -     |
| C50/60                      | -                           | -    | -    | -     | -     | -     | -     |

Tehničko uputstvo dozvoljava primenu i većih količina recikliranog agregata od onih koje su specificirane u *tabeli 22*, ali uz laboratorijska ispitivanja koja će dokazati projektovanu klasu betona. Linije prosejavanja recikliranog agregata treba da se nalaze u oblasti koja je definisana nacionalnim standardom za prirodni agregat, uz mogućnost “stepenaste” korekcije. Takođe, geometrija recikliranog agregata mora biti takva da “indeks oblika” bude u propisanim granicama.

Očigledno je da prikazano tehničko uputstvo predstavlja osnovu za standard koji će se odnositi na reciklirane agregate. Može se reći da je vrlo moderno, u smislu da uvažava savremena znanja o tome šta treba znati o recikliranom agregatu prilikom spravljanja betonske mešavine. Takođe, nedvosmisleno postavlja ograničenja u primeni recikliranih agregata određenih klasa. Zamerka bi mogla da se odnosi na kriterijume klasifikacije recikliranog agregata, koji se odnose na drobljivost, habanje i otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Utisak je da bi kombinacija nekog od ovih kriterijuma i još nekih, poput upijanja vode i detaljnija klasifikacija prema zapreminskoj masi, jasnije određivala kvalitet recikliranog agregata.

#### 2.4.9. HOLANDIJA

U Holandiji je kroz više dokumenata regulisana upotreba recikliranog agregata u betonu. Nacionalni dodatak evropskom standardu za beton (NEN 8005, 2008) predviđa mogućnost zamene prirodnog agregata agregatom od recikliranog betona, do 20% zapremine. Primenjeni RCA treba da zadovolji odredbe standarda za prirodni agregat (EN 12620, 2002). Nacionalni standard ([NEN 5905, 1997](#)) definiše da agregat od recikliranog betona treba da sadrži bar 90% betonskog otpada i da mu je zapreminska masa bar 2100 kg/m<sup>3</sup>. U slučaju mešavine agregata od recikliranog betona i od reciklirane opeke, mešavina mora sadržati bar 50% agregata od recikliranog betona, takođe sa zapreminskom masom od bar 2100 kg/m<sup>3</sup>. CUR Recommendations 112 (2007) formalno nije standard, ali se može koristiti kao tehničko uputstvo. U njemu se navodi da je primena do 50% krupnog RCA dozvoljena bez ograničenja po pitanju uslova izloženosti, dok za betone sa 50%-100% krupnog RCA nije preporučena primena za klase izloženosti XD i XS. U svakom slučaju, maksimalna dozvoljena klasa RAC betona je C53/65.

Ukoliko se koriste analitički izrazi Evrokoda 2 ([Eurocode 2, 2004](#)) koji povezuju čvrstoću pri pritisku sa čvrstoćom pri zatezanju ili modulom elastičnosti, za NAC CUR

Recommendations 112 (2007) preporučuje koeficijente kojima se množe na taj način sračunate vrednosti čvrstoće pri zatezanju ili modula elastičnosti kod RAC. Takođe, istim dokumentom preporučuje se uvećanje koeficijenta tečenja ili skupljanja, tj. množenje vrednosti dobijenih na osnovu Evrokoda 2 ([Eurocode 2, 2004](#)) koeficijentima iz *tabele 23*.

*Tabela 23. Korekcionni koeficijenti prema CUR Recommendations 112 (2007)*

| Proračun prema EC2 | Korekcionni koeficijenti |   |
|--------------------|--------------------------|---|
| Svojstvo           | Čvrstoća pri zatezanju   | 1   |
|                    | Modul elastičnosti       | 0.9   |
|                    | Koeficijent tečenja      | 1.1 za klase $\geq$ C20/25<br>1.3 za klase $<$ C20/25 |
|                    | Skupljanje               | 1.4   |

#### 2.4.10. REZIME O TEHNIČKOJ REGULATIVI

Parametar kojim je u većini zemalja izvršena osnovna klasifikacija recikliranog agregata je vrsta materijala koji je recikliran, a najčešće se pominju beton, opeka i mešoviti otpad. Uslovi kvaliteta koje reciklirani agregat treba da zadovolji za primenu u elementima armiranobetonskih konstrukcija, na različite načine su definisani u različitim državama i od strane različitih institucija. S obzirom na predmet istraživanja, od naročitog su interesa uslovi koje treba da ispuni agregat od recikliranog betona. Sumarni prikaz parametara i njihovih graničnih vrednosti, predstavljen je u *tabeli 24*. Naravno, u okviru *tabele 24* dati su samo neki, najčešće pominjani parametri, kako bi bilo moguće izvršiti poređenje.

Parametri kojima se definiše primena recikliranih agregata u konstrukcijskim betonima najčešće su maksimalni procenat učešća u betonskim mešavinama, najviša klasa (čitaj: marka) betona koju je dozvoljeno ostvariti i uslovi izloženosti takvih betona uticajima sredine. U *tabeli 25* dat je sumarni prikaz ova tri parametra koji se odnose na konstrukcijske betone spravljene sa agregatom od recikliranog betona.

Tabela 24. Uporedni prikaz zahteva za kvalitet agregata od recikliranog betona

| Država   | Velika Britanija                 | Hong Kong         | Japan                          | Nemačka             | Kina                      | Mađarska             | Holandija       | RILEM                       |
|--|----------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| Referenca  | <a href="#">BS 8500-2 (2006)</a> | Poon i ost.(2003) | JIS A 5021 (2005) <sup>a</sup> | DIN 4226-100 (2002) | <a href="#">Li (2008)</a> | Balazs i ost. (2008) | NEN 5905 (1997) | RILEM Recommendation (1994) |
| Min. zapreminska masa (kg/m <sup>3</sup> )               | n.d.                             | 2000              | 2300-2500                      | 2000                | 2400                      | 2000                 | 2100            | 2000                        |
| Sadržaj opeke [% mase]                                   | 5                                | n.d. <sup>c</sup> | n.d.                           | 10                  | 5                         | n.d.                 | 10              | n.d.                        |
| Maksimalno upijanje vode [%]                             | n.d.                             | 10                | 3-5                            | 10                  | 7                         | n.d.                 | n.d.            | n.d.                        |
| TEHNIČKI ZAHTEV<br>Sitne čestice (d ≤ 0.063 mm) [% mase] | 5                                | 4                 | 1 <sup>b</sup>                 | n.d.                | n.d.                      | n.d.                 | n.d.            | 2                           |
| Lake čestice (γ < 1000 kg/m <sup>3</sup> ) [% mase]      | 0.5                              | 0.5               | n.d.                           | n.d.                |                           | n.d.                 | n.d.            | 0.5                         |
| Sadržaj asfalta [% mase]                                 | 5                                |                   | n.d.                           | 1                   | 1                         | n.d.                 | n.d.            |                             |
| Ostale strane materije [% mase]                          | 1                                | 1                 | n.d.                           | 0.2                 |                           | n.d.                 | n.d.            | 1                           |
| Sadržaj sulfata (SO <sub>3</sub> ) [% mase]              | 1                                | 1                 | n.d.                           | n.d.                | 1                         | n.d.                 | n.d.            | 1                           |

<sup>a</sup> odnosi se na agregat klase "H"

<sup>b</sup> čestice manje od 0.075 mm

<sup>c</sup> n.d. – nije definisano



Tabela 25. Uporedni prikaz uslova za primenu agregata od recikliranog betona u konstrukcijskim betonima

| Država             | Velika<br>Britanija                  | Hong<br>Kong             | Japan                                | Nemačka       |                   |              | Mađarska             |                  | Holandija                            |                    | RILEM                              |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------|--------------|----------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| Referenca          | <a href="#">BS 8500-2<br/>(2006)</a> | Poon i<br>ost.<br>(2003) | JIS A<br>5021<br>(2005) <sup>1</sup> | DafStb (1998) |                   |              | Balazs i ost. (2008) |                  | CUR-<br>Recommendation 112<br>(2007) |                    | <a href="#">Rep 022<br/>(2000)</a> |
| Maks. krupnog RCA  | 20%                                  | 20%                      | 100%                                 | 45%           | 35%               | 25%          | 100% <sup>2</sup>    | 30% <sup>2</sup> | 50%                                  | 50-100%            | 20%                                |
| Maks. čvrstoća     | C40/50                               | D35                      | 45 MPa                               |               | C30/37            |              | C35/45               | C45/55           |                                      | C53/65             | C50/60                             |
| Uslovi izloženosti | X0,XC1,X<br>C2,XC3<br>XC4,XF1        | n.d. <sup>3</sup>        | n.d.                                 | X0,<br>XC     | sve<br>osim<br>XA | sve<br>klase | n.d.                 | n.d.             | sve<br>klase                         | sve osim<br>XD, XS | n.d.                               |

<sup>1</sup> odnosi se na agregat klase "H"

<sup>2</sup> osnosi se na klasu agregata Fr-0

<sup>3</sup> n.d. – nije definisano

## **2.5 ZAKLJUČAK**

Osnovni zaključci koji se tiču mehaničkih svojstava betona sa recikliranim agregatom, ponašanja pod opterećenjem RAC elemenata konstrukcije i trenutnog stanja tehničke regulative u ovoj oblasti, izvedeni su na kraju odgovarajućih poglavlja. Kao opšti zaključak o RAC sa stanovišta materijala, može se reći da beton sa recikliranim agregatom od betona može biti materijal koji je u tehničkom smislu konkurentan klasičnom betonu. Njegova fizičko-mehanička svojstva mogu biti ista ili nešto niža od onih kod uporednog betona istog efektivnog vodocementnog faktora. Ovo se prvenstveno odnosi na betone koji sadrže do 50% krupnog recikliranog agregata. Isto može da važi i kod betona sa većom količinom krupnog RCA od 50%, ali sa porastom količine RCA raste i rasipanje rezultata. Broj do sada obavljenih istraživanja ponašanja elemenata konstrukcija od RAC izloženih savijanju ili smicanju izuzetno je mali. Potrebno je unaprediti bazu podataka u ovoj oblasti i sagledati rezultate u celini u pokušaju da se izvedu opšti zaključci. Ispitivanja ponašanja pri savijanju obavljana su uglavnom sa preduslovom ekvivalentnih vodocementnih faktora RAC i NAC betona. Time su dobijene različite čvrstoće pri pritisku, što je u poređenju NAC i RAC greda za stanje eksploatacije delimično, a za stanje granične nosivosti u potpunosti zanemareno. Tehnička regulativa koja se odnosi na definisanje uslova pod kojima se agregat od recikliranog betona može koristiti za konstrukcijske betone nije konzistentna i koristi različite kriterijume od slučaja do slučaja. Tehnička regulativa koja se odnosi na RAC elemente konstrukcije praktično ne postoji.

### **3. Sopstvena eksperimentalna ispitivanja**

#### **3.1 UVOD**

Osnovni cilj eksperimentalnog ispitivanja bio je poređenje ponašanja pri savijanju i smicanju grednih nosača od betona sa različitim sadržajem agregata od recikliranog betona (RCA) u mešavini (0%, 50% i 100%). Osim vrste agregata, parametar je bio i količina podužne i/ili poprečne armature u gredama, dok je čvrstoća pri pritisku kod sva tri betona trebalo da bude ista. Ovo je bio osnovni zahtev pri projektovanju betonskih mešavina. Ideja je bila da se analizira efekat količine recikliranog agregata u betonu, dok bi čvrstoća pri pritisku bila eliminisana kao parametar. Imajući u vidu nedostatak pouzdanih algoritama za projektovanje sastava betonskih mešavina koje sadrži reciklirani agregat, a pogotovo postavljeni uslov istih čvrstoća pri pritisku, opredeljenje je bilo da se sprovedu sopstvena prethodna istraživanja materijala. Prethodna eksperimentalna ispitivanja su obavljena u dve faze. Prva je bila ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava agregata čiji je cilj bio upoznavanje sa strukturom zrna recikliranog agregata na makro nivou i prikupljanje neophodnih podataka za projektovanje betonskih mešavina. Cilj je takođe bio i uočavanje razlika u svojstvima prirodnog i recikliranog agregata koje bi potencijalno predstavljale objašnjenje za fenomene uočene tokom ispitivanja betona i greda koje sadrže reciklirani agregat. Druga faza prethodnih ispitivanja odvijala se na nivou betona kao materijala, u okviru kojeg je, na osnovu rezultata prethodne faze i iskustva sa klasičnim betonom, spravljen niz probnih betonskih mešavina sa različitim sadržajem RCA. Na osnovu rezultata ispitivanja i sprovedenih analiza, određene su recepture betona sa 0%, 50% i 100% RCA koje su korišćene prilikom betoniranja grednih nosača.

#### **3.2 ISPITIVANJE FIZIČKO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA AGREGATA**

##### **3.2.1. PRIPREMA ISPITIVANJA**

U okviru svih eksperimentalnih istraživanja korišćen je prirodni agregat i dve vrste agregata od recikliranog betona. Primenjeni prirodni agregat bio je rečni, pri čemu su prve tri frakcije (0/4, 4/8 i 8/16 mm) dobijene sa separacije "Vodogradnja" Pukovac, dok je četvrta frakcija (16/31,5) uzeta sa separacije "Branko Moravac d.o.o.", Požarevac. Reciklirani krupan agregat je delom dobijen recikliranjem betona iz stare

betonske konstrukcije koja je srušena (agregat A), a delom recikliranjem kontrolnih betonskih kocki iz laboratorije (agregat B), slika 17.



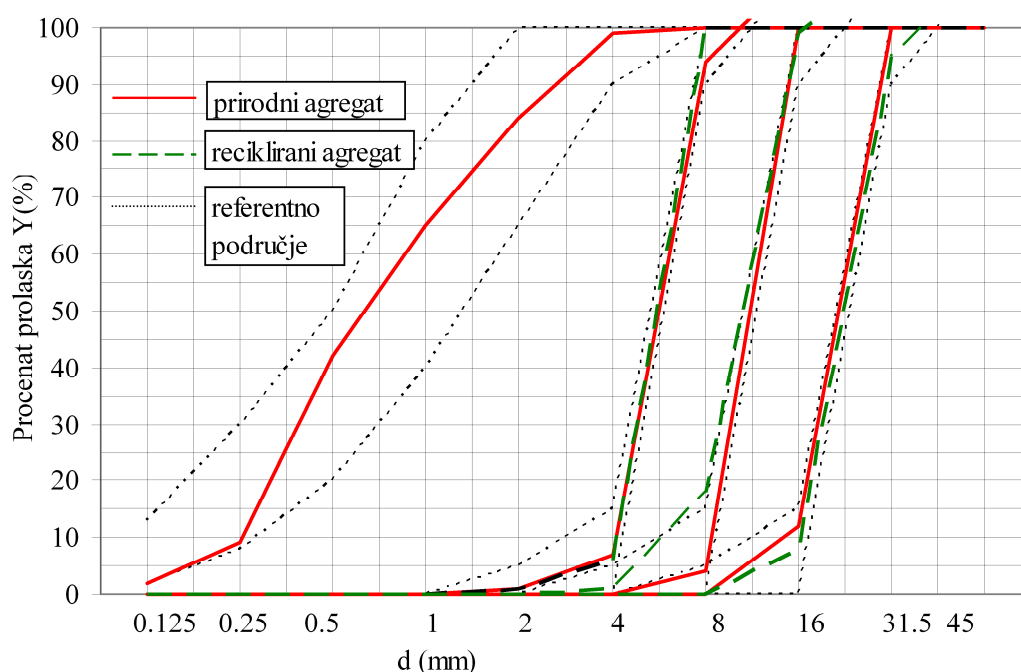
Slika 17. Rušenje konstrukcije (levo) i betoni koji su reciklirani u agregate "A" i „B“

Ispitivanjem kernova izvađenih iz delova srušene betonske konstrukcije, zaključeno je da se radi o betonu koji zadovoljava marku MB 40. Kocke koje su ispitivane u laboratorijskim uslovima različitih su mehaničkih svojstava, tako da se može reći da je kvalitet originalnog betona raznorodan. Ovo je dobra simulacija situacije iz prakse gde se u reciklažnom postrojenju drobi beton različitog, uglavnom nepoznatog kvaliteta, a zatim formira mešavina recikliranog agregata koja se prosejava u frakcije. Agregati A i B, kao i prirodan agregat, inicijalno su bili razvrstani u 3 frakcije (4/8, 8/16 i 16/32 mm) i tako skladišteni u džakovima. U ovom istraživanju, agregati A i B su tretirani odvojeno samo prilikom određivanja granulometrijskog sastava. Nakon toga su formirane 3 mešavine, za tri frakcije krupnog recikliranog agregata, čije su fizičko-mehaničke karakteristike dalje ispitivane. Mešavine agregata A i B formirane su prema unapred definisanim odnosima količina za svaku frakciju (tabela 26), kako bi se postiglo najbolje iskorišćenje ukupne dostupne količine recikliranog agregata za sva planirana ispitivanja. U daljem tekstu koji se odnosi na sopstvena istraživanja, pod recikliranim agregatom podrazumevaće se mešavina agregata A i B, tabela 26.

Tabela 26. Procentualno učešće različitih vrsta recikliranog agregata u mešavini

| Frakcija [mm] | Tip recikliranog agregata |       |
|---------------|---------------------------|-------|
|               | A [%]                     | B [%] |
| II (4/8)      | 27.3                      | 72.7  |
| III (8/16)    | 23.5                      | 76.5  |
| IV (16/31.5)  | 46.9                      | 53.1  |

U pripremi za prosejavanje agregata sprovedena je procedura uzimanja reprezentativnog uzorka, tj. četvrtanje agregata (ISS 1985). Nakon toga izvršeno je sušenje svakog uzorka – po tri frakcije krupnog recikliranog agregata (A i B), kao i 4 frakcije prirodnog agregata. Određivanje granulometrijskog sastava izvršeno je metodom suvog sejanja, a linije prosejavanja prirodnog agregata kao i mešavine recikliranog agregata po frakcijama (0/4, 4/8, 8/16 i 16/31,5 mm), prikazane su na slici 18.



Slika 18. Granulometrijski sastav prirodnog i mešavine recikliranog agregata

Sa slike se može uočiti povišen sadržaj podmerenih zrna u trećoj frakciji recikliranog agregata (18%), što je i jedino odstupanje svih prikazanih frakcija od referentnih vrednosti. Ovo je uzeto u obzir prilikom formiranja mešavine agregata za svaku od betonskih receptura.

### 3.2.2. OBLIK ZRNA AGREGATA

Određivanje oblika zrna prirodnog i recikliranog agregata obavljeno je metodom zapreminskog koeficijenta (ISS 1984<sup>a</sup>), a rezultati su prikazani u tabeli 27.

Tabela 27. Zapreminski koeficijent zrna agregata

| Agregat                 |             | II (4/8 mm) | III (8/16 mm) | IV (16/31.5 mm) |
|-------------------------|-------------|-------------|---------------|-----------------|
| Zapreminski koeficijent | Reciklirani | 0.290       | 0.207         | 0.286           |
|                         | Prirodni    | 0.274       | 0.271         | 0.297           |

Iznenaduje sličnost oblika zrna ova dva različita agregata, jer je poznato da su zrna recikliranog agregata najčešće uglasta (Ignjatović, 2009), vrlo slična prirodnom drobljenom agregatu. Očigledno je da obe vrste agregata ispunjavaju kriterijum za primenu u betonu, s obzirom da ispunjavaju uslov da je zapreminski koeficijent  $C \geq 0,15$  (0,18) (ISS 1986). Izgled frakcija prirodnog i recikliranog agregata, kao i detalj zrna recikliranog agregata, prikazan je na slici 19.



Slika 19. Izgled zrna recikliranog i prirodnog agregata po frakcijama (levo) i detalj zrna recikliranog agregata (desno)

### 3.2.3. ZAPREMINSKA MASA U RASTRESITOM I ZBIJENOM STANJU

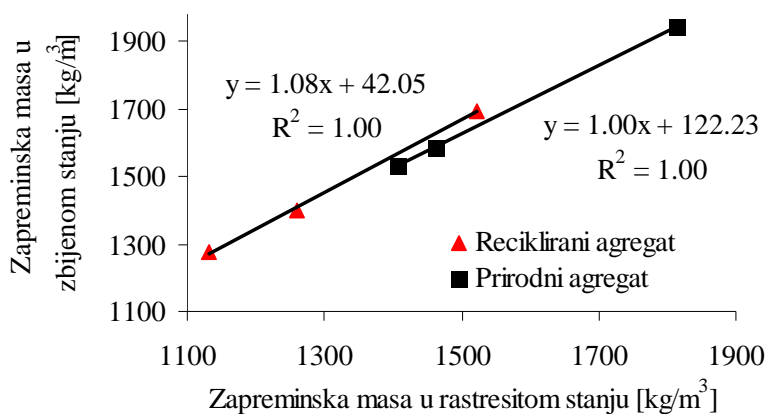
Određivanje zapreminske mase u rastresitom i zbijenom stanju prirodnog i recikliranog krupnog agregata, obavljeno je prema važećim nacionalnim standardima (ISS 1999<sup>a</sup>, ISS 2009), a rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 28.

Tabela 28. Zapreminske mase agregata u rastresitom i zbijenom stanju

| Frakcija     | Prirodni agregat                   |                                 | Reciklirani agregat                |                                 |
|--------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|              | rastresito<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | zbijeno<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | rastresito<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | zbijeno<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
| I (0/4)      | 1519                               | 1628                            | -                                  | -                               |
| II (4/8)     | 1406                               | 1532                            | 1132                               | 1275                            |
| III (8/16)   | 1463                               | 1587                            | 1260                               | 1398                            |
| IV (16/31.5) | 1814                               | 1941                            | 1521                               | 1694                            |

Zapreminska masa recikliranog agregata u rastresitom stanju, za frakcije II, III i IV, manja je za oko 20%, 14% i 16% respektivno, u odnosu na prirodni agregat. Ovo je posledica prisustva cementnog maltera relativno male zapreminske mase u zrnima recikliranog agregata. Kod zapreminske mase u zbijenom stanju, razlike su nešto manje i iznose 17%, 12% i 13% za II, III i IV frakciju respektivno. Razlog je bolje “pakovanje” zrna recikliranog agregata prilikom nabijanja metalnom šipkom, jer pri toj

operaciji delimično otpadaju delovi starog cementnog maltera, te se popunjavaju šupljine između zrna recikliranog agregata. Indikativno je da su najmanje razlike u obe zapreminske mase dobijene za III frakciju. To je posledica granulometrijskog sastava ove frakcije recikliranog agregata, tj. nešto većeg sadržaja podmerenih zrna (18%, *Slika 18*), koja omogućava efikasnije “pakovanje” zrna recikliranog agregata. Između zapreminskih masa u rastresitom i zbijenom stanju može se uspostaviti linearna zavisnost, sa izuzetno malim srednjim kvadratnim odstupanjem, *slika 20*.



Slika 20. Zavisnost između zapreminskih masa u rastresitom i zbijenom stanju

### 3.2.4. STVARNA ZAPREMINSKA MASA I UPIJANJE VODE

Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode sprovedeno je primenom Piknometarske metode ([ISS 1999<sup>b</sup>](#)). Na osnovu metodom definisanih merenja, sračunate su zapreminske mase zasićenog, površinski osušenog uzorka ( $\rho_{ps}$ ), zapreminska masa uzorka osušenog u sušnici ( $\rho_{po}$ ) i upijanje vode ( $a$ ). S obzirom da je upijanje vode jedna od najvažnijih osobina recikliranog agregata jer je taj podatak neophodan pri projektovanju sastava betonskih mešavina, ispitivanje je obavljeno pri različitim nivoima zasićenja, tj. za različite intervale vremena tokom koga je reciklirani agregat bio potopljen u vodi – 10 min, 30 min i 24 časa, *tabela 29*. Isti podaci su izmereni i odgovarajuće veličine sračunate i kod prirodnog agregata, *tabela 30*. Vrednosti prikazane u *tabeli 29*. odnose se na uzorke po frakcijama koji nisu prosejani, tj. kod kojih nisu uklonjena podmerena i nadmerena zrna, kako to definiše nacionalni standard koji propisuje uzorkovanje agregata ([ISS 1998](#)). To je učinjeno kako bi se dobili validni podaci neophodni za projektovanje sastava betonskih mešavina, s obzirom da podmerena zrna mogu značajno da utiču na vrednost upijanja agregata.

Tabela 29. Upijanje i zapreminske mase zrna recikliranog agregata

| Vreme  | RCA II (4/8 mm) |                                  |                                  | RCA III (8/16 mm) |                                  |                                  | RCA IV (16/31.5 mm) |                                  |                                  |
|--------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|        | a [%]           | $\rho_{ps}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_{po}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | a [%]             | $\rho_{ps}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_{po}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | a [%]               | $\rho_{ps}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_{po}$ [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 10 min | 4.1             | 2459                             | 2362                             | 3.5               | 2479                             | 2395                             | 3.4                 | 2471                             | 2391                             |
| 30 min | 4.1             | 2454                             | 2356                             | 4.0               | 2453                             | 2359                             | 3.7                 | 2451                             | 2363                             |
| 24h    | 4.6             | 2405                             | 2309                             | 3.7               | 2456                             | 2370                             | 3.8                 | 2482                             | 2372                             |

Tabela 30. Upijanje i zapreminske mase zrna prirodnog agregata

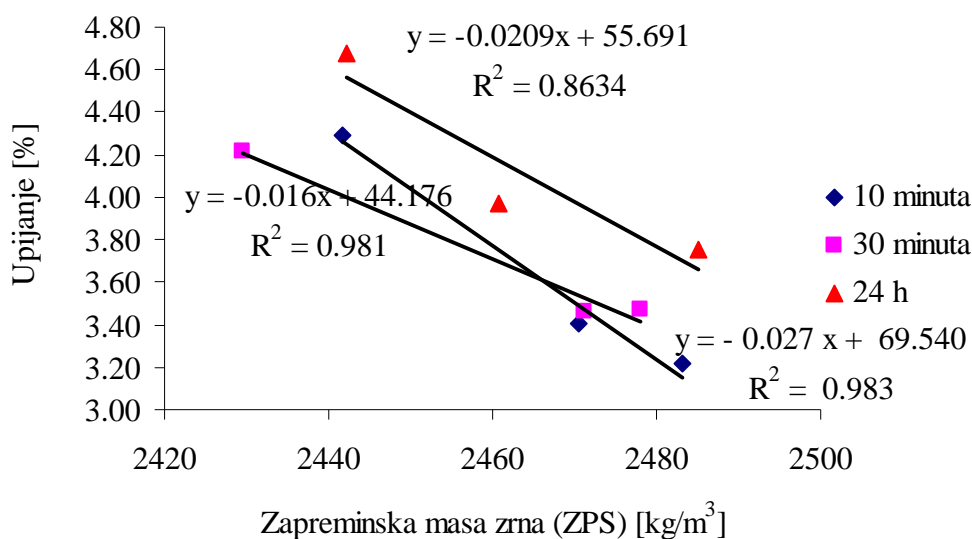
| Vreme  | PA II (4/8 mm) |                                  |                                  | PA III (8/16 mm) |                                  |                                  | PA IV (16/31.5 mm) |                                  |                                  |
|--------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|        | a [%]          | $\rho_{ps}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_{po}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | a [%]            | $\rho_{ps}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_{po}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | a [%]              | $\rho_{ps}$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_{po}$ [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 10 min | 0.8            | 2585                             | 2564                             | 0.6              | 2592                             | 2577                             | 0.4                | 2607                             | 2598                             |
| 30 min | 0.8            | 2598                             | 2578                             | 0.6              | 2592                             | 2576                             | 0.5                | 2595                             | 2582                             |
| 24h    | 0.9            | 2593                             | 2570                             | 0.8              | 2595                             | 2575                             | 0.5                | 2601                             | 2587                             |

Očekivano, što je duže reciklirani agregat u vodi, upijanje je veće, ali razlike u upijanjima nisu velike – čak 90% upijanja kod recikliranog agregata obavi se u prvih 10 minuta, nezavisno od veličine maksimalnog zrna agregata u frakciji. Razlike u zapreminskim masama uzoraka recikliranog agregata u površinski suvom, vodom zasićenom stanju, izmerenim u različitim vremenskim intervalima i za svaku od frakcija, praktično su zanemarljive, na nivou od 1%. Slični odnosi između pomenutih veličina postoje i kod prirodnog agregata, ali su očigledne razlike u apsolutnim vrednostima. Upijanja recikliranog agregata kreću se u rasponu od 3.4% do 4.6% (tabela 29), što je nekoliko puta više u odnosu na upijanja prirodnog agregata koja se kreću od 0.4% do 0.9%, tabela 30.

Za obe vrste agregata važi da veća upijanja odgovaraju sitnijim frakcijama. Zapreminska masa recikliranog agregata u vodom zasićenom, površinski suvom stanju, manja je za 5,3% u odnosu na prirodni agregat. Kod zapreminske mase uzorka osušenog u sušnici, razlika kod ove dve vrste agregata iznosi 8,3%.

Na osnovu *tabele 29* može se uspostaviti linearna zavisnost između upijanja i svake od sračunatih zapreminskih masa u vodom zasićenom površinski suvom stanju (ZPS), pri čemu veće upijanje znači manju zapreminsku masu, *slika 21*.





Slika 21. Zavisnost između zapreminskih masa zrna recikliranog agregata i upijanja

### 3.2.5. DROBLJIVOST AGREGATA

Mera otpornosti agregata prema drobljenju utvrđena je metodom ispitivanja drobljivosti u cilindru ([ISS 1994](#)). Rezultati ispitivanja prikazani su u *tabeli 31*.

Tabela 31. Drobljivost agregata

|             | Agregat | II (4/8 mm) | III (8/16 mm) | IV (16/32 mm) |
|-------------|---------|-------------|---------------|---------------|
| Drobljivost | RCA     | 23.0        | 26.1          | 32.7          |
| [%]         | PA      | 21.0        | 24.0          | 28.9          |

Drobljivost recikliranog agregata je prosečno, gledajući sve frakcije, za oko 10% veća nego kod prirodnog, što je posledica prisustva starog cementnog kamena u zrnu recikliranog agregata. Cementni malter ima nižu otpornost na drobljenje u poređenju sa zrnom prirodnog agregata oko koga se nalazi, pa u proseku, zrna recikliranog agregata imaju veću drobljivost. Rezultati iz *tabele 31* ukazuju da sa porastom krupnoće frakcije raste drobljivost obe vrste agregata, što je za prirodni agregat i očekivano ([Muravljev, 1998](#)). Kod recikliranog agregata, najveću drobljivost će imati frakcija koja sadrži najveću količinu cementnog maltera, jer je procena da kod ocene drobljivosti recikliranog agregata, efekat količine cementnog maltera u pojedinim frakcijama premašuje efekat veličine zrna. To bi, prema prikazanim rezultatima iz *tabele 31*, značilo da sa porastom maksimalnog zrna u frakciji raste i količina cementnog maltera. Ipak, imajući u vidu rezultate zapreminskih masa iz *tabele 29*, ovo nije logično, pa bi za dalju analizu rezultata drobljivosti trebalo nekom od poznatih metoda odrediti količinu cementne paste po frakcijama recikliranog agregata. Ako se vrednosti iz *tabele 31*

uporede sa zahtevima nacionalnog standarda koji definiše kvalitet agregata za izradu betona ([ISS 1986](#)), zaključak je da jedino frakcija IV recikliranog agregata ne ispunjava uslov, s obzirom da je drobljivost veća od 30%. Ipak, s obzirom na procentualno učešće u mešavini agregata koja služi za spravljanje betona (oko 30%), nema sumnje da reciklirani agregat u celini zadovoljava ovaj kriterijum.

### 3.2.6. SADRŽAJ SITNIH ČESTICA U AGREGATU

Sadržaj sitnih čestica u obe vrste agregata određen je metodom mokrog sejanja ([ISS 1982](#)), *tabela 32*.

*Tabela 32. Sadržaj sitnih čestica u agregatu*

| Agregat | Sitne čestice | I<br>(0/4 mm) | II<br>(4/8 mm) | III<br>(8/16 mm) | IV<br>(16/32 mm) |
|---------|---------------|---------------|----------------|------------------|------------------|
| RCA     | < 0.063 [%]   |               | 0.88           | 0.38             | 0.00             |
|         | < 0.09 [%]    |               | 0.96           | 0.42             | 0.01             |
| PA      | < 0.063 [%]   | 2.80          | 0.23           | 0.08             | 0.12             |
|         | < 0.09 [%]    | 3.20          | 0.28           | 0.10             | 0.12             |

Iako procentualno izraženo značajno veći u odnosu na prirodni agregat, sadržaj sitnih čestica kod recikliranog agregata zadovoljava tehnički uslov za agregat ([ISS 1986](#)), koji limitira sadržaj sitnih čestica u krupnim frakcijama agregata na 1%. Veća količina sitnih čestica kod recikliranog agregata može se objasniti prisustvom fine cementne prašine nastale kao rezultat delimičnog drobljenja starog cementnog maltera prilikom uzimanja i rukovanja uzorkom. Količina sitnih čestica u prirodnom agregatu sitne frakcije takođe zadovoljava tehnički uslov koji propisuje maksimalni sadržaj u iznosu od 5% ([ISS 1986](#)).

### 3.2.7. SUMARNI PRIKAZ REZULTATA I ZAKLJUČAK

Ispitani prirodni agregat u svemu zadovoljava tehničke uslove za primenu u betonima ([ISS 1986](#)). Analizirajući rezultate ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava prirodnog i recikliranog agregata, sumarno prikazanih u *tabeli 33*, može se zaključiti da je upijanje vode praktično jedino svojstvo koje se bitno razlikuje kod ove dve vrste agregata. Ipak, upijanje vode recikliranog agregata je u granicama od 3.7% do 4.6%, što se može smatrati prihvatljivim za proizvodnju konstrukcijskog betona sa recikliranim agregatom. Ove vrednosti upijanja su u okviru vrednosti definisanih standardima za RCA, kao što su Nemački standard -10% ([DIN 4226-100, 2002](#)), Japanski standard- JIS A 5022- 5% (Sakai, 2009), Kineski tehnički pravilnik DG/TJ07-008-7% (Li, 2008),

Tehničke specifikacije Hong Konga-10% (Works Bureau, 2002). Neki istraživači su preporučili da maksimalno upijanje RCA koji se primenjuje u konstrukcijskim betonima bude 3%, ali da može da bude i do 5% (Oikonomou, 2005). Ostala svojstva RCA zadovoljavaju uslove kvaliteta za prirodni agregat, osim drobljivosti recikliranog agregata frakcije 16/31.5 mm koja je za oko 10% veća od maksimalno dozvoljene za prirodni agregat. Imajući u vidu navedene činjenice, može se smatrati da je primenjeni reciklirani agregat dobrog kvaliteta.

*Tabela 33. Svojstva krupnog prirodnog i recikliranog agregata*

| Karakteristika                        | Tehnički zahtev        | Tip agregata | 4/8 mm | 8/16 mm | 16/31.5 mm |     |
|---------------------------------------|------------------------|--------------|--------|---------|------------|-----|
| Zapreminski koeficijent [%]           | -                      | RCA          | 29.0   | 20.7    | 28.6       |     |
|                                       | $\geq 18$              | PA           | 27.4   | 27.1    | 29.7       |     |
| Drobljivost (u cilindru) [%]          | -                      | RCA          | 23.0   | 26.1    | 32.7       |     |
|                                       | $< 30$                 | PA           | 21.0   | 24.0    | 28.9       |     |
| Sadržaj sitnih čestica $< 0.063$ [%]  | -                      | RCA          | 0.38   | 0.38    | 0.00       |     |
|                                       | $< 1$                  | PA           | 0.23   | 0.08    | 0.12       |     |
|                                       | vodom zasićeno         | RCA          | 2405   | 2456    | 2482       |     |
|                                       | površinski suvo stanje | 2000-3000 PA | 2593   | 2595    | 2601       |     |
| Zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ] | zbijeno stanje         | RCA          | 1275   | 1398    | 1694       |     |
|                                       |                        | PA           | 1532   | 1587    | 1941       |     |
|                                       | rastresito stanje      | RCA          | 1132   | 1260    | 1521       |     |
|                                       |                        | PA           | 1406   | 1463    | 1814       |     |
| Upijanje vode [%]                     | 10 min                 | -            | 4.1    | 3.5     | 3.4        |     |
|                                       | 30 min                 | -            | RCA    | 4.1     | 4.0        | 3.7 |
|                                       | 24h                    | -            |        | 4.6     | 3.7        | 3.8 |
|                                       | 10 min                 | -            |        | 0.8     | 0.6        | 0.4 |
|                                       | 30 min                 | -            | PA     | 0.8     | 0.6        | 0.5 |
|                                       | 24h                    | $\leq 1.5$   |        | 0.9     | 0.8        | 0.5 |

### **3.3 ISPITIVANJA FIZIČKO-MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM**

#### 3.3.1. UVOD

Ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava betona sa različitim sadržajem recikliranog agregata bila je praktično priprema za ispitivanje ponašanja grednih nosača kao centralnog dela planiranih eksperimentalnih ispitivanja. U tom smislu, ova faza je nazvana probnim ispitivanjima čije je sprovođenje imalo dva osnovna cilja:

- Ispitivanje odnosa osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika kod betona sa različitim sadržajem recikliranog krupnog agregata, koji imaju isti efektivni vodocementni faktor,

- uspostavljanje zavisnosti između čvrstoće pri pritisku i vodocementnog faktora za betone sa različitim sadržajem RCA, kao preduslova za projektovanje sastava takvih betona sa željenom čvrstoćom pri pritisku.

Obimom probnih ispitivanja predviđeno je formiranje 9 betonskih mešavina. U njima su varirane 3 količine cementa –  $300 \text{ kg/m}^3$ ,  $350 \text{ kg/m}^3$  i  $400 \text{ kg/m}^3$ , kao i količina, tj. procentualno učešće krupnog recikliranog agregata u mešavini, u iznosima od 0%, 50% i 100%. Ciljana je plastična konzistencija, koja je izražena merom sleganja od  $8 \pm 2$  cm nakon 30 minuta. Ovaj period od 30 minuta je usvojen kako bi se simulirali realni transportni uslovi od fabrike betona do gradilišta.

### 3.3.2. PROJEKTOVANJE SASTAVA MEŠAVINA U PROBNIM ISPITIVANJIMA

Pri projektovanju sastava betona od recikliranog agregata korišćeni su principi koji se inače primenjuju prilikom projektovanja betona sa prirodnim agregatom. Iako se u literaturi mogu naći neke nove metode za projektovanje sastava betona sa recikliranim agregatom, npr. metoda ekvivalentnih zapremina cementnog maltera (engl. *equivalent mortar volume method-EMV*, [Fathifazl 2008](#)), odlučeno je da se zadrži procedura spravljanja koja je uobičajena kod betona sa prirodnim agregatom. Naravno, vodilo se računa o specifičnostima recikliranog agregata. Kao što je već rečeno, oblik i struktura recikliranog agregata utiču na niz fizičkih svojstava agregata kao što su zapreminska masa, upijanje vode, sadržaj sitnih čestica, primesa itd. Ova svojstva recikliranog agregata utiču na određivanje ukupnog sadržaja vode u mešavini, vodocementni faktor, obradljivost i ugradljivost svežeg betona, tehnologiju mešanja komponenata i na niz mehaničkih svojstava očvrslog betona, u prvom redu čvrstoće pri pritisku. Iako je kroz pregled dosadašnjih istraživanja ukazano na povoljan efekat koji određeni mineralni dodaci mogu imati na mehanička svojstva RAC betona (pre svih silikatna prašina), odlučeno je da sastav svih betona čine samo elementarni konstitutivni materijali – agregat, cement i voda. Osnovni motiv bio je utvrđivanje „realnih” odnosa između svojstava NAC i RAC, s obzirom da mineralni dodaci mogu da imaju različit efekat na posmatrano svojstvo NAC i RAC, ali i da imaju efekat „popravljanja” samo nekih svojstava betona.

Sav agregat, prirodni i reciklirani, sušen je u sušnici, a zatim prirodno hlađen na temperaturu prostorije. Ovo je učinjeno kako bi se imala kontrola nad konzistencijom

mešavina. Nije upotrebljivan aditiv tipa plastifikatora, što je zahtevalo kompenzaciju, tj. dodavanje vode u mešavinama sa recikliranim agregatom, u skladu sa kapacitetom upijanja za izabrani vremenski period od 30 minuta (*tabela 29*). Zbog toga je procenjeno da će konzistencija merena odmah nakon spravljanja mešavina biti nešto veća, na nivou sleganja od  $13 \pm 2$  cm. Odsustvo plastifikatora opravdano je željom da se ne “zamaskira” svojstvo recikliranog agregata da upija deo vode namenjen hidrataciji cementa. Dakle, koncept je da se slobodna količina vode ( $m_v$ ) usvoji (odredi na osnovu empirijskih izraza i/ili prethodnog iskustva) u skadu sa ciljanom konzistencijom, a da se dodatna količina vode ( $\Delta m_v$ ) namenjena “zasićenju” agregata odredi iz eksperimentalno utvrđenog kapaciteta upijanja nakon 30 min. Ako se ne obezbedi ova dodatna količina vode, reciklirani agregat bi upio deo vode namenjen procesu hidratacije cementa, došlo bi do poremećaja vodocementnog faktora i teško predvidljive, ali sigurno kruće konzistencije.

Za formiranje mešavina korišćen je agregat čija su fizičko-mehanička svojstva prethodno detaljno ispitana (poglavlje [3.2](#)). U okviru referentnog područja prosejavanja četvorofrakcijskog agregata (između krivih A32 i B32, definisanih standardom [ISS 1984<sup>b</sup>](#)), definisane su referentne krive agregata za sve tri vrste betona, tj. procentualni iznosi prolaska kroz odgovarajuća sita, *tabela 34*.

*Tabela 34. Ordinate referentnih linija mešavina agregata za svaku od tri vrste betona*

| Vrsta betona | Otvori sita (mm) |      |     |    |    |    |    |    |      |     |
|--------------|------------------|------|-----|----|----|----|----|----|------|-----|
|              | 0.125            | 0.25 | 0.5 | 1  | 2  | 4  | 8  | 16 | 31.5 | 45  |
| NAC          | 1                | 3    | 14  | 22 | 29 | 35 | 51 | 72 | 100  | 100 |
| RAC50        | 1                | 3    | 15  | 23 | 29 | 36 | 52 | 73 | 99   | 100 |
| RAC100       | 1                | 3    | 15  | 23 | 29 | 35 | 51 | 72 | 98   | 100 |

Na osnovu tih vrednosti i granulometrijskog sastava frakcija agregata, sračunata su procentualna učešća pojedinih frakcija za svaku od betonskih mešavina, *tabela 35*.

*Tabela 35. Procentualno učešće pojedinih frakcija agregata za svaku vrstu betona*

| Frakcija [mm] | Vrsta betona |       |        |    |
|---------------|--------------|-------|--------|----|
|               | NAC          | RAC50 | RAC100 |    |
| Učešće [%]    | 0-4          | 34    | 35     | 35 |
|               | 4-8          | 17    | 15     | 12 |
|               | 8-16         | 17    | 20     | 23 |
|               | 16-31.5      | 32    | 30     | 30 |

Konačno, ukupna količina agregata određena je iz zapreminske jednačine, tj. sume apsolutnih zapremina komponentnih materijala (vode, cementa, agregata i uvučenog vazduha) u 1 m<sup>3</sup> betona, izrazi (5)-(7). Količina uvučenog vazduha je pretpostavljena u iznosu od 2% za sve mešavine.

$$\frac{m_c}{g_{sc}} + \frac{m_v}{g_{sv}} + \frac{0.34m_a}{g_{s,PAS}} + \frac{0.66m_a}{g_{s,PAK}} + v_p = 1 \quad (5)$$

$$\frac{m_c}{g_{sc}} + \frac{m_v}{g_{sv}} + \frac{0.35 \cdot m_a}{g_{s,PAS}} + \frac{0.325 \cdot m_a}{g_{s,PAK}} + \frac{0.325 \cdot m_a}{g_{s,ARBK}} + v_p = 1 \quad (6)$$

$$\frac{m_c}{g_{sc}} + \frac{m_v}{g_{sv}} + \frac{0.35 \cdot m_a}{g_{s,PAS}} + \frac{0.65 \cdot m_a}{g_{s,ARBK}} + v_p = 1 \quad (7)$$

Masa agregata po frakcijama određena je na osnovu ukupne količine agregata i procentualnog učešća svake frakcije u mešavini (*tabela 35*). Sastav probnih mešavina po komponentama prikazan je u *tabeli 36*.

*Tabela 36. Projektni sastav probnih mešavina i rezultati ispitivanja konzistencije metodom sleganja*

| Oznaka betona | Cement, m <sub>c</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | Voda m <sub>v</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | Dodatna voda Δm <sub>v</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | PA agregat [kg/m <sup>3</sup> ] | RCA agregat [kg/m <sup>3</sup> ] | Sleganje [cm] |            | f <sub>c</sub> [MPa] |
|---------------|---|--|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------|------------|----------------------|
|               |   |  |   |                                 |                                  | t=0 [min]     | t=30 [min] |                      |
| NAC-1         | 300   | 185                                      | -   | 1810                            | -                                | 12.5          | 7.5        | 35.3                 |
| NAC-2         | 350   | 190                                      | -   | 1755                            | -                                | 13            | 8          | 39.3                 |
| NAC-3         | 400   | 195                                      | -   | 1699                            | -                                | 12            | 7.5        | 43.8                 |
| RAC50-1       | 300   | 185                                      | 22  | 1186                            | 571                              | 12.5          | 6.5        | 33.3                 |
| RAC50-2       | 350   | 190                                      | 22  | 1150                            | 554                              | 13            | 7.5        | 41.1                 |
| RAC50-3       | 400   | 195                                      | 21  | 1113                            | 536                              | 15            | 8          | 40.7                 |
| RAC100-1      | 300   | 185                                      | 43  | 597                             | 1109                             | 13.5          | 5.5        | 34.7                 |
| RAC100-2      | 350   | 190                                      | 42  | 579                             | 1075                             | 13            | 5.5        | 39.3                 |
| RAC100-3      | 400   | 195                                      | 41  | 561                             | 1041                             | 14            | 7          | 44.9                 |

Ukupne zapremine ovih mešavina bile su relativno male, po oko 8 l, dovoljne za izradu dva uzorka oblika kocke ivice 15 cm. Mešanje je obavljeno pomoću mešalice zapremine oko 11 l, *Slika 22* levo. Ispitivanje ugradljivosti betonskih mešavina sprovedeno je metodom sleganja Abramsovog konusa, *slika 23*. Iz rezultata ispitivanja konzistencije probnih betona (*tabela 36*), vidi se da je zahtevano sleganje Abramsovog konusa od 13±2 cm nakon spravljanja, postignuto kod svih mešavina, a da sleganje od 8±2 cm nakon 30 minuta nije postignuto kod dva betona tipa RAC100. Oni su imali

krutu konzistenciju i pored činjenice da im je dodata voda na osnovu upijanja agregata za 30 minuta.



*Slika 22. Mešalice za probna ispitivanja 1. faze (levo) i 2. faze (desno)*



*Slika 23. Merenje sleganja odmah nakon spravljanja betona sa recikliranim agregatom i istog betona nakon 30 minuta (desno)*

Objašnjenje leži u obliku i strukturi zrna recikliranog agregata, odnosno potrebi za većom količinom cementne kaše koja popunjava pore starog cementnog maltera i formira tanak sloj na površini recikliranog agregata. Time se “podmazuju” zrna recikliranog agregata i postiže bolja ugradljivost i obradljivost, praktično ista kao kod betona sa prirodnim agregatom. Ova činjenica, kao i uzimanje u obzir efekta mešalice, dovele su do korekcije sastava betonskih mešavina, sprovedenih u okviru druge faze izrade probnih mešavina. Količina vode je kod svih betona tipa NAC i RAC50 smanjena za  $5 \text{ kg/m}^3$ , dok je kod betona tipa RAC100 ona zadržana na istom nivou kao u probnim mešavinama. Ipak, da bi se zadržao isti efektivni vodocementni faktor kod svih mešavina, kod grupe betona RAC100 korigovana je i količina cementa. Konačne recepture za sve betone iz druge faze prikazane su u *tabeli 37*.

Tabela 37. Konačni sastav betonskih mešavina iz druge faze

| Oznaka betona | Cement, $m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Voda, $m_v$ [kg/m <sup>3</sup> ] | Dodatna voda, $\Delta m_v$ [kg/m <sup>3</sup> ] | PA [kg/m <sup>3</sup> ] | Krupan RCA [kg/m <sup>3</sup> ] | $m_v/m_c$ |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------|---------------------------------|-----------|
| NAC-1         | 300                                | 180                              | -   | 1823                    | -                               | 0.600     |
| NAC-2         | 350                                | 185                              | -   | 1768                    | -                               | 0.529     |
| NAC-3         | 400                                | 190                              | -   | 1712                    | -                               | 0.475     |
| RAC50-1       | 300                                | 180                              | 21  | 1193                    | 574                             | 0.600     |
| RAC50-2       | 350                                | 185                              | 20  | 1156                    | 557                             | 0.529     |
| RAC50-3       | 400                                | 190                              | 20  | 1120                    | 539                             | 0.475     |
| RAC100-1      | 308                                | 185                              | 39  | 593                     | 1102                            | 0.600     |
| RAC100-2      | 359                                | 190                              | 38  | 575                     | 1067                            | 0.529     |
| RAC100-3      | 411                                | 195                              | 37  | 556                     | 1033                            | 0.475     |

Mešanje komponenti izvršeno je u rotacionoj mešalici sa vertikalnom osom (Controls, Italija), kapaciteta 60 l (*slika 22* desno), pri čemu je ukupna zapremina svake od tri betonske mešavine bila oko 40 l. Prodecura mešanja komponentnih materijala trajala je ukupno 3.5 minuta, a sastojala se iz nekoliko koraka:

- mešanje svih frakcija prirodnog i recikliranog agregata “u suvo” u trajanju od 30 sec
- dodavanje cementa i mešanje “u suvo” još 30 sec
- tokom narednih 30 sekundi dodaje se voda
- mešanje 2 minuta

U obe faze izrade probnih betonskih mešavina konzistencija je merena odmah nakon spravljanja betona i nakon 30 min. U tom vremenskom intervalu, beton se nalazio u mešalici koja je bila pokrivena nepropusnom PVC folijom, kako bi se sprečilo odavanje vode. U istom vremenskom intervalu, mešalica je uključivana u pogon u trajanju od 10 sekundi na svakih 5 minuta, kako bi se na neki način simulirali realni uslovi, tj. efekti mešanja betona u auto mikseru prilikom transporta do gradilišta. Takođe, to mešanje je značilo i narušavanje početnih struktura koje se formiraju prilikom očvršćavanja betona. Ovakav postupak mešanja betona primenjivan je i kasnije prilikom spravljanja mešavina za betoniranje svih grednih nosača. Betonske mešavine su spravljene i ugrađene u odgovarajuće kalupe pri temperaturi prostorije od  $24\pm 1^\circ\text{C}$  i vlažnosti od  $63\pm 2\%$ . Nakon ugrađivanja svežeg betona, kalupi su prekrivani jutanim tkaninama. Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 časa, a zatim negovani u vodi temperature  $20\pm 2\%$  do dana ispitivanja.

Za svaku od 9 vrsta betona izrađeno je:



- po 3 uzorka oblika kocke ivice 15 cm, za ispitivanje čvrstoće pri pritisku
- po 3 uzorka oblika cilindra prečnika 15 cm i visine 15 cm, za ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem (Brazilski opit)
- po 3 uzorka oblika cilindra prečnika 15 cm i visine 30 cm, za ispitivanje modula elastičnosti betona.

### 3.3.3. FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA SA RAZLIČITIM SADRŽAJEM RCA

Rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika betona u svežem i očvrsлом stanju pri starosti od 28 dana, čije su recepture date u *tabeli 37*, prikazani su u *tabeli 38*, gde su:

$\gamma$  – zapreminska masa betona,

$f_c$  – čvrstoća pri pritisku,

$f_{zs}$  – čvrstoća pri zatezanju cepanjem,

E – modul elastičnosti betona.

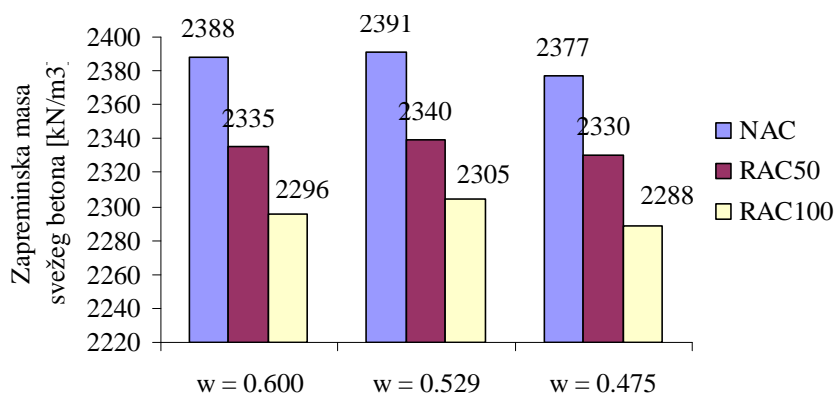
*Tabela 38. Rezultati ispitivanja svojstava betona u svežem i očvrsлом stanju – probna istraživanja*

| Oznaka betona | Svojstva svežeg betona           |               |      | Svojstva očvrslog betona         |                |                   |            |
|---------------|----------------------------------|---------------|------|----------------------------------|----------------|-------------------|------------|
|               | $\gamma$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | sleganje [cm] |      | $\gamma$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $f_c$<br>[MPa] | $f_{zs}$<br>[MPa] | E<br>[GPa] |
|               |                                  | t=0           | t=30 |                                  |                |                   |            |
| NAC-1         | 2388                             | 12.8          | 9.5  | 2384                             | 35.5           | 2.8               | 28.2       |
| NAC-2         | 2391                             | 13.2          | 8    | 2388                             | 43.1           | 3.0               | 28.3       |
| NAC-3         | 2377                             | 13            | 7    | 2375                             | 44.3           | 3.0               | 31.0       |
| RAC50-1       | 2335                             | 10.5          | 8.3  | 2335                             | 36.3           | 2.6               | 29.4       |
| RAC50-2       | 2340                             | 12            | 9.7  | 2341                             | 42.7           | 3.0               | 28.5       |
| RAC50-3       | 2330                             | 13.5          | 9.2  | 2329                             | 45.2           | 3.1               | 30.9       |
| RAC100-1      | 2296                             | 15.5          | 7.5  | 2283                             | 33.4           | 3.0               | 26.7       |
| RAC100-2      | 2305                             | 13.5          | 9.7  | 2297                             | 40.7           | 3.0               | 26.4       |
| RAC100-3      | 2288                             | 13.3          | 7.7  | 2290                             | 43.3           | 3.2               | 29.5       |

Vrednosti prikazane u *tabeli 38* baziraju se na prosečnim vrednostima merenim na tri uzorka, osim zapreminske mase u očvrsлом stanju koja predstavlja prosečnu vrednost merenja na 9 uzoraka (3 kocke, 3 mala i 3 velika cilindra). Svi betoni su postigli željeno sleganje od 8±2 cm nakon 30 minuta, *tabela 38*. Ovim je potvrđena ispravnost metodologije spravljanja betona sa suvim recikliranim agregatom, uz dodavanje vode prema kapacitetu upijanja za željeni vremenski period. Sličan postupak primenjivali su i drugi autori ([Malešev i ostali](#), 2006; [Poon i ostali](#), 2004<sup>a</sup>). Od procenjenog inicijalnog

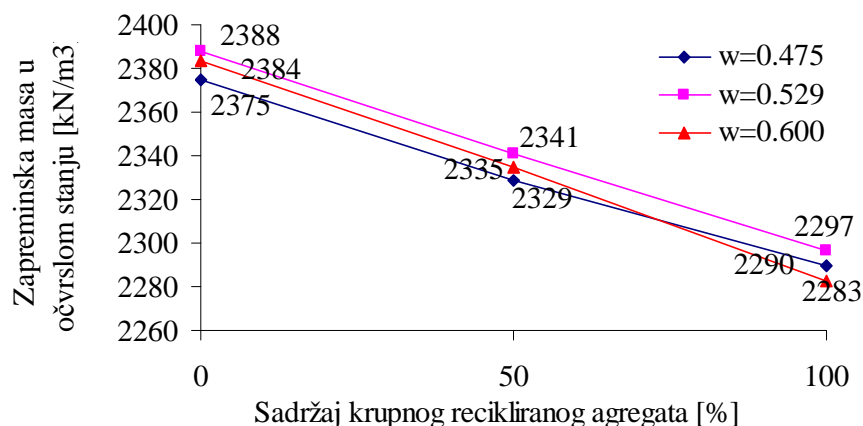
sleganja od  $13\pm 2$  cm, odstupanje se pojavilo kod betona RAC100-1 na gornju, i betona RAC50-1 na donju stranu, za 0,5 cm. Ova odstupanja ocenjena su kao prihvatljiva.

Odnosi zapreminskih masa u svežem stanju, betona sa prirodnim i recikliranim agregatom iz tri serije uzoraka, prikazani su na slici 24.



Slika 24. Zapreminske mase betona u svežem stanju

Sa slike 24 se vidi da zapreminska masa opada sa povećanjem količine recikliranog agregata u mešavini, što je posledica većeg sadržaja starog cementnog maltera u zrnima recikliranog agregata. Ipak, te razlike su, između betona iste serije (isti efektivni vodocementni faktor), svega oko 2% kada se porede RAC50 i NAC, odnosno, oko 4% kada se porede RAC100 i NAC. Ovo ukazuje na dobar kvalitet recikliranog agregata i na nivou je razlika između zapreminskih masa prirodnog i recikliranog agregata u vodom zasićenom stanju (poglavlje 3.2.4). Zapreminske mase betona u očvrslom stanju opadaju približno linearno sa povećanjem sadržaja RCA - razlike su u proseku oko 2% između betona RAC50 i NAC, odnosno, oko 4% između betona RAC100 i NAC, slika 25. Standardna devijacija zapreminskih masa očvrsllog betona je relativno mala, manja od 1% srednje vrednosti zapreminske mase i ne zavisi od količine RCA u betonu.



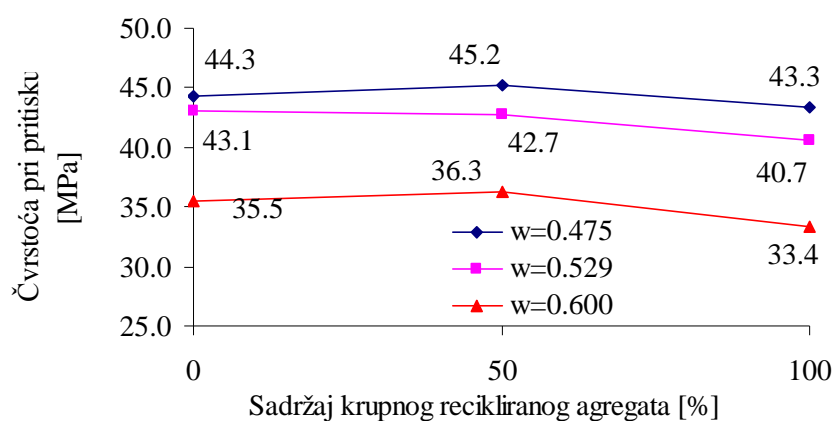
Slika 25. Zapreminske mase betona u očvrslom stanju

Ispitivanje čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju cepanjem i modula elastičnosti sprovedeno je u Institutu za puteve (IP), Laboratoriji za beton i veziva, pomoću univerzalne prese (Controls, Italija), kapaciteta 3000 kN i sistema za automatsku akviziciju podataka, *slika 26*.



*Slika 26. Univerzalna presa i sistem za akviziciju podataka (Institut za puteve)*

Zavisnost čvrstoće pri pritisku i količine recikliranog agregata u betonu može se sagledati na osnovu dijagrama na *slici 27*.

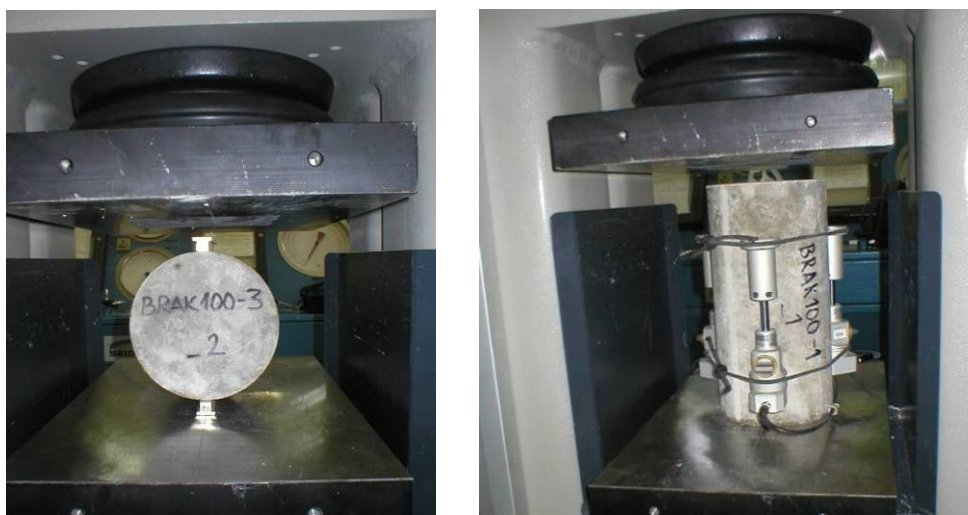


*Slika 27. Čvrstoća betona pri pritisku u funkciji količine krupnog recikliranog agregata i vodocementnog faktora*

Dva od tri betona sa 50% RCA imala su čak i veću čvrstoću pri pritisku (za 2% i 2.2%) u odnosu na uporedne NAC, dok je čvrstoća jednog od njih (RAC50-2) bila za 1% manja od uporednog betona (NAC-2). Ovi rezultati, uz rezultate drugih istraživača ([Malešev i ostali, 2006](#)), daju za pravo da se kaže da je betone koji sadrže do 50% agregata od recikliranog betona, moguće napraviti tako da im čvrstoće pri pritisku budu iste kao kod betona spravljenih sa potpuno prirodnim agregatom i sa istom količinom cementa i sa istim efektivnim vodocementnim faktorom. Za isti efektivni vodocementni

faktor, RAC100 betoni imaju do 6% niže čvrstoće pri pritisku od betona sa prirodnim agregatom. Razlike su utoliko manje ukoliko je vodocementni faktor niži, jer što su veće čvrstoće pri pritisku uticaj agregata se smanjuje, a uticaj cementne matrice raste. Prosečna relativna odstupanja pojedinačnih vrednosti čvrstoća pri pritisku u odnosu na prikazane srednje vrednosti iznose 1.5%, 2.2% i 2.5% za betone NAC, RAC50 i RAC100 respektivno. Odstupanja očigledno rastu sa povećanjem količine recikliranog agregata u betonu, što se može očekivati kada se uzme u obzir heterogenost ovakvog agregata. Ipak, ovaj zaključak treba smatrati tek mogućom indikacijom, s obzirom da je izveden na osnovu samo 3 ispitana uzorka, nedovoljna za pouzdanu statističku analizu. Ipak, u apsolutnim vrednostima posmatrano, sva pojedinačna odstupanja od srednje vrednosti su mala.

Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri zatezanju opitom cepanja, (*tabela 38, slika 28 levo*) nije moguće uspostaviti zavisnost između čvrstoće pri zatezanju cepanjem i količine recikliranog agregata u betonu.



*Slika 28. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem (levo) i modula elastičnosti (desno)*

Ipak, svi rezultati ispitivanja betona sa recikliranim agregatom nalaze se u granicama od  $\pm 7.5\%$  u odnosu na uporedne betone od prirodnog agregata sa istim efektivnim vodocementnim faktorom. Tangentni moduli elastičnosti (*tabela 38*) sračunati su na osnovu izraza (8), prema nacionalnom standardu ([ISS 2000<sup>a</sup>](#)).

$$E_c = \frac{s_2 - s_1}{e_2 - e_1} \quad (8)$$

gde je  $\sigma_2$  napon koji odgovara sili od 30% čvrstoće pri pritisku cilindra,  $\sigma_1$  je 1 MPa, dok  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  predstavljaju dilatacije koje odgovaraju naponima  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , respektivno. Dilatacije su dobijene na osnovu merenja sa tri induktivana ekstenzometra, (Controls, tip 50-C0222/F), postavljena na ekvidistantnim rastojanjima po obimu cilindra, *slika 28* desno. Dilatacije  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  predstavljaju prosečne vrednosti ovih merenja, pri čemu pojedinačna merenja moraju biti u opsegu od  $\pm 20\%$  od srednje vrednosti.

Kod svih betona sa 50% RCA dobijeni su isti ili veći (do 4% ) moduli elastičnosti u odnosu na uporedne betone sa prirodnim agregatom istog efektivnog vodocementnog faktora, *tabela 38*. S druge strane, sva tri RAC100 betona imala su manji modul elastičnosti u odnosu na uporedne NAC i to za 5.3%, 6.9% i 6.8% za betone sa efektivnim vodocementnim faktorima od 0.6, 0.529 i 0.475, respektivno. Ovako male razlike u modulima elastičnosti između betona sa različitim sadržajem RCA mogu se pripisati relativno dobrom kvalitetu primenjenog recikliranog agregata, pre svega relativno velikoj zapreminskoj masi.

Osim prezentovanih rezultata ispitivanja modula elastičnosti, ispitivanje istog svojstva betona, na istim uzorcima, obavljeno je i u laboratoriji Instituta za materijale i konstrukcije, *tabela 39*, *slika 29*.

*Tabela 39. Modul elastičnosti određen u laboratoriji IMK*

| Oznaka betona | NAC-1 | NAC-2 | NAC-3 | RAC50-1 | RAC50-2 | RAC50-3 | RAC100-1 | RAC100-2 | RAC100-3 |
|---------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| E [GPa]       | 25.4  | 26.4  | 27.9  | 27.0    | 27.7    | 26.3    | 22.9     | 23.3     | 24.2     |



*Slika 29. Ispitivanje modula elastičnosti u laboratoriji IMK*

Srednje vrednosti modula elastičnosti kod svih betona manje su od 2.6% do 17.9% u odnosu na one izmerene u laboratoriji IP. Ovo je posledica različitih mernih baza koje su korišćene u ove dve laboratorije. Naime, aparatura u laboratoriji IMK ima bazu od 200 mm, dok je baza elektronskih deformetara korišćenih u IP bila 165 mm. Baza od 200 mm znači da je rastojanje od ivice elementa do baze samo 50 mm, što je manje od ¼ dužine uzorka. To praktično znači da su oslonci baza u zoni sa troosnim stanjem napona, što može da utiče da se dobiju niže vrednosti modula elastičnosti.

Vrednosti modula elastičnosti iz *tabela 38* i *tabela 39* iskorišćene su za sračunavanje koeficijenta Z, koji određuje kredibilitet svake laboratorije. Vrednost Z se računa iz jednačine:

$$Z_i = \frac{\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}}{S_p} \quad (9)$$

gde  $\bar{x}_i$  predstavlja prosečnu vrednosti modula elastičnosti za jedan beton u jednoj laboratoriji,  $\bar{\bar{x}}$  je prosečna vrednost sračunatog modula za jedan beton iz obe laboratorije i  $\sigma_p$  je standardna devijacija. Vrednosti parametra Z su između 0.207 i 0.693, *Tabela 40*.

*Tabela 40. Vrednosti parametra Z sračunatog na osnovu interlaboratorijskih ispitivanja*

| $m_c$ [kg] | NAC   | RAC50 | RAC100 |
|------------|-------|-------|--------|
| 300        | 0.582 | 0.449 | 0.693  |
| 350        | 0.466 | 0.207 | 0.681  |
| 400        | 0.567 | 0.699 | 0.678  |

Kriterijum koji se bazira na koeficijentu Z definisan je standardima ([ISS 2006](#), [ISS 2007](#)) i ukazuje koliko su laboratorije kvalifikovane da rade određena ispitivanja. S obzirom da su vrednosti parametra Z značajno ispod 1, zaključak je da su obe laboratorije osposobljene da izvrše ovakvu vrstu merenja. Na osnovu toga je doneta odluka da se ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava betona koji su korišćeni za betoniranje greda izvrši u okviru laboratorije IMK.

### 3.3.4. ZAKLJUČAK

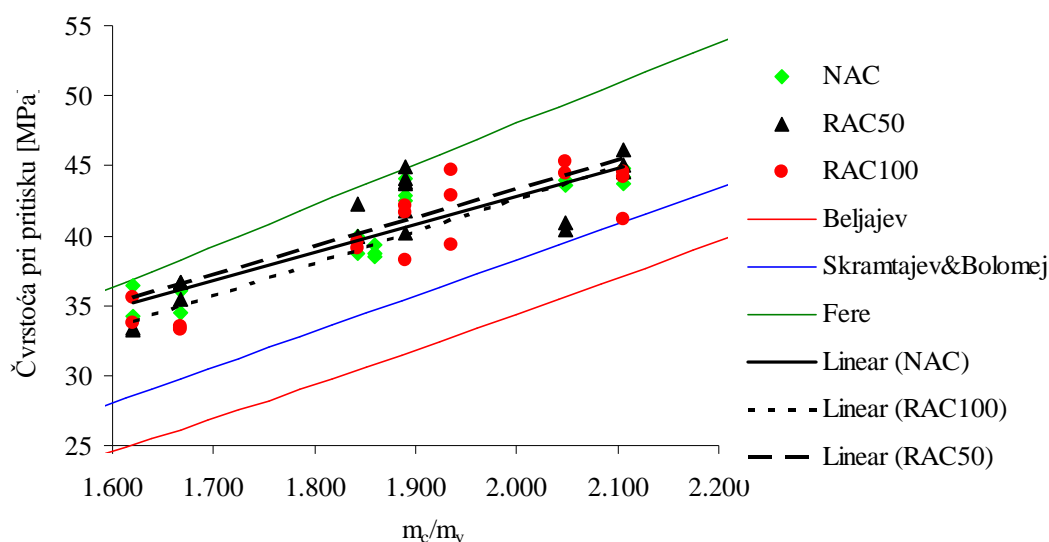
U fazi projektovanja sastava betona sa recikliranim agregatom i testiranja odnosa fizičko-mehaničkih svojstava RAC i NAC betona sa istim ekvivalentnim vodocementnim faktorom, ukupno je ispitano 99 probnih tela. Na osnovu sprovedenih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja doneti su odgovarajući zaključci:

- Projektovanje sastava betona sa recikliranim agregatom moguće je bazirati na metodologiji poznatoj kod NAC betona, gde se mase komponentih materijala sračunavaju iz zapreminske jednačine,
- Svojstva RC agregata koja su neophodna pri projektovanju sastava su zapreminska masa u površinski suvom, vodom zasićenom stanju i upijanje vode,
- Dodavanje izvesne količine vode sračunate iz kapaciteta upijanja RC agregata na količinu potrebnu za hidrataciju cementa, tj. ostvarivanje efektivnog vodocementnog faktora, efikasan je način za kontrolu ugradljivosti i obradivosti mešavina koje sadrže RC agregat; opisana metodologija obezbeđuje zahtevanu konzistenciju u uslovima uobičajenog vremena proteklog od proizvodnje do ugradnje betona,
- Zahtevana ugradljivost RAC betona izražena merom sleganja ostvarena je nakon 30 minuta od spravljanja, uz sprečeno odavanje vode i povremeno mešanje u mešalici; s obzirom na utvrđenu brzinu upijanja vode recikliranog agregata, procena je da se ciljana konzistencija može postići već nakon 10 minuta od spravljanja betona,
- Zapreminske mase u svežem i očvrslom stanju betona sa 50% i 100% krupnog recikliranog agregata su za 2% i 4% respektivno manje od zapreminske mase uporednog betona sa prirodnim agregatom,
- Betoni sa 50% RCA imali su istu ili čak veću čvrstoću pri pritisku u odnosu na betone sa prirodnim agregatom spravljenih sa istom količinom cementa i sa istim efektivnim vodocementnim faktorom; ovo se tumači kao posledica efikasnog međusobnog pakovanja uglastih zrna recikliranog i zaobljenih zrna prirodnog agregata,

- Betoni sa 100% RCA imali su do 6% manju čvrstoću pri pritisku u odnosu na uporedni NAC,
- Čvrstoća betona sa 50% do 100% RCA na zatezanje cepanjem kreće se u granicama od  $\pm 7,5\%$  u odnosu na uporedne betone od prirodnog agregata; nije moguće utvrditi zavisnost količine RCA i odstupanja od čvrstoće uporednog NAC,
- Modul elastičnosti betona sa 50% RCA bio je isti ili veći u odnosu na modul elastičnosti uporednog NAC,
- Modul elastičnosti betona sa 100% RCA bio je 5% do 7% manji od modula elastičnosti uporednog NAC..

### 3.4 PRINCIP PROJEKTOVANJA SASTAVA BETONSKIH MEŠAVINA

Da bi se projektovalo prema ciljanoj čvrstoći pri pritisku, što je bio jedan od osnovnih zahteva za kvalitet betona, neophodno je prvo uspostaviti vezu između čvrstoće pri pritisku i vodocementnog faktora za svaku od tri vrste betona. S obzirom da su veze ovih veličina kod klasičnih betona predstavljene hiperboličnim funkcijama, lakše je koristiti vezu čvrstoće pri pritisku i recipročne vrednosti vodocementnog faktora koja predstavlja linearnu funkciju. Na slici 30 prikazani su rezultati ispitivanja čvrstoća pri pritisku u funkciji odnosa masa cementa i vode, za fazu probnih ispitivanja. Na istom dijagramu predstavljeno je i nekoliko dobro poznatih analitičkih zavisnosti ovih veličina.



Slika 30. Dijagram zavisnosti čvrstoće betona pri pritisku i odnosa masa cementa i vode



Kada se posmatraju rezultati ispitivanja svih betona, dobijene zavisnosti definisane pravim trend linijama prikazanim na dijagramu na *slici 30*, nalaze se između predikcija Skramtajeve&Bolomeja ([Muravljov, 1998](#)) i izraza Ferea ([Muravljov, 1998](#)). Sa ovog dijagrama vidi se i da se za tri različita vodocementna faktora kod betona NAC i RAC50, trend linije praktično poklapaju, što još jednom ukazuje na male razlike u ponašanju ovih betona u smislu čvrstoće pri pritisku. Primetno je i da je nagib sve tri trend linije manji u odnosu na nagibe linija kojima su definisane analitičke veze čvrstoće i recipročne vrednosti vodocementnog faktora kod betona sa prirodnim agregatom. To je posledica činjenice da su za niže vrednosti vodocementnih faktora u probnim ispitivanjima dobijene čvrstoće pri pritisku ispod očekivanih, kako za betone sa recikliranim, tako i za one sa prirodnim agregatom.

Procedura određivanja količina komponentnih materijala u betonskim mešavinama sastoji se iz nekoliko koraka. Ako su poznate jednačine trend linija sa *slici 30*, za željenu vrednost čvrstoće pri pritisku lako se dolazi do podatka o odnosu masa cementa i vode, odnosno vodocementnom faktoru. Na osnovu njega i usvojene količine vode prema željenoj konzistenciji, što je već utvrđeno probnim ispitivanjima, sračunava se potrebna količina cementa. Usvaja se količina uvučenog vazduha. Pod pretpostavkom da su poznate vrednosti specifičnih zapreminskih masa komponentnih materijala, iz zapreminskih jednačina (1)-(3) sračunava se ukupna količina prirodnog agregata. Konačno, sračunavanje količina agregata po frakcijama obavlja se na osnovu procentualnog učešća svake frakcije u ukupnoj masi agregata, na način na koji je to već objašnjeno kod probnih mešavina, poglavlje [3.3.2](#).

### **3.5 ISPITIVANJE PONAŠANJA AB GREDA PRI SAVIJANJU POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM**

#### **3.5.1. UVOD**

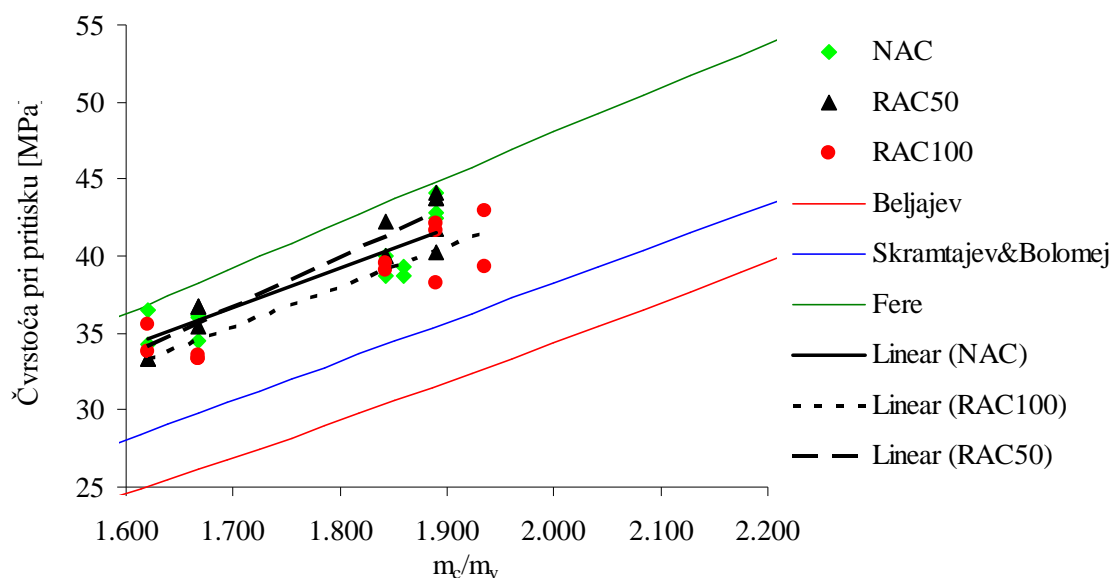
Nosivost na savijanje greda od klasičnog betona dobro je istražena oblast zahvaljujući velikom broju eksperimentalnih ispitivanja sprovedenih tokom prethodnih decenija. Mehanizam loma dobro je poznat i sastavni je deo tehničkih propisa za projektovanje konstrukcija. S druge strane, istraživanja ponašanja greda od betona sa recikliranim agregatom relativno su retka, zaključci o ponašanju su delom kontradiktorni, a tehnička regulativa praktično ne postoji. Postoji, dakle, potreba za

pouzdanim informacijama o ponašanju greda od betona sa recikliranim agregatom na savijanje, kako bi se omogućila primena ovog materijala za konstrukcijske elemente.

Ponašanje na savijanje grednih elemenata dominantno je uslovljeno oblikom naponsko-deformacijskog ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) dijagrama primenjenog betona, kvalitetom armaturnog čelika i kvalitetom veze čelik-beton. Pouzdane baze za zaključak o  $\sigma$ - $\varepsilon$  relacijama na nivou materijala (RAC betona) nema, jer su spitivanja na globalnom nivou izuzetno retka, a zbog nedostatka opreme u domaćim okvirima praktično i nemoguća. Ovi podaci su takođe neophodni za definisanje parametara radnih dijagrama betona sa RC agregatom, kao i za softversko modeliranje procesa. Do sada sprovedena ispitivanja ponašanja RAC greda pri savijanju bazirana su na poređenju sa ponašanjem NAC greda, pri čemu su betoni RAC i NAC imali isti efektivni vodocementni faktor. To međutim, generalno ne garantuje i istu čvrstoću pri pritisku od koje u izvesnoj meri zavisi granična nosivost i ponašanje pri savijanju. Zato je odlučeno da svi betoni od kojih su formirani gredni nosači, nezavisno od količine recikliranog agregata, imaju istu (sličnu) čvrstoću pri pritisku. Na taj način je ona eliminisana kao parametar i kao razlog za eventualne razlike u ponašanju greda sa različitim količinom RC agregata. S obzirom da je propisima već omogućena primena recikliranog agregata uglavnom u iznosima od 20%-30% (poglavlje [2.4](#)), odlučeno je da se ispituje ponašanje greda od betona sa značajno većom količinom agregata od recikliranog betona, sa 50% i 100% krupnog RCA.

### 3.5.2. RECEPTURA ZA BETON

Za ispitivanje ponašanja greda pri savijanju predviđen je beton čvrstoće pri pritisku od 42 MPa, plastične konzistencije, koja izražena merom sleganja treba da iznosi  $8 \pm 2$  cm nakon 30 minuta. Receptura je određena na osnovu rezultata ispitivanja probnih mešavina, tj. uspostavljene zavisnosti čvrstoće pri pritisku i masenog odnosa cementa i vode. Na osnovu razmatranja u poglavlju 3.4, ocenjeno je da bi za ciljanu čvrstoću od 42 MPa, određivanje potrebnih odnosa  $m_c/m_v$  na osnovu trend linija sa *slike 30* rezultiralo znatno većim čvrstoćama pri pritisku od očekivanih. Zbog toga su prilikom određivanja jednačina zavisnosti čvrstoće pri pritisku i odnosa  $m_c/m_v$  za svaku od 3 vrste betona (0%, 50% i 100% RCA), rezultati koji odgovaraju najnižim vodocementnim faktorima odbačeni (*slika 31*). Time je povećan nagib trend linija koje su postale paralelne linijama predikcija za klasične betone.



Slika 31. Uspostavljene zavisnosti čvrstoće pri pritisku i odnosa  $m_c/m_v$

Jednačine trend linija sa kojima je uspostavljena veza između recipročne vrednosti vodocementnog faktora ( $1/\omega$ ) i čvrstoće pri pritisku date su izrazima (10)-(12). Tom prilikom, koeficijenti determinacije ( $R^2$ ) za betone NAC, RAC50 i RAC100 iznose 0.80, 0.90 i 0.83, respektivno, što ukazuje na relativno dobru korelaciju eksperimentalnih podataka i ponuđenih analitičkih izraza:

$$NAC : f_c = 25.549 \cdot \frac{1}{\omega} - 6.7759 \quad (10)$$

$$RAC50 : f_c = 31.979 \cdot \frac{1}{\omega} - 17.669 \quad (11)$$

$$RAC100 : f_c = 25.865 \cdot \frac{1}{\omega} - 8.5713 \quad (12)$$

Na osnovu jednačina (10)-(12) i ciljane čvrstoće pri pritisku od 42 MPa, sračunate su vrednosti vodocementnih faktora za betone sa 0%, 50% i 100% RCA i iznose 0.524, 0.536 i 0.511, respektivno. S obzirom da je jedna od hipoteza celog istraživanja, da se betoni sa 50% krupnog RCA i elementi konstrukcija napravljeni od tog betona mogu koristiti kao ekvivalent betonima i elementima sa potpuno prirodnim agregatom, usvojen je isti vodocementni faktor za betone sa 0% i 50% RCA – 0.524. Poštujući korake u proceduri projektovanja sastava betona objašnjene u poglavlju 3.4, određene su recepture za tri vrste betona sa ciljanom čvrstoćom pri pritisku od 42 MPa, *tabela 41*.

Tabela 41. Sastav betonskih mešavina za željenu čvrstoću pri pritisku od 42 MPa

| Oznaka    | Cement, m <sub>c</sub> | Voda           |                 | Prirodni agregat |       |                |           | Reciklirani agregat |        |           |
|-----------|------------------------|----------------|-----------------|------------------|-------|----------------|-----------|---------------------|--------|-----------|
|           |                        | m <sub>v</sub> | Δm <sub>v</sub> | Pesak            |       | Krupan agregat |           | Krupan agregat      |        |           |
|           |                        |                |                 | [0-4]            | [4-8] | [8-16]         | [16-31.5] | [4-8]               | [8-16] | [16-31.5] |
| NAC-42    | 354                    | 185            | -               | 600              | 300   | 300            | 564       | -                   | -      | -         |
| RAC50-42  | 354                    | 185            | 20              | 598              | 128   | 171            | 256       | 128                 | 171    | 256       |
| RAC100-42 | 365                    | 186            | 38              | 576              | -     | -              | -         | 198                 | 379    | 494       |

\* sve vrednosti su u [kg/m<sup>3</sup>]

### 3.5.3. KARAKTERISTIKE MATERIJALA

#### 3.5.3.1 Beton

Od svojstava svežeg betona ispitivana je zapreminska masa u svežem stanju prema nacionalnom standardu (ISS 1997), kao i konzistencija, metodom sleganja Abramsovog konusa, (ISS 2010<sup>a</sup>), *tabela 42*. Od fizičkih svojstava očvrsllog betona izmerena je zapreminska masa betona u očvrslom stanju (ISS 1997), *tabela 43*, a od mehaničkih karakteristika betona ispitane su čvrstoća pri pritisku (ISS 2010<sup>b</sup>), čvrstoća pri zatezanju (ISS 2008<sup>a</sup>) i modul elastičnosti (ISS 2000<sup>a</sup>), *tabela 44*. Numeričke veličine date u *tabeli 44* predstavljaju srednje vrednosti merenja na tri uzorka. Sva ispitivanja sprovedena su u okviru laboratorije Instituta za materijale i konstrukcije, IMK.

#### 3.5.3.2 Konzistencija i zapreminske mase betona

Kao što je već pokazano u probnim ispitivanjima, metodologija dodavanja izvesne, prethodno sračunate količine vode obezbeđuje da betoni sa različitim sadržajem RCA (0%, 50% i 100%) imaju sličnu ugradljivost. To je i potvrđeno rezultatima ispitivanja konzistencije i zapreminske mase u svežem stanju betona ciljane čvrstoće 42 MPa, koji su prikazani su u *tabeli 42*. Očigledno je da su sva tri betona zadovoljila zadati uslov sleganja Abramsovog konusa od 13±2 cm odmah nakon spravljanja i 8±2 cm (plastična konzistencija) nakon 30 minuta.

Tabela 42. Rezultati ispitivanja svojstava betona u svežem stanju

| Vrsta betona | Sleganje [cm] |          | Zapreminska masa [kN/m <sup>3</sup> ] |                |              |       |
|--------------|---------------|----------|---------------------------------------|----------------|--------------|-------|
|              | t=0 min       | t=30 min | μ <sup>1</sup>                        | σ <sup>2</sup> | broj uzoraka | Δ [%] |
| NAC-42       | 12.5          | 7.5      | 2414                                  | 16             | 9            | -     |
| RAC50-42     | 11.5          | 6.5      | 2350                                  | 21             | 9            | 2.6   |
| RAC100-42    | 11.7          | 7        | 2305                                  | 23             | 9            | 4.5   |

<sup>1</sup> srednja vrednost

<sup>2</sup> standardna devijacija

Poređenjem srednjih vrednosti zapreminskih masa u svežem stanju betona iste grupe, imajući u vidu i broj ispitanih uzoraka, može se zaključiti da betoni sa 50% RCA imaju

do 3%, a betoni sa 100% RCA do 5% manju zapreminsku masu u svežem stanju u odnosu na uporedni NAC beton slične čvrstoće pri pritisku. Standardna devijacija je slična kod svih betona, ne zavisi od količine RCA i iznosi oko 1% srednje vrednosti zapreminske mase u svežem stanju, *tabela 42*.

Rezultati ispitivanja zapreminske mase u očvrsлом stanju prikazani su u *tabeli 43*.

*Tabela 43. Rezultati ispitivanja zapreminske mase betona u očvrsлом stanju*

| Vrsta betona | Zapreminska masa [kN/m <sup>3</sup> ] |            |              |              |
|--------------|---------------------------------------|------------|--------------|--------------|
|              | $\mu^1$                               | $\sigma^2$ | broj uzoraka | $\Delta$ [%] |
| NAC-42       | 2408                                  | 15         | 6            |              |
| RAC50-42     | 2350                                  | 13         | 6            | 2.4          |
| RAC100-42    | 2315                                  | 15         | 6            | 3.9          |

<sup>1</sup> srednja vrednost

<sup>2</sup> standardna devijacija

Betoni sa recikliranim agregatom imali su nešto niže zapreminske mase u poređenju sa NAC betonima slične čvrstoće – do 2.5% za RAC50 betone i do 4% kada se radi o RAC100 betonima. Standardna devijacija ne zavisi od vrste betona i iznosi oko 6% srednje vrednosti.

### 3.5.3.3 Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoća pri pritisku je ispitana pri različitim starostima i uslovima nege, na uzorcima oblika kocke ivice 15 cm. Po tri uzorka od svakog betona negovana su na standardni način (24h u kalupima, a nakon toga u vodi) i ispitana na 28 dana, dok su po tri uzorka negovana na isti način kao i grede čije je ponašanje pri savijanju bilo predmet ispitivanja. Ovi uzorci su ispitani kada je ispitivana greda od odgovarajućeg betona. Dobijene vrednosti čvrstoća pri pritisku na 28 dana, kod svih betona su nešto veće od ciljanih 42 MPa, maksimalno do 5%. U odnosu na uporedni NAC, betoni sa 50% i 100% RCA odstupaju za 1.1% i 2.7% respektivno. Za razliku od ovih uzoraka, uzorci ispitani pri istoj starosti kao i grede u trenutku ispitivanja imali su nešto veće čvrstoće u odnosu na ciljanih 42 MPa, kao posledicu veće starosti u trenutku ispitivanja i drugačije nege betona, *tabela 44*.

*Tabela 44. Rezultati ispitivanja svojstava betona u očvrsлом stanju*

| Oznaka betona | $f_c$ [MPa] |                   | $E_c$ [GPa] | $f_{ct,sp}$ [MPa] |
|---------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
|               | 28 dana     | test <sup>1</sup> |             |                   |
| NAC-42        | 43.7        | 47.3              | 26.6        | 3.1               |
| RAC50-42      | 44.2        | 46.2              | 26.2        | 2.7               |
| RAC100-42     | 42.5        | 43.7              | 25.4        | 3.2               |

<sup>1</sup> ispitano u starosti od 34, 37 i 34 dana za uzorke od NAC, RAC50 i RAC100, respektivno

U odnosu na uporedni NAC-42, RAC50-42 i RAC100-42 imali su za 2.3% i 7.6% respektivno manju čvrstoću pri pritisku.

#### 3.5.3.4 Statički modul elastičnosti

Modul elastičnosti određen je na osnovu merenja dilatacija na cilindrima prečnika 15 cm i visine 30 cm. Moduli elastičnosti su ispod očekivanih vrednosti za dobijenu čvrstoću pri pritisku, ali treba imati u vidu i način ispitivanja, tj. veličinu merne baze, o čemu je bilo reči u poglavlju 3.3.3. U odnosu na uporedni NAC-42, RAC50-42 i RAC100-42 imaju za 1.5% i 4.5% respektivno manje module elastičnosti.

#### 3.5.3.5 Čvrstoća pri zatezanju

Čvrstoća pri zatezanju određena je iz opita cepanja (ISS 2008<sup>a</sup>), na cilindrima prečnika i visine 15 cm. Kod betona RAC50-42 manja je u odnosu na uporedni NAC-42 za 13%, dok je na betonu označenom sa RAC100-42 čvrstoća pri zatezanju za 3.2% veća u odnosu na uporedni NAC-42. Kao i kod probnih ispitivanja, čvrstoća pri zatezanju cepanjem ne pokazuje očiglednu korelaciju sa količinom recikliranog agregata u betonskim mešavinama.

#### 3.5.3.6 Armaturni čelik

Za armiranje grednih nosača, kako podužnom tako i poprečnom armaturom, primenjen je armaturni čelik nazivnog kvaliteta B500B u skladu sa standardom SRPS EN 10080 (ISS 2008<sup>b</sup>). Ispitivanje mehaničkih karakteristika čeličnih šipki različitih prečnika izvršilo je preduzeće METALFER, *tabela 45*.

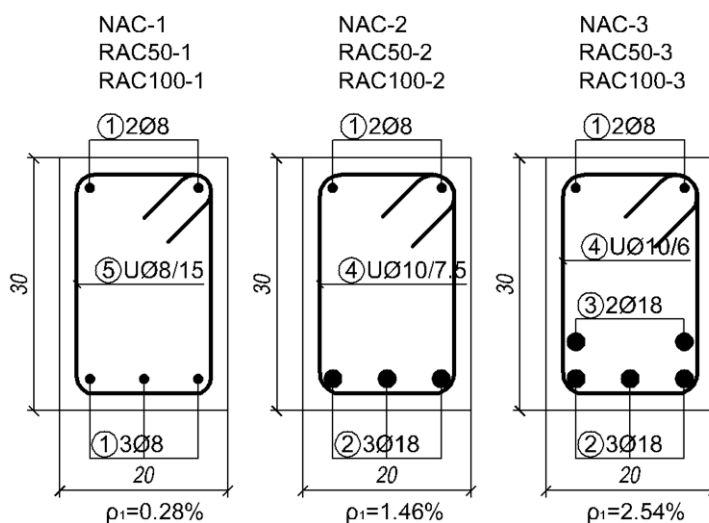
*Tabela 45. Karakteristike armaturnog čelika*

| Nazivni prečnik | Napon na granici tečenja [MPa] | Čvrstoća pri zatezanju [MPa] | Izduženje pri lomu [%] |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Ø10             | 638                            | 706                          | 5.8                    |
| Ø16             | 580                            | 648                          | 8.0                    |
| Ø18             | 547                            | 619                          | 7.6                    |
| Ø22             | 555                            | 616                          | 9.3                    |

### 3.5.4. OPIS GREDNIH ELEMENATA

U okviru ispitivanja ponašanja na savijanje napravljene su po tri grede od tri vrste betona (NAC-42, RAC50-42 i RAC100-42) sa različitim procentom podužne zategnute armature: 0.28% ('minimum') – grede NAC-1, RAC50-1 i RAC100-1, 1.46% ('srednje') - grede NAC-2, RAC50-2 i RAC100-2, i 2.54% ('maksimum') - grede

NAC-3, RAC50-3 i RAC100-3. Detalji armiranja svih greda na nivou poprečnih preseka prikazani su na slici 32.



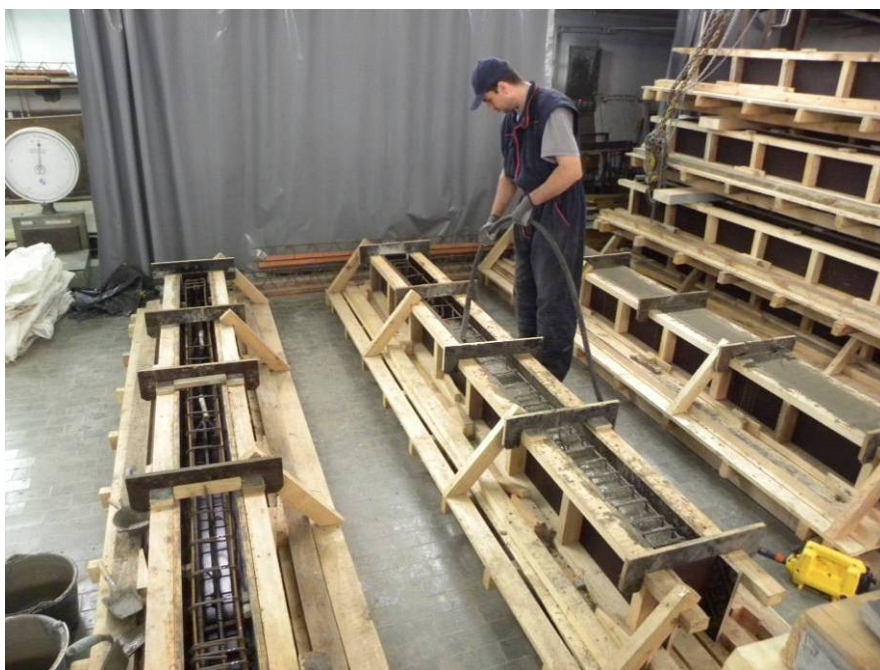
Slika 32. Armiranje greda ispitivanih na savijanje – poprečni presezi

Ukupno je testirano devet greda ne računajući probnu gredu koja je poslužila za kontrolu dispozicije ispitivanja i merenja na gredi. Sve grede su dimenzionisane tako da lom bude usled savijanja, tj. sve su bile armirane poprečnom armaturom (uzengijama) na način da je nosivost na smicanje bila bar 1.7 puta veća od nosivosti na savijanje. Minimalni procenat armiranja je sračunat prema Evrokodu 2 ([Comité Européen de Normalisation, 2004](#)) za klasični armirani beton. Podužnu armaturu činile su rebraste šipke prečnika  $\text{Ø}8$  mm i  $\text{Ø}18$  mm. Sve grede su bile pravougaonog poprečnog preseka širine 20 cm i visine 30 cm, ukupne dužine 3.5 m. Rastojanje od 25 cm od oslonca do ivice grede predviđeno je kako bi se obezbedilo pouzdano sidrenje podužne zategnute armature i time izbegao lom usled narušavanja veze beton-čelik. Odnos rastojanja od oslonca do mesta delovanja sile (smičući raspon) i statičke visine preseka bio je isti za sve uzorke i iznosio je 4.

### 3.5.5. IZRADA I NEGA GREDNIH NOSAČA

Gredni nosači betonirani su i ispitivani u okviru Laboratorije za konstrukcije na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Korišćena je drvena oplata, slika 33. Spravljanje betona obavljeno je pomoću mešalice sa vertikalnom osom rotacije, slika 22 desno. Procedura mešanja komponentalnih materijala je detaljno opisana u okviru poglavlja 3.3.2. Ugrađivanje betona vršeno je uz pomoć vibro igli prečnika 5 cm i 2.5

cm. Temperatura vazduha u laboratoriji tokom betoniranja iznosila je  $24\pm 1^{\circ}\text{C}$ , a vlažnost  $63\pm 2\%$ .



*Slika 33. Ugrađivanje betona u oplata*

Nakon ugradnje betona, kalupi su prekriveni vlažnim jutanim tkaninama i PVC folijom kako bi se sprečilo naglo isušivanje betona, *slika 34*. Polivanje vodom započeto je 3 sata nakon betoniranja i intenzivno je sprovedeno 72 sata od ugradnje betona. Nakon toga grede su izvađene iz kalupa i nastavljena je njihova nega polivanjem do starosti od 14 dana.

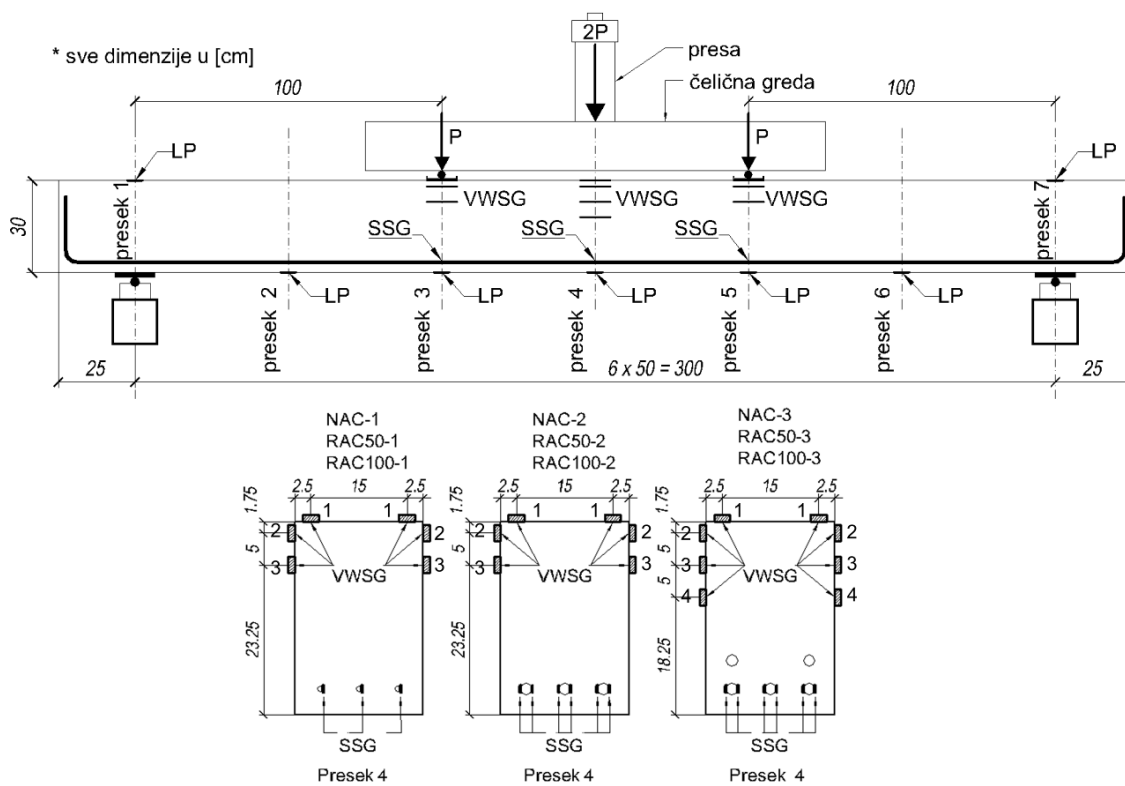


*Slika 34. Nega greda odmah nakon betoniranja*



## 3.5.6. DISPOZICIJA ISPITIVANJA I INSTRUMENTATA

Dispozicija ispitivanja i raspored merne opreme prikazani su na slici 35..

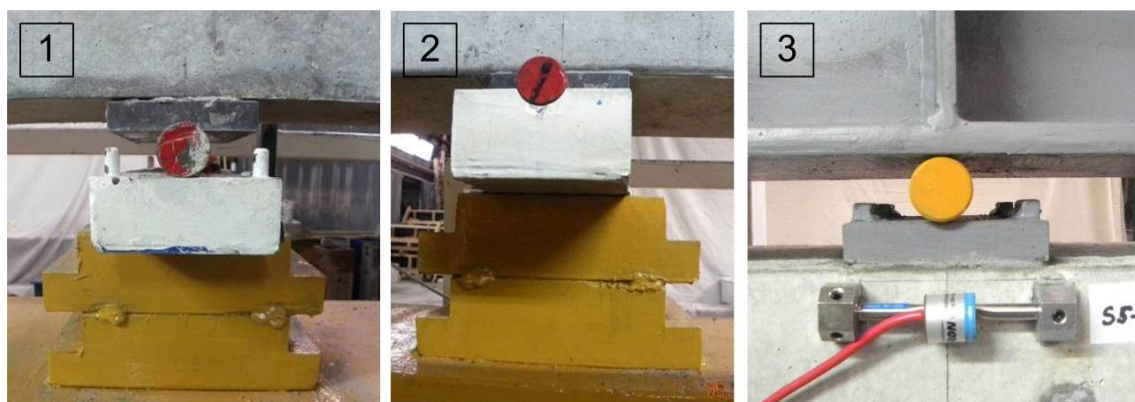


Slika 35. Šematski prikaz dispozicije ispitivanja i rasporeda merne opreme

Sve ispitane grede su bile statičkog sistema proste grede, raspona 3.0 m, opterećene sa dve koncentrisane sile u trećinama raspona. Sila je aplicirana putem prese kapaciteta 40T koja se odupirala o zatvoreni ram pozicioniran u sredini grede i krutu čeličnu gredu preko koje se opterećenje prenosilo na armiranobetonsku gredu u vidu dve koncentrisane sile, *slika 36*. Između rama i prese postavljen je dinamometar za merenje veličine opterećenja-sile. Oslanjanje grede na valjkaste oslonce izvršeno je preko naležućih čeličnih ploča koje su epoksidnim premazom zalepljene za donju stranu grede. Statički sistem proste grede zahtevao je jedan pokretan i jedan nepokretan valjak, *slika 37* (1 i 2). Prenos sile sa čelične na armiranobetonsku gredu izvršen je pomoću pokretnih valjaka koji leže na čeličnim pločama koje su postavljene u trećinama raspona grede, *slika 37* (3). Da bi se sprečila neravnomerna distribucija opterećenja na mestu unošenja sile u nosač, između betonske grede i čeličnih ploča izlivena je izravnavajuća podlivka.



Slika 36. Dispozicija ispitivanja i raspored merne opreme



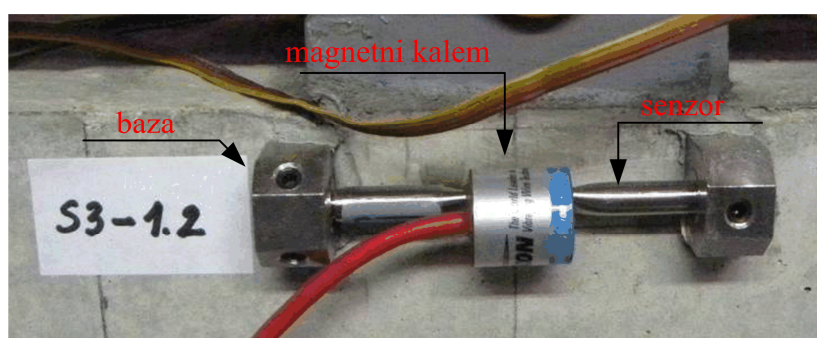
Slika 37. Detalji: 1) pokretan oslonac 2) nepokretan oslonac 3) mesto unošenja opterećenja na nosač

Dilatacije u zategnutoj armaturi merene su pomoću mernih traka tipa PFL 10-11 proizvođača Tokyo Sakki Kenkyujo Co (oznaka SSG na slici 35), sa mernom bazom od 10 mm. Merenje dilatacija u armaturi izvršeno je u tri preseka –u preseku u sredini raspona (presek 4) i presecima na mestu delovanja koncentrisanog opterećenja (preseki 3 i 5). U svakom preseku, merne trake su postavljane na svaku od tri šipke prvog reda armature i to: na profilu  $\varnothing 18$  po dve merne trake, a na profilu  $\varnothing 8$  po jedna merna traka, slika 35. Prilikom postavljanja trake, površina armaturne šipke je obrađena brusilicom, tačnije, uklonjen je deo rebra na armaturi i formirana ravna površina približno  $1 \text{ cm}^2$ , na koju je zatim zalepljena merna traka. Kablovi sa svih mernih traka smešteni su u plastično orebreno crevo kojim su duž grede i kroz bočnu oplatu sprovedeni do akvizicionog uređaja, slika 38. Položaj orebrenog creva je određen tako da u fazi loma ostane u zategnutoj zoni poprečnog preseka.



Slika 38. Vođenje kablova sa mernih traka duž grede

Dilatacije u betonu su merene pomoću senzora označenih sa VWSG na slici 35. VWSG (Vibrating Wire Strain Gauges) su senzori koji funkcionišu na principu promene frekvencije vibrirajuće žice pri promeni njene dužine, slika 39. Baze su zalepljene na orapavljenu (pikovanu) površinu pomoću polimera SIKA Dur 31 i fiksirane stegama koje se skidaju nakon najmanje 24 sata. Tada je između baza fiksiran senzor i vrši se njegovo nulto očitavanje. Tokom ispitivanja, žica unutar senzora se periodično pobuđuje na oscilovanje pomoću elektromagnetnog kalema i automatski očitava period ili frekvencija oscilovanja. Naknadnim preračunavanjem dobija se vrednost dilatacije u betonu na bazi od 100 mm.

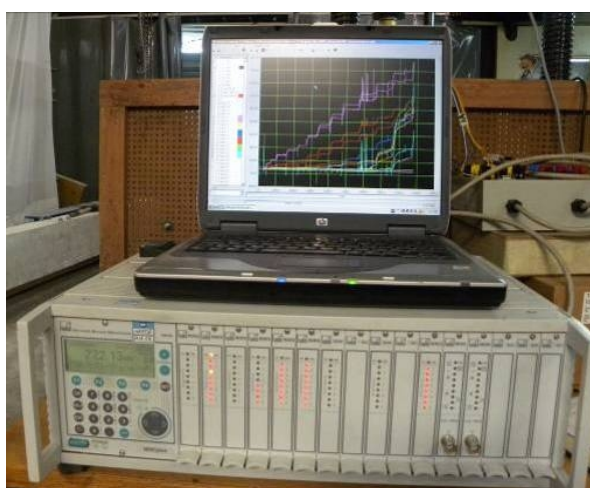


Slika 39. Senzori tipa VWSG za merenje dilatacija u betonu

Ugibi greda mereni su pomoću induktivnih i mehaničkih ugibomera, Slika 40. Merenje ugiba izvršeno je u ukupno 7 preseka označenih sa LP, slika 35. Mehanički ugibomeri su postavljeni u oslonačkim presecima (po jedan), kao i u preseku 6, sa obe strane grede. U ostalim presecima, na rastojanjima od po 50 cm duž grede postavljena su po dva induktivna ugibomera, slika 36.



Slika 40. Ugibomeri- induktivni (levo) i mehanički (desno)



Slika 41. Uređaj za akviziciju podataka

Prikupljanje podataka sa mernih traka i ugibomera obavljano je na svaku sekundu, a na svakih 40 sekundi sa senzora za merenje dilatacija u betonu, pomoću sistema za akviziciju podataka DT80G, *slika 41*. Svaka od greda je opterećena do nivoa eksploatacionog opterećenja, rasterećena, a zatim opterećena do loma. Opterećivanje greda je obavljeno kontrolom sile, a inkrement nanošenja opterećenja bio je oko 1/10 računске sile loma, tj. 5 kN, 20 kN i 30 kN za grede sa minimalnim, srednjim i maksimalnim procentom armiranja, respektivno.

### 3.5.7. PONAŠANJE PRI SAVIJANJU

Rezultati ispitivanja greda sa različitim procentom armiranja podužnom zategnutom armaturom ( $\rho_1$ ) prikazani su u *tabeli 46*: granična sila loma ( $2P_u$ ), sila pri kojoj greda prelazi prag tečenja ( $2P_y$ ) i odgovarajući ugibi ( $\delta_y, \delta_u$ ), sila pri kojoj dolazi do pojave prve prsline ( $2P_{cr}$ ) kao i ugibi pri eksploatacionom optereću ( $\delta_s$ ). Takođe, u istoj tabeli

prikazane su maksimalne širine prslina pod eksploatacionim opterećenjem ( $w_{max}$ ), kao i dilatacije na pritisutoj ivici betona ( $\epsilon_c$ ) u fazi opterećenja neposredno pred lom. Grede su ispitivane u starosti od 28 do 37 dana, *tabela 46*.

*Tabela 46. Rezultati ispitivanja greda na savijanje*

| Oznaka grede | $\rho_1$ [%] | Starost [dani] | $2P_{cr}$ <sup>1</sup> [kN] | $2P_y$ <sup>2</sup> [kN] | $2P_u$ [kN] | $\delta_s$ [mm] | $\delta_y$ [mm] | $\delta_u$ [mm] | $\Delta 2P_u$ <sup>3</sup> [%] | $\delta_u/\delta_y$ | $w_{max}$ [mm] | $l_{cr}$ [cm] | $\epsilon_c$ <sup>4</sup> [%] |
|--------------|--------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------------|----------------|---------------|-------------------------------|
| NAC-1        | 0.28         | 29             | 25                          | 48.7                     | 56.7        | 2.2             | 12.5            | 75.4            | -                              | 6.0                 | -              | -             | 0.92                          |
| RAC50-1      | 0.28         | 33             | 20                          | 44.9                     | 54.0        | 4.2             | 12.8            | 97.9            | -4.8                           | 7.7                 | 0.05           | 27.0          | 1.48                          |
| RAC100-1     | 0.28         | 28             | 20                          | 46.7                     | 53.6        | 3.5             | 14.4            | 92.6            | -5.3                           | 6.4                 | 0.05           | 28.0          | 1.04                          |
| NAC-2        | 1.46         | 30             | 40                          | 202.5                    | 217.1       | 7.5             | 22.2            | 45.8            | -                              | 2.1                 | 0.05           | 14.8          | 2.75                          |
| RAC50-2      | 1.46         | 35             | 40                          | 210.0                    | 221.1       | 7.4             | 25.0            | 46.2            | 1.8                            | 1.8                 | 0.05           | 12.8          | 2.5                           |
| RAC100-2     | 1.46         | 30             | 40                          | 202.0                    | 210.8       | 7.2             | 22.9            | 38.9            | -2.9                           | 1.7                 | 0.08           | 11.3          | 2.86                          |
| NAC-3        | 2.54         | 34             | 60                          | -                        | 275.2       | 8.9             | -               | 28.5            | -                              | -                   | 0.1            | 9.3           | 4.13                          |
| RAC50-3      | 2.54         | 37             | 60                          | -                        | 320.7       | 8.0             | -               | 34.5            | 16.6                           | -                   | 0.05           | 10.0          | 3.24                          |
| RAC100-3     | 2.54         | 34             | 60                          | -                        | 285.2       | 9.0             | -               | 30.4            | 3.7                            | -                   | 0.05           | 11.6          | 3.56                          |

<sup>1</sup> primećeno golim okom na kraju faze opterećenja

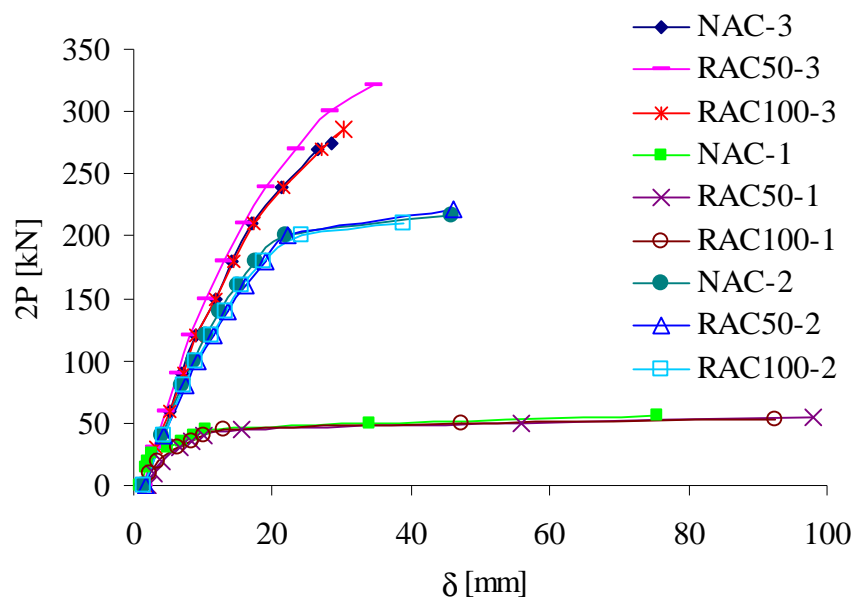
<sup>2</sup> tečenje grede, procenjeno na osnovu oblika dijagrama sila-pomeranje

<sup>3</sup> u odnosu na NAC gredu sa istim procentom armiranja zategnutom armaturom

<sup>4</sup> dilatacije u betonu, krajnje pritisnuto vlakno, presek u sredini raspona, pri sili od 45 kN, 200 kN i 270 kN za grede sa 0.28%, 1.46% i 2.54% armature, respektivno

S obzirom na izuzetno mali odnos sopstvene težine grede i nanetog opterećenja u bilo kojoj od razmatranih faza, sopstvena težina je zanemarena i kao jedino opterećenje razmatra se sila na presi (2P), tj. od nje svedene sile u trećinama raspona (P). Imajući u vidu dispoziciju ispitivanja (*slika 35*), to znači da je u srednjoj trećini nosača konstantni moment savijanja čija je vrednost P [kNm].

Krive kojima je uspostavljena zavisnost sila (2P) - ugib ( $\delta$ ) za grede sa različitim procentom armiranja i vrstom betona, prikazane su na *slici 42*. Očekivano, pri istim ostalim parametrima, sila loma raste sa porastom procenta armiranja, *slika 42*. Nezavisno od vrste betona, uočavaju se tri različita odgovora-ponašanja greda: duktilno, sa izraženim tečenjem podužne armature i velikim ugibima- kod greda sa minimalnim procentom armiranja; krto sa malim deformacijama i lomom pre početka tečenja podužne armature- kod greda sa maksimalnim procentom armiranja i 'srednje' duktilno sa umerenim ugibima i umerenim tečenjem podužne armature kod greda sa srednjim procentom armiranja. Postoje sasvim male razlike u sili loma u okviru grupa greda sa istim procentom armiranja, nezavisno od tipa betona, tj. procentualnog učešća recikliranog agregata, *tabela 46*.



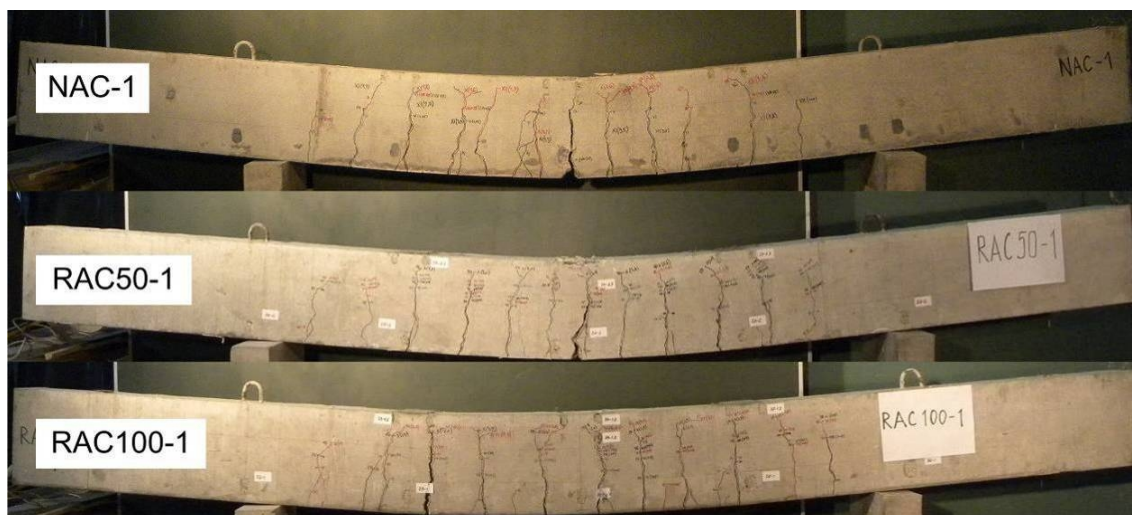
Slika 42. Dijagrami sila ( $2P$ ) - ugib ( $\delta$ ) za ispitane grede na savijanje

Za betone sa istom čvrstoćom pri pritisku, sila pri kojoj je zabeleženo tečenje grede povećava se sa porastom količine podužne armature. Duktilnost, definisana kao odnos ugiba u sredini raspona pri lomu ( $\delta_u$ ) i pri tečenju grede ( $\delta_y$ ), opada sa porastom procenta armiranja, *tabela 46*. Ipak, razlike u duktilnosti među gredama sa istim procentom armiranja, nezavisno od procenta primenjenog recikliranog agregata u betonu, mogu se smatrati zanemarljivim. P-  $\delta$  krive na dijagramu, *slika 42*, ne počinju iz koordinatnog početka zbog nepovratne deformacije koja je posledica početne faze opterećenja do nivoa eksploatacionog opterećenja, a potom rasterećenja pre ponovnog opterećenja do loma svake grede. Ova faza nije prikazana na *slici 42* kako se ne bi ugrozila jasnoća dijagrama. Vrednosti ovih plastičnih deformacija su veoma slične kod svih ispitanih greda.

### 3.5.7.1 Lom

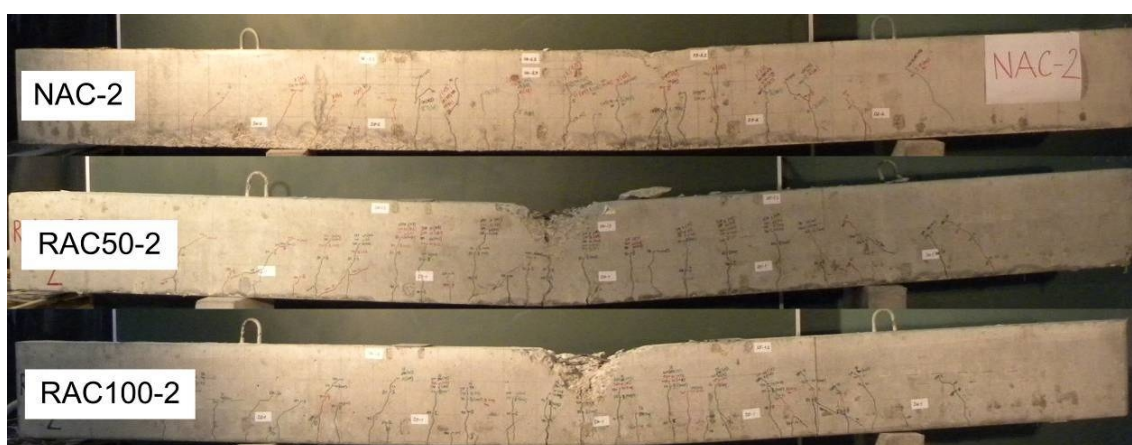
U svim gredama sa minimalnim procentom armiranja (NAC-1, RAC50-1, RAC100-1), početne prsline od savijanja formirale su se pri opterećenju od oko 50% graničnog opterećenja. Pružale su se do  $2/3$  visine grede i praćene su serijama drugih, takođe vertikalnih prsline. Nakon stabilizacije stanja prsline, povećanje opterećenja dovelo je do povećanja njihove dužine i širine, ali ne i broja. Nakon tečenja zategnute armature, konstatovani su relativno veliki ugibi – do 10 cm, *Tabela 46*. Lom je nastao drobljenjem betona u pritisnutom delu grede, *slika 43*. Visina pritisnute zone betona bila je svega nekoliko centimetara. Oblik loma je bio drugačiji kod grede RAC100-1 gde je došlo do

kidanja dve od tri šipke podužne armature pre drobljenja pritisnutog betona. Ipak, slika prslina pri lomu u ovoj gredi bila je slična kao kod uporednih greda NAC-1 i RAC50-1, *slika 43*. Ni u jednoj gredi nisu primećene kose prsline u blizini oslonaca.



*Slika 43. Lom greda sa „minimalnim“ procentom armiranja*

Grede sa “srednjim“ procentom armiranja (NAC-2, RAC50-2 i RAC100-2) pokazale su slično ponašanje kao i grede sa minimalnim procentom. Vertikalne prsline u srednjoj trećini raspona greda pojavile su se pri opterećenju od oko 20% opterećenja pri lomu. Kose prsline su se pojavile pri opterećenju od oko 100 kN menjajući nagib do oko 45° blizu oslonaca. Tek u poslednjoj fazi opterećenja prsline su zašle u gornju trećinu visine greda, *slika 44*.



*Slika 44. Lom greda sa “srednjim“ procentom armiranja*

Oblik loma je bio duktilan sa tečenjem armature i relativno velikim deformacijama (do oko 5 cm) praćenim lomom betona u pritisnutoj zoni preseka kod svih greda, *slika 44*.

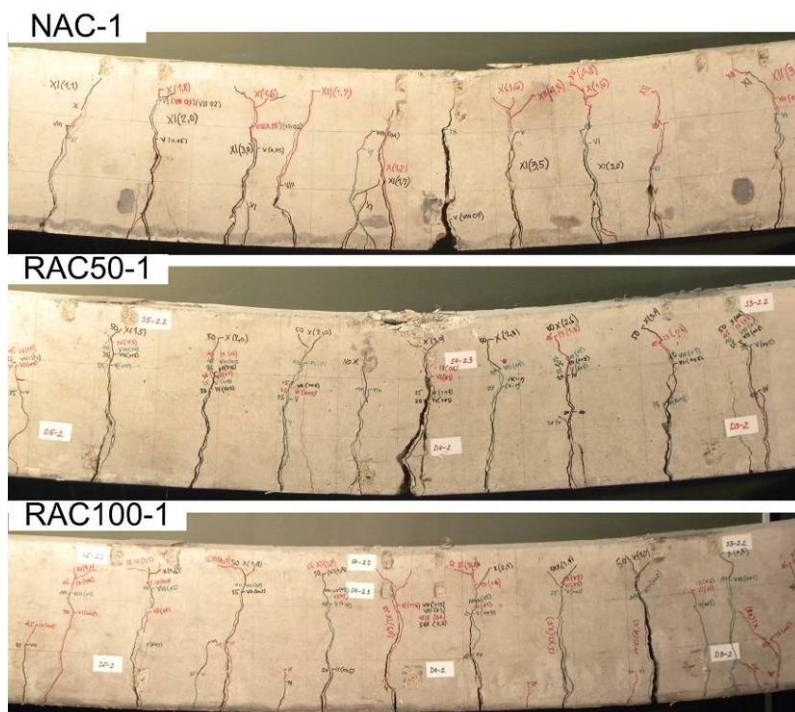
Kod tri grede sa „maksimalnim“ procentom armiranja (NAC-3, RAC50-3 i RAC100-3) lom je ostvaren drobljenjem betona u pritisnutoj zoni u sredini raspona, bez tečenja podužne armature. Ovo je poznato kao krti oblik loma. Vertikalne prsline su formirane u srednjoj trećini raspona i pružale su se do oko polovine visine greda, slika 45. Kose prsline u smičućem rasponu pojavile su se pri opterećenju od oko 120 kN i ugao njihovog nagiba se smanjivao u blizini oslonaca.



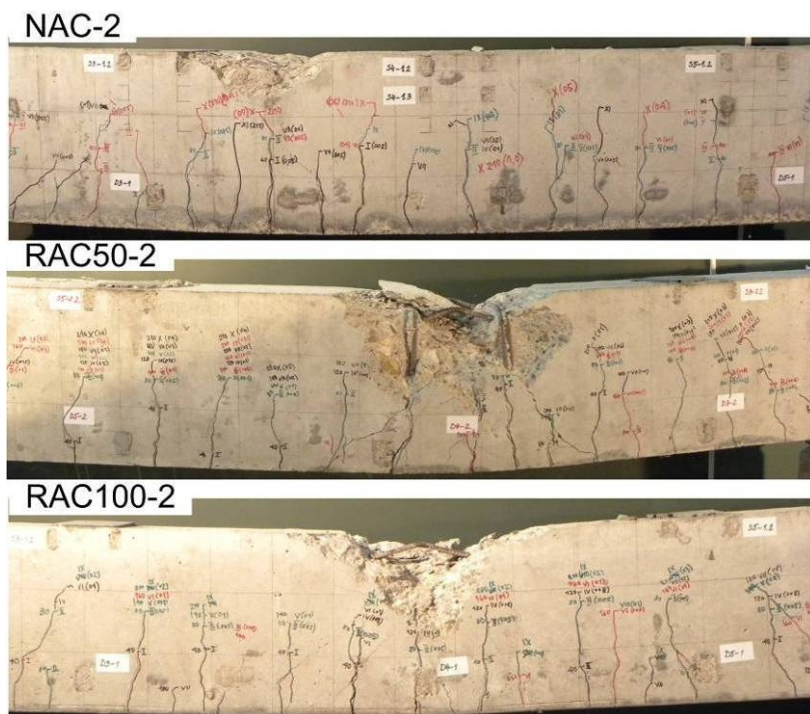
*Slika 45. Lom greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja*

Najznačajnija razlika u obliku loma između greda od različite vrste betona bila je u nivou oštećenja betona pri lomu. Sa porastom sadržaja recikliranog agregata raste veličina površi loma kao i nivo destrukcije betona u zoni loma greda. Te razlike su izraženije sa porastom procenta armiranja greda, tj. sa povećanjem visine pritisnute zone betona, tako da ih je kod greda sa minimalnim procentom armiranja vrlo teško primetiti, *slika 46*. Za razliku od grede NAC-2, kod greda RAC50-2 i RAC100-2 beton je pri lomu zdrobljen u sitne komade, svedene praktično na veličinu zrna agregata, *slika 47*. Još veća razlika može se uočiti prilikom poređenja nakon loma dve grede sa najviše zategnute armature NAC-3 i RAC100-3, *Slika 48*. Dok su prsline kod NAC-3 formirale površ loma u obliku dobro poznatog konusa u pritisnutoj zoni preseka, greda RAC100-3 je pretrpela potpunu destrukciju u zoni oko sredine raspona. Zabeležena je velika rotacija, a oštećenja su propagirala po čitavoj visini greda, *slika 48*. Ovo je u skladu sa nalazima [González-Fonteboia i ost. \(2011\)](#), koji su zaključili da oštećenja greda od RAC betona pri lomu rastu sa porastom količine recikliranog agregata u betonu.

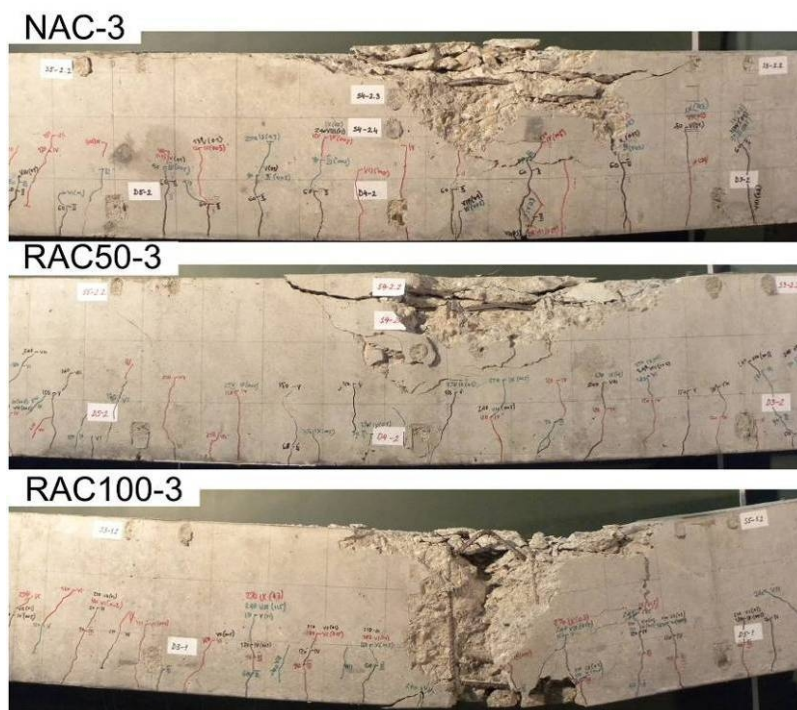




Slika 46. Srednja trećina nosača sa „minimalnim“ procentom armiranja pri lomu



Slika 47. Srednja trećina nosača sa „srednjim“ procentom armiranja pri lomu



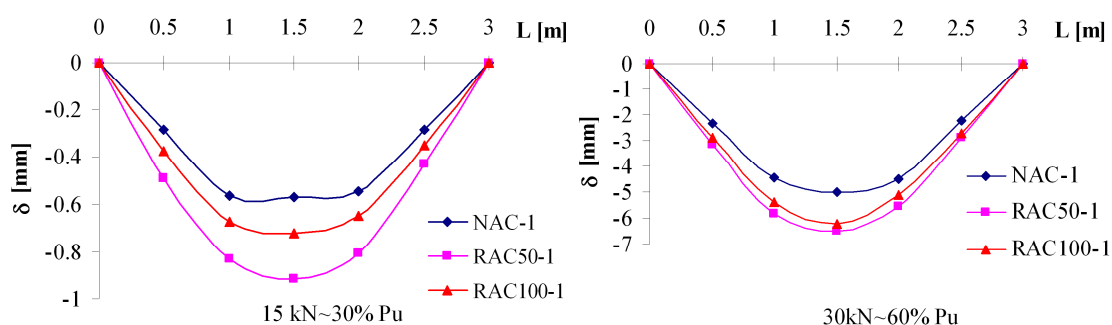
Slika 48. Srednja trećina nosača sa „maksimalnim“ procentom armiranja pri lomu

Objašnjenje se može naći u drugačijoj i značajno komplikovanijoj mikro strukturi RAC u poređenju sa NAC betonom. Nova kontaktno prelazna zona između zrna recikliranog agregata i nove cementne paste je obično porozna i rastresita i predstavlja slabo mesto u betonu sa recikliranim agregatom ([Tam i ost. 2008](#)). Analiza mikrostrukture pomoću Skenirajućeg Optičkog Mikroskopa (SEM) primenjena na recikliranom agregatu takođe je pokazala postojanje više pora i sitnih prslina u starom cementnom malteru koji je deo recikliranog agregata, nego na površini zrna prirodnog agregata ([Poon i ost. 2004<sup>b</sup>](#); [Tam i ost. 2009](#)). Ove mikro prsline verovatni su razlog veće destrukcije greda od RAC betona. Jedno od mogućih rešenja za poboljšanje kvaliteta kontaktno tranzitne zone sastoji se u ispunjavanju pora i mikro prslina silikatnom prašinom i cementnim gelom u predfazi spravljanja betona. Tom prilikom se formira relativno tanak i mekan sloj silikatne isplake koji može značajno da poboljša kvalitet i stare i nove kontaktno tranzitne zone ([Tam i Tam 2008](#)).

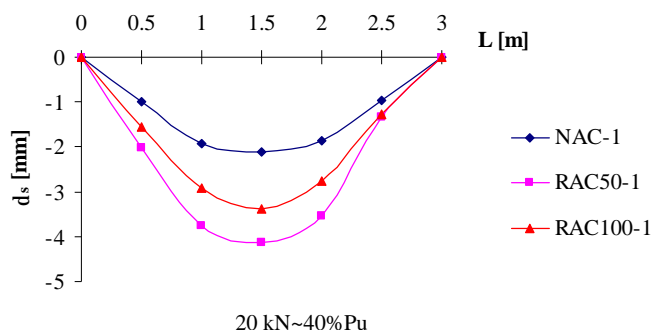
### 3.5.7.2 Ugibi

Na slikama 49, 50 i 51 dat je uporedni prikaz merenih ugiba greda od različitih betona armiranih minimalnim, srednjim i maksimalnim procentom armiranja, za različite nivoe opterećenja – 30%, 40%, 60%, 80% i 90% proračunske granične sile loma. S obzirom da su grede sa istim procentom armiranja napravljene od tri vrste

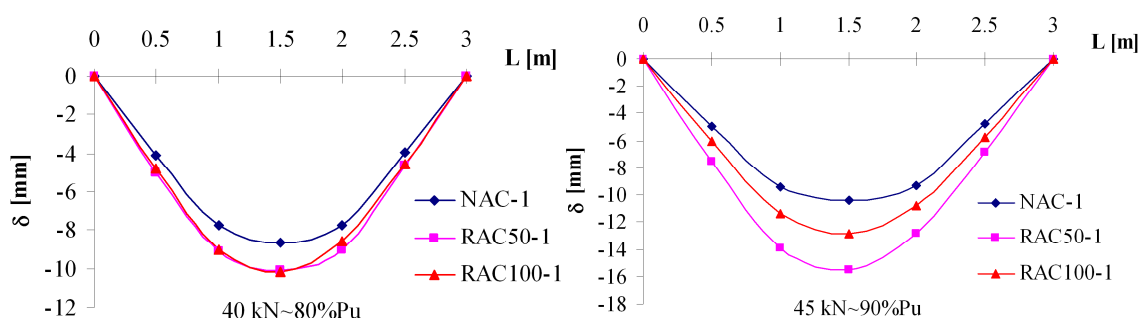
betona (NAC, RAC50 i RAC100), ali iste čvrstoće pri pritisku, proračunska granična sila, a samim tim i usvojene vrednosti sila pri eksploatacionom opterećenju bile su iste -  $2P_s=20$  kN,  $2P_s=80$  kN i  $2P_s=120$  kN za grede sa minimalnim, srednjim i maksimalnim procentom armiranja, respektivno. Ova opterećenja su na nivou od 40% proračunskog graničnog opterećenja. Numeričke vrednosti ugiba svih greda pri eksploatacionom opterećenju ( $\delta_s$ ), u preseku u sredini raspona, prikazani su u tabeli 46. Vrednosti ugiba u ostalim presecima ( $\delta$ ) i pri različitom opterećenju nalaze se u Aneksu A.



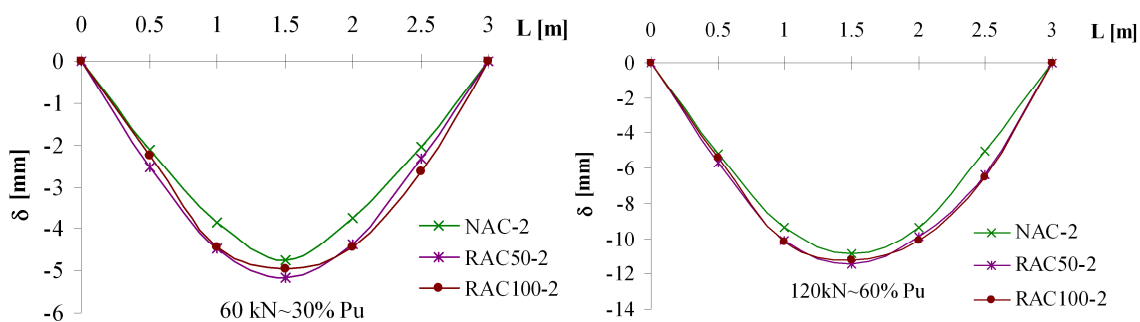
Slika 49. Ugibi greda sa „minimalnim“ procentom armiranja pri 30% i 60% graničnog opterećenja



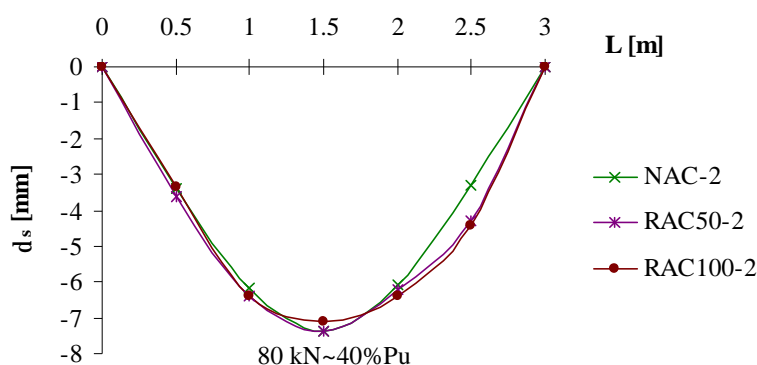
Slika 50. Ugibi greda sa „minimalnim“ procentom armiranja pri eksploatacionom opterećenju (40% graničnog opterećenja)



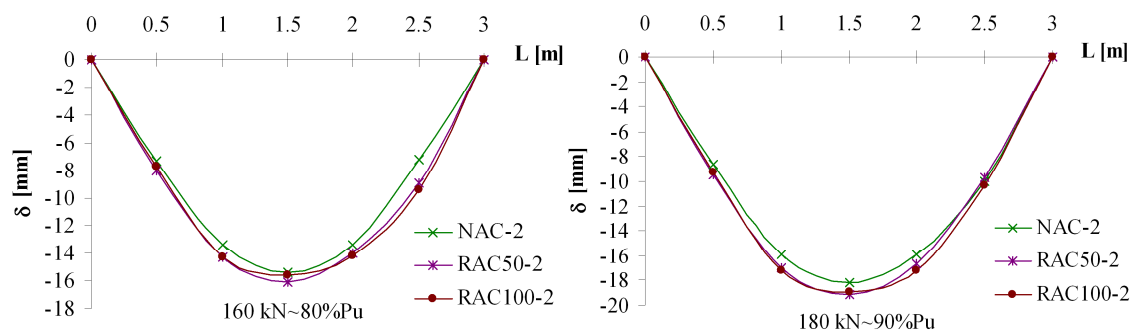
Slika 51. Ugibi greda sa „minimalnim“ procentom armiranja pri 80% i 90% graničnog opterećenja



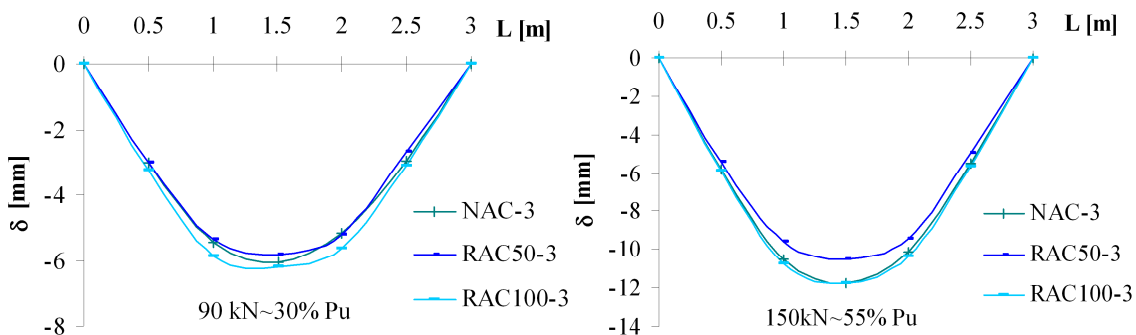
Slika 52. Ugibi greda sa „srednjim“ procentom armiranja pri 30% i 60% graničnog opterećenja



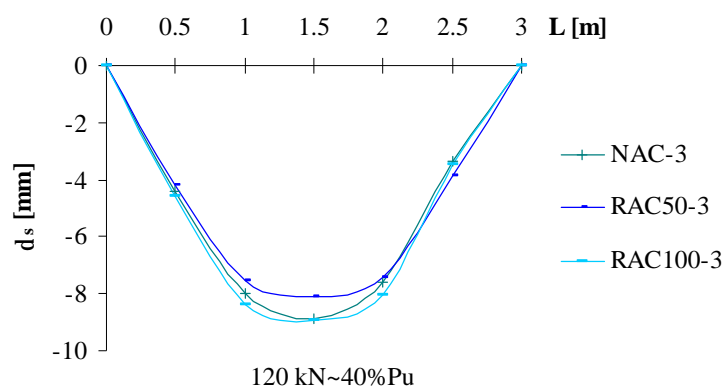
Slika 53. Ugibi greda sa „srednjim“ procentom armiranja pri eksploatacionom opterećenju (40% graničnog opterećenja)



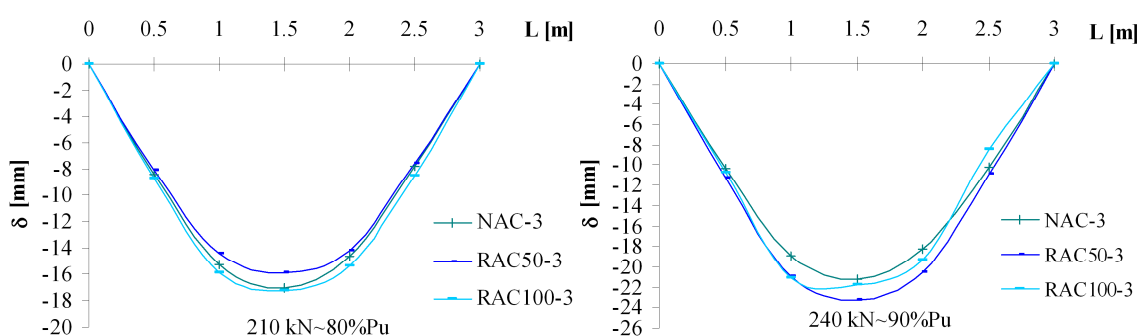
Slika 54. Ugibi greda sa „srednjim“ procentom armiranja pri 80% i 90% graničnog opterećenja



Slika 55. Ugibi greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja pri 30% i 55% graničnog opterećenja



Slika 56. Ugibi greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja pri eksploatacionom opterećenju (40% graničnog opterećenja)



Slika 57. Ugibi greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja pri 80% i 90% graničnog opterećenja

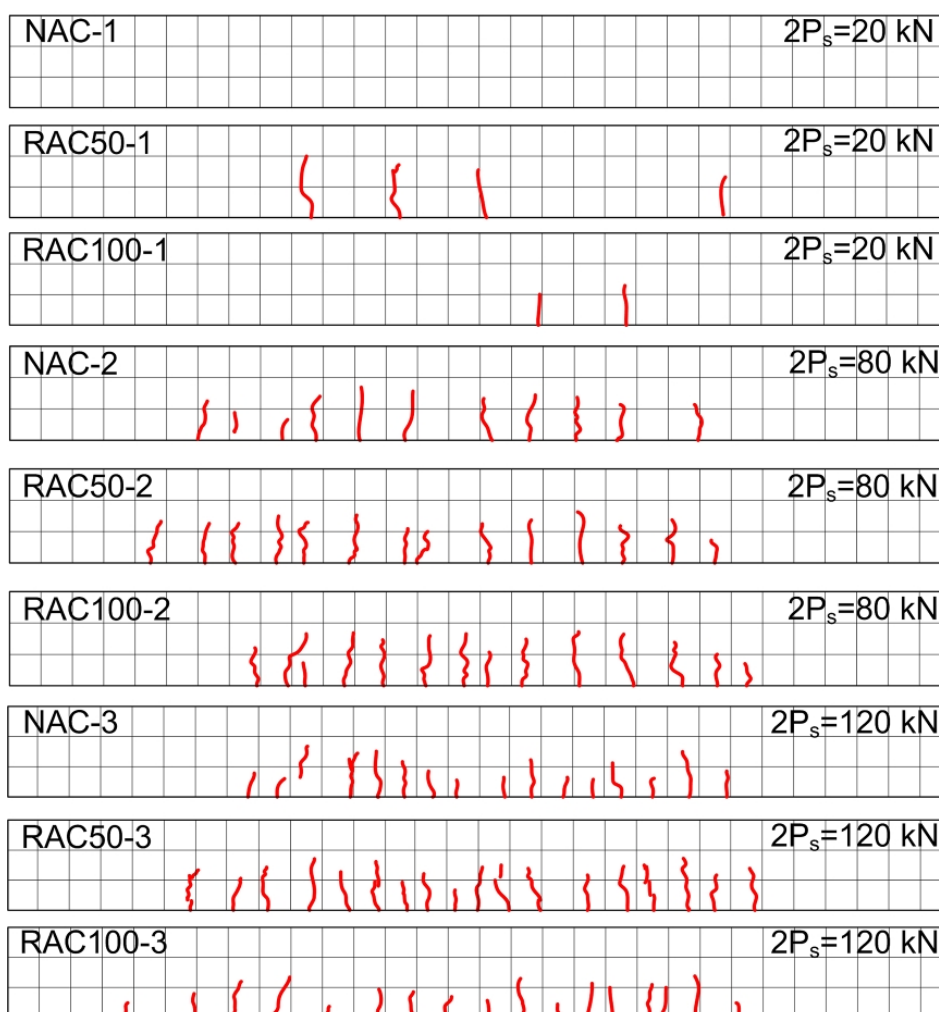
Maksimalni ugibi kod svih greda, za sve nivoe opterećenja, očekivano su zabeleženi u sredini raspona. Pri eksploatacionom nivou opterećenja, najveće razlike u ugibima između greda od betona sa različitim sadržajem RCA uočene su u prvoj grupi greda, armiranih minimalnim procentom armiranja. Grede RAC50-1 i RAC100-1 imale su 95% i 58% respektivno veće ugibe u odnosu na uporednu NAC-1 gredu. Ovo se delom može tumačiti kao posledica različite slike prslina kod različitih greda. Naime, kod greda sa RCA otvaranje prslina zabeleženo je praktično pri eksploatacionom nivou opterećenja ( $2P_{cr}=2P_s=20$  kN), dok one još uvek nisu bile formirane kod NAC-1 grede ( $2P_{cr}=25$  kN), pa je ona imala nešto veću krutost i manje ugibe. Ipak, u fazama pre otvaranja prslina (npr. 30%  $P_u$ ), ali i pri opterećenjima bliskim graničnom (npr. 80%  $P_u$ ), grede sa recikliranim agregatom imale su veće ugibe od uporedne NAC-1 grede, od 17% do 66%. Imajući u vidu da su i moduli elastičnosti i slika prslina za sve tri vrste betona vrlo slični (tabela 44, slika 46), razlog za evidentne razlike u ugibima treba tražiti u sadejstvu zategnutog betona između prslina. Ovo sadejstvo je očigledno izraženije kod grede od običnog betona (NAC-1) u odnosu na grede RAC50-1 i RAC100-1.

Ugibi pri eksploatacionom opterećenju RAC greda sa srednjim i maksimalnim procentom armiranja praktično su isti kao ugibi uporednih NAC greda. Ugibi greda RAC50-2 i RAC100-2 bili su za 0.3% i 4% manji u odnosu na uporednu NAC-2 gredu. Slično, ugibi RAC50-3 i RAC100-3 greda bili su za 9% manji, odnosno 1% veći u odnosu na uporednu NAC-3 gredu, respektivno. Slični odnosi između ugiba RAC i NAC greda sa srednjim i maksimalnim procentom armiranja važe i pri većim opterećenjima od eksploatacionog. U preostalim fazama opterećenja do faze pred lom nosača, RAC50-2 i RAC100-2 imaju ugibe koji su od 4% do 6%, odnosno 1% do 4% respektivno veći od ugiba uporedne NAC-2 grede. RAC50-3 i RAC100-3 imale su ugibe koji su 6% do 11% manji, odnosno 1% do 3% veći respektivno u odnosu na uporednu NAC-3 gredu.

### 3.5.7.3 Prsline

Iz *tabele 46* se vidi da sila pri kojoj dolazi do formiranja prslina ne zavisi u većoj meri od vrste betona, tj. količine recikliranog agregata, već iznenađujuće, od procenta armiranja greda. Analiza odnosa računskog i stvarnog momenta savijanja pri pojavi prslina sprovedena je u poglavlju [4.3.2.](#)

Slike prslina za sve grede u fazi opterećenja koje odgovaraju eksploataciji prikazane su na *slikama 50, 53 i 56*, dok su maksimalne širine ( $w_{max}$ ) i srednje rastojanje ( $l_{cr}$ ) prslina za taj nivo opterećenja date u *tabeli 46*. Širine prslina su merene upoređujući ih sa linijama različite debljine nacrtanim na providnoj foliji-etalonu. Srednje rastojanje prslina sračunato je kao prosečno izmereno rastojanje svih prslina sa obe strane grede. Srednje rastojanje i dužina prsline se smanjuju sa povećanjem procenta armiranja, za sve vrste betona. Širina i srednje rastojanje prslina kod NAC i RAC greda mogu se smatrati veoma sličnim kod greda sa srednjim i maksimalnim procentom armiranja. Kod NAC-1 grede sa minimalnim procentom armiranja nisu primećene prsline pri eksploatacionom opterećenju, dok je kod RAC50-1 i RAC100-1 greda uočeno nekoliko prslina. U sledećem koraku nanošenja opterećenja prsline su se pojavile i kod NAC-1 grede. Za druge vrednosti opterećenja različite od eksploatacionog kao i pri lomu nosača (*slike 51, 52, 54, 55, 57*), takođe nisu uočene bitne razlike u srednjem rastojanju, širini i dužini prslina između greda od različitog betona.



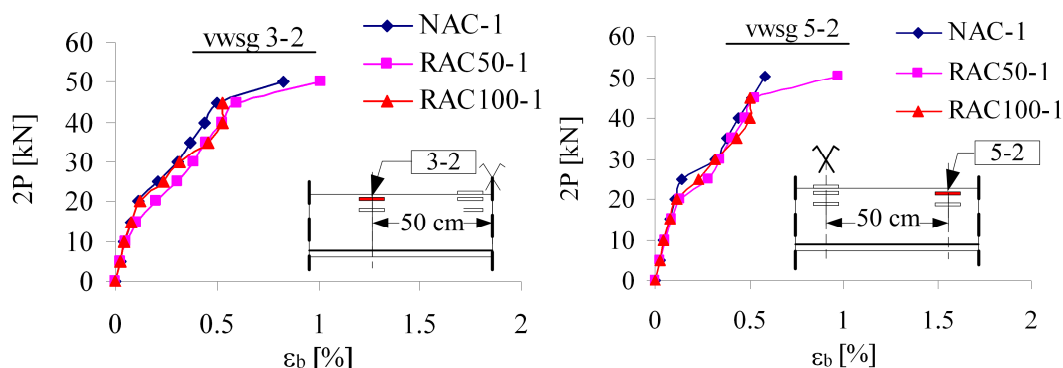
Slika 58. Slika prslina u gredama pri eksploatacionom nivou opterećenja

#### 3.5.7.4 Dilatacije u betonu

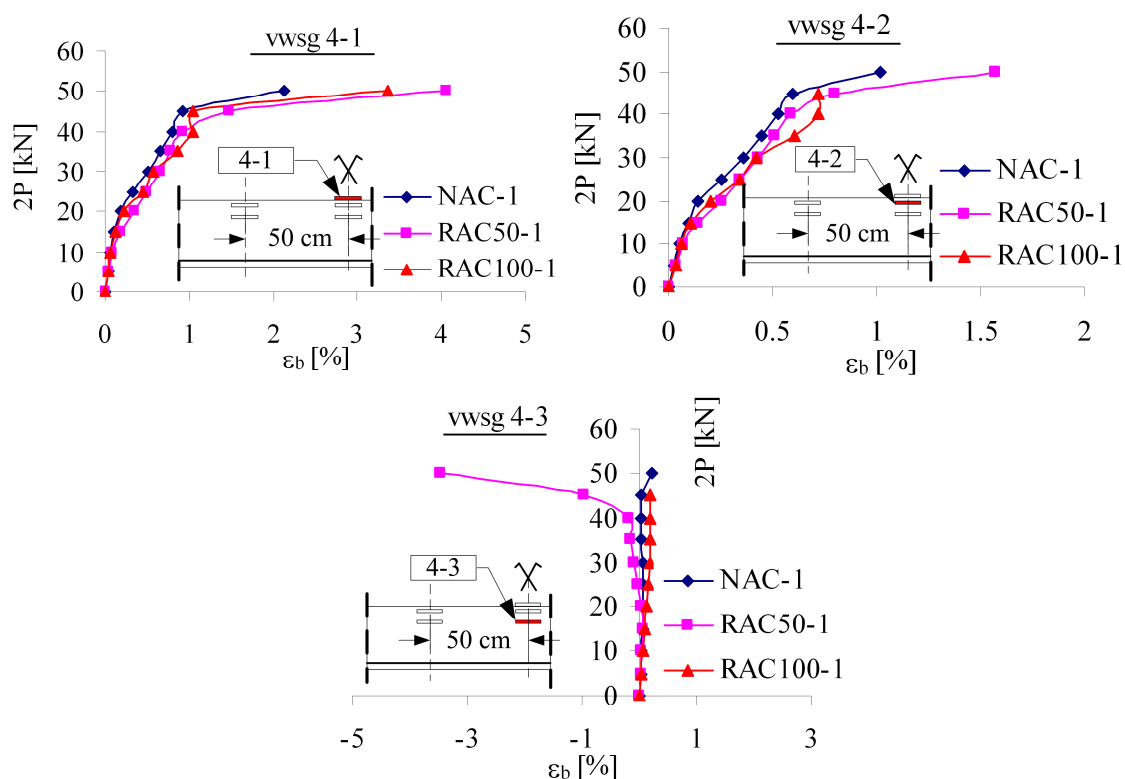
Dilatacije u betonu merene su u presecima 3, 4 i 5 (slika 35) kontinualno u svim fazama opterećenja. Dijagrami uporednih dilatacija za sve tri vrste betona i sva tri procenta armiranja, na svakom mernom mestu po visini preseka, prikazani su na slikama 59 i 60. Oznaka mesta izmerene dilatacije nalazi se u zaglavlju svakog dijagrama u obliku  $vwsg\ M-N$ , gde je  $M$  oznaka preseka, a  $N$  oznaka položaja senzora po visini poprečnog preseka grede, Slika 35. Svaka dilatacija predstavlja srednju vrednost merenih dilatacija na obe strane grede.

Generalno, dilatacije u betonu rastu sa povećanjem opterećenja. Za grede sa minimalnim procentom armiranja prva promena na dijagramu sila (2P)-dilatacija ( $\epsilon_b$ ) dešava se pri opterećenju od oko 20 kN, što odgovara trenutku formiranja prslina u

gredama. Uočljivo je značajno povećanje dilatacija u sva tri preseka pri opterećenju od oko 45 kN, što odgovara konstatovanoj pojavi tečenja kod greda tog tipa (slike 59 i 60).



Slika 59. Dilatacije u betonu kod greda sa „minimalnim“ procentom armiranja, merna mesta 3-2 i 5-2

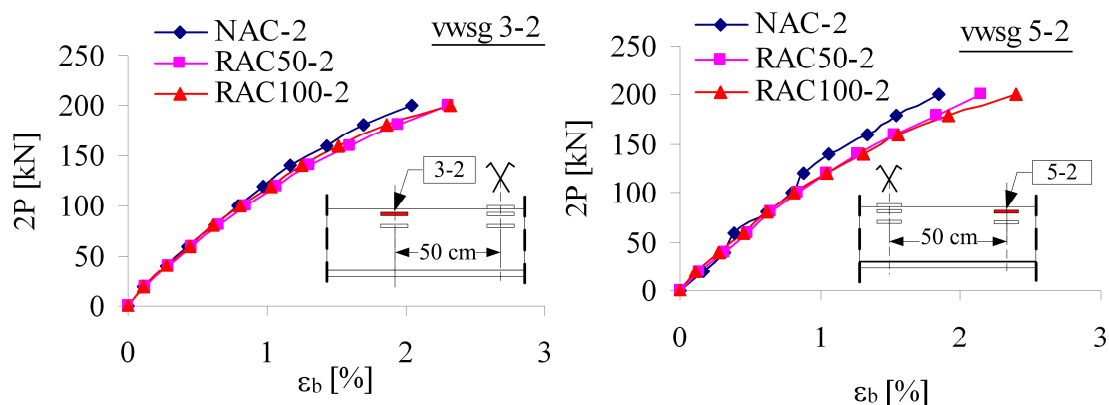


Slika 60. Dilatacije u betonu kod greda sa „minimalnim“ procentom armiranja, merna mesta 4-1, 4-2 i 4-3

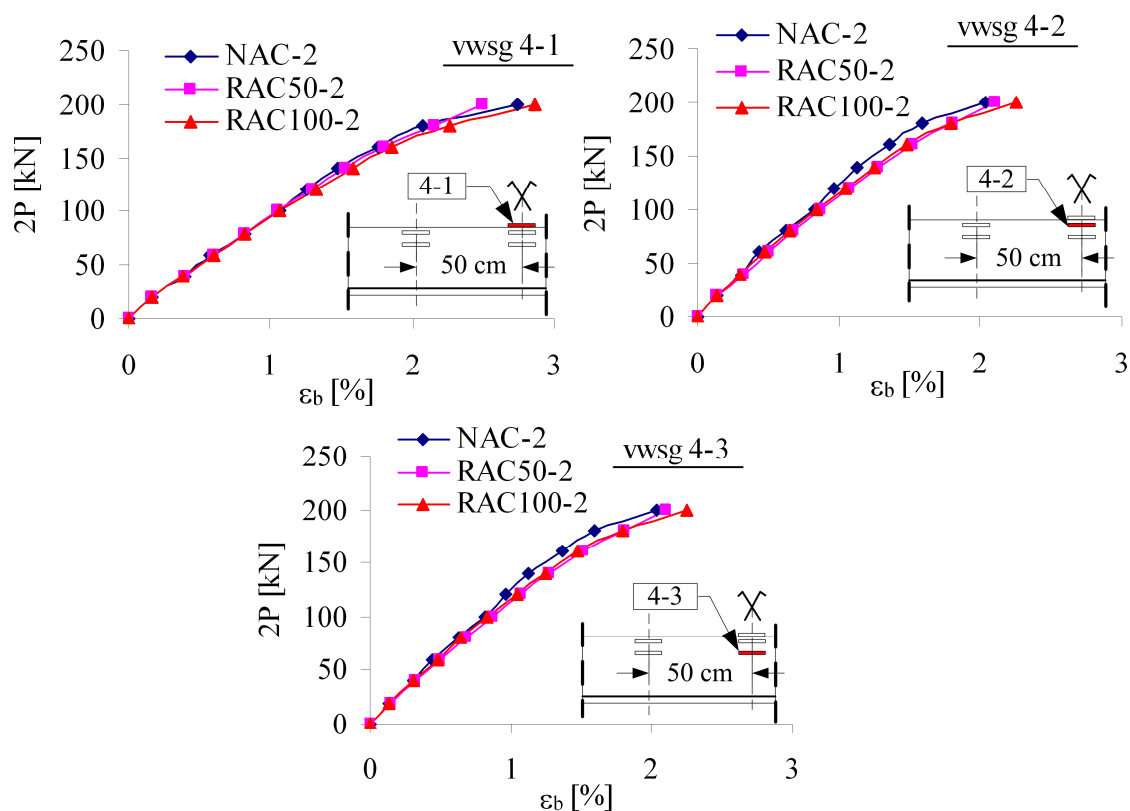
Na mernom mestu 4-3 zabeležene su vrlo niske dilatacije za sve faze opterećenja, a kod grede RAC50-1 čak postaju dilatacije zatezanja. To znači da je to merno mesto, na rastojanju od 6.75 cm od gornje ivice grede, u blizini neutralne linije ili je čak deo zategnute zone preseka. Gledano po dužini grede, najveće dilatacije kod sve tri grede očekivano se javljaju u sredini (merni mesto 4-1), dok su nešto manje, a međusobno



vrlo slične, dilatacije u presecima 3 i 5 (merna mesta 3-2 i 5-2). Dilatacije kod NAC-1 grede bile su u svim fazama opterećenja manje od dilatacija RAC50-1 i RAC100-1 grede, na istim mernim mestima, *slike 59 i 60*. Razlike su najveće u fazi pred lom i mogu iznositi i do 100%, ali treba imati u vidu da se radi o malim dilatacijama posmatrano u apsolutnim vrednostima.



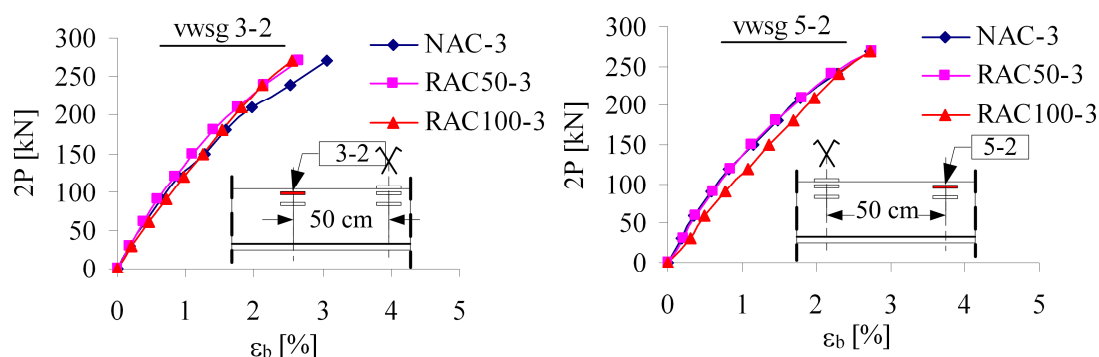
Slika 61. Dilatacije u betonu kod greda sa „srednjim“ procentom armiranja, merna mesta 3-2 i 5-2



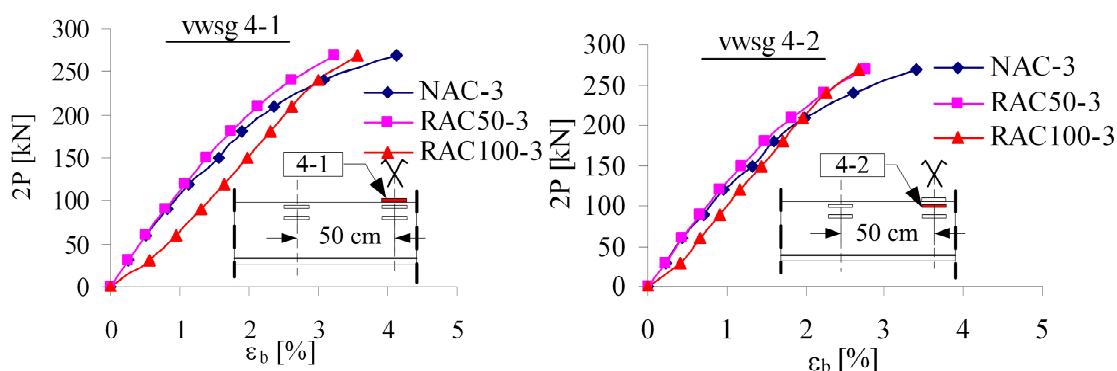
Slika 62. Dilatacije u betonu kod greda sa „srednjim“ procentom armiranja, merna mesta 4-1, 4-2 i 4-3

Kod greda sa srednjim procentom armiranja, dijagrami promene dilatacije u betonu mogu se podeliti na linearni deo, do opterećenja koje je za 50% veće od eksploatacionog, tj. iznosi oko 60% graničnog opterećenja ( $2P=120$  kN), i nelinearni deo nakon toga do loma nosača, *slike 61 i 62*. U prvom delu, razlike u dilatacijama na svim mernim mestima između NAC-2, RAC50-2 i RAC100-2 greda su do 10%, dok je u drugom delu uočljiv brži prirast dilatacija kod greda sa recikliranim agregatom, a razlike u odnosu na NAC-2 iznose do 20% kod RAC50-2 i do 30% kod RAC100-2 greda.

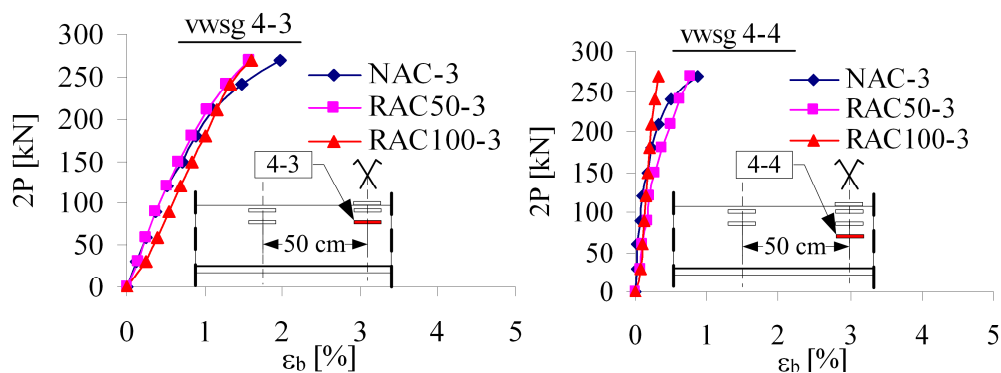
U grupi od tri grede sa maksimalnom podužnom armaturom, dilatacije u betonu beleže praktično linearno povećanje sa povećanjem opterećenja do pred fazu loma, kada je registrovan nešto brži prirast dilatacija, *slike 63, 64 i 65*. U odnosu na uporednu NAC-3 gredu, dilatacije u betonu kod grede RAC50-3 su za 10% do 20% manje. Na gredi RAC100-3, dilatacije u betonu su u početnim fazama čak i do 100% veće u odnosu na uporednu NAC-3, ali sa povećanjem opterećenja te razlike se smanjuju, da bi u poslednjoj fazi pred lom bile do 20% manje nego kod NAC-3 grede. Ovakvi odnosi važe na svim mernim mestima osim na poziciji 4-4 koja je najbliža neutralnoj liniji.



Slika 63. Dilatacije u betonu kod greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja, merna mesta 3-2 i 5-2

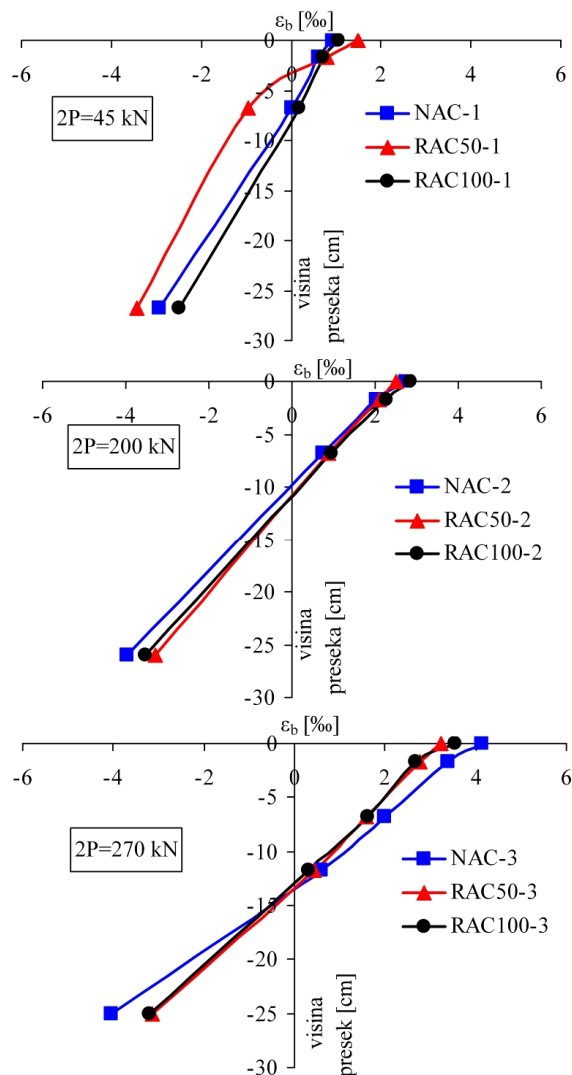


Slika 64. Dilatacije u betonu kod greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja, merna mesta 4-1 i 4-2



Slika 65. Dilatacije u betonu kod greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja, merna mesta 4-3 i 4-4

Raspored dilatacija po visini preseka u sredini raspona greda, pri opterećenju od 45 kN, 200 kN i 270 kN (faza pred lom), za grede sa 0.28%, 1.46% i 2.54% armiranja podužnom armaturom respektivno, prikazane su na slici 66.



Slika 66. Dilatacije po visini grede u preseku u sredini raspona

Nezavisno od procenta armiranja i vrste betona, raspored dilatacija po visini preseka može se smatrati linearnim. Jedini izuzetak predstavlja ponašanje grede RAC50-1. Razlike u dilatacijama na gornjim ivicama greda napravljenih od različitih betona, a sa istim procentom armiranja su do 22%, *tabela 46*. Ako se uporede visine pritisnutih zona kod greda od različitih betona, mogu se videti relativno male razlike. Kod greda sa minimalnim procentom armiranja, visina pritisnute zone je 7 cm do 8 cm, za srednji procenat armiranja je 10 cm do 11 cm, dok kod betona sa najvećom podužnom armaturom iznosi oko 13 cm, nezavisno od vrste betona, *slika 66*.

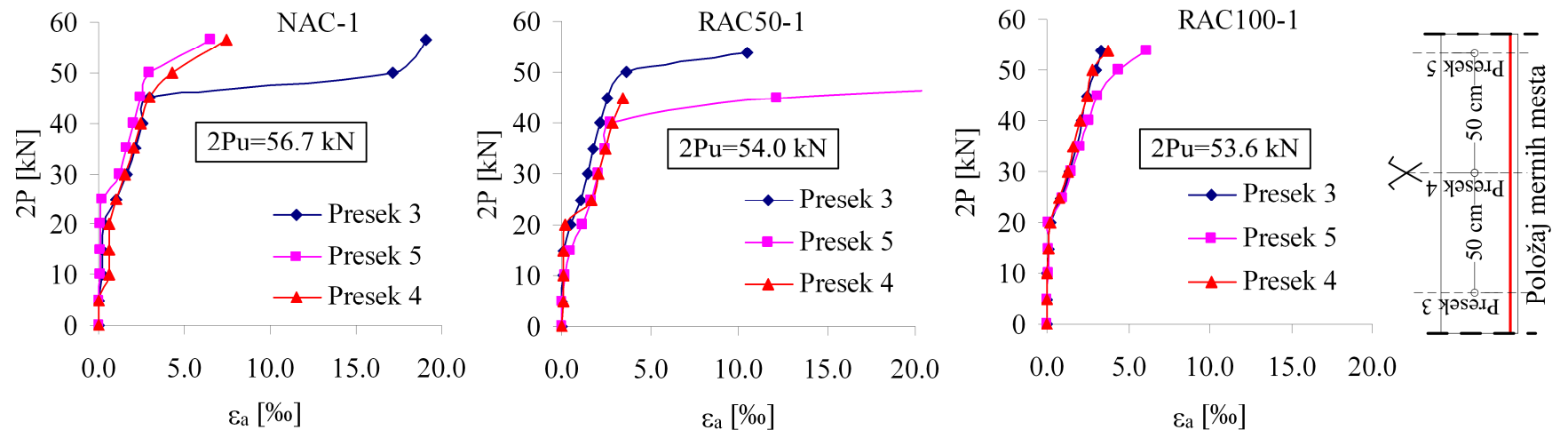
#### 3.5.7.5 Dilatacije u armaturi

Kod sve tri grede sa minimalnim procentom armiranja - NAC-1, RAC50-1, RAC100-1, *slika 67*, jasno se mogu uočiti tri dela dijagrama zavisnosti dilatacija ( $\epsilon_a$ )-sila ( $2P$ ). Prvi deo dijagrama je linearan do opterećenja od oko 20 kN kada se pojavljuju prve prsline. Tada se krutost nosača smanjuje do opterećenja od oko 45 kN, što se vidi na drugom delu dijagrama. Taj deo dijagrama je takođe linearan, ali se na samom njegovom početku može primetiti nelinearan deo koji odgovara periodu stabilizacije slike prsline. Treći deo dijagrama je od oko 45 kN do loma nosača sa izraženim tečenjem armature u sva tri preseka duž srednje trećine nosača. Oblik krivih linija kojima je definisana zavisnost dilatacija-sila ne razlikuju se bitno kod greda od različitih betona, NAC-1, RAC50-1 i RAC100-1. Same vrednosti dilatacija u različitim gredama, a u istom preseku, mogu se značajno razlikovati posmatrano u procentualnim iznosima, ali se radi o malim dilatacijama posmatrano u apsolutnim vrednostima. Ovo se, naravno, odnosi za faze do oko 45 kN. Interesantno, kod greda RAC100-1 do loma je došlo lomom podužne armature u preseku 3, ali taj lom nije praćen velikim izduženjima, *Slika 67*.

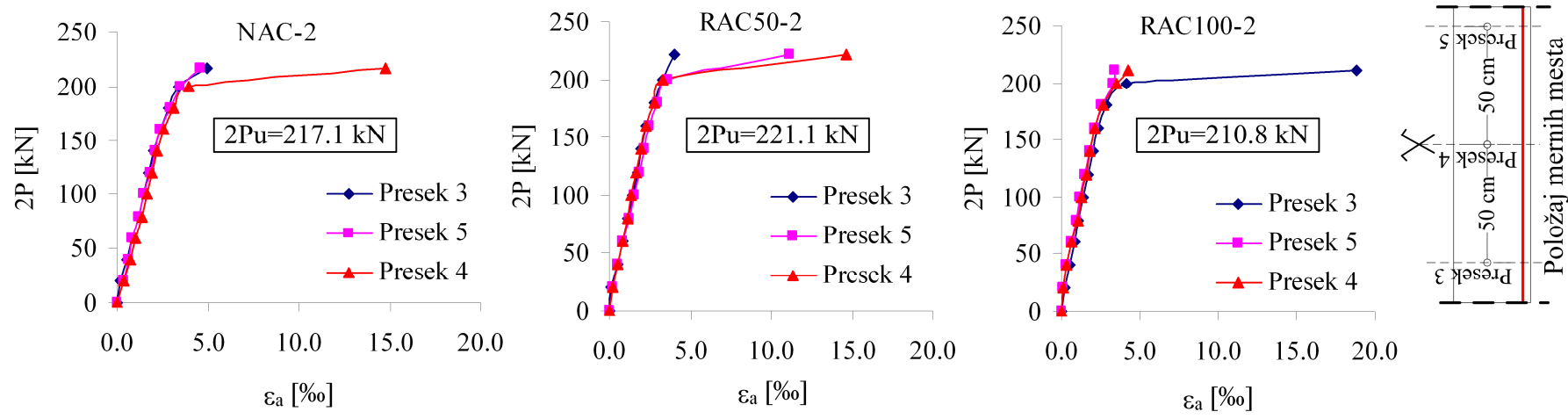
Na svakoj od greda sa srednjim procentom armiranja (NAC-2, RAC50-2, RAC100-2) izmerene dilatacije u armaturi u tri preseka međusobno se razlikuju do 10%, za sve faze opterećenja do faze loma nosača kada armatura u nekom/nekim od preseka počinje značajno da teče, *slika 68*. Ako se uporede dilatacije u istim presecima kod greda od različitog betona, može se zaključiti da su dilatacije u armaturi kod greda RAC50-2 i RAC100-2 manje od dilatacija u armaturi kod uporedne NAC-2 grede za do 16% i 25% respektivno. Ovo se odnosi na sve faze opterećenja počev od faze eksploatacije ( $2P_s=80$  kN) do pred fazu loma nosača ( $2P=200$  kN). Za opterećenja van navedenog opsega,

dilatacije su ili male, posmatrano u apsolutnim vrednostima, ili je došlo do tečenja armature u različitim presecima.

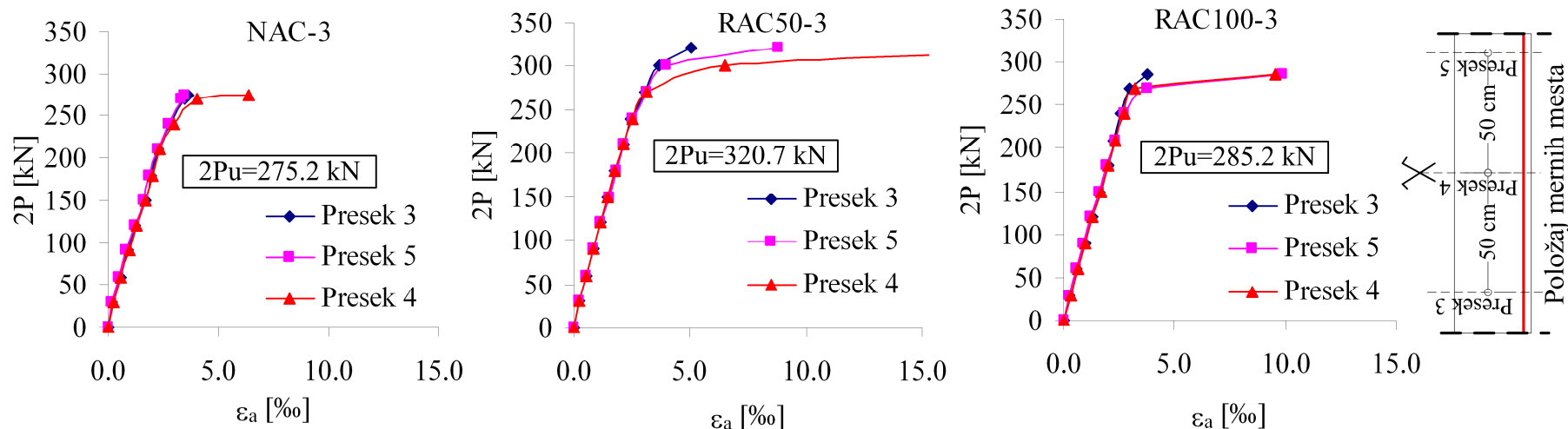
Kod greda sa najviše podužne armature, dilatacije u armaturi grede RAC50-3 do 15% su manje od dilatacija u armaturi uporedne NAC-3 grede posmatrane u istim presecima (za nivo opterećenja od 120 kN do 240 kN), *slika 69*. Dilatacije u armaturi grede RAC100-3 su do 10% veće i do 5% manje nego kod uporedne NAC-3 grede, za isti opseg opterećenja. Kod svih greda, dilatacije u preseku 4 su iste ili do 8% veće u odnosu na preseke 3 i 5. Kod svih greda, tečenje armature počinje pri vrednosti dilatacija od oko 3 promila (*slika 70*), što je u skladu sa očekivanjima na osnovu ispitivanja ponašanja armaturnih šipki (poglavlje [3.5.3.2](#)).



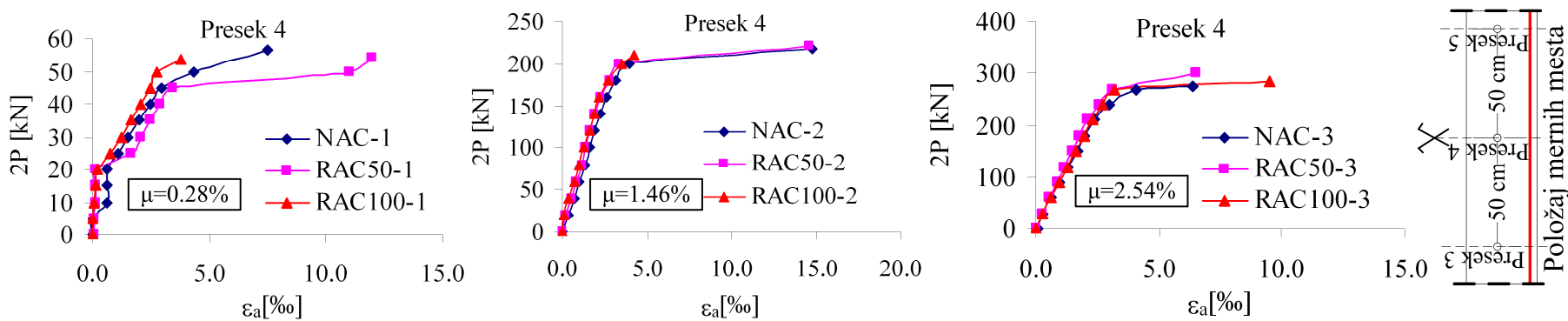
Slika 67. Dilatacije u armaturi kod greda sa „minimalnim“ procentom armiranja



Slika 68. Dilatacije u armaturi kod greda sa „srednjim“ procentom armiranja



Slika 69. Dilatacije u armaturi kod greda sa „maksimalnim“ procentom armiranja



Slika 70. Dilatacije u armaturi u srednjem preseku greda sa „minimalnim“, „srednjim“ i „maksimalnim“ procentom armiranja

### 3.5.8. ZAKLJUČAK

U okviru dela istraživanja koje se odnosi na ispitivanje ponašanja grednih nosača pri savijanju napravljenih od betona sa različitim sadržajem recikliranog agregata, ukupno je ispitano do loma 9 greda i 36 betonskih uzoraka (kocki i cilindara). Numerički podaci prikupljeni su sa ukupno 336 mernih mesta na grednim nosačima. Na osnovu obrađenih rezultata mogu se doneti sledeći zaključci:

- Betoni NAC i RAC50 napravljeni su sa istim količinama cementa i sa istim efektivnim vodocementnim faktorima, a pri tome su imali praktično iste čvrstoće pri pritisku, koje su bile neznatno veće od projektovane čvrstoće. Konzistencija ovih mešavina takođe je bila ista,
- Beton RAC100 iste čvrstoće pri pritisku i konzistencije kao i NAC, spravljen je sa oko 3% više cementa u odnosu na NAC,
- Zavisnost sila-pomeranje za opterećenje do loma kod ispitanih greda ne zavisi značajno od tipa primenjenog betona, tj. od količine recikliranog agregata. Razlike u obliku dijagrama sila-pomeranje između NAC, RAC50 i RAC100 greda koje su armirane istom količinom armature, mogu se smatrati zanemarljivim,
- Razlike u vrednostima sila loma, tj. graničnim nosivostima između NAC, RAC50 i RAC100 greda koje su armirane istom količinom armature, mogu se smatrati zanemarljivim,
- Veličina površi loma kao i nivo destrukcije betona pri lomu greda pri savijanju značajno je uslovljen količinom recikliranog agregata. Sa povećanjem količine recikliranog agregata raste veličina površi loma, a veći je i nivo destrukcije betona,
- Nisu uočene značajne razlike u ugibima NAC i RAC greda sa istim procentom armiranja za eksploatacioni nivo opterećenja. Izvesne razlike uočene su u gredama sa minimalnim procentom armiranja, zbog nešto ranijeg otvaranja prslina, odnosno manjeg sadejstva zategnutog betona i armature između prslina kod RAC greda,



- U okviru grupa greda sa istom podužnom armaturom, srednje rastojanje i širina prslina za nivo eksploatacionog opterećenja mogu se takođe smatrati sličnim, imajući u vidu relativno grubu procenu širine prslina,
- Linearna raspodela dilatacija po visini preseka u fazi pred fazu loma dokazuje da važi Bernulijeva hipoteza ravnih preseka bez obzira na količinu recikliranog agregata u betonu,
- Nema značajnih razlika u dilatacijama u betonu i armaturi između NAC i RAC greda sa istim procentom armiranja, za sve nivoe opterećenja.

### **3.6 ISPITIVANJE PONAŠANJA AB GREDA PRI SMICANJU POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM**

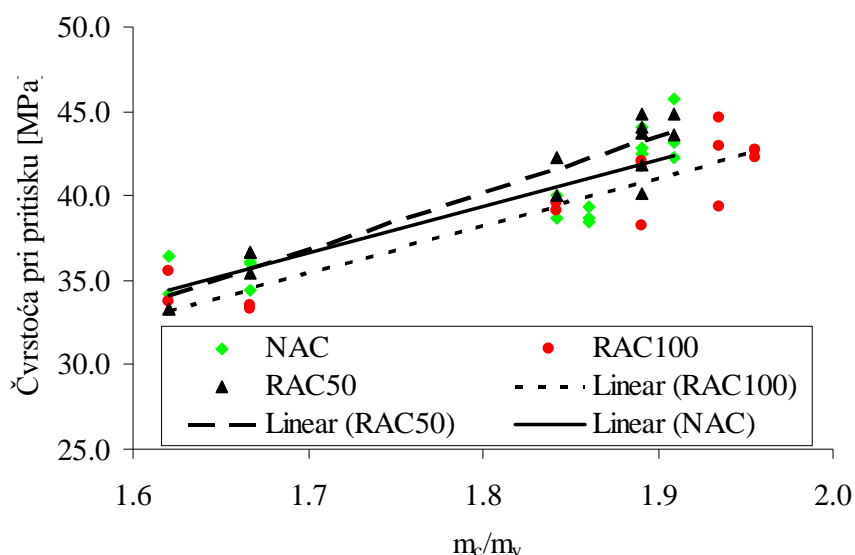
#### **3.6.1. UVOD**

Istraživanja ponašanja armiranobetonskih greda pri smicanju sprovode se decenijama unazad. I pored toga, prenos smičućih sila nije do kraja objašnjen u smislu definisanja doprinosa različitih mehanizama u transferu poprečnih sila – prenosa napona smicanja u neisprskalom betonu, agregat “interlock”-a, “dowel” efektu podužne armature, efektu luka i uticaju poprečne armature. U skladu sa različitim ocenama uticaja pojedinih efekata predloženi su brojni modeli ponašanja greda pri smicanju. Razumljivo, problem postaje utoliko komplikovaniji ukoliko se radi o betonu koji sadrži reciklirani agregat. Istraživanja koja se bave ponašanjem armiranog betona sa recikliranim agregatom izloženog kombinaciji normalnih napona i napona smicanja, relativno je malo. Poznajući fizičko-mehanička svojstva betona sa RC agregatom, intuitivno se može očekivati slična nosivost na smicanje NAC i RAC greda. Ipak, doprinos mehanizama koji zavise od svojstava betona kao što su prenos smicanja u neisprskalom betonu ili “interlock” efekat mogu biti različiti. U tu svrhu napravljeno je 9 greda koje su ispitane do loma. Parametri u ovom istraživanju bili su procentualni sadržaj recikliranog agregata i količina poprečne armature. Kako bi se analizirao doprinos samog betona, jedna serija greda bila je bez poprečne armature (uzengija) u okviru smičućeg raspona. Ostali bitni parametri, kao što su smičući raspon i veličina poprečnog preseka, su usvojeni isti za sve grede. Iz ograničenja po pitanju veličine opterećenja koje se može naneti proistekla je odluka da se promeni receptura betona u odnosu na grede ispitivane na savijanje, tačnije smanji ciljana čvrstoća pri pritisku. Iz istog razloga, u cilju

zmanjenja nosivosti na smicanje, promjenjena je vrsta poprečne armature, tj. primenjen je glatki armaturni čelik. Promena klase betona s druge strane doprinela je da se još jednom ispituju karakteristike betona sa recikliranim agregatom na nivou materijala i prošire zaključci. Takođe, analizirana je mogućnost primene nedestruktivnih metoda ispitivanja betona sa recikliranim agregatom u cilju povezivanja strukturalnih i mehaničkih svojstava ovih betona.

### 3.6.2. RECEPTURA ZA BETON

Za ispitivanje ponašanja greda pri smicanju projektovan je beton čvrstoće 36 MPa, plastične konzistencije. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka iz prethodno opisanog ispitivanja (*tabela 44*) pridruženi su setu podataka iz probnog ispitivanja betona (*tabele 36 i 38*) i na osnovu tako proširene baze formirane su nove zavisnosti čvrstoće pri pritisku i masenih odnosa cementa i vode, *slika 71*.



*Slika 71. Uspostavljene zavisnosti čvrstoće betona pri pritisku i odnosa  $m_c/m_v$*

Jednačine trend linija prikazanih na *slici 71* u kojima je  $m_c/m_v$  recipročna vrednost efektivnog vodocementnog faktora ( $1/\omega$ ) glase:

$$NAC : f_c = 27.648 \cdot \frac{1}{\omega} - 10.393 \quad (13)$$

$$RAC50 : f_c = 33.845 \cdot \frac{1}{\omega} - 20.81 \quad (14)$$

$$RAC100 : f_c = 27.927 \cdot \frac{1}{\omega} - 12.046 \quad (15)$$

Ove nove relacije iskorišćene su za određivanje receptura betona sa ciljanom čvrstoćom od 36 MPa, *tabela 47*.

Tabela 47. Sastav betonskih mešavina za željenu čvrstoću pri pritisku od 36 MPa (u  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ )

| Oznaka betona | Cement, $m_c$ | Voda  |              | Prirodni agregat |       |                |           | Reciklirani agregat |        |           |
|---------------|---------------|-------|--------------|------------------|-------|----------------|-----------|---------------------|--------|-----------|
|               |               | $m_v$ | $\Delta m_v$ | Pesak            |       | Krupan agregat |           | Krupan agregat      |        |           |
|               |               |       |              | [0-4]            | [4-8] | [8-16]         | [16-31.5] | [4-8]               | [8-16] | [16-31.5] |
| NAC-36        | 302           | 180   | -            | 619              | 310   | 310            | 583       | -                   | -      | -         |
| RAC50-36      | 302           | 180   | 21           | 618              | 132   | 177            | 265       | 132                 | 177    | 265       |
| RAC100-36     | 312           | 181   | 40           | 597              | -     | -              | -         | 204                 | 391    | 511       |

Efektivni vodocementni faktori za betone označene sa NAC-36, RAC50-36 i RAC100-36 iznose 0.596, 0.596 i 0.580, respektivno.

### 3.6.3. KARAKTERISTIKE MATERIJALA

#### 3.6.3.1 Beton

Od svojstava svežeg betona ispitivana je zapreminska masa u svežem stanju i konzistencija, prema domaćim standardima, *tabela 48*. Od mehaničkih karakteristika betona, ispitane su čvrstoća pri pritisku (ISS 2010<sup>b</sup>), čvrstoća pri zatezanju cepanjem (ISS 2008<sup>a</sup>) i savijanjem (ISS 2000<sup>b</sup>), statički (ISS 2000<sup>a</sup>) i dinamički modul elastičnosti (ISS 1993), dinamički Poasonov koeficijent (ISS 1993), *tabela 49*. Numeričke veličine date u *tabeli 49* predstavljaju srednje vrednosti merenja na tri uzorka. Takođe, izmerena je zapreminska masa betona u očvrsлом stanju, *tabela 48* (ISS 1997), Sva ispitivanja sprovedena su u okviru laboratorije Instituta za materijale i konstrukcije, IMK.

#### 3.6.3.2 Konzistencija i zapreminske mase betona

Rezultati ispitivanja konzistencije i zapreminske mase u svežem i očvrsлом stanju betona ciljane čvrstoće 36 MPa, prikazani su u *tabeli 48*. Sva tri betona su zadovoljila zadati uslov sleganja Abramsovog konusa od  $13 \pm 2$  cm odmah nakon spravljanja i  $8 \pm 2$  cm (plastična konzistencija) nakon 30 minuta.

Tabela 48. Rezultati ispitivanja svojstava betona u svežem stanju

| Vrsta betona | Sleganje [cm] |          | Zapreminska masa u svežem stanju $[\text{kN}/\text{m}^3]$ |            |       | Zapreminska masa u očvrsлом stanju $[\text{kN}/\text{m}^3]$ |            |       |
|--------------|---------------|----------|---|------------|-------|---|------------|-------|
|              | t=0 min       | t=30 min | $\mu^1$   | $\sigma^2$ | $n^3$ | $\mu^1$   | $\sigma^2$ | $n^3$ |
| NAC-36       | 11.8          | 6.3      | 2401  | 26         | 31    | 2384  | 22         | 28    |
| RAC50-36     | 11.0          | 6.5      | 2356  | 21         | 33    | 2345  | 19         | 30    |
| RAC100-36    | 12.7          | 6.3      | 2331  | 24         | 31    | 2320  | 20         | 28    |

<sup>1</sup> srednja vrednost

<sup>2</sup> standardna devijacija

<sup>3</sup> broj uzoraka

Poređenjem srednjih vrednosti zapreminskih masa u svežem stanju (*tabela 48*), može se zaključiti da betoni sa 50% RCA imaju do 2%, a betoni sa 100% RCA do 3%

manju zapreminsku masu u svežem stanju u odnosu na uporedni NAC beton slične čvrstoće pri pritisku. Standardna devijacija je slična kod svih betona, ne zavisi od količine RCA i iznosi oko 1% srednje vrednosti zapreminske mase u svežem stanju. Isti odnosi između RAC i NAC betona vladaju i kada je u pitanju zapreminska masa u očvrsлом stanju, *tabela 48*. Ovi rezultati su potpuno u skladu sa rezultatima ispitivanja betona projektovane čvrstoće 42 MPa (*tabele 42 i 43*).

### 3.6.3.3 Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoća pri pritisku ( $f_c$ ) je ispitana pri različitim starostima i uslovima nege, na uzorcima oblika kocke ivice 15 cm. Po tri uzorka od svakog betona negovana su na standardni način i ispitana pri starosti od 28 dana, dok su po tri uzorka negovana na isti način kao i grede čije je ponašanje pri smicanju bilo predmet ispitivanja. Oni su ispitani u starosti od 26 dana, kada je ispitivana druga iz serije od tri grede od istog betona. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betona u očvrsлом stanju prikazani su u *tabeli 49*.

*Tabela 49. Rezultati ispitivanja svojstava betona u očvrsлом stanju*

| Oznaka betona | $f_c$ [MPa] |                   | $E_c$ [GPa] | $E_d$ [GPa] | $f_{ct,sp}$ [MPa] | $f_{ct,fl}$ [MPa] |
|---------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|
|               | 28 dana     | test <sup>1</sup> |             |             |                   |                   |
| NAC-36        | 38.5        | 41.8              | 28.0        | 39.7        | 3.0               | 7.0               |
| RAC50-36      | 41.8        | 46.3              | 24.5        | 37.2        | 3.2               | 7.3               |
| RAC100-36     | 43.1        | 42.4              | 25.1        | 34.9        | 3.1               | 6.6               |

<sup>1</sup> ispitano u starosti od 26 dana

Dobijene vrednosti čvrstoća pri pritisku na 28 dana, kod svih betona su veće od ciljanih 36 MPa. Beton označen sa NAC-36 imao je čvrstoću koja je za oko 7% veća od ciljanje, dok je RAC50-36 dostigao čvrstoću koja je za oko 16% veća od ciljanih 36 MPa. Neočekivano, beton sa najviše RCA, imao je čvrstoću koja je za čak 20% veća od projektovane. Uzorci od NAC i RAC50 ispitani pri starosti od 26 dana (u vreme testiranja greda) imali su veće čvrstoće nego uzorci ispitani na 28 dana. To se može objasniti različitom negom betona, tačnije, manjom vlažnošću uzoraka ispitivanih pri starosti od 26 dana, što može rezultovati većom čvrstoćom pri pritisku ([Nevil, 1976](#); [Xudong i ost. 2012](#)).

### 3.6.3.4 Statički i dinamički modul elastičnosti

Modul elastičnosti ( $E_c$ ) određen je na osnovu merenja dilatacija na cilindrima prečnika 15 cm i visine 30 cm, pri naponu od 0.5 MPa i naponu koji je jednak trećini pritisne čvrstoće betona. Radi se, dakle, o određivanju sekantnog modula elastičnosti.

Iako je čvrstoća pri pritisku NAC-36 bila manja u poređenju sa RAC50-36 i RAC100-36, moduli elastičnosti ova dva RAC betona bili su za 12.5% i 10.3% respektivno manji u odnosu na NAC-36.

Dinamički modul elastičnosti ( $E_d$ ) koji zapravo predstavlja početni tangentni modul elastičnosti, određen je na bazi merenja rezonantne frekvencije longitudinalnih oscilacija na uzorku oblika prizme dimenzija 12x12x36 cm, prema dispoziciji prikazanoj na slici 72 i izraza:

$$E_D = 4 \cdot \gamma \cdot l^2 \cdot f^2 \quad (16)$$

gde je:  $\gamma$  - zapreminska masa materijala [ $\text{kg/m}^3$ ]

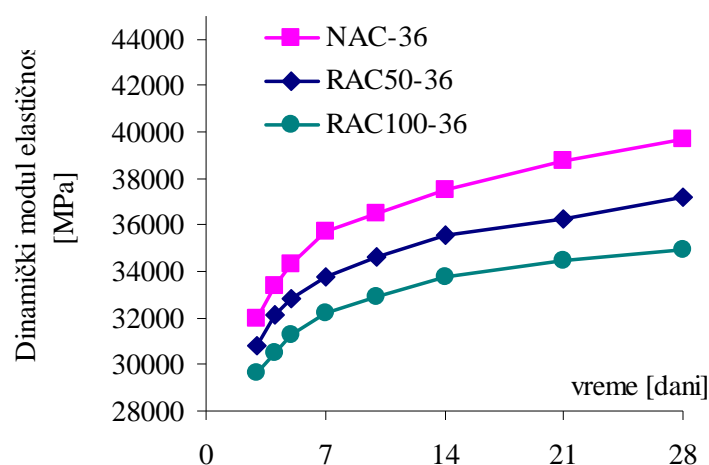
$l$  – dužina uzorka [m]

$f$  – rezonantna frekvencija [Hz]



Slika 72. Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti metodom rezonantne frekvencije

Dobijeni rezultati prikazani su na dijagramu na slici 73.



Slika 73. Dinamički modul elastičnosti u funkciji vremena i vrste betona

Kod sva tri betona, dinamički modul raste u toku vremena po zakonu koji ima odlično poklapanje sa jednačinom kvadratne parabole, što se vidi iz koeficijenta determinacije koji za sva tri betona iznosi 0.98.

Dinamički modul opada sa povećanjem količine recikliranog agregata u betonu, a razlike između NAC i RAC50, odnosno NAC i RAC100 rastu u toku vremena i iznose do 6.5%, odnosno 12% respektivno. Dakle, kao i kod statičkog modula i dinamički modul elastičnosti je manji kod betona koji sadrže reciklirani agregat, bez obzira što je čvrstoća pri pritisku RAC50 i RAC100 betona veća u odnosu na NAC. Ovo je posledica veće količine cementnog kamena kod RAC betona, jer cementni kamen ima manji modul elastičnosti u odnosu na zrno prirodnog agregata. To je još jedan dokaz da između čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti kod betona koji sadrže reciklirani agregat važe drugačije relacije od onih koje su poznate kod klasičnih betona. Takođe, korišćenjem vrednosti modula dobijenih ispitivanjem (*tabela 49*), može se pokazati da analitičke veze između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti, npr. izraz ([Nevil, 1976](#)):

$$E_c = 1.25 \cdot E_D - 19 \quad (17)$$

ne važi kod betona sa recikliranim agregatom, čak i ukoliko se uzme u obzir da su izmerene vrednosti statičkog modula elastičnosti nešto niže od očekivanih (poglavlje [3.3.3](#)).

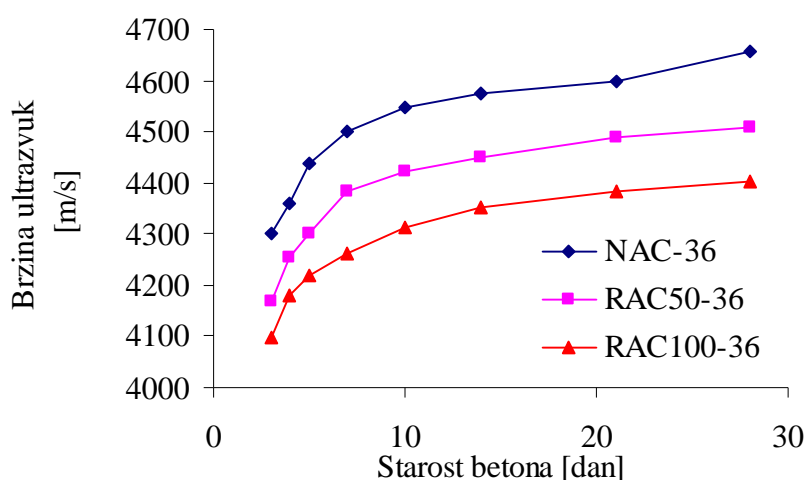
#### 3.6.3.5 Dinamički Poasonov koeficijent

Dinamički Poasonov koeficijent sračunat je na osnovu merenja brzine rasprostiranja podužnih ultrazvučnih talasa, zapreminske mase i prethodno utvrđenog dinamičkog modula elastičnosti. Uređaj za ispitivanje brzine ultrazvučnih talasa prikazan je na *slici 74*.



Slika 74. Uređaj za merenje brzine ultrazvučnih talasa

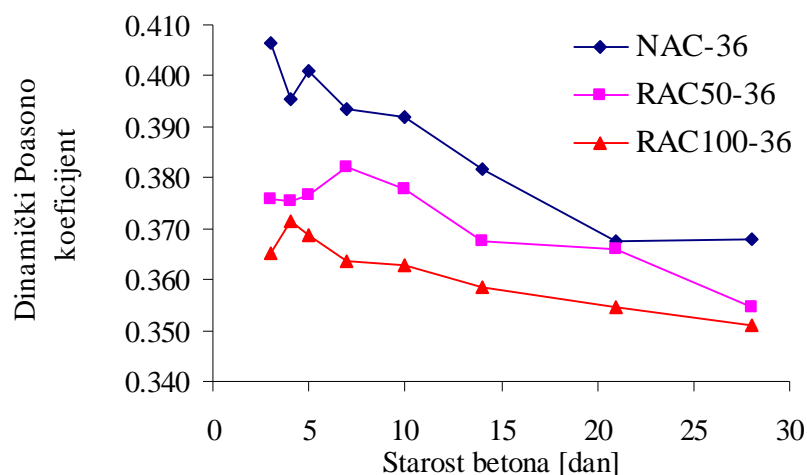
Uzorak je isti koji je korišćen pri ispitivanju rezonantne frekvencije i postavlja se između ispitnih sonde – predajnika i prijemnika ultrazvučnih impulsa. Na osnovu izmerog vremena prolaska ultrazvučnih talasa kroz uzorak, sračunata je njihova brzina za svaki od tri betona pri starosti od 3, 4, 5, 7, 10, 14, 21 i 28 dana, *slika 75*. Ako bi se primenila klasifikacija po kvalitetu betona na osnovu brzine prostiranja ultrazvučnog impulsa koju je predložio Kaplan ([Nevil, 1976](#)), betoni NAC-36 i RAC50-36 bili bi svrstani u kategoriju “izvrstan“, s obzirom da je kod njih na 28 dana brzina iznosila 4657 m/s i 4509 m/s respektivno. Donja granica za ovu kategoriju je 4500 m/s. Beton RAC100-36, sa brzinom ultrazvučnih talasa od 4401 m/s bio bi svrstan u kategoriju „dobrih“ betona.



Slika 75. Brzina ultrazvučnih talasa u funkciji starosti i vrste betona

Sa *slike 75* se vidi direktna zavisnost količine recikliranog agregata u betonu i brzine ultrazvučnih talasa, tj. da sa povećanjem sadržaja RCA brzina opada, za sve starosti betona do 28 dana. Manja brzina ultrazvučnog talasa znači manju kompaktnost betona koja u principu znači i manju čvrstoću pri pritisku. Ipak, čvrstoća pri pritisku zavisi i od adhezije između zrna agregata i nove cementne paste ([Muravljov, 1998](#)). Iz prezentovanih rezultata brzina talasa, zaključak bi bio da čvrstoća pri pritisku opada sa povećanjem sadržaja recikliranog agregata. To, međutim, nije tačno, imajući u vidu rezultate ispitanih čvrstoća prikazanih u *tabeli 49*. Sledi, dakle, da je adhezija između zrna agregata i nove cementne paste veća kod betona sa recikliranim u odnosu na betone sa prirodnim agregatom.

Na osnovu izmerenih brzina prostiranja ultrazvučnih talasa, zapreminske mase betona i dinamičkog modula elastičnosti, sračunat je dinamički Poasonov koeficijent ( $\mu_D$ ) čija je promena u funkciji starosti betonskog uzorka prikazana na slici 76.



Slika 76. Dinamički Poasonov koeficijent u funkciji starosti i vrste betona

Dinamički modul elastičnosti opada sa povećanjem starosti uzorka i opada sa porastom količine RCA u betonu za sve starosti do 28 dana, slika 76. Po pravilu, betoni većih čvrstoća pri pritisku imaju i veće vrednosti koeficijenta  $\mu_D$ , što ponovo dovodi do kontradikcije sa rezultatima ispitivanja čvrstoće. Ovo je još jedna potvrda male pouzdanosti zaključaka o čvrstoći betona sa recikliranim agregatom izvedenih na osnovu rezultata ispitivanja nedestruktivnim metodama.

### 3.6.3.6 Čvrstoća pri zatezanju

U okviru ispitivanja ovog svojstva betona ispitane su čvrstoća pri zatezanju cepanjem (na cilindrima prečnika i visine 15 cm, slika 77 levo) i čvrstoća pri zatezanju savijanjem (na prizmatičnim uzorcima dimenzija 12x12x36 cm, slika 77 desno).



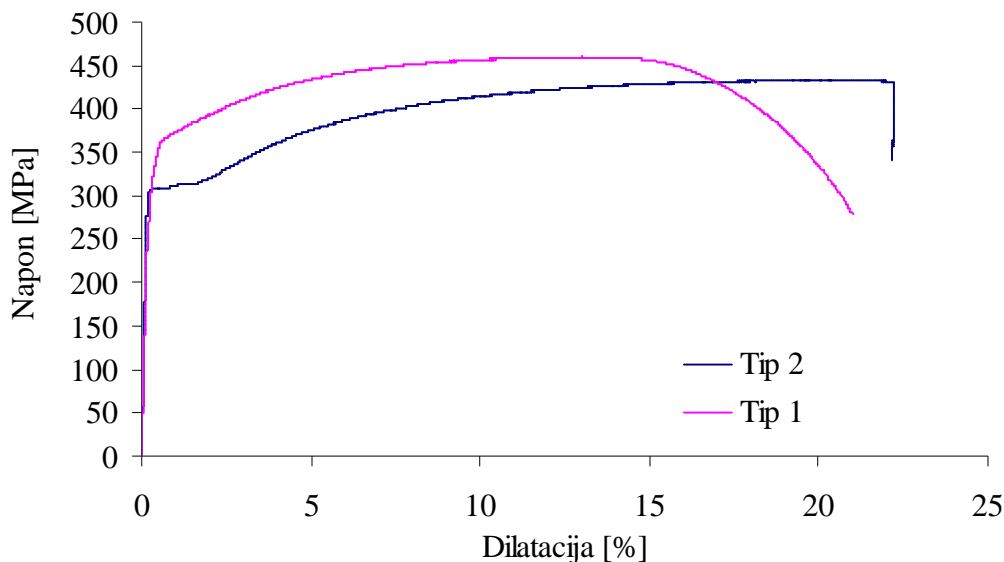
Slika 77. Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju cepanjem (levo) i savijanjem (desno)



Rezultati ispitivanja obe čvrstoće kod sve tri vrste betona, nalaze se u okviru margine od 5%, *tabela 49*, pri čemu se ne može uspostaviti veza sa količinom recikliranog agregata. Odnos čvrstoća pri zatezanju savijanjem i cepanjem iznosi 2.33, 2.28 i 2.13 za NAC, RAC50 i RAC100 respektivno. Ako se usvoji da je  $f_{ct}/f_{ct,sp} = 0.9$  (Comité Européen de Normalisation, 2004), dobiće se da je  $f_{ct,fl}/f_{ct} \sim 2.5$ , što je veće od teorijskog odnosa ovih veličina koji iznosi 1.5-1.9 ([Muravljov, 1998](#)). Ovo ukazuje da je prilikom proračuna/procene trenutka formiranja prslina u armiranobetonskim gredama važno imati izmerenu vrednost čvrstoće pri zatezanju savijanjem, a ne vrednost sračunatu preko čvrstoće dobijene iz opita cepanja, jer se može potceniti vrednost opterećenja pri formiranju prslina.

### 3.6.3.7 Armaturni čelik

Armaturni čelik koji je korišćen za podužnu armaturu bio je isti kod greda ispitivanih na smicanje i greda ispitivanih na savijanje, *tabela 45*. S obzirom na ograničenja koja su postojala vezano za veličinu maksimalne sile na presi, odlučeno je da poprečna armatura greda bude od glatkog armaturnog čelika, a ne rebrastog kao podužna. Ispitana su dva tipa glatke armature, čiji su  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagrami predstavljeni na *slici 78*.



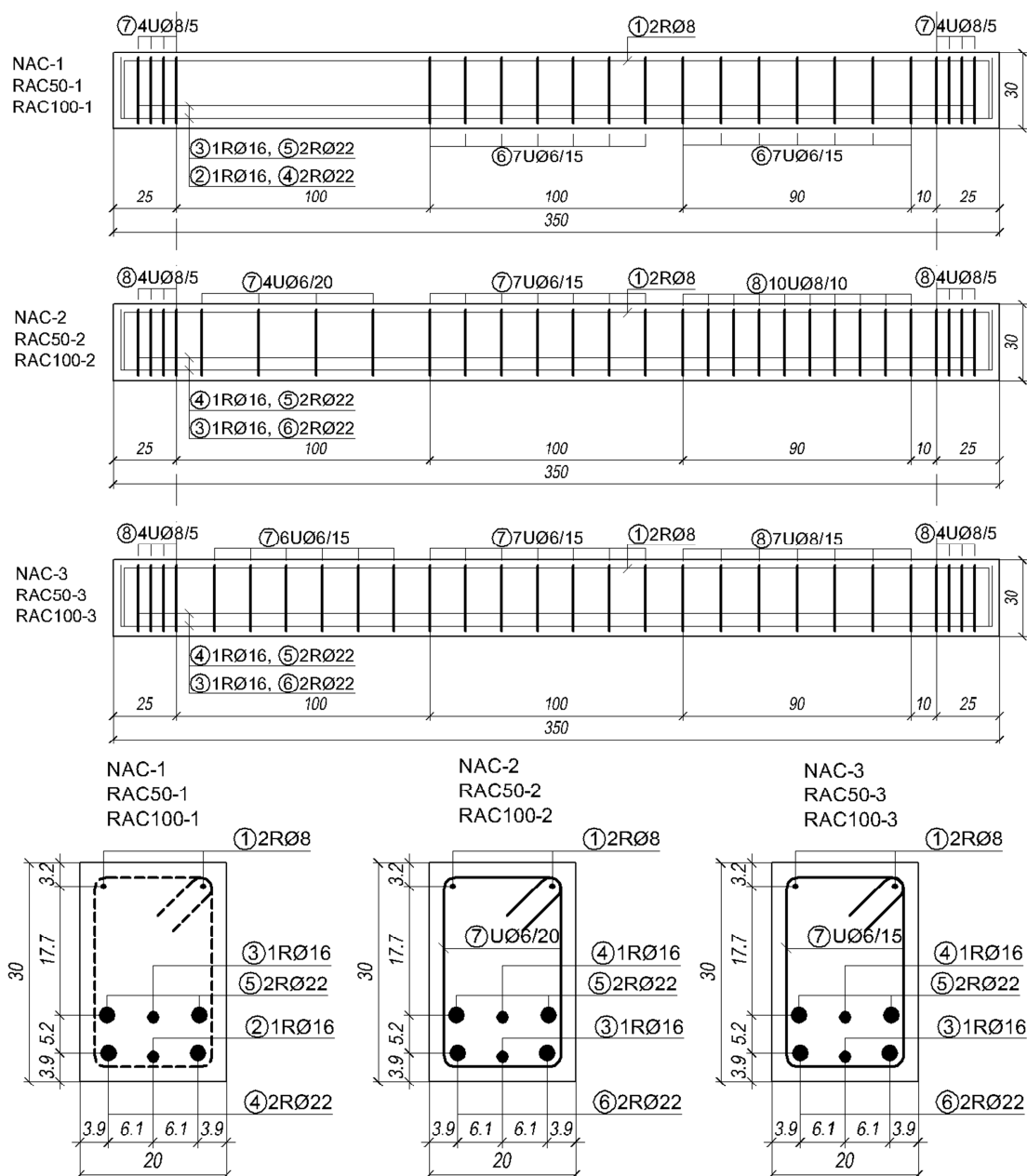
Slika 78. Ispitivanje armaturnog čelika za poprečnu armaturu

Ispitivanje je obavljeno na Tehnološko metalurškom fakultetu u Beogradu. Armatura Tip 2 je pokazala niži napon pri dostizanju granice tečenja - oko 300 MPa u odnosu na 360 MPa kod armature Tip 1. Takođe, dostizanje granice tečenja je izraženije kod armature Tip 2, a ova armatura ima i nešto nižu čvrstoću pri zatezanju od oko 430 MPa u odnosu na 460 kod armature Tip 1. Imajući u vidu postavljene zahteve vezane za vrstu

loma nosača i kapacitet prese za apliciranje opterećenja, za poprečnu armaturu greda kod kojih je ispitivano ponašanje na smicanje izabrana je armatura Tip 2.

### 3.6.4. OPIS GREDNIH ELEMENATA

Napravljene su po tri grede od tri vrste betona (NAC-36, RAC50-36 i RAC100-36) sa različitim procentom poprečne armature: 0%– grede NAC-1, RAC50-1 i RAC100-1, 0.14% (minimalna poprečna armatura) - grede NAC-2, RAC50-2 i RAC100-2, i 0.19% - grede NAC-3, RAC50-3 i RAC100-3, *slika 79*.



Slika 79. Detalji armiranja greda ispitivanih do loma smicanjem

Ukupno je do loma testirano devet greda. Kod svih greda očekivan je lom usled smicanja, s obzirom da je proračunska nosivost na savijanje bila značajno veća, što je obezbeđeno odgovarajućom količinom podužne armature. Minimalni procenat armiranja od 0.14% je sračunat prema Evrokodu 2 (Comité Européen de Normalisation, 2004) za klasični armirani beton. Uzengije su napravljene od glatkog čelika prečnika  $\varnothing 6$  mm, dok su podužnu armaturu činili profili  $\varnothing 22$ . Pomenutom količinom uzengija armiran je samo jedan, levi smičući raspon, dok je desna strana svake grede armirana znatno jačom poprečnom armaturom, *slika 79*. Time je unapred definisana zona loma nosača.

Sve grede su bile pravougaonog poprečnog preseka širine 20 cm i visine 30 cm, ukupne dužine 3.5 m. Rastojanje od 25 cm od oslonca do ivice grede predviđeno je kako bi se obezbedilo pouzdano sidrenje podužne zategnute armature i time izbegao lom usled narušavanja veze beton-čelik. Odnos rastojanja od oslonca do mesta delovanja sile (smičući raspon) i statičke visine preseka bio je isti za sve uzorke i iznosio je 4.

#### 3.6.5. IZRADA I NEGA GREDNIH NOSAČA

Procedura izrade i nege grednih nosača u potpunosti je bila ista kao kod greda ispitivanih na savijanje, što je detaljno objašnjeno u poglavlju [3.5.5](#).

#### 3.6.6. DISPOZICIJA ISPITIVANJA I INSTRUMENATA

Dispozicija ispitivanja i raspored merne opreme prikazani su na *slici 80*. Statički sistem ispitanih nosača bio je prosta greda raspona 3.0 m, koja je opterećena sa dve koncentrisane sile u trećinama raspona. Sila je aplicirana putem prese na isti način kao u ispitivanju ponašanja greda na savijanje, *slika 80*. Oslanjanje grede na pokretno i nepokretno ležište, kao i oslanjanje čeličnog profila na gredu u dve tačke putem kojih je aplicirano opterećenje na nosač, takođe je izvršeno na isti način kao kod greda ispitanih na savijanje, *slika 37*.

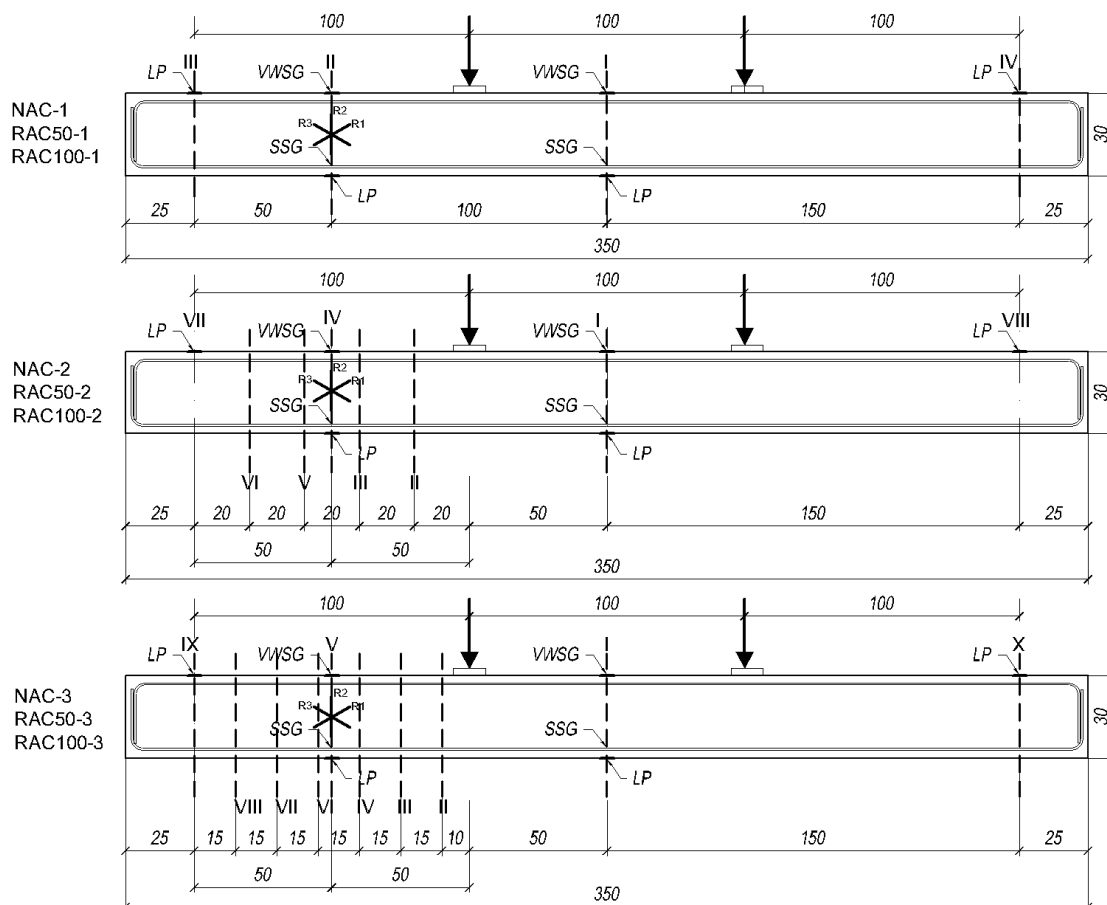
Dilatacije u podužnoj armaturi merene su u sredini raspona grede, kao i u sredini smičućeg raspona pomoću mernih traka tipa PFL 10-11 proizvođača Tokyo Sakki Kenkyujo Co. U oba preseka postavljene su po dve merne trake na šipke u donjem redu armature. Pomoću istog tipa mernih traka merene su i dilatacije u poprečnoj armaturi, tačnije na svakoj od četiri uzengije kod greda sa minimalnim procentom armiranja

uzengijama (UØ6/20) i na svakoj od šest uzengija greda čije su uzengije bile UØ6/15 (slika 81).



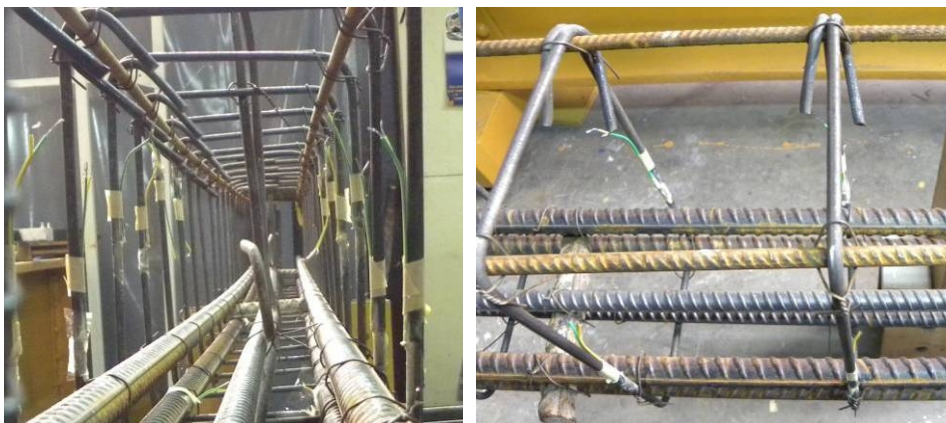
Slika 80. Dispozicija ispitivanja greda na smicanje

\* sve dimenzije u [cm]  
 \*\* rimskim brojevima date su oznake preseka

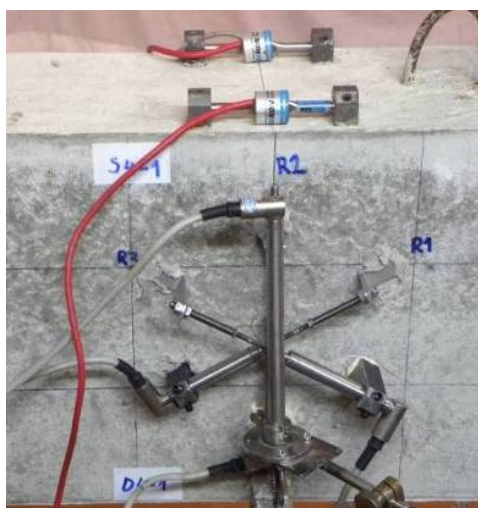


Slika 81. Raspored merne opreme i mernih mesta

Svaki meri presek bio je opremljen sa po dve merne trake, po jednom na svakoj od dve vertikalne strane uzengije, *slika 82*. Dilatacije u betonu merene su u dva preseka-preseku u sredini raspona i preseku u sredini smičućeg raspona, pomoću senzora tipa VWSG sa mernom bazom od 100 mm. U oba preseka simetrično su postavljena po dva senzora na gornjoj površini grede, *slika 83*.



*Slika 82. Merne trake na poprečnoj armaturi*



*Slika 83. VWSG senzori, ugibomer i rozeta deformacije*

Deformacije, tj. ugibi, mereni su takođe u srednjem preseku grede i u preseku u sredini smičućeg raspona, pomoću induktivnih ugibomera sa obe strane grede. Sa po jednim mehaničkim ugibomerom merena su vertikalna sleganja oba oslonca. Za sračunavanje glavnih dilatacija i njihovih pravaca korišćena su tri induktivna ugibomera koji su postavljeni tako da međusobno zaklapaju ugao od  $60^\circ$ , formirajući na taj način rozetu deformacije, *slika 83*.

Pomeranja očitana sa svakog od ugibomera podeljena sa veličinom merne baze od 150 mm predstavljaju dilatacije betona u svakom od tri pravca. Položaj rozete u odnosu

na oslonac sa jedne strane grede bio je uvek isti - u sredini smičućeg raspona, dok je sa druge strane variran u zavisnosti od procenjenog ugla pružanja prslina. Cilj je bio da prva kosa prslina "preseče" rozetu čime bi se stvorili uslovi da se iz čitanja dilatacija sa tri ugibomera sračunaju tražene veličine.

### 3.6.7. PONAŠANJE PRI SMICANJU

Rezultati ispitivanja greda sa različitim procentom armiranja poprečnom armaturom ( $\rho_l$ ) sumarno su prikazani su u *tabeli 50*, a u narednim poglavljima biće detaljno analizirani. U *tabeli 50* date su vrednosti sledećih veličina: sila pri formiranju vertikalnih prslina usled savijanja ( $2P_{cr,fl}$ ), sila pri formiranju kosih prslina usled glavnih napona zatezanja ( $2P_{cr,s}$ ), granična sila loma ( $2P_u$ ), odnos sile loma i sile pri formiranju kose prslina kao indikatora duktilnosti greda, normalizovana smičuća nosivost  $(v_c/\sqrt{f_c})^1$ , kao i ugibi ( $\delta_s$ ) pri eksploatacionom opterećenju ( $2P=0.4 \cdot 2P_u$ ) i ugibi pri lomu ( $\delta_u$ ).

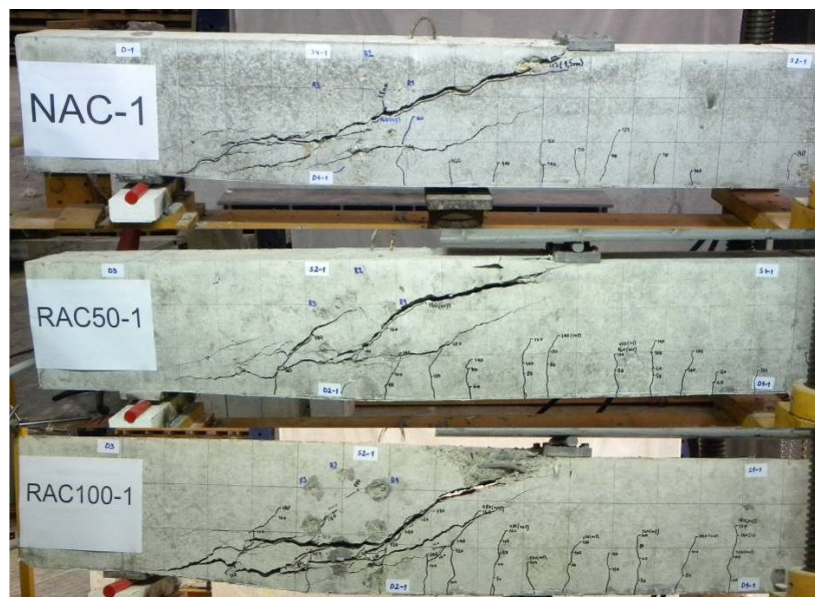
*Tabela 50. Rezultati ispitivanja greda na smicanje*

| Oznaka grede | $\rho_l$ [%] | Starost [dani] | $2P_{cr,fl}$ <sup>1</sup> [kN] | $2P_{cr,s}$ <sup>2</sup> [kN] | $2P_u$ [kN] | $2P_u/2P_{cr,s}$ | $v_c/\sqrt{f_c}$ | $\delta_s$ [mm] | $\delta_u$ [mm] |
|--------------|--------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| NAC-1        | 0            | 24             | 37                             | 160                           | 212.5       | 1.33             | 0.140            | 5.10            | 17.4            |
| RAC50-1      | 0            | 24             | 40                             | 160                           | 183.5       | 1.15             | 0.115            | 4.5             | 13              |
| RAC100-1     | 0            | 25             | 50                             | 180                           | 209.5       | 1.16             | 0.137            | 4.7             | 19.2            |
| NAC-2        | 0.142        | 26             | 35                             | 160                           | 281.3       | 1.76             | 0.184            | 6.92            | 25.6            |
| RAC50-2      | 0.142        | 26             | 40                             | 160                           | 283.9       | 1.77             | 0.176            | 7.66            | 22.7            |
| RAC100-2     | 0.142        | 26             | 30                             | 180                           | 269.9       | 1.50             | 0.175            | 6.68            | 24.7            |
| NAC-3        | 0.189        | 28             | 30                             | 180                           | 319.8       | 1.78             | 0.209            | 7.68            | 28.5            |
| RAC50-3      | 0.189        | 30             | 30                             | 180                           | 313.7       | 1.74             | 0.195            | 7.42            | 28.8            |
| RAC100-3     | 0.189        | 28             | 30                             | 180                           | 326.8       | 1.82             | 0.212            | 8.09            | 30.8            |

#### 3.6.7.1 Oblik loma

U svim gredama bez poprečne armature (NAC-1, RAC50-1 i RAC100-1) prve registrovane prslina bile su relativno kratke vertikalne prslina od savijanja u srednjoj trećini raspona nosača. Prve kose prslina na gredama NAC-1 i RAC50-1 formirane su pri sličnoj sili od oko 160 kN i odmah nakon pojavljivanja brzo su propagirale po celoj visini grede, od zategnute armature do pritisnute zone betona. Kod grede NAC-1 ta dijagonalna prslina bila je širine 0.15 mm. Pri relativno malom povećanju opterećenja na 175 kN došlo je do naglog širenja prslina na 1.5 mm, a potom do progresivnog širenja sve do loma pritisnute zone betona pri sili od oko 212 kN, *slika 84*.

<sup>1</sup> videti poglavlje 3.6.7.2

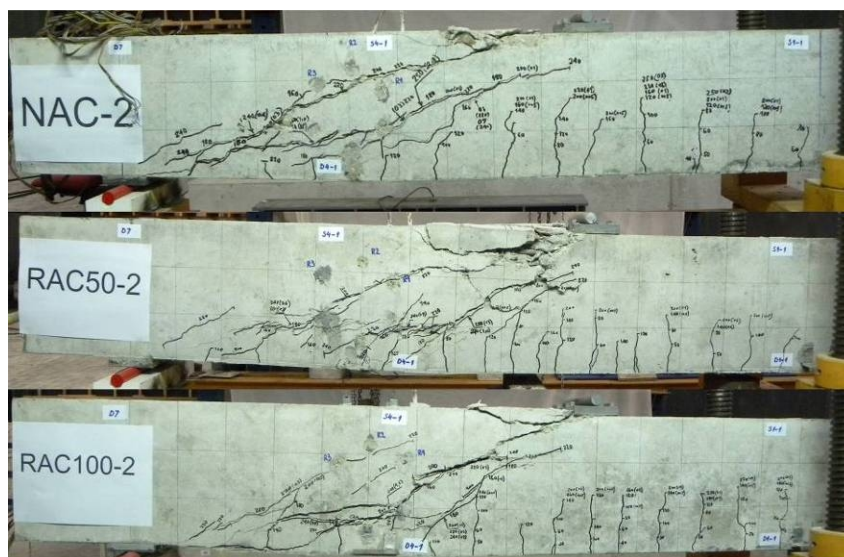


Slika 84. Lom greda bez poprečne armature

Ugao nagiba prsline iznosio je oko 30 stepeni, sa trendom smanjenja u blizini oslonca. Kod RAC50-1 grede, prva kosa prslina formirana je kao produzetak vertikalne prsline od savijanja. Nakon sledećeg koraka nanošenja opterećenja, pri sili od 183.5 kN došlo je do iznenadnog otvaranja kose prsline po čitavoj visini grede, širine preko 1 cm i loma nosača usled drobljenja pritisnute zone betona. Kosa prslina imala je nagib od  $45^\circ$  u srednjoj trećini visine nosača, odakle se pod vrlo malim uglom pružala do oslonca na jednu i do mesta delovanja sile na drugu stranu, *slika 84*. Formiranje prve kratke kose prsline kod grede RAC100-1 zabeleženo je pri sili od oko 180 kN. U sledećem koraku opterećenja, pri sili od oko 200 kN došlo je do povezivanja nekoliko prsline i formiranja dijagonalne prsline širine oko 4 mm, od zategnute armature do pritisnute zone betona. Slično kao kod RAC50-1, u srednjoj trećini visine prslina je bila pod uglom od  $45^\circ$ , a dalje pod vrlo malim uglom ka gornjoj i donjoj ivici grede. Kao trenutak loma označen je trenutak drobljenja pritisnute zone betona neposredno uz mesto nanošenja opterećenja uz istovremeno otvaranje dijagonalnih pukotina širine nekoliko centimetara, *slika 84*.

Grede sa poprečnom armaturom imale su slično ponašanje pod opterećenjem kao i grede bez uzengija. Uloga uzengija se manifestovala kroz angažovanje na ostvarivanju “aggregate interlock” efekta preko limitiranja širine kosih prsline i davanja oslonaca podužnoj armaturi čime se povećao “dowel” efekat. Kod dve od tri grede sa minimalnim procentom armiranja uzengijama (NAC-2, RAC50-2) pojava prvih kosih prsline uočena je pri opterećenju od oko 160 kN, dok su se kod grede RAC100-2

pojave pri sili od oko 180 kN. Dalje povećavanje opterećenja dovelo je do formiranja još nekoliko kosih prslina, ali pre svega sukcesivnog povećanja dužine i širine prve dve, dominantne prsline, tako da je bilo uočljivo formiranje pritisnute betonske dijagonale između njih, *slika 85*. Lom nosača kod sve tri grede je krt, u pravcu jedne od dve glavne prsline, nastao drobljenjem pritisnute zone betona pri sili od oko 281 kN, 284 kN i 270 kN za grede NAC-2, RAC50-2 i RAC100-2 respektivno.

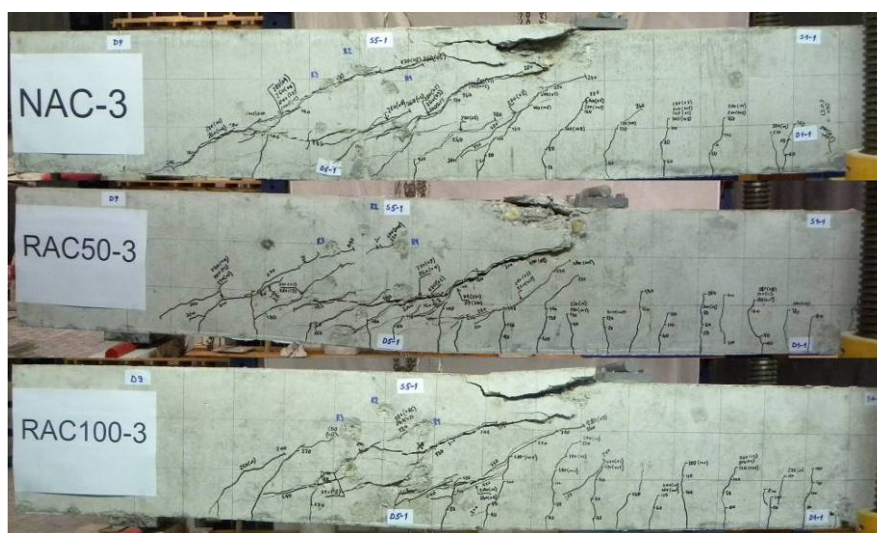


*Slika 85. Lom greda sa minimalnom poprečnom armaturom*

Kod grupe greda NAC-3, RAC50-3, RAC100-3, pojava prvih kosih prslina zabeležena je pri opterećenju od oko 180 kN. Sa povećanjem opterećenja prsline se produžuju, ali se pojavljuju i nove nastale krivljenjem vertikalnih prslina od savijanja. Obrazovale su se tri približno paralelne prsline koje se pružaju od zategnute armature do pritisnute zone betona, sa promenljivim uglom, od  $35^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ,  $26^{\circ}$ - $31^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ - $35^{\circ}$  za grede NAC-3, RAC50-3, RAC100-3 respektivno, *slika 86*. Lom je krt, uz drobljenje pritisnute zone betona neposredno uz mesto opterećenja pri sili od oko 320 kN, 314 kN i 327 kN, respektivno. Ako se kao faktor duktilnosti usvoji odnos sile loma i sile pri formiranju prve kose prsline (*tabela 50*), grede bez poprečne armature RAC50-1 i RAC100-1 imale su nižu duktilnost u poređenju sa NAC-1 gredom. Pri tome, nosivost RAC100-1 grede je na nivou nosivosti grede NAC-1, ali ima nešto kasniju pojavu kose prsline, dok je za gredu RAC50-1 karakterističan iznenadni lom, praktično odmah nakon otvaranja kose prsline. Kod greda sa minimalnim procentom armiranja poprečnom armaturom, RAC50-2 imala je praktično isti faktor duktilnosti kao uporedna NAC-2 greda, dok je RAC100-2 imala manju duktilnost. Razlike u duktilnostima greda NAC-3, RAC50-3 i



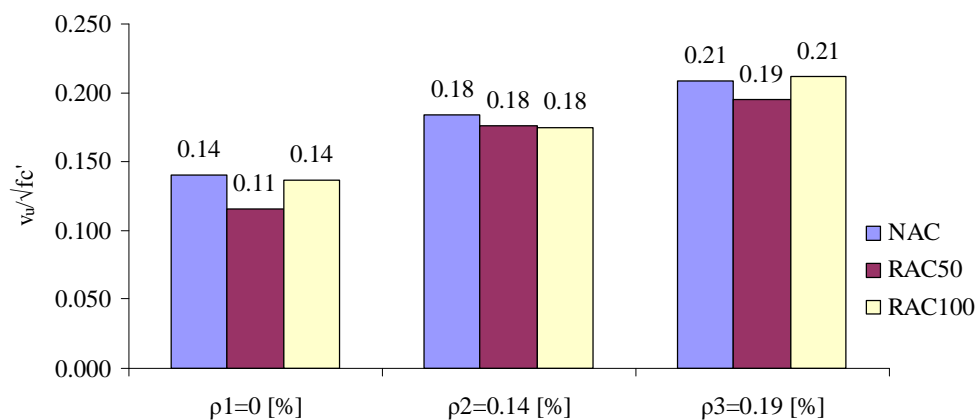
RAC100-3 mogu se smatrati zanemarljivim sa aspekta mogućnosti primene greda od recikliranog betona u realnim konstrukcijama.



Slika 86. Lom greda sa poprečnom armaturom većom od minimalne

### 3.6.7.2 Granična nosivost na smicanje

Na slici 87 prikazan je odnos normalizovanih smičućih nosivosti greda sa različitim procentom recikliranog agregata i različitim procentom armiranja poprečnom armaturom.



Slika 87. Lom greda sa poprečnom armaturom većom od minimalne

Smičuća nosivost je izražena preko napona smicanja, normalizovanog pomoću kvadratnog korena vrednosti čvrstoće pri pritisku primenjenog betona,  $\sqrt{f_c'}$ . Ovo je bilo neophodno kako bi se eliminisao efekat različitih čvrstoća betona pri pritisku (tabela 49). Smičuća nosivost je sračunata pomoću izraza:

$$v_u = \frac{P_u}{b \cdot d_v} \quad (18)$$

gde je:

$P_u$  - granična transverzalna sila, jednaka polovini sile na presi ( $2P_u$ )

$b$  – širina poprečnog preseka

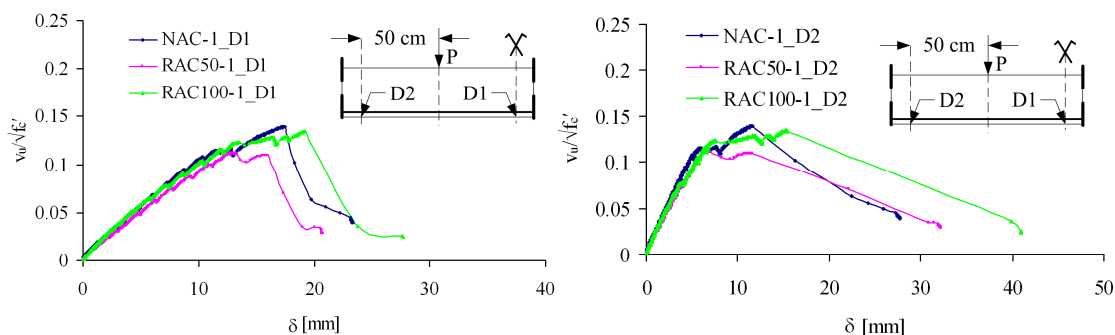
$d_v$  – efektivna smičuća visina (uzeta kao veća vrednost od vrednosti  $0,9d$  ili  $0,72h$ , gde su  $d$  i  $h$  efektivna visina grede i ukupna visina grede, respektivno).

Za grede bez poprečne armature,  $v_u$  predstavlja smičuću nosivost betona, dok za grede sa poprečnom armaturom predstavlja zbir smičućih nosivosti betona ( $v_c$ ) i armature. Očekivano,  $v_u$  raste sa porastom procenta armiranja uzengijama. Grede NAC-2 i NAC-3 imale su 32% i 49% respektivno veću nosivost u odnosu na gredu bez uzengija NAC-1. Kod greda od betona sa 50% RCA, povećanja su bila 53% i 69% za grede RAC50-2 i RAC50-3 respektivno u odnosu na RAC50-1. Povećanje nosivosti sa povećanjem procenta armiranja uzengijama kod greda RAC100-2 i RAC100-3 u odnosu na gredu RAC100-1 bila su 28% i 55% respektivno. Dakle, nešto veća povećanja nosivosti ostvarena su kod greda sa recikliranim agregatom nego kod greda od klasičnog betona. Ovo se može objasniti boljim agregat “interlock“ efektom koji obezbeđuju uzengije, ali i nešto nižom nosivošću greda od betona sa recikliranim agregatom bez uzengija, naročito kod RAC50-1 grede. Prema *slici 87*, vrednost  $v_c / \sqrt{f_c}$  za gredu NAC-1 je 0.14, što je 17.7% i 2.2% veće od vrednosti kod greda RAC50-1 i RAC100-1, respektivno. Grede sa minimalnim procentom armiranja poprečnom armaturom, RAC50-2 i RAC100-2 imale su za 4.1% i 4.7% respektivno manju vrednost  $v_c / \sqrt{f_c}$  nego uporedna NAC-2 greda. Među gredama sa najvećom poprečnom armaturom, najveću vrednost normalizovane smičuće nosivosti ima greda RAC100-3 i ona je za 1.4% veća od vrednosti kod uporedne NAC-3 grede. Greda RAC50-3 ima za 6.8% nižu vrednost u odnosu na uporednu NAC-3 gredu. Očigledno je da se sve razlike u normalizovanim smičućim nosivostima između RAC i uporednih NAC greda, izuzimajući gredu RAC50-1, mogu smatrati zanemarljivim.

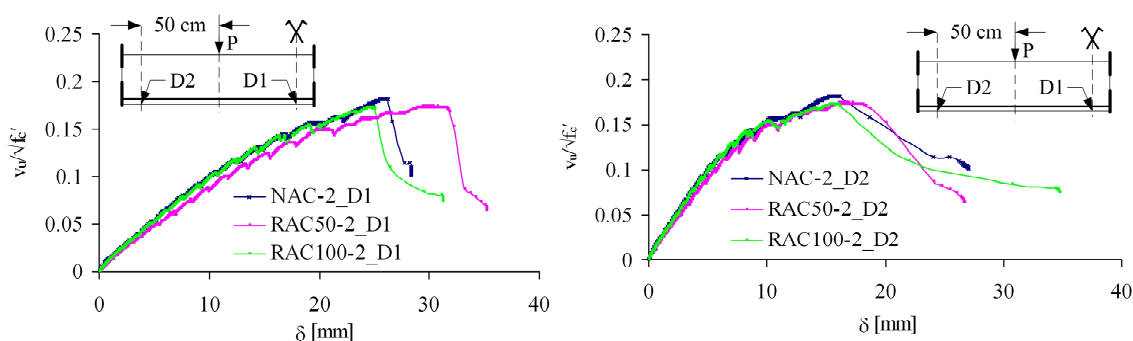
### 3.6.7.3 Ugibi

Na *slici 88* levo prikazana je zavisnost između normalizovane smičuće otpornosti i ugiba u sredini raspona grede, a *slici 88* desno za presek u sredini smičućeg raspona, kod greda bez poprečne armature. Ovi dijagrami daju nam informacije o efektu vrste

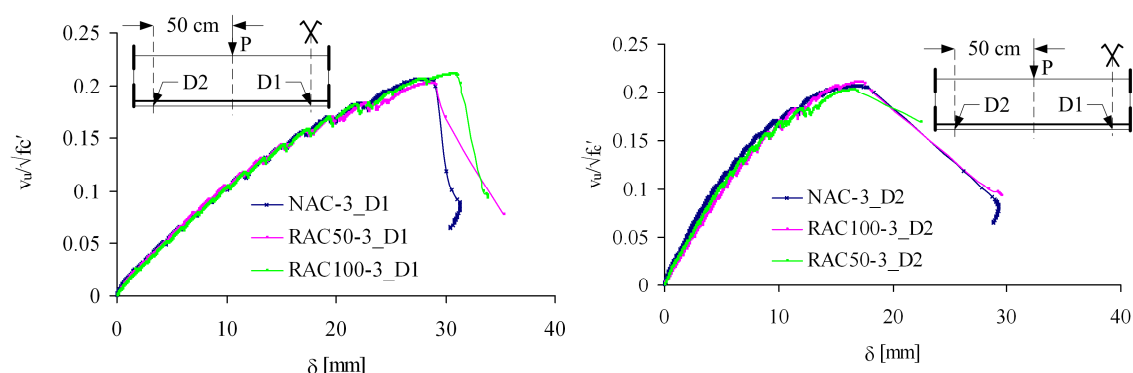
betona na ponašanje pri opterećenju do loma smicanjem. Kod greda bez uzengija (NAC-1, RAC50-1, RAC100-1), oba dijagrama se mogu podeliti na 4 karakteristične oblasti. Prvi deo je linearni deo dijagrama, gde ugibi linearno rastu sa porastom opterećenja. Drugi deo je nakon pojave kosih prslina, gde je uočljivo povećanje ugiba dok je sila približno konstantna ili čak opada. Potom sledi zona ojačanja gde ponovo dolazi do porasta deformacije pri povećanju opterećenja i konačno zona nakon dostizanja granične nosivosti, gde se deformacije povećavaju pri čemu sila opada. Početni, linearni deo dijagrama se može podeliti na dva linearna segmenta, jedan do i drugi nakon formiranja prvih prslina od savijanja, iako to nije vidljivo na dijagramu. Sa *slike 88* levo je očigledno da grede NAC-1 i RAC100-1 imaju sličan nagib početnog dela dijagrama, tj. da su nosači slične krutosti, dok je greda RAC50-1 sa nešto blažim nagibom linearnog dela dijagrama, tj. manje krutosti. Prvi značajan pad sile se dešava pri pojavi kosih smičućih prslina i njihovom širenju, što značajno redukuje krutost sve tri grede. S obzirom na relativno veliki odnos  $a/d$ , u smičućoj otpornosti dominira gredno dejstvo na koje u velikoj meri utiče formiranje kosih prslina, tako da je ovaj pad očekivan. Treći segment dijagrama i porast otpornosti pri povećanju deformacija rezultat je "interlock" efekta između zrna agregata. Za razliku od greda NAC-1 i RAC100-1, taj efekat je očigledno izostao kod RAC50-1 grede, gde je odmah nakon pojave dominantne kose prsline došlo do rapidnog povećanja ugiba i loma nosača, *slika 88* levo. Kod greda sa poprečnom armaturom, nakon formiranja kosih prslina došlo je do aktiviranja uzengija koje seku kosu prslinu čime je obezbeđen bolji "interlock" efekat i sprečen značajan pad krutosti sve do tečenja uzengija. Trenutak formiranja kosih prslina i aktiviranje uzengija u prijemu glavnih napona zatezanja može se registrovati (ne sasvim jasno) na *slikama 89 i 90* kao promena, tj. smanjenje nagiba krivih. Očigledno je da u tom trenutku dolazi do pada krutosti greda, ali su one i dalje sposobne da prihvataju dodatno opterećenje. Bitnih razlika u ponašanju greda sa i bez recikliranog agregata praktično nema, osim što greda RAC50-2 ima nešto veće deformacije pri istom nivou smičućeg naprezanja od greda NAC-2 i RAC100-2. Početni nagib krivih koje predstavljaju ponašanje greda sa uzengijama do formiranja kosih prslina vrlo je sličan kao kod greda bez uzengija, bez obzira na vrstu betona. Ovo je očekivano imajući u vidu istu podužnu armaturu, slična mehanička svojstva betona i slične slike prslina.



Slika 88. Ugibi greda bez poprečne armature, u sredini raspona grede (levo) i sredini smičućeg raspona (desno)



Slika 89. Ugibi greda sa minimalnom poprečnom armaturom, u sredini raspona grede (levo) i sredini smičućeg raspona (desno)

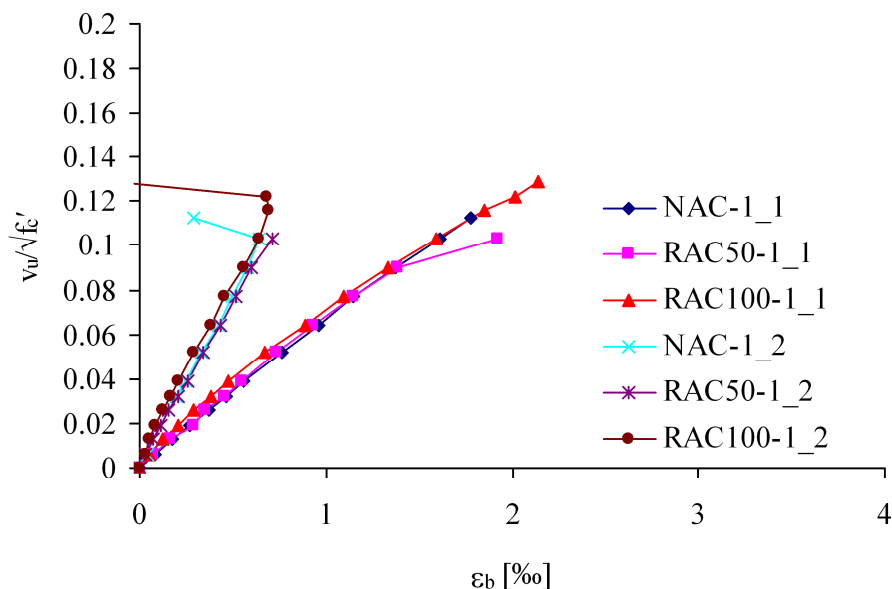


Slika 90. Ugibi greda sa poprečnom armaturom većom od minimalne, u sredini raspona grede (levo) i sredini smičućeg raspona (desno)

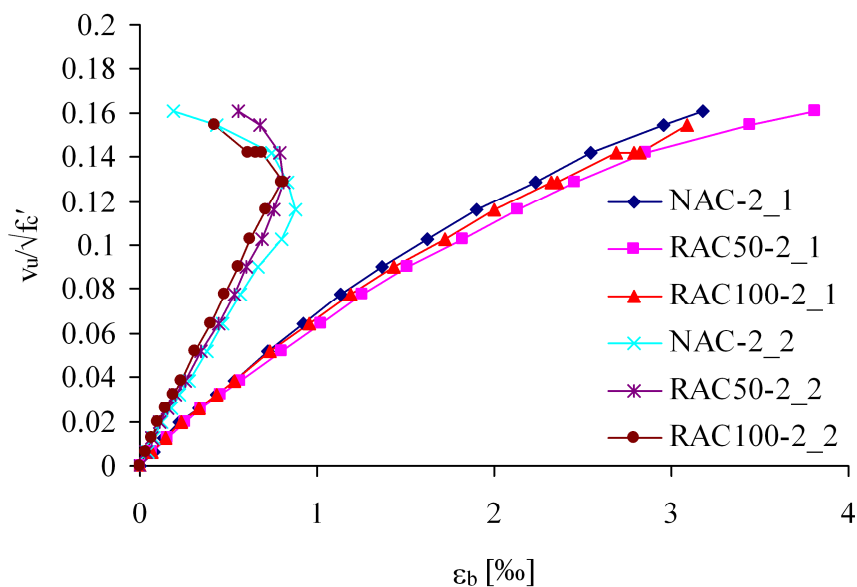
#### 3.6.7.4 Dilatacije u betonu

Promena dilatacija u betonu ( $\epsilon_b$ ) u sredini raspona (oznaka ”\_1”) i u sredini smičućeg raspona (oznaka ”\_2”), u funkciji normalizovanog smičućeg opterećenja, prikazane su na slikama 91, 92 i 93. U sredini raspona, očekivano, dilatacije u betonu rastu sa porastom opterećenja sve do dostizanja granične nosivosti. Nisu uočene bitne razlike u vrednostima dilatacija za isti nivo normalizovanog smičućeg napona. U preseku u sredini smičućeg raspona, nakon početnog rasta zabeležen je pad dilatacija pritiska u betonu nakon pojave kosih prslina, pa čak i prelazak u zatezanje. Ovo se dešava kod

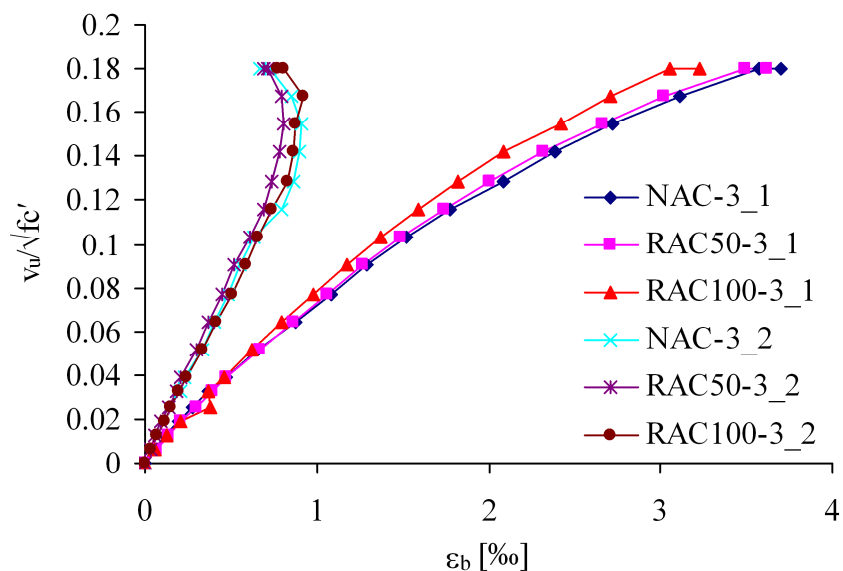
svih greda, bez obzira na procenat armiranja poprečnom armaturom ili procenat učešća recikliranog agregata u betonu, s tim što inkrement promene (smanjenja) dilatacija opada sa porastom procenta armiranja greda. Opisana pojava se dešava usled preraspodele unutrašnjih sila u okviru smičućeg raspona i povećanja udela agregat “interlock” efekta u prenosu smičućih sila.



Slika 91. Dilatacije u betonu u sredini raspona (\_1) i sredini smičućeg raspona (\_2) greda bez poprečne armature

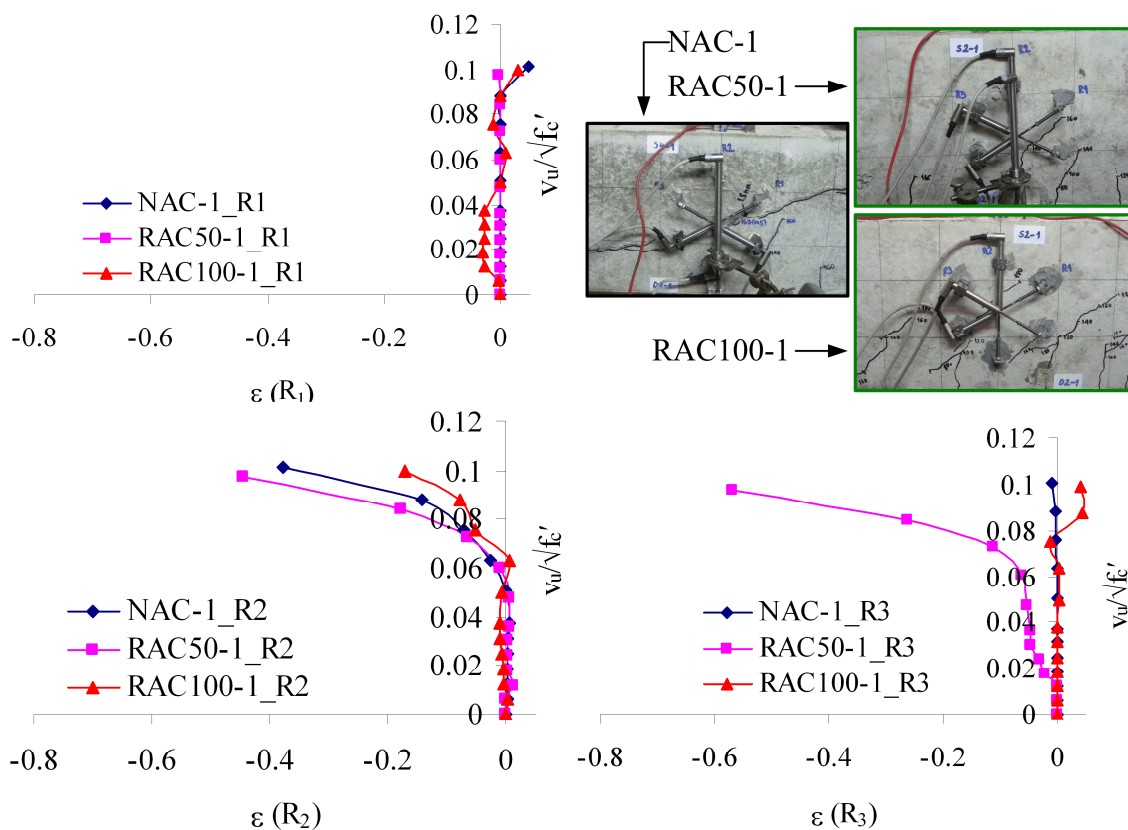


Slika 92. Dilatacije u betonu u sredini raspona (\_1) i sredini smičućeg raspona (\_2) greda sa minimalnom poprečnom armaturom

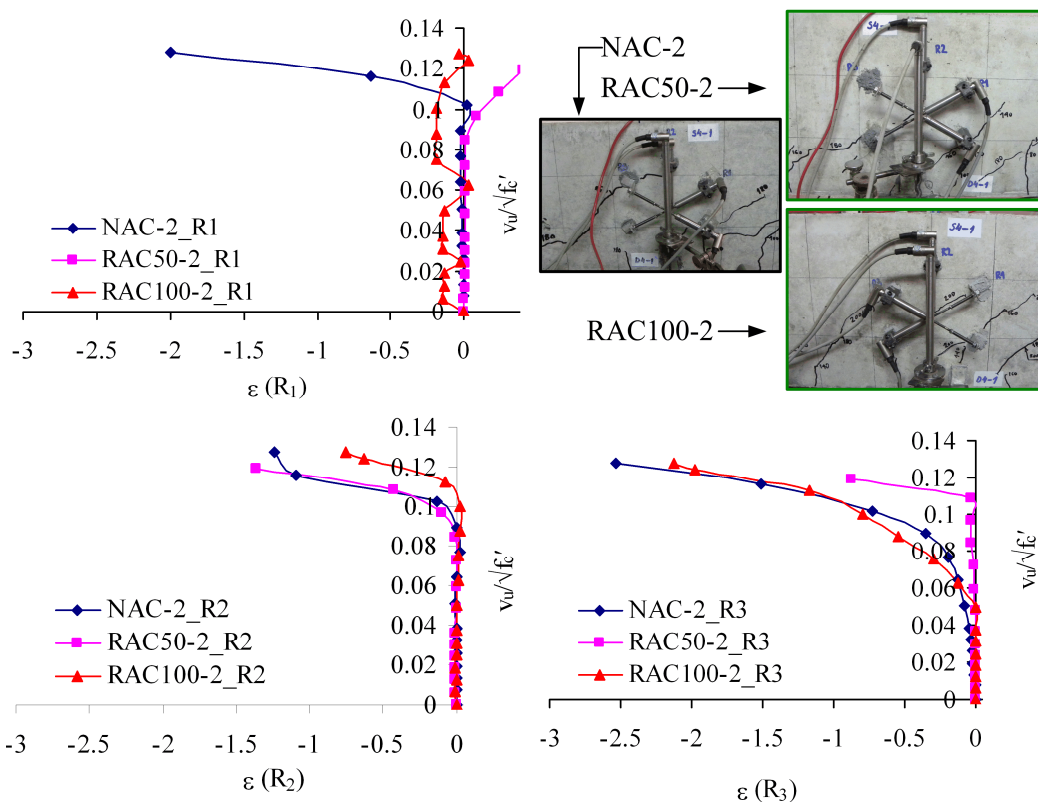


lika 93. Dilatacije u betonu u sredini raspona (\_1) i sredini smičućeg raspona (\_2) greda sa poprečnom armaturom većom od minimalne

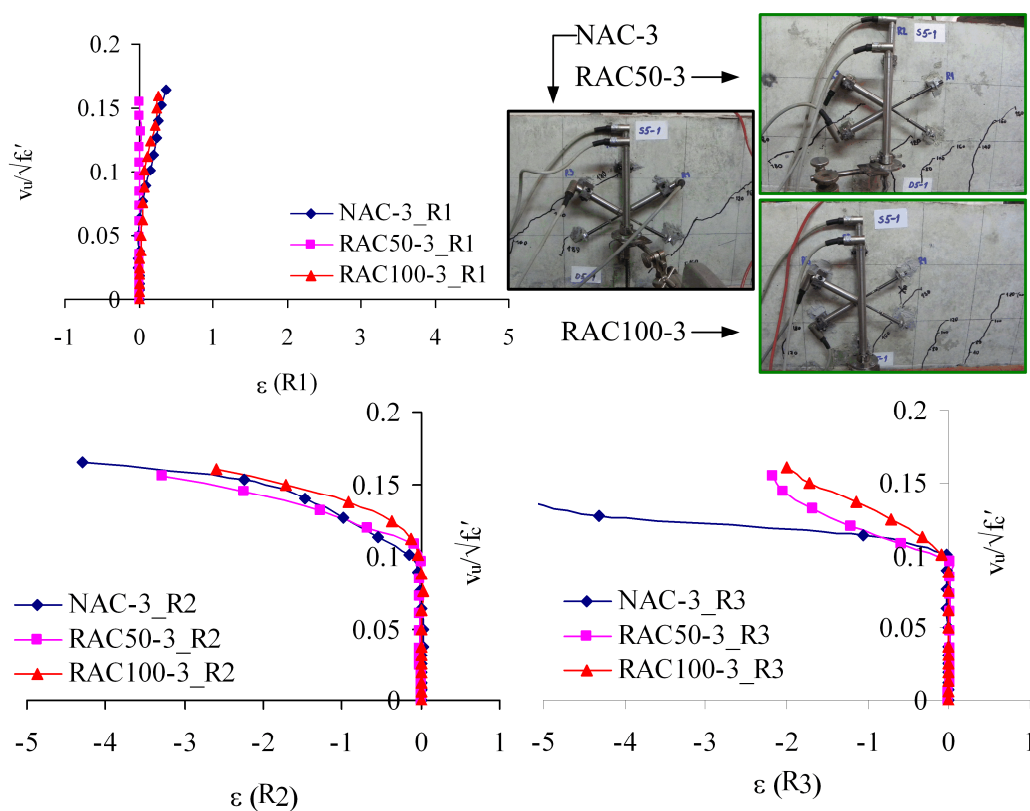
Na slikama 94, 95 i 96 prikazana je promena dilatacija u svakom od 3 pravca iz rozete deformacija (R1, R2 i R3) u funkciji normalizovanog smičućeg napona.



Slika 94. Dilatacije u rozetama na gredama bez poprečne armature



Slika 95. Dilatacije u rozetama na gredama sa minimalnom poprečnom armaturom



Slika 96. Dilatacije u rozetama na gredama sa poprečnom armaturom većom od minimalne

Maksimalni napon na dijagramima kod greda bez poprečne armature, predstavlja trenutak pojave prvih kosih prslina. Za dve grupe greda sa uzengijama, prikazani su rezultati do demontaže uređaja sa grede što je urađeno pri silama na presi od  $2P=200$  kN i  $2P=260$  kN za grede sa minimalnom i jačom poprečnom armaturom respektivno. Treba imati u vidu da izmerene vrednosti pomeranja za svaki pravac iz rozete imaju fizički smisao dilatacija betona samo do trenutka otvaranja prsline, jer nakon toga merene vrednosti zapravo predstavljaju kombinaciju deformacije betona i širine prsline na tom mestu.

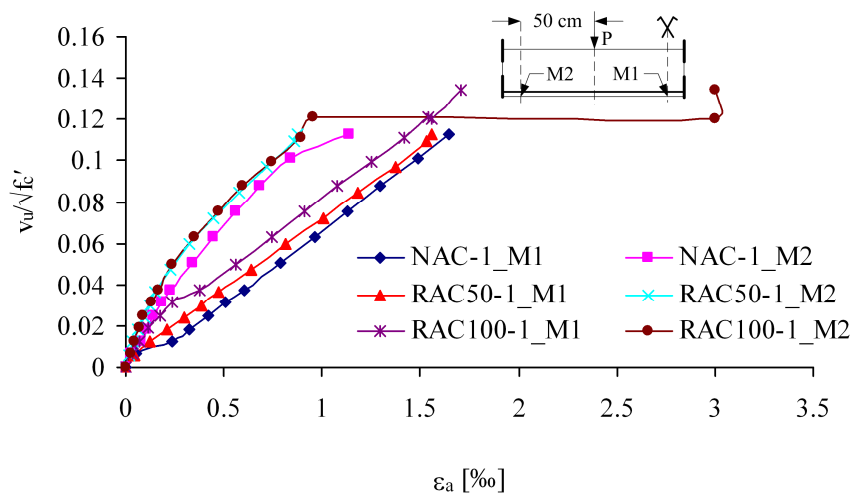
Kod svih greda, bez obzira na procenat armiranja i vrstu betona, dilatacije u pravcu R1 su očekivano vrlo male, s obzirom da je taj pravac najpribližniji pravcu pružanja dominantne prsline. Dilatacije u pravcu R2 su slične među gredama od različitog betona sa istim procentom armiranja, a vrednosti dilatacija rastu sa porastom količine poprečne armature. Najveće razlike mogu se uočiti u dilatacijama u R3 pravcu. Među gredama bez uzengija najveću dilataciju u R3 pravcu, iako u apsolutnom iznosu vrlo malu, imala je greda RAC50-1, dok su kod druge dve grede dilatacije u tom pravcu zanemarljivo male. U grupi greda sa minimalnim uzengijama dilatacije su slične na gredama NAC-2 i RAC100-2, dok su nešto manje na gredi RAC50-2. Konačno, merene dilatacije na gredama RAC50-3 i RAC100-3 su praktično iste, dok je dilatacija na gredi NAC-3 značajno, za red veličine veća. Ipak, ovo je verovatno posledica prolaska prsline tačno kroz bazu ugibomera koji je merio deformaciju u R3 pravcu, *slika 96*. Dakle, može se reći da su izmerene dilatacije betona u tri pravca u sredini smičućeg raspona greda nezavisne od vrste betona, tj. količine recikliranog agregata u njemu.

#### 3.6.7.5 Dilatacije u podužnoj armaturi

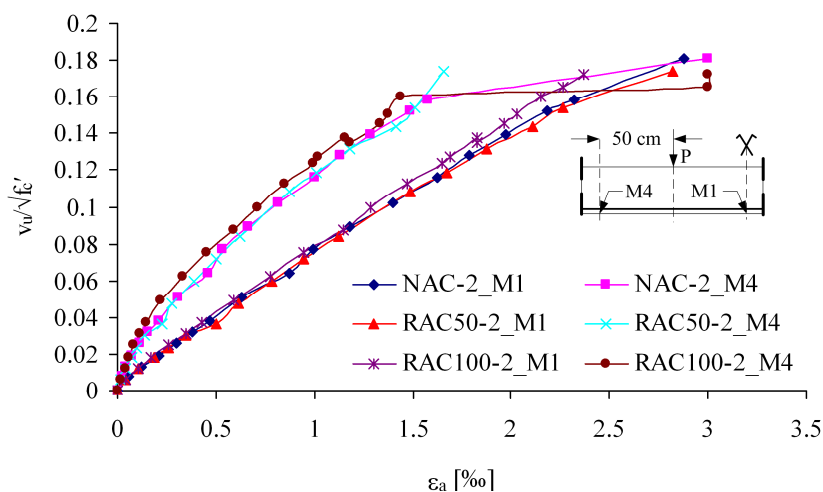
Na *slikama 97, 98 i 99* prikazane su promene dilatacija u podužnoj armaturi u funkciji normalizovanog smičućeg opterećenja, u presecima u sredini raspona grede i sredini smičućeg raspona. Sa povećanjem sile rastu i dilatacije, u oba preseka i kod svih greda. U preseku u sredini raspona (M1) kod svih greda, za isti nivo opterećenja, ostvarene su veće dilatacije nego u sredini smičućeg raspona. To se ne odnosi jedino na fazu loma, gde je kod greda sa minimalnim procentom armiranja uzengijama i greda bez uzengija, zabeleženo tečenje podužne armature u preseku u sredini smičućeg raspona, a ne u sredini grede. Razlike u dilatacijama podužne armature među gredama od različitog betona, u oba preseka, u okviru su margine od 10%, bez obzira na količinu



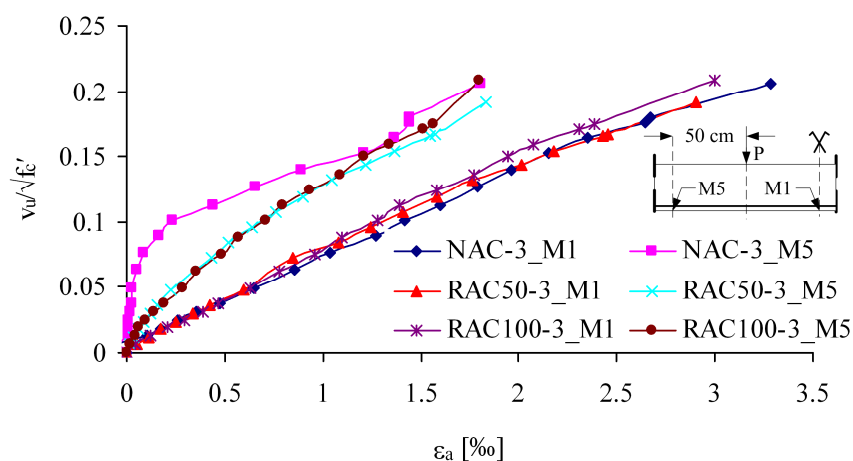
recikliranog agregata u gredama, tj. vrstu betona, osim kod grede NAC-3 u preseku 5 (M5), slika 99.



Slika 97. Dilatacije u podužnoj armaturi gređa bez poprečne armature



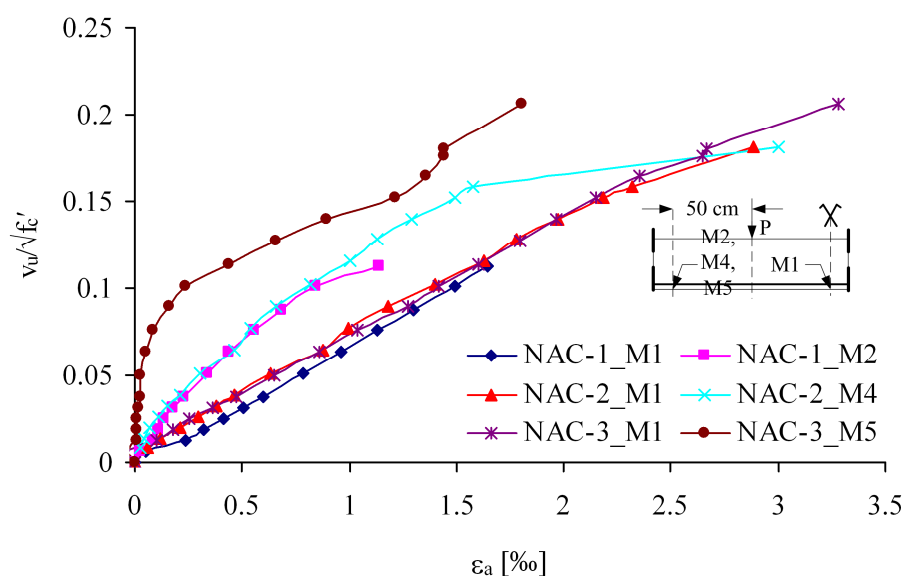
Slika 98. Dilatacije u podužnoj armaturi gređa sa minimalnom poprečnom armaturom



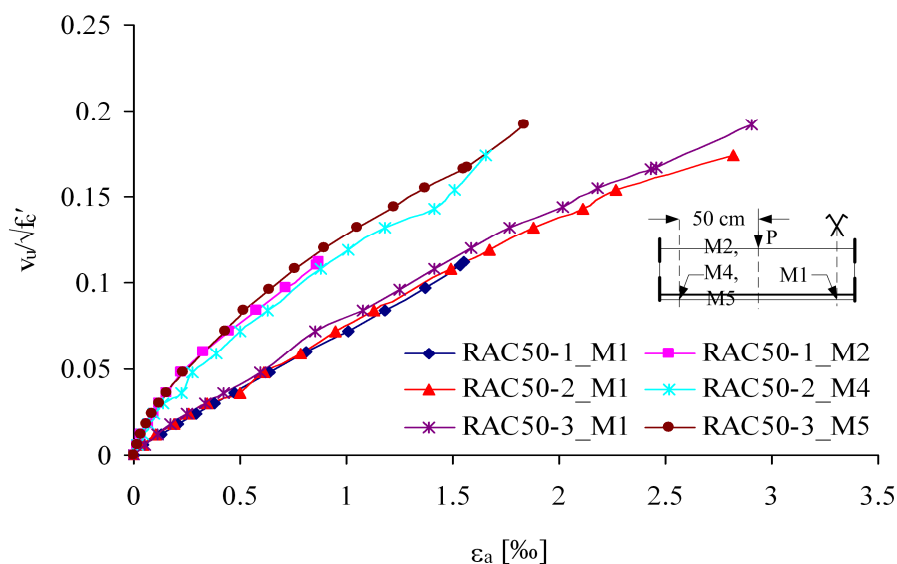
Slika 99. Dilatacije u podužnoj armaturi gređa sa poprečnom armaturom većom od minimalne

Za presek u sredini raspona može se čak reći da su dilatacije podužne armature kod NAC greda za sve faze opterećenja veće u poređenju sa dilatacijama RAC50 i RAC100 greda. Te razlike u apsolutnim iznosima su praktično konstantne kod grede bez uzengija, a procentualno iznose od 4% pri većim opterećenjima do 25% za niža opterećenja, *slika 97*. Kod greda sa minimalnim procentom armiranja, NAC-2 ima do 7% veće dilatacije u odnosu na RAC50-2 i RAC100-2, dok NAC-3 u odnosu na RAC50-3 i RAC100-3 ima do 9% veće dilatacije u podužnoj armaturi u srednjem preseku.

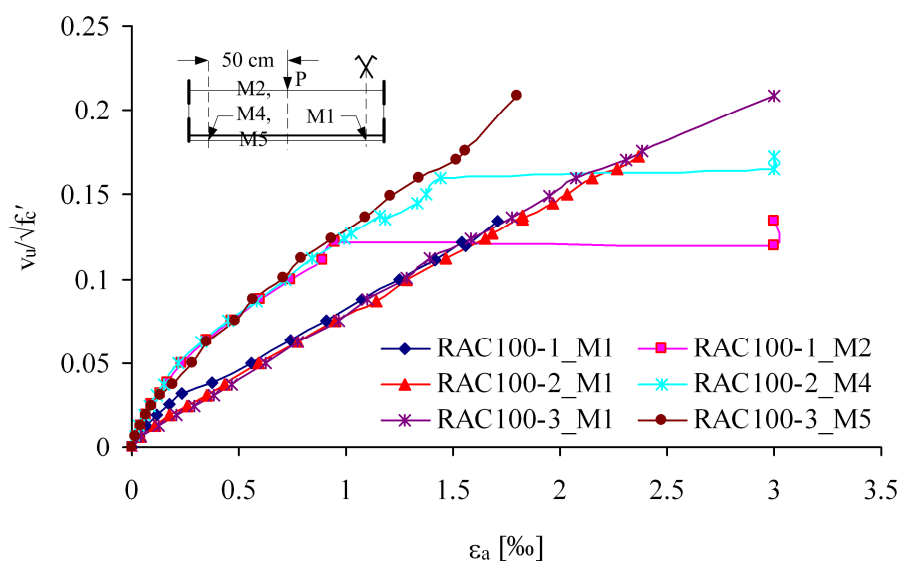
Efekat procenta armiranja poprečnom armaturom na dilatacije u podužnoj armaturi za svaku od tri vrste betona prikazan je na *slikama 100, 101 i 102*. S obzirom da je količina podužne armature ista u svim gredama, u grupi greda od istog betona, za oba razmatrana preseka, pri istom nivou opterećenja, dilatacija u armaturi je praktično ista. Naravno, grede sa manje poprečne armature imale su manju graničnu nosivost pa su i konačne (maksimalne) dilatacije u podužnoj armaturi kod tih greda manje. Grede RAC100-1 i RAC100-2 su imale izražena tečenja podužne armature, u preseku u sredini smičućeg raspona, koja nisu registrovana kod uporednih NAC i RAC50 greda, *slika 102*.



Slika 100. Efekat procenta armiranja na dilatacije u podužnoj armaturi greda bez poprečne armature



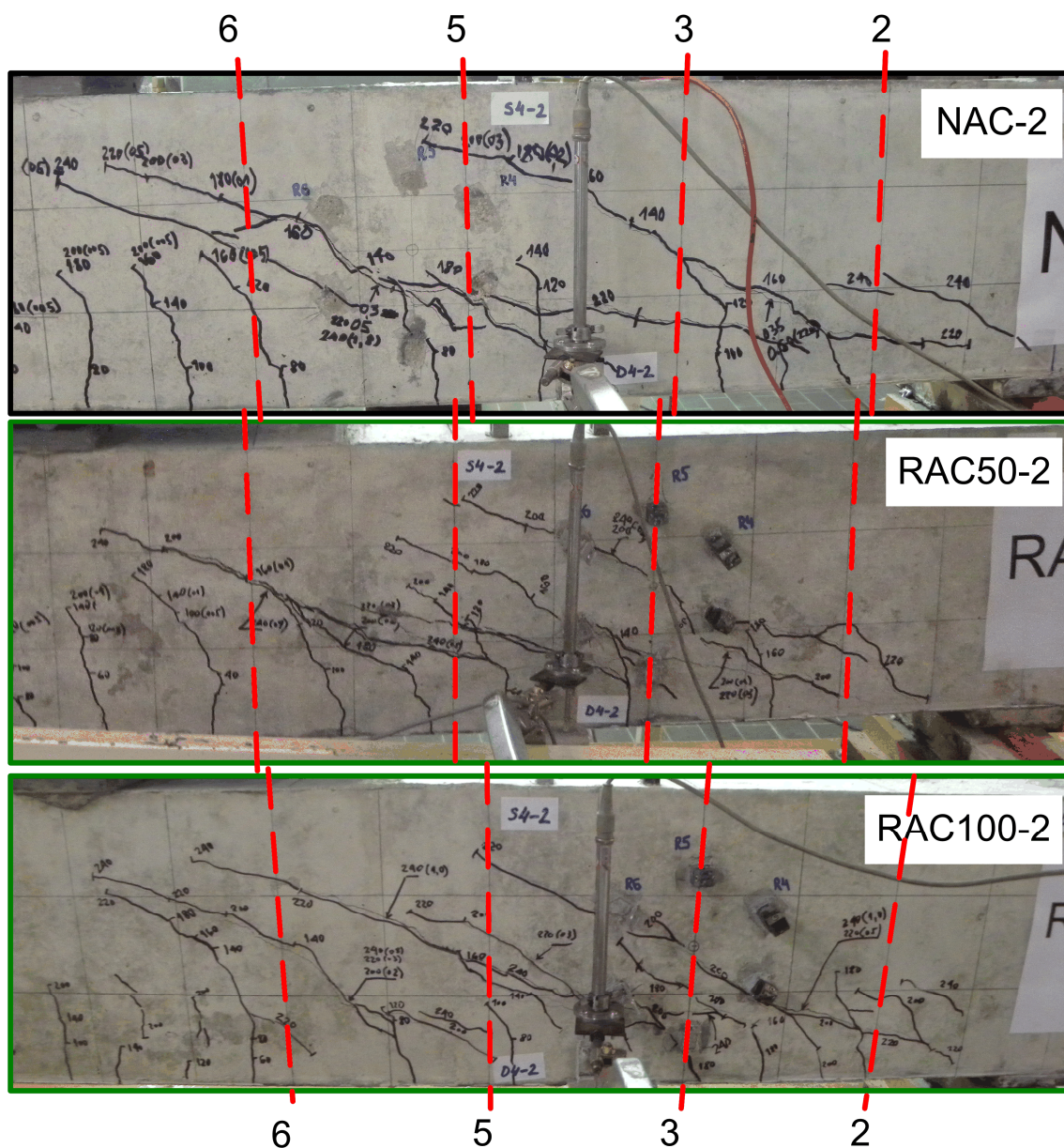
Slika 101. Efekat procenta armiranja na dilatacije u podužnoj armaturi greda sa minimalnom poprečnom armaturom



Slika 102. Efekat procenta armiranja na dilatacije u podužnoj armaturi greda sa poprečnom armaturom većom od minimalne

### 3.6.7.6 Dilatacije u poprečnoj armaturi (uzengijama)

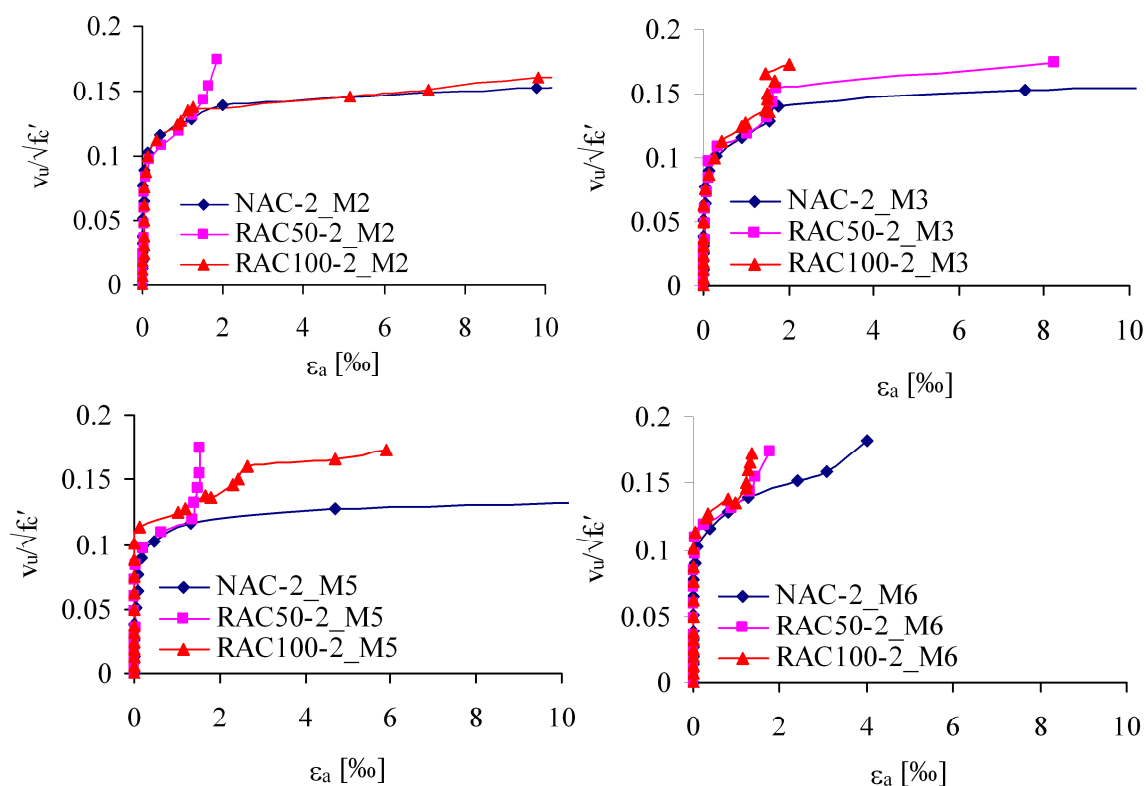
Na slici 103 prikazano je stanje prslina i raspored uzengija u smičućem rasponu, a na slici 104 izmerene dilatacije u tim uzengijama, za grupu greda od različitih betona armiranih minimalnim procentom armiranja poprečnom armaturom.



Slika 103. Stanje prslina u fazi pred lom kod greda sa minimalnim procentom armiranja poprečnom armaturom

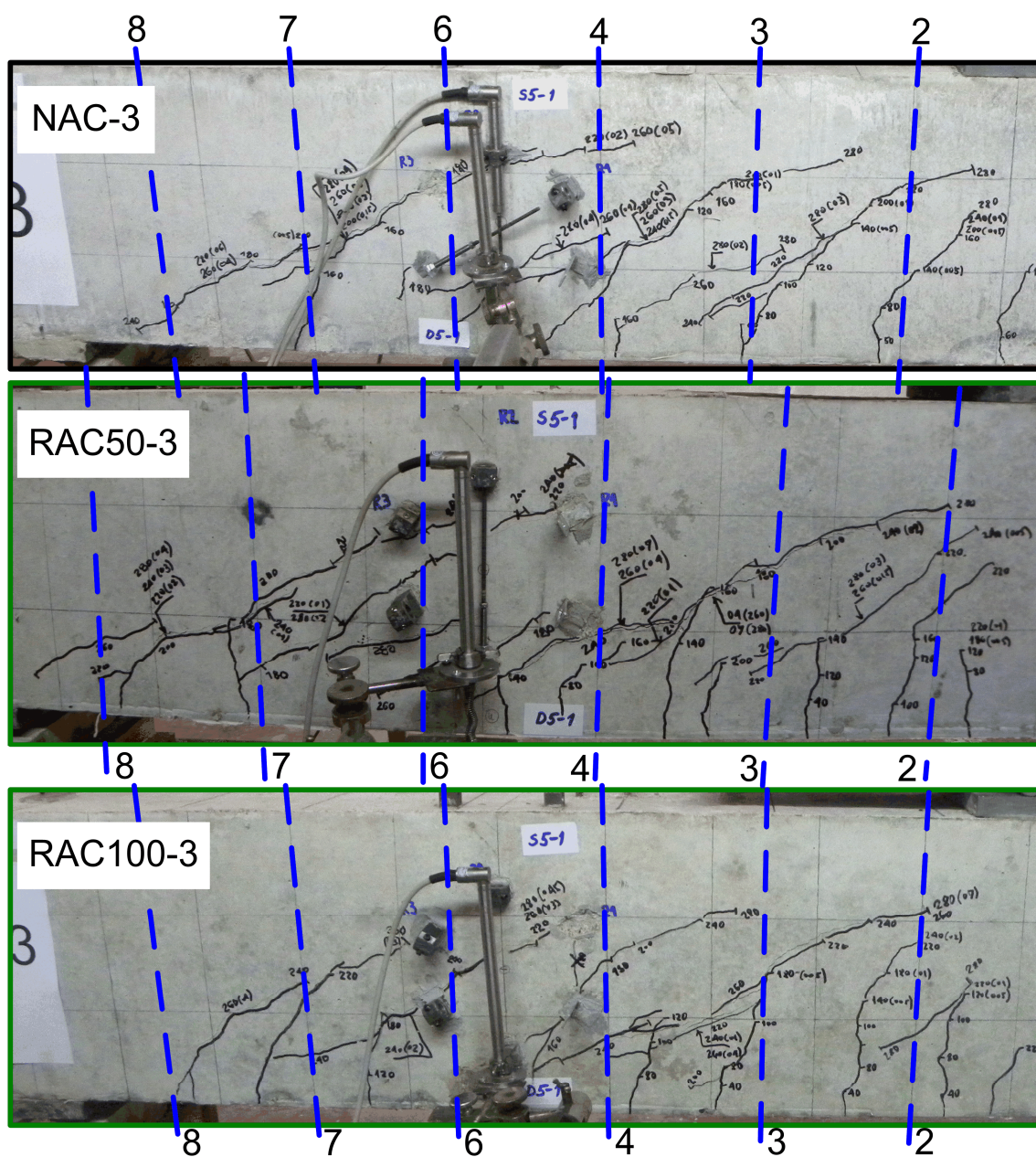
Sa slika se može zaključiti da uzengije dostižu prag tečenja pri dilataciji od oko 2 promila, što je u skladu sa rezultatima ispitivanja  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagrama primenjene armature (poglavlje [3.6.3.2.](#)). Takođe, očigledno je da su dilatacije uzengija u svim presecima najveće kod NAC greda. Nakon pune aktivacije uzengija, tj. nakon otvaranja kosih prslina, dilatacije uzengija u gredama od betona sa recikliranim agregatom, bilo RAC50 ili RAC100, su za isti nivo opterećenja manje nego kod uporednih NAC greda. Ovo važi za sve preseke, a razlike se kreću od 5% do 97%. Uzengije u RAC50-2 i RAC100-2 gredama dostižu prag tečenja pri većem opterećenju nego uzengije u NAC-2 gredi.

Ova činjenica, imajući u vidu da je normalizacijom ordinate izbegnut efekat različite čvrstoće različitih betona, znači da su druge komponente smičuće otpornosti kod greda od betona sa recikliranim agregatom veće nego kod NAC greda, u prvom redu agregat “interlock“ efekat. Na osnovu prikazanih dijagrama na slici 104, ne može se precizno zaključiti o efektu količine recikliranog agregata u betonu na dilatacije u uzengijama, tj. razlikama između RAC50 i RAC100 betona. Dok u presecima 2 i 5 uzengije u RAC100-2 gredi dostižu prag tečenja pri nižem opterećenju nego kod grede RAC50-2, u preseku 3 to se prvo dešava kod RAC50-2 grede. U preseku 6, koji je najbliži osloncu, tečenje uzengija se praktično ne dešava ni kod jedne od ove dve grede. Treba imati u vidu da je dilatacija u poprečnoj armaturi osim opterećenja, funkcija i položaja kosih prslina u betonu kao i položaja, tj. relativnog odstojanja merne trake od tih prslina.



Slika 104. Dilatacije u uzengijama kod greda sa minimalnim procentom armiranja poprečnom armaturom

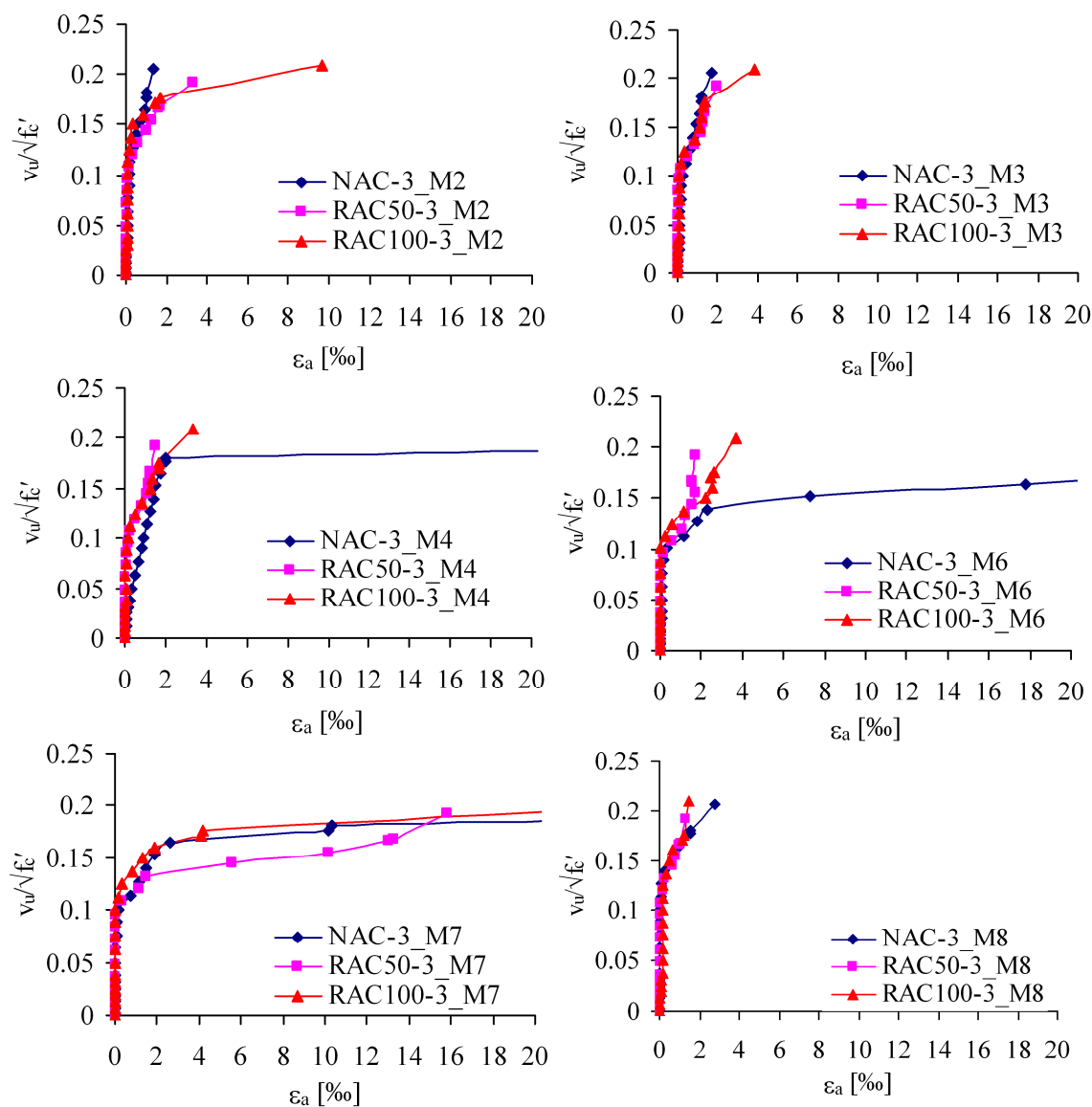
Na slici 105 prikazano je stanje prslina i raspored uzengija u smičućem rasponu, a na slici 106 izmerene dilatacije u tim uzengijama, za grupu greda od različitih betona armiranih poprečnom armaturom sa procentom većim od minimalnog.



Slika 105. Stanje prslina u fazi pred lom kod greda sa procentom armiranja poprečnom armaturom većim od minimalnog

Do nivoa opterećenja koje podrazumeva otvaranje kosih prslina gotovo da nema razlike u dilatacijama uzengija u istom preseku kod NAC-3 i RAC-3 greda. Preseci u kojima je nivo očekivane aktivacije uzengija najveći su 4, 6 i 7, koji se nalaze u srednjoj tečini smičućeg raspona (slika 105). Nakon otvaranja kosih prslina u njima i jesu zabeležene najveće dilatacije, ali i izvesne razlike. U preseku 7 su dilatacije poprečne armature praktično iste kod sve tri grede (NAC-3, RAC50-3 i RAC100-3), dok su u presecima 4 i 6 dilatacije u uzengijama NAC-3 grede značajno veće, tj. zabeleženo je

tečenje poprečne armature, *slika 106*. Jedini presek gde su veće dilatacije kod RAC greda je presek 2, ali bez izraženog tečenja armature. Dakle, kao i kod serije greda sa minimalnom poprečnom armaturom i ovde su zabeležene dilatacije u uzengijama koje sugerišu da je njihov doprinos kod greda sa recikliranim agregatom manji, tj. da je doprinos mehanizma agregat “interlock” kod takvih greda veći.



*Slika 106. Dilatacije u uzengijama kod greda sa procentom armiranja poprečnom armaturom većim od minimalnog*

### 3.6.7.7 Stanje prslina

Ako se usvoji da je nivo opterećenja koji odgovara eksploataciji 40% granične sile loma, lako je uočiti da ni kod jedne od ispitanih greda pri tom nivou opterećenja nije došlo do formiranja kosih prslina, pa time poređenje njihove širine postaje nemoguće.

Ovo je posledica relativno malih graničnih sila loma uzrokovanih slabom poprečnom armaturom, koju su, pak, diktirali tehnički uslovi za izvođenje eksperimenta. Dakle, pri usvojenom nivou eksploatacionog opterećenja od 80 kN, 100 kN i 120 kN za grede sa 0%, 0.142% i 0.189% poprečne armature respektivno, postoje samo prsline usled savijanja. Njihova širina u tom trenutku opterećenja je, nezavisno od tipa primenjenog betona u gredi, tj. procenta recikliranog agregata, iznosila najviše 0,05 mm, koliko je usvojena širina za najtanju vidljivu prslinu. Da bi se stekao uvid u kvalitativni odnos stanja prsline kod betona sa i bez recikliranog agregata mogu se uporediti izmerene širine kosih prsline za svaku od faza opterećenja nakon pojave prve kose prsline, *tabela 51*. Kod betona bez poprečne armature poređenje širine prsline nije moguće s obzirom na pojavljivanja u različitim fazama opterećenja i način dalje propagacije (poglavlje [3.6.7.1](#)). Kod grupe greda sa minimalnim procentom poprečne armature, širine prsline kod greda sa recikliranim agregatom (RAC50-2 i RAC100-2) bile su veće nego kod grede NAC-2 u fazi pojavljivanja prve prsline (0,1 mm u poređenju sa 0,05 mm) i u fazi pred lom (1,0 mm u poređenju sa 0,06 mm). U ostalim fazama kod RAC greda zabeležene su iste ili manje širine prsline u odnosu na NAC gredu. Kod grupe greda sa jačom poprečnom armaturom, nisu zabeležene bitne razlike u širinama prsline ni u jednoj od faza opterećenja, bez obzira na vrstu primenjenog betona u gredama, tj. količinu recikliranog agregata, *tabela 51*.

*Tabela 51. Širine kosih prsline (u [mm]) za različite nivoe opterećenja*

| Oznaka grede | Opterećenje [kN] |      |      |     |     |     |     |
|--------------|------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|
|              | 160              | 180  | 200  | 220 | 240 | 260 | 280 |
| NAC-2        | 0.05             | 0.2  | 0.3  | 0.5 | 0.6 |     |     |
| RAC50-2      | 0.1              | 0.1  | 0.2  | 0.3 | 1   |     |     |
| RAC100-2     |                  | 0.1  | 0.2  | 0.5 | 1   |     |     |
| NAC-3        |                  | 0.05 | 0.15 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.9 |
| RAC50-3      |                  | 0.05 | 0.1  | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 1.2 |
| RAC100-3     |                  | 0.05 | 0.1  | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 1   |

### 3.6.8. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata sopstvenih ispitivanja betona sa različitim sadržajem RC agregata i ispitivanja ponašanja armiranobetonskih greda pri smicanju, doneti su zaključci koji slede. Ukupan broj probnih tela u ovoj fazi ispitivanja bio je 95. Na svakoj od 9 ispitanih greda mereno je po 18 podataka. Pri izvođenju zaključaka vezanih



za ponašanje greda od betona sa različitim sadržajem RC agregata, uticaj različitih čvrstoća pri pritisku uzet je u obzir kroz normalizovane vrednosti smičućih sila.

- Beton sa 50% krupnog recikliranog agregata spravljen sa istim efektivnim vodocementnim faktorom i istom količinom cementa kao i beton sa prirodnim agregatom, ima veću čvrstoću pri pritisku, manji modul elastičnosti i sličnu čvrstoću pri zatezanju od uporednog betona,
- Beton sa 50% krupnog recikliranog agregata spravljen sa istim efektivnim vodocementnim faktorom i istom količinom cementa kao i beton sa prirodnim agregatom, ima zapreminsku masu u svežem i očvrslom stanju koja je za 2% manja u odnosu na uporedni beton sa prirodnim agregatom,
- Adhezija između zrna agregata i nove cementne paste veća je kod betona sa recikliranim u odnosu na betone sa prirodnim agregatom, bez obzira na količinu recikliranog agregata u RAC betonu,
- Korelacija između veličina utvrđenih nedestruktivnim metodama ispitivanja (brzina ultrazvučnih talasa ili rezonantna frekvencija) sa mehaničkim karakteristikama (čvrstoće pri pritisku) preko strukturnih karakteristika (kompaktnost, zapreminska masa), kod betona sa RC agregatom je slaba i može dovesti do pogrešnih zaključaka,
- Grede od betona sa recikliranim agregatom, bez obzira na količinu RCA, bez poprečne armature, imaju manju duktilnost u odnosu na grede sa prirodnim agregatom, dok duktilnost greda koje imaju poprečnu armaturu ne zavisi od količine RC agregata u betonu,
- Razlike u ugibima greda od betona sa 0%, 50% i 100% RCA sa istom količinom poprečne i podužne armature, pri eksploatacionom opterećenju u okviru su granice od 10%,
- Širina prslina, kao i mehanizam loma greda usled smicanja sa istom količinom poprečne armature ne zavisi od količine, tj. procentualnog sadržaja recikliranog agregata u betonskim gredama; raspored prslina takođe je sličan, ali je kod RAC greda između dominantnih kosih prslina primetno formiranje serija manjih (tanjih i kraćih) prslina;

- Dilatacije u betonu i podužnoj armaturi kod greda od betona sa 0%, 50% i 100% RC agregata sa istom količinom poprečne armature, mogu se smatrati istim,
- Dilatacije u uzengijama kod RAC50 i RAC100 greda manje su u poređenju sa dilatacijama uzengija kod NAC greda. Ovo ukazuje na manji doprinos uzengija, a veći doprinos “agregat interlock” mehanizma u prenošenju smicanja kod greda sa recikliranim agregatom,
- Normalizovane granične sile loma kod greda od betona sa 0%, 50% i 100% recikliranog agregata i istim procentom armiranja poprečnom armaturom, praktično su iste.

## **4. Analiza eksperimentalnih rezultata**

### **4.1 UVOD**

U uvodnom delu ovog poglavlja dat je prikaz osnovnih mehanizama ponašanja greda u eksploataciji i pri lomu, koji su osnova savremenih propisa u ovoj oblasti. S obzirom da propisi koji se odnose na konstrukcije od betona sa recikliranim agregatom praktično ne postoje i da se u radu testira mogućnost primene propisa za klasične armiranobetonske konstrukcije na RAC gredama, prikaz mehanizama loma greda usled savijanja i smicanja, kao i modela ponašanja odnosi se na grede od klasičnog betona. Komentarisana je mogućnost ispunjavanja proračunskih pretpostavki koje važe kod klasičnog betona i u slučaju betona sa recikliranim agregatom. U centralnom delu ovog poglavlja izvršena je analiza sopstvenih eksperimentalnih rezultata ispitivanja ponašanja greda od betona sa recikliranim agregatom i to na dva načina. Kao prvo, izvršeno je testiranje dobijenih rezultata u smislu poređenja određenih veličina sa proračunskim vrednostima tih veličina dobijenih na osnovu postojećih pravilnika, propisa ili softvera koji se baziraju na savremenim modelima ponašanja armiranobetonskih elemenata. U drugom delu, izvršeno je proširenje sopstvene eksperimentalne baze podataka sa podacima iz drugih istraživanja u cilju donošenja opštijih zaključaka o veličinama koje definišu ponašanje elemenata konstrukcije u eksploataciji i nosivost grednih elemenata od betona na bazi recikliranog agregata.

### **4.2 MEHANIZMI I MODELI PONAŠANJA PRI SAVIJANJU I SMICANJU ELEMENATA KONSTRUKCIJA OD KLASIČNOG BETONA**

U okviru ovog poglavlja biće prikazani osnovni mehanizmi prenosa uticaja čistog savijanja i smicanja u grednim elementima. Biće predstavljene osnovne proračunske pretpostavke i računski modeli dati domaćim propisom- BAB'87 ([Beton i armirani beton prema BAB '87- Priručnik, 1995](#)), odredbe date u okviru dva svetski prihvaćena propisa – Evrokodu 2- EC2 ([Eurocode 2, 2004](#)) i Američkim propisima- ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)), kao i na osnovu najnovijeg predloga Modela Propisa- MC ([fib, 2010](#)).

#### 4.2.1. SAVIJANJE

##### 4.2.1.1 Granična nosivost

Decenijska eksperimentalna ispitivanja ponašanja armiranobetonskih grednih elemenata na savijanje rezultovala su utvrđivanjem mehanizma prihvatanja i prenosa momenta savijanja i interpretacijom tog mehanizma kroz propise. Proračun armiranobetonskih preseka prema teoriji granične nosivosti- loma, opterećenih momentima savijanja i/ili normalnim silama bazira se na četiri osnovne pretpostavke:

- 1) Raspodela dilatacija po visini preseka je linearna
- 2) Poznat je  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram armaturnog čelika
- 3) Poznat je  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram betona
- 4) Doprinos zategnutog betona može se zanemariti

Prva pretpostavka zapravo znači da važi Bernulijeva hipoteza o ravnim presecima, po kojoj su podužne dilatacije u betonu i armaturi, u različitim tačkama preseka po visini, proporcionalne odstojanju od neutralne ravni- ose. Manja odstupanja od ovoga mogu se javiti u zategnutoj zoni preseka zbog klizanja između šipki armature i betona, kao i u pritisnutoj zoni preseka u fazi loma zbog značajne plastifikacije betona. Ipak, eksperimenti su pokazali da generalno posmatrano ta odstupanja nisu velika i da pretpostavka važi i za granično stanje nosivosti. Za ostvarivanje ove pretpostavke važno je da postoji dobra adhezija, odnosno prijanjanje, između armature i betona, što znači da su na jednakim rastojanjima od neutralne ravni dilatacije u betonu i armaturi jednake. Dakle, za potvrdu ove pretpostavke kod RAC betona potrebno je pažljivo analizirati adheziju između betona sa recikliranim agregatom i armaturnog čelika i naravno, ukoliko je moguće, dobiti eksperimentalnu potvrdu linearne raspodele dilatacija po visini preseka.

Stvarni naponsko-deformacijski dijagram armaturnog čelika se za potrebe proračuna transformiše u idealizovani ili proračunski  $\sigma$ - $\varepsilon$  dijagram. Oblik proračunskog dijagrama različito je definisan u propisima, dominantno kao bilinearan sa ili bez ojačanja, sa ograničenjem maksimalnih dilatacija (10‰ prema BAB'87) ili bez limita (EC2, ACI, MC).

Treća pretpostavka odnosi se na raspodelu napona pritiska u preseku koja je neophodna za dimenzionisanje preseka. Različiti propisi daju različite aproksimacije

stvarne eksperimentalno utvrđene zavisnosti  $\sigma$ - $\epsilon$ , tj. različite proračunske dijagrame-pravougaoni blok dijagram, bilinearni (trapezni) ili dijagram oblika parabola+prava. Maksimalna dilatacija u betonu pri lomu obično se usvaja u granicama od 3‰ (ACI) do 3.5‰ (EC2, BAB'87, MC). Dosadašnja istraživanja napansko-deformacijskog dijagrama kod betona sa RC agregatom prikazana su u poglavlju [2.2.6.](#)

S obzirom da se u zategnutoj zoni savijanih elemenata prsline pojavljuju i pri eksploatacionom opterećenju, deluje razumno pretpostavka da se za stanje loma zanemari doprinos zategnutog betona, nezavisno od toga da li se radi o NAC ili RAC betonima.

Mehanizam prihvatanja spoljašnjeg momenta savijanja sastoji se u formiranju sprega unutrašnjih sila u poprečnom preseku koji čine sila u zategnutoj armaturi i sila u pritisnutom betonu i pritisnutoj armaturi. Sila zatezanja sračunava se kao proizvod površine poprečnog preseka armature i napona u njoj, dok sila u pritisnutom betonu zavisi od površine pritisnute zone preseka i usvojenog oblika dijagrama napon-dilatacija. Ovakav model je isti u svim propisima za NAC elemente, a razlike se odnose jedino na oblik radnog napansko-deformacijskog dijagrama. Dva osnovna oblika loma nosača napregnutih na savijanje su lom po betonu i lom po armaturi. U slučaju jako armiranih preseka, očekivani lom je krt, po betonu, pri relativno malim dilatacijama u armaturi, ispod granice tečenja. U slučaju srednje ili slabo armiranih preseka, očekivani lom je duktilan, nastao velikim izduženjima armature i praćen drobljenjem betona u pritisnutoj zoni preseka. Očekuju se slični oblici loma i kod RAC greda.

#### 4.2.1.2 Ugibi

U ovom delu predstavljen je proračun ugiba prema algoritmima koje nude domaći propis BAB87 ([Beton i armirani beton prema BAB '87- Priručnik, 1995](#)), EC2 ([Comité Européen de Normalisation, 2004](#)) i ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)).

Priručnik prema BAB87 ([Beton i armirani beton prema BAB '87- Priručnik, 1995](#)) osim tačnog postupka numeričke integracije predlaže primenu, uz izvesna ograničenja, i uprošćenog postupka tzv. bilinearne metode. Ona se bazira na pretpostavci da je, ne uzimajući u obzir uticaj skupljanja betona, ugib bilinearna funkcija momenta savijanja. Ugib isprskalog armiranobetonskog elementa ( $v(t)$ ) računa se prema izrazu:

$$v(t) = (1 - z_b) \cdot v^I(t) + z_b \cdot v^{II}(t) \quad (19)$$

gde je:

$v^I(t)$  – ugib sračunat za proračunski model bez prslina

$v^II(t)$  – ugib sračunat za proračunski model sa prslinama

$\zeta_b$  – koeficijent koji uzima u obzir sadejstvo zategnutog betona između prslina i armature i za koji se pretpostavlja da ima konstantnu vrednost iako duž elementa varira; određuje se na osnovu momenta savijanja  $M_D$  i momenta pojave prslina  $M_{rD}$  u kritičnom preseku, prema izrazu:

$$z_b = 1 - b_1 \cdot b_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M_D} \quad (20)$$

Prema EC2 ([Eurocode 2, 2004](#)), za elemente izložene pretežno savijanju, adekvatna procena ponašanja data je izrazom:

$$a = x \cdot a_{II} + (1 - x) \cdot a_I \quad (21)$$

gde su:

$\alpha_I, \alpha_{II}$  – vrednosti parametra deformacije (dilatacija, krivina, rotacija, ugib) sračunatih za stanje bez prslina i za stanje sa potpuno obrazovanim prslinama, respektivno

$\xi$  – distributivni koeficijent kojim se uzima u obzir sadejstvo zategnutog betona u preseku i računa se kao:

$$x = 1 - b \cdot \left( \frac{s_{sr}}{s_s} \right)^2 \quad (22)$$

gde je:

$\beta$  – koeficijent kojim se uzima u obzir uticaj trajanja opterećenja ili ponavljanja opterećenja na srednju vrednost dilatacije;

$\beta=1.0$  za jedno kratkotrajno opterećenje

$\beta=0.5$  za dugotrajno opterećenje ili veliki broj ciklusa ponavljanja opterećenja

$\sigma_s$  – napon u zategnutoj armaturi, sračunat za presek sa prslinom

$\sigma_{sR}$  – napon u zategnutoj armaturi, sračunat za presek sa prslinom od opterećenja pri kojem nastaje prva prslina

Najtačnija metoda za određivanje ugiba korišćenjem izraza (15) je da se sračunaju krivine u dovoljno velikom broju preseka duž elementa i da se onda ugib sračuna numeričkom integracijom. Uprošćeni postupak podrazumeva da se ugib sračuna dva puta, jednom pretpostavljajući element bez prslina, a zatim pretpostavljajući da je sa potpuno obrazovanim prslinama i da se onda izvrši interpolacija prema izrazu (17).

ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)) nudi jednostavan proračun preko izraza za elastičan ugib, ali se za proračun krutosti koristi efektivni moment inercije preseka, sračunat na osnovu izraza:

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \cdot I_g + \left( 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \cdot I_{cr} \quad (23)$$

gde je:

$I_e$  – efektivni moment inercije preseka

$I_g$  – moment inercije bruto betonskog preseka

$I_{cr}$  – moment inercije isprskalog preseka

$M_{cr}$  – moment savijanja pri pojavi prslina (*tabela 53*)

$M_a$  – moment savijanja za razmatrani nivo eksploatacionog opterećenja

#### 4.2.1.3 Moment savijanja pri pojavi prsline

Računske vrednosti momenta savijanja pri pojavi prslina ( $M_{cr,rač}$ ) u svakom od tri analizirana propisa: BAB'87 (BAB, 1987), Evrokodu 2- EC2 ([Eurocode 2, 2004](#)) i Američkom propisu- ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)), predstavljaju proizvod čvrstoće pri zatezanju savijanjem i odgovarajućeg otpornog momenta preseka. Vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem mogu se odrediti na tri načina –eksperimentalnim merenjem, preračunavanjem sa merenih vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem ili na osnovu analitičkih izraza koji direktno ili indirektno povezuju čvrstoću pri pritisku (u ovom slučaju merenu vrednost) i čvrstoću pri zatezanju savijanjem. U daljem će se predstaviti pojedinosti proračuna prema navedenim propisima.

Prema Priručniku uz BAB'87 ([Beton i armirani beton prema BAB '87- Priručnik, 1995](#)), moment savijanja pri formiranju prsline jednak je proizvodu čvrstoće pri zatezanju savijanjem ( $f_{bzs}$ ) i odgovarajućeg otpornog momenta idealizovanog preseka ( $W_i$ ):

$$M_{cr,rač} = f_{bzs} \cdot W_i \quad (24)$$

Otporni moment idealizovanog preseka osim betona uzima u obzir i količinu podužne armature. Čvrstoća pri zatezanju savijanjem ( $f_{bzs}$ ) i aksijalna čvrstoća ( $f_{bz}$ ), prema BAB'87, povezani su izrazom (25), dok je veza aksijalne čvrstoće pri zatezanju i pritisku ( $f_{bk}$ ) data izrazom (26). Sračunavanje aksijalne čvrstoće pri zatezanju na osnovu merenih vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem ( $f_{bzc}$ ) izvršeno je preko izraza (27).

$$f_{bzs} = 0.7 \cdot f_{bz} \cdot \left( 0.6 + \frac{0.4}{\sqrt[4]{d}} \right) \quad (25)$$

gde je  $d$  visina preseka u [m]

$$f_{bz} = 0.25 \cdot f_{bk}^{2/3} \quad (26)$$

$$f_{bz} = 0.9 \cdot f_{bzc} \quad (27)$$

Prema smernicama za primenu EC2 ([European Concrete Platform ASBL, 2008](#)), moment savijanja pri pojavi prslina može da se odredi na osnovu izraza:

$$M_{cr} = f_{ct,eff} \cdot W_b \quad (28)$$

Pri tome, za efektivnu čvrstoću pri zatezanju ( $f_{ct,eff}$ ) može se usvojiti srednja vrednost aksijalne čvrstoće pri zatezanju ( $f_{ctm}$ ), ili, ukoliko se dokaže da nema aksijalnih napona zatezanja (što je realno za slučaj analiziranog eksperimenta), može se usvojiti čvrstoća pri zatezanju savijanjem ( $f_{ctm,fl}$ ). Otporni moment ( $W_b$ ) računa se za bruto betonski presek i u slučaju pravougaonog poprečnog preseka (širine  $b$  i visine  $d$ ) iznosi  $bd^2/6$ . Veza čvrstoće pri zatezanju savijanjem i aksijalne čvrstoće pri zatezanju data je izrazom:

$$f_{ctm,fl} = \max\{(1.6 - h/1000) \cdot f_{ctm}; f_{ctm}\} \quad (29)$$

Pri čemu se  $f_{ctm}$  može sračunati na osnovu čvrstoće pri pritisku merene na cilindru ( $f_{ck}$ ) izraz (30), ili preko čvrstoće na zatezanje cepanjem ( $f_{ctm,sp}$ ), jednačina (31).

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (30)$$

$$f_{ctm} = 0.9 \cdot f_{ctm,sp} \quad (31)$$

Prema ACI 318, moment savijanja pri pojavi prslina ( $M_{cr}$ ) računa se kao:

$$M_{cr} = f_r \cdot \frac{I_g}{y_t} \quad (32)$$

$$f_r = 0.62 \cdot I \cdot \sqrt{f_c'} \quad (33)$$



$$f_{ctsp} = 0.56 \cdot \sqrt{f_c'} \quad (34)$$

$f_r$  – čvrstoća pri zatezanju savijanjem (engl. *modulus of rupture*), izraz (29)

$I_g$  – moment inercije bruto betonskog preseka

$y_t$  – rastojanje od težišta bruto betonskog preseka do zategnute ivice preseka

$f_{ctsp}$  – čvrstoća pri zatezanju cepanjem

$f_c'$  – čvrstoća pri pritisku merena na cilindričnom uzorku (b/d~15/30 cm)

#### 4.2.2. SMICANJE

##### 4.2.2.1 Mehanizmi i modeli prihvatanja smičućih sila kod greda

Postoje brojna istraživanja koja analiziraju ponašanje linijskih elemenata pri smicanju, međutim kompleksnost problema uticala je na to da još uvek nema opšte prihvaćenog modela ponašanja, niti su do kraja istraženi i otkriveni svi faktori koji utiču na kapacitet smičuće nosivosti. Generalno, razlikuje se ponašanje elemenata koji imaju i koji nemaju poprečnu armaturu - uzengije. U slučaju elementa konstrukcije koji nema uzengije, mehanizam prenosa smicanja sastoji se od sledećih komponenti: prenosa smicanja preko neisprskalog betona, agregat “interlock” efekat i “dowel” efekat odnosno uticaj podužne armature ([ASCE-ACI Committee 445, 1998](#)). Osim ovih komponenta, u slučaju poprečno armiranih elemenata postoji i doprinos te armature, odnosno uzengija. U zavisnosti od procenjenog doprinosa pojedinih komponenti različiti autori razvili su različite modele.

U neisprskalim delovima nosača smicanje se prenosi u skladu sa trajektorijama glavnih napona pritiska i zatezanja. Ovo takođe važi i u pritisnutoj zoni isprskalog preseka. Integracijom napona smicanja po visini pritisnute zone betona dobija se komponenta smičuće sile koja se često naziva “doprinos betona”. Fizičko objašnjenje agregat “interlock” efekta je da na mestu prslina površina betona nije ravna, već se prslina formira kroz cementnu pastu tako da zrna agregata “štrče” u odnosu na ravan prslina i na taj način sprečavaju proklizavanja, tj. omogućavaju prenos smičuće sile. Kako se kod lakoagregatnih betona ili betona visokih čvrstoća prslina javlja po zrnu agregata, a i dalje ima mogućnost prenosa smicanja, termin poput “trenje” (engl. *friction*) čini se prikladnijim. Ovaj mehanizam može biti naročito interesantan kod betona sa RC agregatom s obzirom na strukturu zrna recikliranog agregata, tj. manju veličinu zrna prirodnog agregata i u principu nepoznat kvalitet starog cementnog

kamena koji ga obavija. Efekat podužne armature ili “dowel” efekat na smičuću otpornost nije veliki u slučaju nosača bez poprečne armature, dok u slučaju nosača sa uzengijama i značajnom podužnom armaturom raspoređenom u više redova može da bude veoma izražen.

Modeli koji su razvijeni za dimenzionisanje grednih elemenata na smicanje zasnovani su na dva principa pri čemu jedan drugog ne isključuju u potpunosti – gredno dejstvo i lučno dejstvo. Model koji pretpostavlja lučno dejstvo je model pritisnutih i zategnutih štapova (engl. *strut-and-tie model*), dok je najzastupljeniji model zasnovan na grednom dejstvu - model rešetke. Uočeno je da preovlađujuće dejstvo (gredno ili lučno) dominantno zavisi od odnosa smičućeg raspona ( $a$ ) i statičke visine ( $h$ ). Za odnos  $a/h > 3$  dominira gredno dejstvo gde u slučaju elemenata bez uzengija lom nastupa praktično odmah nakon otvaranja kose prsline. U slučaju da postoje uzengije, one se aktiviraju nakon otvaranja dijagonalne prsline i lom postaje duktilan usled velikih izduženja poprečne armature. Za odnos  $a/h < 2$  dominira lučno dejstvo, a lom nastupa po pritisnutoj betonskoj dijagonali ili usled poprečnog cepanja betona usled širenja napona pritiska. Da bi se ostvario ovakav oblik loma neophodno je postojanje minimalne armature u svim pravcima uključujući i poprečnu, kako bi se obezbedila redistribucija unutrašnjih napona nakon pojave prsline. Za odnose  $2 < a/h < 3$ , kod greda sa bar minimalnom poprečnom armaturom, postoji doprinos i grednog i lučnog efekta, a lom nastupa obično u pritisnutoj zoni betona usled kombinacije napona pritiska i smicanja.

Model rešetke nastao je početkom XX veka. Osnovni postulat je da nakon formiranja kosih prsline usled kosih glavnih napona zatezanja, greda može da se zameni rešetkom čiji je zategnuti pojas podužna armatura, pritisnuti pojas i pritisnute dijagonale pod uglom od  $45^\circ$  predstavljaju pritisnuti beton, a zategnute vertikalne predstavljaju uzengije. Ovaj model zanemarivao je doprinos zategnutog betona, a ugao od  $45^\circ$  važio je pre i posle formiranja prsline, što je činilo ovaj model konzervativnim. Poboljšanje ovog modela mogućnošću da dijagonala pritiska zahvata ugao različit, obično manji, od  $45^\circ$ , dovelo je do formiranja modela rešetke sa promenljivim nagibom dijagonala.

Model pritisnutih i zategnutih štapova zahteva minimalnu količinu armature raspoređenu u oba pravca kako bi se obezbedila potrebna duktilnost za redistribuciju unutrašnjih napona nakon formiranja prsline. Podrazumeva se da se veći deo smicanja prenosi direktno do oslonca preko pritisnute dijagonale, tako da ostaje manji deo

smicanja za redistribuciju nakon pojave prsline, pa je ovaj model pogodan za visoke elemente bez poprečne armature.

Kompleksni modeli koji usled smičuće sile ili kombinacije smicanja i momenta savijanja razmatraju napone zatezanja u podužnoj i poprečnoj armaturi, napone pritiska u isprskalim betonskim dijagonalama koje menjaju ugao nagiba u odnosu na horizontalu, nazvani su teorija polja pritisaka (engl. *compression field theory*). Kasnije je ovaj model modifikovan (engl. *modified compression field theory, MCFT*) ([Vecchio&Collins, 1986](#)) i uzima u obzir zategnuti beton između prsline. Osnovno pojednostavljenje ovog modela je da se pravci glavnih napona poklapaju sa pravcima glavnih dilatacija.

#### 4.2.2.2 Pregled propisa

Propisi za proračun nosivosti NAC elemenata konstrukcija na smicanje razlikuju se međusobno zbog usvojenog modela prenosa smičućih sila i doprinosa pojedinih mehanizama u tom prenosu. Zato je u ovom poglavlju dat prikaz nekoliko savremenih propisa za NAC elemente. Takođe, data su dva izraza iz Kineskih propisa za RAC elemente konstrukcija (CTC), koja se odnose na proračun nosivosti na smicanje, a koji su u svom radu prikazali [Xiao i ost. \(2013\)](#).

#### ***Evrokod 2***

Evrokod 2-EC2 ([Eurocode 2, 2004](#)) razlikuje procedure proračuna nosivosti na smicanje u zavisnosti od toga da li je elementu potrebna proračunska armatura za smicanje ili ne. Ukoliko nije, proračunska vrednost nosivosti predstavlja doprinos betona i data je izrazom:

$$V_{R,c} = [C_{R,c} \cdot k \cdot (100 \cdot r / f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot s_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (35)$$

sa minimalnom vrednošću od:

$$V_{R,c} = (V_{\min} + k_1 \cdot s_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (36)$$

gde je:

$C_{R,c}$  – preporučena vrednost 0.18

$f_{ck}$  – čvrstoća betona pri pritisku [MPa]

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$$

d - statička visina [mm]

$$r = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0.02$$

$A_{sl}$  – površina zategnute armature koja se produžava za  $\geq (l_{bd}+d)$  (videti sliku 6.3 u EC 2)

$b_w$  - najmanja širina poprečnog preseka u zategnutoj zoni

$$s_{cp} = \frac{N_E}{A_c} \leq 0.2 \cdot f_{cd}$$

$N_E$  - aksijalna sila u poprečnom preseku od opterećenja

$A_c$  – površina poprečnog preseka betona [mm<sup>2</sup>]

$V_{R,c}$  u [N]

$k_1=0.15$

$$v_{\min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Proračun elemenata u kojima je potrebna armatura za smicanje zasniva se na modelu rešetke, pri čemu ugao nagiba pritisnutnih betonskih dijagonala uzima vrednosti:

$$1 \leq ctgq \leq 2.5 \quad (37)$$

Nosivost pri smicanju jednaka je manjoj od dve vrednosti koje zapravo predstavljaju nosivost poprečne armature (38) i nosivost pritisnute betonske dijagonale (39).

$$V_{R_s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{yw} \cdot ctgq \quad (38)$$

$$V_{R_{msx}} = \frac{a_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot n_1 \cdot f_{cd}}{(ctgq + tgq)} \quad (39)$$

gde je:

$A_{sw}$  – površina preseka armature za smicanje na rastojanju  $s$

$s$  – rastojanje uzengija

$f_{yw}$  – granica razvlačenja armature za smicanje

$v_1$  – koeficijent kojim se smanjuje čvrstoća betona zbog prslina od smicanja ( $v_1=0.6$  za  $f_{ck} \leq 60$  MPa)

$a_{cw}$  – koeficijent kojim se uzima u obzir stanje napona u pritisnutom pojasu ( $a_{cw}=1$  za neprednapregnute konstrukcije)

Izrazi (35)-(39) važe kada je odnos smičućeg raspona ( $a$ ) i statičke visine preseka ( $d$ ) veći od 2 ( $a/d \geq 2$ ), što odgovara dispoziciji sprovedenog eksperimenta ( $a/d=4$ ).

### ACI

Prema proceduri ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)), smičuća otpornost ( $V_n$ ) obezbeđuje se kroz doprinos betona ( $V_c$ ) i doprinos armature ( $V_s$ ), prema izrazu:

$$V_n = V_c + V_s \quad (40)$$

Gde je:

$$V_c = \lambda \cdot \frac{\sqrt{f_c'}}{6} \cdot b_w \cdot d \quad (41)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s} \quad (42)$$

Gde je:

$\lambda$ - faktor koji definiše vrstu betona u smislu zapreminske mase, za beton uobičajene zapreminske mase,  $\lambda=1$

$f_c'$ - čvrstoća betona pri pritisku merena na cilindru

$b_w$ - širina preseka

$d$ - statička visina preseka

$A_v$ - površina armature za smicanje na rastojanju  $s$

$f_{yt}$ - granica razvlačenja armature

$s$ - rastojanje između uzengija

### Model Code 2010

Prema novom Modelu propisa-MC ([fib, 2010](#)), smičuća nosivost preseka računa se prema izrazu :

$$V_R = V_{R,c} + V_{R,s} \quad (43)$$

Gde je  $V_{R,c}$  doprinos betona, a  $V_{R,s}$  doprinos armature nosivosti preseka na smicanje

$$V_{R,c} = k_v \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot z \quad (44)$$

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot z \cdot f_{yw} \cdot (\cot \alpha + \cot \beta) \cdot \sin \alpha \quad (45)$$

Model Code razlikuje tri nivoa proračuna po kompleksnosti. Prvi nivo primenjuje se na nivou koncept proračuna, za elemente sa i bez poprečne armature. Uzima se u obzir

doprinos betona i doprinos armature. Ugao nagiba pritisnutih dijagonala usvaja se kao  $\theta=36^\circ$ . Za elemente bez značajne normalne sile, kod kojih je  $f_{ck} \leq 64$  MPa,  $f_{yk} \leq 500$  MPa i beton spravljen sa agregatom čija je veličina zrna bar 10 mm, može se usvojiti sledeća vrednost koeficijenta  $k_v$ :

$$k_v = \frac{200}{1000 + 1.3 \cdot z} \leq 0.15, \text{ za } \rho_w = 0 \quad (46)$$

$$k_v = 0.15, \text{ za } r_w \geq 0.08 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_{yk} \quad (47)$$

Gde je:

$f_{ck}$  – čvrstoća betona pri pritisku merena na uzorku oblika kocke [MPa]

$b_w$  – širina preseka

$z$  – krak unutrašnjih sila

$A_{sw}$  – površina armature za smicanje na rastojanju  $s_w$

$s$  – rastojanje između uzengija

$f_{yw}$  – granica razvlačenja armature

$\theta$  – ugao nagiba pritisnute betonske dijagonale

$\alpha$  – ugao nagiba uzengija

$\rho_w$  – procenat armiranja uzengijama

Drugi nivo proračuna bazira se na modelu rešetke sa promenljivim nagibom pritisnutih dijagonala koji se usvaja u sledećim granicama:

$$20^\circ + 10000 \cdot \epsilon_x \leq q \leq 45^\circ \quad (48)$$

gde  $\epsilon_x$  predstavlja podužnu dilataciju na sredini visine preseka, koja se računa iz linearne raspodele dilatacija po visini preseka. Na ovom nivou proračuna, doprinos betona smičućej otpornosti se zanemaruje, tj.  $V_{R,c}=0$ .

Treći nivo proračuna predstavlja opšti model ponašanja greda ili ploča pri smicanju, primenjiv za proizvoljnu količinu poprečne armature. Kao i kod prvog nivoa proračuna, uzima se u obzir doprinos betona i doprinos armature smičućej nosivosti. Ugao nagiba pritisnutih dijagonala kod armiranobetonskih elemenata (neprednapregnutih) usvaja se kao:

$$q = 29^\circ + 7000 \cdot \epsilon_x \quad (49)$$

Dok se podužna dilatacija na sredini visine preseka računa iz izraza:

$$e_x = \frac{M_{Ed} / z + V_{Ed} + 0.5N_{Ed}}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \quad (50)$$

Gde je:

$M_E$  – moment savijanja u posmatranom preseku

$V_E$  – transversalna sila u posmatranom preseku

$N_E$  – normalna sila u posmatranom preseku

$E_s$  – modul elastičnosti čelika podužne armature

$A_s$  – površina podužne armature

$d_g$  – prečnik agregata.

$$k_v = \frac{0.4}{(1 + 1500 \cdot e_x)} \cdot \frac{1300}{(1000 + 0.7 \cdot k_{dg} \cdot z)}, \text{ za } \rho_w = 0 \quad (51)$$

$$k_v = \frac{0.4}{(1 + 1500 \cdot e_x)}, \text{ za } r_w \geq 0.08 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_{yk} \quad (52)$$

$$k_{dg} = \frac{48}{16 + d_g} \geq 1.15 \quad (53)$$

### BAB '87

Prema domaćem propisu BAB '87, nosivost preseka na smicanje bazira se na modelu rešetke i zavisi od nosivosti armature koja se računa se prema izrazu:

$$T_{u,u} = b \cdot z \cdot \frac{m \cdot a_u^{(1)}}{b \cdot e_u} \cdot (\cos a + \sin a \cdot \operatorname{ctg} q) \cdot s_v \quad (54)$$

Ukoliko je:  $T_{u,u} > 3 \cdot t_r \cdot b \cdot z \quad (55)$

onda je nosivost preseka jednaka nosivosti uzengija, tj.  $T_u = T_{u,u}$ . U suprotnom, nosivost preseka zavisi i od doprinosa betona i računa se prema izrazu:

$$T_u = \frac{2}{3} \cdot T_{u,u} + t_r \cdot b \cdot z \quad (56)$$

Korišćene oznake su:

$b$  – širina preseka

$z$  – krak unutrašnjih sila

$m$  – sečnost uzengija

$a_u^{(1)}$  – površina poprečnog preseka jedne uzengije

$e_u$  – razmak između uzengija

$\alpha$  – nagib uzengija prema horizontali

$\theta$  – usvojeni nagib pritisnute betonske dijagonale

$\tau_r$  – računska čvrstoća betona na smicanje

### CTC

Prema Kineskim propisima za RAC elemente konstrukcija, koji su trenutno jedini poznati, nosivost na smicanje ( $V_{cs}$ ) računa se prema izrazu:

$$V_{cs} = \frac{1.75}{l+1} \cdot f_t \cdot b \cdot h_0 + f_{yv} \cdot \frac{A_{sv}}{s} \cdot h_0 \quad (57)$$

gde je:

$\lambda$  – odnos smičućeg raspona i statičke visine preseka

$f_t$  – čvrstoća betona na aksijalno zatezanje

$b$  – širina preseka

$h_0$  – statička visina preseka

$f_{yv}$  – granica razvlačenja poprečne armature

$A_{sv}$  – površina poprečne armature u jednom preseku

$s$  – rastojanje između uzengija

Prema istom propisu, nosivost na savijanje ( $M_u$ ) računa se kao:

$$M_u = 0.95 \cdot f_y \cdot A_s \cdot \left( h_0 - \frac{f_y \cdot A_s}{2 \cdot 0.95 \cdot f_c \cdot b} \right) \quad (58)$$

gde je:

$f_y$  – granica razvlačenja zategnute podužne armature

$A_s$  – površina podužne zategnute armature

$h_0$  – statička visina preseka

$f_c$  – čvrstoća betona pri pritisku

$b$  – širina preseka



### 4.3 POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I RAČUNSKIH VELIČINA

#### 4.3.1. UVOD

U poglavlju [2.1.1](#) prikazane su smernice za proračun nosivosti armiranobetonskih greda opterećenih dominantno na savijanje ili smicanje koje su napravljene od klasičnog betona. Cilj analize predstavljene u ovom delu rada je provera da li se analitički izrazi iz različitih propisa (BAB'87, EC2, ACI) koji se odnose na sračunavanje nosivosti ili deformacija, mogu primeniti i na grede od betona sa različitim sadržajem agregata od recikliranog betona. Osnovne veličine koje će biti analizirane su:

- 1) momenat savijanja u trenutku formiranja prslina
- 2) granična nosivost na savijanje
- 3) ugib elemenata usled kratkotrajnog opterećenja
- 4) granična nosivost na smicanje

#### 4.3.2. MOMENT SAVIJANJA PRI FORMIRANJU PRSLINA KOD SAVIJANIH ELEMENATA

Moment savijanja u trenutku formiranja prslina značajan je parametar pri određivanju prslina i ugiba savijanih elemenata. Izvršeno je poređenje između vrednosti koje su zabeležene u trenutku vizuelnog uočavanja prvih prslina i računskih vrednosti. Računske vrednosti momenta savijanja pri pojavi prslina ( $M_{cr,rač}$ ) prema svakom od analiziranih propisa, dobijaju se iz izraza datih u poglavlju 4.2.1.3. Vrednosti čvrstoće pri zatezanju savijanjem određene su na dva načina – preračunavanjem sa merenih vrednosti čvrstoće pri zatezanju cepanjem ili preračunavanjem sa merenih vrednosti čvrstoće pri pritisku. Na ovaj način ostvarena su dva cilja: utvrđivanje odnosa stvarnog, eksperimentalnog ( $M_{cr,exp}$ ) i očekivanog, računskog momenta savijanja pri formiranju prslina ( $M_{cr,rač}$ ) kod betona sa i bez RC agregata i testiranje primene veza između osnovnih mehaničkih svojstava koje važe kod običnih betona na betonima sa recikliranim agregatom. Prema rezultatima iz *tabele 46*, postoje značajne razlike u eksperimentalnim vrednostima momenta savijanja pri pojavi prslina ( $M_{cr,exp}$ ) između različito armiranih greda. Očigledno je da sa porastom procenta armiranja značajno raste i moment savijanja pri pojavi prslina, što nije logično, očekivano i verovatno je posledica načina merenja. Naime, merenje, tačnije osmatranje pojave prvih prslina, vršeno je na kraju svake faze nanošenja opterećenja, a faze su za srednje i najjače

armirane grede bile relativno velike (20 kN i 30 kN). Ovakvo prikupljanje eksperimentalnih podataka ocenjeno je kao neadekvatno. Zato je kao drugi kriterijum za utvrđivanje veličine opterećenja pri pojavi prvih prslina usvojena sila pri promeni nagiba početnog dela dijagrama sila-pomeranje (P-Δ) kod ispitivanih greda, određena vizuelnom analizom P-Δ dijagrama.

#### 4.3.2.1 Proračun prema BAB'87

Otporni momenat idealizovanog preseka, potreban za proračun prema BAB'87, osim vrste betona (NAC, RAC50, RAC100) uzima u obzir i količinu podužne armature: Min.(0.28%), Sred.(1.46%), Maks.(2.54%), *tabela 52.*

*Tabela 52. Otporni momenat idealizovanog preseka kod greda u testu savijanja*

| Oznaka betona | Otporni momenat idealizovanog preseka [cm <sup>3</sup> ] |           |         |
|---------------|--|-----------|---------|
|               | μ=0.28%  | μ=1.46%), | μ=2.54% |
| NAC           | 3198   | 3780      | 3981    |
| RAC50         | 3200   | 3791      | 3993    |
| RAC100        | 3207   | 3817      | 4025    |

Čvrstoća pri zatezanju savijanjem sračunata preko čvrstoće pri pritisku, na osnovu izraza (25) i (26) označavaće se sa  $f_{bzs}^1$ , a za slučaj da je sračunata preko čvrstoće pri zatezanju cepanjem, tj. izraza (25) i (27) označavaće se sa  $f_{bzs}^2$ . Pri tome, izmerene srednje vrednosti čvrstoća smatraće se za karakteristične vrednosti. Sračunate i u eksperimentu zabeležene vrednosti momenta savijanja pri pojavi prslina ( $M_{cr,rač}$  i  $M_{cr,exp}$ ), kao i njihov odnos, prikazani su u *tabeli 53.*

*Tabela 53. Računske i eksperimentalne vrednosti momenta pri pojavi prslina prema BAB'87*

| <b>BAB'87</b>    | $f_{bzs}^1$ | $f_{bzs}^2$ | $M_{cr,rač}^1$ | $M_{cr,rač}^2$ | $M_{cr,exp}$ | $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$ | $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$ |
|------------------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|---------------------------|---------------------------|
| Ozn. Bet.        | [MPa]       | [MPa]       | [kNm]          | [kNm]          | [kNm]        |                           |                           |
| NAC-1            | 2.61        | 2.23        | 8.3            | 7.1            | 12.5         | 1.50                      | 1.75                      |
| NAC-2            | 2.61        | 2.23        | 9.9            | 8.4            | 12.5         | 1.27                      | 1.48                      |
| NAC-3            | 2.61        | 2.23        | 12.7           | 8.9            | 13.5         | 1.07                      | 1.52                      |
| RAC50-1          | 2.57        | 1.94        | 8.2            | 6.2            | 9            | 1.09                      | 1.45                      |
| RAC50-2          | 2.57        | 1.94        | 9.7            | 7.4            | 12.5         | 1.28                      | 1.70                      |
| RAC50-3          | 2.57        | 1.94        | 10.3           | 7.7            | 10           | 0.97                      | 1.29                      |
| RAC100-1         | 2.47        | 2.30        | 7.9            | 7.4            | 12           | 1.51                      | 1.63                      |
| RAC100-2         | 2.47        | 2.30        | 9.4            | 8.8            | 9            | 0.95                      | 1.03                      |
| RAC100-3         | 2.47        | 2.30        | 10.0           | 9.3            | 11           | 1.10                      | 1.19                      |
| Srednja vrednost |             |             |                |                | NAC          | 1.28                      | 1.59                      |
|                  |             |             |                |                | RAC          | 1.15                      | 1.38                      |

Prosečne vrednosti odnosa  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$  za NAC i RAC uzorke (bez obzira na količinu RC agregata), iznose 1.28 i 1.15 respektivno, dok za odnos  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$  prosečne vrednosti iznose 1.59 i 1.38, respektivno. Primetno je da su u oba slučaja predikcije za RAC grede manje konzervativne, ali ipak sa izvesnom rezervom, tj. predviđa se pojava prslina pri nižem opterećenju nego što se dogodilo u eksperimentu. Očekivano, odnos  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}$  nije u direktnoj vezi sa procentom armiranja greda. Računska vrednost momenta savijanja menja se u skladu sa promenom idealizovanog otpornog momenta preseka, što je za oko 25% (tabela 52), dok su među eksperimentalnim vrednostima razlike relativno male i nisu posledica količine armature u gredama. Nešto bolja procena veličine momenta savijanja pri pojavi prslina dobija se na osnovu čvrstoće pri zatezanju savijanjem koja je sračunata preko čvrstoće pri pritisku ( $f_{bzs}^1$ ). Standardne devijacije odnosa  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}$  praktično ne zavise od vrste betona i načina određivanja  $M_{cr,rač}$  i iznose 0.21 i 0.22 kod NAC i RAC greda respektivno za  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$ , naspram 0.26 i 0.15 za odnos  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$ , tabela 53.

#### 4.3.2.2 Proračun prema EC2

Rezultati analize prema smernicama za primenu EC2 ([European Concrete Platform ASBL, 2008](#)), prikazani su u tabeli 54.

*Tabela 54. Računske i eksperimentalne vrednosti momenta pri pojavi prslina prema EC2*

| EC2<br>Ozn. Bet. | $f_{ctm,fl}^1$<br>[MPa] | $f_{ctm,fl}^2$<br>[MPa] | $M_{cr,rač}^1$<br>[kNm] | $M_{cr,rač}^2$<br>[kNm] | $M_{cr,exp}$<br>[kNm] | $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$ | $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$ |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| NAC-1            | 4.36                    | 3.63                    | 13.1                    | 10.9                    | 12.5                  | 0.96                      | 1.15                      |
| NAC-2            | 4.36                    | 3.63                    | 13.1                    | 10.9                    | 12.5                  | 0.96                      | 1.15                      |
| NAC-3            | 4.36                    | 3.63                    | 13.1                    | 10.9                    | 13.5                  | 1.03                      | 1.24                      |
| RAC50-1          | 4.30                    | 3.16                    | 12.9                    | 9.5                     | 9                     | 0.70                      | 0.95                      |
| RAC50-2          | 4.30                    | 3.16                    | 12.9                    | 9.5                     | 12.5                  | 0.97                      | 1.32                      |
| RAC50-3          | 4.30                    | 3.16                    | 12.9                    | 9.5                     | 10                    | 0.78                      | 1.06                      |
| RAC100-1         | 4.14                    | 3.74                    | 12.4                    | 11.2                    | 12                    | 0.97                      | 1.07                      |
| RAC100-2         | 4.14                    | 3.74                    | 12.4                    | 11.2                    | 9                     | 0.72                      | 0.80                      |
| RAC100-3         | 4.14                    | 3.74                    | 12.4                    | 11.2                    | 11                    | 0.89                      | 0.98                      |
| Srednja vrednost |                         |                         |                         |                         | NAC                   | 0.98                      | 1.18                      |
|                  |                         |                         |                         |                         | RAC                   | 0.84                      | 1.03                      |

Čvrstoća pri zatezanju savijanjem sračunata na osnovu izraza (29) i (30) označavaće se sa  $f_{ctm,fl}^1$ , a za slučaj da je sračunata preko izraza (29) i (31) označavaće se sa  $f_{ctm,fl}^2$ . Prosečne vrednosti odnosa  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$  za NAC i RAC uzorke (bez obzira na količinu RC agregata), iznose 0.98 i 0.84 respektivno, dok za odnos  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$  prosečne

vrednosti iznose 1.18 i 1.03, respektivno. Očigledno je da EC2 daje sasvim korektnu predikciju trenutka formiranja prslina od savijanja kod NAC greda, ukoliko se proračun bazira na čvrstoći pri pritisku. S druge strane, prosečan odnos  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$  za RAC grede iznosi 0.84, što znači da EC2 precenjuje čvrstoću pri zatezanju RAC betona, tj. pojava prslina kod RAC greda realno se dešava pri nižem opterećenju od očekivanog (računskog). Ukoliko je proračun momenta pojave prslina kod RAC greda baziran na čvrstoći pri zatezanju cepanjem, dobijaju se bolje predikcije (u smislu da su na strani sigurnosti) sa prosečnom vrednošću odnosa  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$  od 1.03.

#### 4.3.2.3 Proračun prema ACI

Rezultati analize računskih momenata savijanja pri pojavi prsline prema ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)) i njihovog odnosa sa eksperimentalnim podacima prikazani su u tabeli 55.

*Tabela 55. Računske i eksperimentalne vrednosti momenta pri pojavi prslina prema ACI*

| ACI<br>Ozn. Bet. | $f_r^1$<br>[MPa] | $f_r^2$<br>[MPa] | $M_{cr,rač}^1$<br>[kNm] | $M_{cr,rač}^2$<br>[kNm] | $M_{cr,exp}$<br>[kNm] | $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$ | $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$ |
|------------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| NAC-1            | 3.79             | 3.44             | 11.4                    | 10.3                    | 12.5                  | 1.10                      | 1.21                      |
| NAC-2            | 3.79             | 3.44             | 11.4                    | 10.3                    | 12.5                  | 1.10                      | 1.21                      |
| NAC-3            | 3.79             | 3.44             | 11.4                    | 10.3                    | 13.5                  | 1.19                      | 1.31                      |
| RAC50-1          | 3.75             | 3.00             | 11.3                    | 9.0                     | 9                     | 0.80                      | 1.00                      |
| RAC50-2          | 3.75             | 3.00             | 11.3                    | 9.0                     | 12.5                  | 1.11                      | 1.39                      |
| RAC50-3          | 3.75             | 3.00             | 11.3                    | 9.0                     | 10                    | 0.89                      | 1.11                      |
| RAC100-1         | 3.65             | 3.55             | 10.9                    | 10.7                    | 12                    | 1.10                      | 1.13                      |
| RAC100-2         | 3.65             | 3.55             | 10.9                    | 10.7                    | 9                     | 0.82                      | 0.84                      |
| RAC100-3         | 3.65             | 3.55             | 10.9                    | 10.7                    | 11                    | 1.01                      | 1.03                      |
| Srednja vrednost |                  |                  |                         |                         | NAC                   | 1.13                      | 1.24                      |
|                  |                  |                  |                         |                         | RAC                   | 0.95                      | 1.08                      |

Imajući u vidu izraze (33) i (34),  $f_r$  se može sračunati na osnovu čvrstoće pri pritisku, što će se u daljem označavati sa  $f_r^1$ , i na osnovu čvrstoće pri zatezanju cepanjem, što će se na dalje označavati sa  $f_r^2$ . Dakle, prosečne vrednosti odnosa  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$  za NAC i RAC uzorke (bez obzira na količinu RC agregata), iznose 1.13 i 0.95 respektivno, dok za odnos  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$  prosečne vrednosti iznose 1.24 i 1.08 respektivno. Kao i kod prethodna dva analizirana propisa, vrednosti odnosa  $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}$  manje su kod RAC nego kod NAC greda. Računske vrednosti momenta savijanja pri pojavi prsline bliže su eksperimentalnim ukoliko se baziraju na čvrstoći pri pritisku, ali takva predikcija kod RAC greda daje nekonzervativne vrednosti.

#### 4.3.3. GRANIČNA NOSIVOST NA SAVIJANJE

Granični moment savijanja ili moment nosivosti elemenata dominantno izloženih savijanju zavisi od veličine preseka, procenta armiranja i vrste primenjene armature, kao i od čvrstoće betona pri pritisku, odnosno dijagrama napon-dilatacija za primenjeni beton. Ako se porede grede istog poprečnog preseka, sa istom količinom i vrstom armature, a postignuta je ista čvrstoća pri pritisku, jasno je da će realna nosivost dominantno zavistiti od naponsko-deformacijske veze betona, a u računskom smislu, od usvojenog modela za beton čime će se definisati sila u pritisnutom betonu i krak unutrašnjih sila. U tom smislu, izvršeno je poređenje računskih i eksperimentalnih vrednosti graničnih momenata savijanja kod svih greda. Računske vrednosti dobijene su primenom različitih propisa – BAB'87 (Beton i armirani beton prema BAB '87-Priručnik, 1995), EC2 ([Eurocode 2, 2004](#)) i ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)), kao i na osnovu programa RESPONSE 2000 ([Bentz, 2000](#)) sa definisanim ponašanjem betona i čelika, koji koristi metodu numeričke integracije. Osim ovih propisa za klasične, NAC grede, testiran je i izraz za granični moment savijanja dat u Kineskim propisima za elemente konstrukcije od recikliranog betona (CTC) ([Xiao i ost. 2013](#)). Za granični eksperimentalni moment savijanja usvojen je moment savijanja sračunat na osnovu maksimalne zabeležene sile na presi pri ispitivanju. Doprinis sopstvene težine grede tom prilikom je zanemaren. Za proračun prema BAB87 i EC2 usvojeni su dijagrami napon-dilatacija u betonu u obliku parabola-prava, sa eksperimentalno utvrđenim čvrstoćama pri pritisku i karakterističnim vrednostima dilatacija definisanim u ovim propisima. Za proračun prema ACI usvojen je blok-dijagram napona pritiska u betonu ([ACI Committee 318, 2008](#)). Za definisanje krive napon-dilatacija u programu RESPONSE 2000 korišćen je model koji su predložili Popovics, Thorenfeldt i Collins ([Collins&Mitchell, 1991](#)):

$$f_c = f_c' \cdot \frac{n \cdot (e_{cf} / e_c')}{n - 1 + (e_{cf} / e_c')^{nk}} \quad (59)$$

gde je:

$f_c'$  – čvrstoća pri pritisku [MPa], izmerena na cilindru ispitanom u istoj starosti i sa istom negom kao i greda (*tabela 44*)

$\varepsilon_c'$  – dilatacija pri naponu  $f_c'$  [%],

$$e_c' = \frac{f_c'}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1} \quad (60)$$

$n$  – faktor podešavanja krivine (engl. curve fitting factor),  $n = E_c / (E_c - E_c')$ , tj.

$E_c$  – tangentni modul elastičnosti [MPa],

$$E_c = w_c^{1.5} \cdot 0.043 \cdot \sqrt{f_c'} \quad (61)$$

$w_c$  – zapreminska masa betona [ $\text{kg/m}^3$ ] (tabela 43)

$E_c' = f_c' / \epsilon_c'$

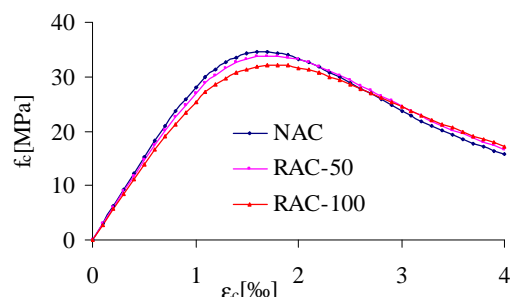
$k$  – faktor smanjenja napona nakon dostizanja čvrstoće  $f_c'$ ,

$$k = 0.67 + \frac{f_c'}{62} \quad (62)$$

Četiri parametra neophodna za definisanje ovog modela ( $f_c'$ ,  $\epsilon_c'$ ,  $E_c$ ,  $k$ ) mogu se odrediti iz eksperimentom određenog dijagrama napon-dilatacija za svaki beton. Međutim, s obzirom da takvi dijagrami nisu formirani, tri parametra ( $\epsilon_c'$ ,  $E_c$ ,  $k$ ) sračunata su na osnovu eksperimentalnih podataka- čvrstoće pri pritisku ( $f_c'$ ), zapreminske mase ( $w_c$ ) i analitičkih izraza (60), (61) i (62). U tabeli 56 su prikazane sračunate vrednosti parametara u opisanom modelu, a na slici 107 njima definisani naponsko-deformacijski dijagrami NAC, RAC50 i RAC100 betona.

Tabela 56. Vrednosti parametara u modelu betona Popovics, Thorenfeldt, Collins (Collins&Mitchell, 1991)

| Oznaka<br>Betona | $f_c'$<br>[MPa] | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $E_c$<br>[MPa] | $E_c'$<br>[MPa] | $n$   | $\epsilon_c'$<br>[‰] | $k$   |
|------------------|-----------------|----------------------------------|----------------|-----------------|-------|----------------------|-------|
| NAC              | 37.41           | 2408                             | 31079          | 20722           | 3.001 | 1.81                 | 1.273 |
| RAC50            | 36.59           | 2350                             | 29632          | 19596           | 2.953 | 1.87                 | 1.260 |
| RAC100           | 34.57           | 2315                             | 28161          | 18222           | 2.833 | 1.90                 | 1.228 |



Slika 107. Naponsko-deformacijski modeli betona prema (Collins&Mitchell, 1991)

Sumarni rezultati ispitivanja odnosa graničnih momenata savijanja određenih analitički, numeričkom integracijom i eksperimentalno, prikazani su u tabeli 57.

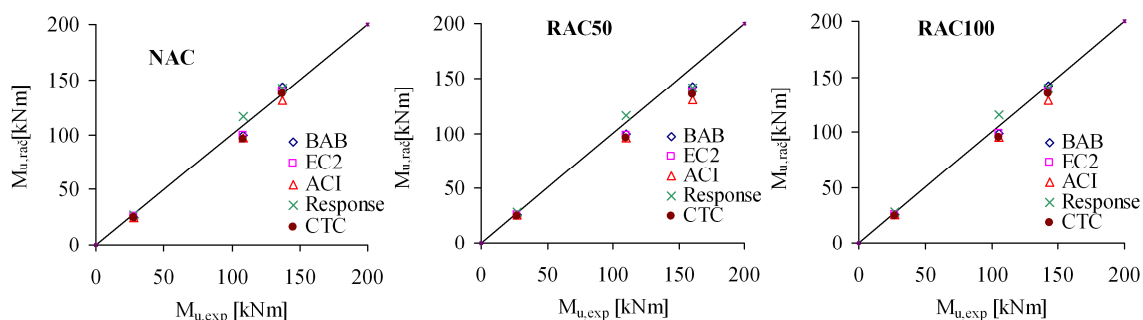
Tabela 57. Računske i eksperimentalne vrednosti graničnog momenta savijanja

| Ozn. Bet.        | BAB   | EC2   | ACI   | R*    | CTC   | EXP   | $M_{u,exp}/M_{u,rač}$ |      |      |      |      |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|------|------|------|------|
|                  | $M_u$ | $M_u$ | $M_u$ | $M_u$ | $M_u$ | $M_u$ | BAB                   | EC2  | ACI  | R*   | CTC  |
|                  | [kNm] | [kNm] | [kNm] | [kNm] | [kNm] | [kNm] |                       |      |      |      |      |
| NAC-1            | 25.0  | 25.7  | 25.1  | 27.5  | 24.0  | 28.4  | 1.14                  | 1.10 | 1.13 | 1.03 | 1.18 |
| NAC-2            | 99.9  | 98.9  | 96.4  | 117.0 | 95.8  | 108.6 | 1.09                  | 1.10 | 1.13 | 0.93 | 1.13 |
| NAC-3            | 144.0 | 139.3 | 131.6 | 142.6 | 136.8 | 137.6 | 0.96                  | 0.99 | 1.05 | 0.96 | 1.01 |
| RAC50-1          | 24.9  | 25.7  | 25.1  | 27.5  | 24.0  | 27.0  | 1.08                  | 1.05 | 1.08 | 0.98 | 1.12 |
| RAC50-2          | 99.7  | 98.7  | 96.1  | 116.6 | 95.6  | 110.6 | 1.11                  | 1.12 | 1.15 | 0.95 | 1.16 |
| RAC50-3          | 143.5 | 138.7 | 130.7 | 142.1 | 136.3 | 160.4 | 1.12                  | 1.16 | 1.23 | 1.13 | 1.18 |
| RAC100-1         | 24.9  | 25.6  | 25.0  | 27.4  | 24.0  | 26.8  | 1.08                  | 1.05 | 1.07 | 0.98 | 1.12 |
| RAC100-2         | 99.3  | 98.9  | 95.3  | 115.9 | 95.1  | 105.4 | 1.06                  | 1.07 | 1.11 | 0.91 | 1.11 |
| RAC100-3         | 142.1 | 137.1 | 128.4 | 139.2 | 134.9 | 142.6 | 1.00                  | 1.04 | 1.11 | 1.02 | 1.06 |
| Srednja vrednost |       |       |       |       |       | NAC   | 1.06                  | 1.06 | 1.10 | 0.97 | 1.11 |
|                  |       |       |       |       |       | RAC   | 1.08                  | 1.08 | 1.12 | 1.00 | 1.12 |
| Standardna dev.  |       |       |       |       |       | NAC   | 0.09                  | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.09 |
|                  |       |       |       |       |       | RAC   | 0.04                  | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.04 |

Ako se uporede računске vrednosti graničnih momenata savijanja greda od različitog betona, sa istom količinom armature, razlike su male – do 1%, osim za gredu RAC100-3 gde su razlike do 2.4%. Ovo je očekivano, s obzirom da su primenjeni dijagrami napon-dilatacija za betone sa različitim sadržajem RC agregata isti po obliku, uz relativno male razlike u vrednosti maksimalnog napona (čvrstoće pri pritisku). Iz relativno malih razlika srednjih vrednosti odnosa  $M_{u,rač}/M_{u,exp}$  za NAC i RAC grede (do 2%) može se zaključiti da se postojeći analitički izrazi za NAC mogu primeniti i za RAC grede.

Ako se uporede srednje vrednosti odnosa  $M_{u,rač}/M_{u,exp}$  za različite propise, jasno je da sva tri propisa daju konzervativne vrednosti granične nosivosti na savijanje, a da su najkonzervativniji propisi ACI i CTC. Dakle, prema propisu koji važi za RAC konstruktivne elemente, granični momenti savijanja su prosečno za 12% manji od stvarnih. Štaviše, manje su konzervativni kada se primene na NAC grede, razlika je 11%. Ipak, vrlo važna činjenica je da je upravo kod propisa CTC standardna devijacija najmanja, što govori o pouzdanosti ove predikcije. Analiza iz Respons-a pokazala je najbolju korelaciju računskih i eksperimentalnih vrednosti graničnih momenata savijanja, ali za većinu greda nezavisno od vrste betona, sa nekonzervativne strane, tabela 57. Za eventualnu širu primenu ovog tipa softvera, dakle, važno je što tačnije definisati modele betona, kako se ne bi precenili momenti nosivosti RAC greda na

savijanje. Zaključak ove analize je da se prilikom proračuna graničnog momenta savijanja RAC greda mogu primeniti postojeći propisi za NAC elemente konstrukcija. U prilog tome ide činjenica da je greška koja se tom prilikom čini do 10% i da je u rangu greške koju pravi jedini propis za proračun RAC elemenata konstrukcija (CTC). Grafička prezentacija rezultata iz *tabele 57* prikazana je na *slici 108*.



Slika 108. Odnos računskih i eksperimentalnih vrednosti graničnih momenata savijanja za NAC, RAC50 i RAC100 grede

#### 4.3.4. DEFORMACIJE POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM

Analiza deformacija, tj. ugiba ispitivanih greda sprovedena je za eksploatacioni nivo opterećenja, koji je pretpostavljen u iznosu od oko 40% graničnog opterećenja svake ispitane grede. S obzirom da nije izvršeno merenje ugiba od sopstvene težine nosača (koji je relativno mali u odnosu na ugib pri eksploatacionom opterećenju), on je pri proračunu ugiba zanemaren kako bi bilo omogućeno poređenje računskih i merenih vrednosti ugiba. Proračun ugiba sproveden je približnim postupcima, prema algoritmima koje nude domaći propis BAB87 ([Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1995](#)), EC2 ([Eurocode 2, 2004](#)) i ACI ([ACI Committee 318, 2008](#)), a koji su prikazani u poglavlju [4.2.1.2](#). U svim proračunskim modelima korišćene su eksperimentalno utvrđene karakteristike betona - modul elastičnosti, čvrstoća pri zatezanju cepanjem i stvarne geometrijske karakteristike armiranobetonskog preseka. Moment savijanja pri pojavi prsline u svakom od tri postupka proračuna sračunat je na osnovu čvrstoće pri zatezanju cepanjem, s obzirom da je ranije pokazano da se tako prema sva tri propisa dobijaju vrednosti koje su na strani sigurnosti, bez obzira da li se radi o NAC ili RAC betonima. Analizom odnosa računskih i eksperimentalno utvrđenih ugiba pri eksploatacionom opterećenju mogu se uočiti dve grupe greda, *tabela 58*. Jednu grupu čine grede sa minimalnim procentom armiranja, a drugu grupu čine grede sa "srednjim" i „maksimalnim“ procentom armiranja. U okviru prve grupe, dakle



minimalno armiranih greda, odnos  $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$  varira u vrlo širokom opsegu od 0.34 do 1.99, u zavisnosti od vrste betona i propisa. To je posledica specifičnosti slučaja u kome je vrednost eksploatacionog opterećenja za koje se računaju ugibi ( $2P_s=20$  kN) vrlo bliska izmerenoj sili pri formiranju prslina ( $2P_{cr}=20$  kN i  $2P_{cr}=25$  kN, vidi tabelu 46) i vrlo bliska računskim vrednostima momenata savijanja pri formiranju prslina (tabele 53, 54 i 55).

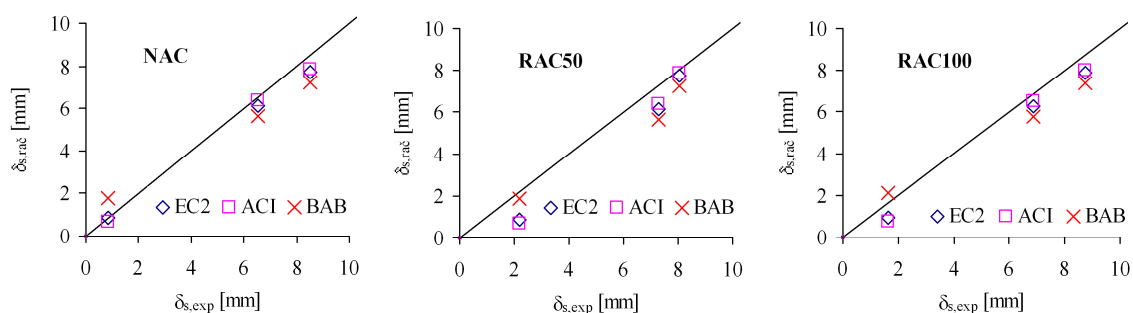
*Tabela 58. Računske i eksperimentalne vrednosti ugiba pri eksploatacionom opterećenju*

| Oznaka grede     | BAB                | EC2                | ACI                | EXP                | $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$ |      |      |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|------|------|
|                  | $\delta_s$<br>[mm] | $\delta_s$<br>[mm] | $\delta_s$<br>[mm] | $\delta_s$<br>[mm] | BAB                             | EC2  | ACI  |
| NAC-1            | 2.48               | 0.88               | 0.86               | 0.84               | 0.34                            | 0.96 | 0.98 |
| NAC-2            | 5.75               | 6.25               | 6.42               | 6.55               | 1.14                            | 1.05 | 1.02 |
| NAC-3            | 7.34               | 7.77               | 7.87               | 8.49               | 1.16                            | 1.09 | 1.08 |
| RAC50-1          | 3.01               | 1.46               | 1.24               | 2.20               | 0.73                            | 1.50 | 1.78 |
| RAC50-2          | 5.88               | 6.35               | 6.49               | 7.27               | 1.24                            | 1.14 | 1.12 |
| RAC50-3          | 7.45               | 7.84               | 7.92               | 8.04               | 1.08                            | 1.02 | 1.01 |
| RAC100-1         | 2.40               | 0.92               | 0.83               | 1.65               | 0.69                            | 1.79 | 1.99 |
| RAC100-2         | 5.80               | 6.32               | 6.50               | 6.89               | 1.19                            | 1.09 | 1.06 |
| RAC100-3         | 7.44               | 7.89               | 8.00               | 8.73               | 1.17                            | 1.11 | 1.09 |
| Srednja vrednost |                    |                    |                    | NAC                | 0.88                            | 1.03 | 1.03 |
|                  |                    |                    |                    | RAC                | 1.02                            | 1.28 | 1.34 |

Kod grede NAC-1, pri vrednosti opterećenja od  $2P_s=20$  kN još nije došlo do formiranja prslina pa otuda mala vrednost ugiba koja se relativno dobro slaže sa predikcijama EC2 i ACI (0.96 i 0.98, respektivno), kod kojih je računski moment pri pojavi prslina veći od momenta savijanja pri eksploatacionom opterećenju,  $M_{cr,rač} > M_s$ . S druge strane, primenjujući BAB87 dobija se da je  $M_{cr,rač} < M_s$ , a rezultat su značajno veći računski ugibi i odnos  $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$  od svega 0.34. Kod greda RAC50-1 i RAC100-1, pri eksploatacionom opterećenju već su bile prisutne prsline što je rezultovalo većim ugibima nego kod NAC-1. To je relativno dobro pokrio BAB prema kome i kod ovih greda važi  $M_{cr,rač} < M_s$  što se vidi kroz odnose  $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$  od 0.73 i 0.69. Značajno lošiju predikciju, tj. relativno velike odnose  $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$  u tom slučaju daju EC2 i ACI jer je kod njih računski moment pojave prslina veći od momenta savijanja pri eksploatacionom opterećenju, pa su računski ugibi relativno mali. Teško je, dakle, zbog

specifičnosti ovog slučaja diskutovati o mogućnosti primene propisa za proračun ugiba NAC greda na RAC grede.

U okviru druge grupe greda, srednje i maksimalno armiranih, moment savijanja pri pojavi prsline je značajno manji od momenta pri eksploatacionom opterećenju. Samim tim, uticaj razlika u proračunskim momentima savijanja pri pojavi prsline prema raznim propisima (koje su u okviru 5 kNm), je mali. Razlike u odnosima  $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$  kod NAC i RAC greda iz ove grupe bile su relativno male, od 6% do 10% kada se uporede RAC50 i NAC grede, odnosno od 1% do 4% pri poređenju RAC100 i NAC greda, bez obzira na primenjeni propis. Dakle, propisi slično “greše“, tj. imaju sličnu tačnost u predikciji ugiba i NAC i RAC greda sa “srednjom” i “maksimalnom” količinom armature. Grafička prezentacija rezultata iz *tabele 58* data je na *slici 109*.



Slika 109. Odnos računskih i eksperimentalnih vrednosti ugiba za NAC, RAC50 i RAC100 grede

Ako se međusobno uporede predikcije propisa za grede iz druge grupe, uočljivo je da kod svih greda, bez obzira na vrstu betona, najbolje rezultate (računske vrednosti ugiba najbliže merenim) daje ACI, a najlošije BAB. Ipak, sprovedena analiza ima za cilj prvenstveno poređenje odnosa  $\delta_{s,rač}/\delta_{s,exp}$  kod NAC i RAC greda, kao i relativno poređenje propisa, a ne da pokaže da li je i koliko neki propis konzervativan ili ne. Tako posmatrano, može se reći da su sva tri propisa primenljiva na proračun deformacija RAC greda sa “srednjim” i “maksimalnim” procentnom armature bez obzira na količinu recikliranog agregata. Ipak, prirodno se nameće pitanje: zašto se računске vrednosti ugiba greda druge grupe razlikuju od merenih ugiba i to prosečno za 16%, 8% i 6% kod primene BAB, EC2 i ACI, respektivno? Kako rezultati iz *tabele 59* pokazuju, razliku čine efekti skupljanja betona. Iako se uobičajeno skupljanje betona uzima u obzir pri proračunu dugotrajnih deformacija (zajedno sa tečenjem betona), očigledno je da o ovom efektu treba voditi računa i kod ocene ugiba grednih nosača pri kratkotrajnom

opterećenju. Prosečne vrednosti odnosa  $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$  kod svih greda iz *tabele 59* bez obzira na vrstu betona, iznose 1.0, 1.0 i 1.11 za propise ACI, EC2 i BAB, respektivno. Očigledno je da uzimanje efekata ranog skupljanja samo prema BAB nije rezultovalo bitnom približavanju računskih i merenih vrednosti. To se delom može objasniti činjenicom da dilatacija skupljanja, za usvojeni period između kraja nege i trenutka ispitivanja od 14 dana, iznosi 0.067‰ prema BAB, što je skoro upola manje nego prema EC2 ili ACI (0.122‰).

*Tabela 59. Računske i eksperimentalne vrednosti ugiba pri eksploatacionom opterećenju uzimajući u obzir i efekte skupljanja*

| Oznaka grede | BAB                | EC2                | ACI                | EXP                | $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$ |      |      |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|------|------|
|              | $\delta_s$<br>[mm] | $\delta_s$<br>[mm] | $\delta_s$<br>[mm] | $\delta_s$<br>[mm] | BAB                             | EC2  | ACI  |
| NAC-2        | 6.01               | 6.87               | 6.80               | 6.55               | 1.09                            | 0.95 | 0.96 |
| NAC-3        | 7.64               | 8.48               | 8.37               | 8.49               | 1.11                            | 1.00 | 1.01 |
| RAC50-2      | 6.14               | 6.98               | 6.91               | 7.27               | 1.18                            | 1.04 | 1.05 |
| RAC50-3      | 7.76               | 8.55               | 8.45               | 8.04               | 1.04                            | 0.94 | 0.95 |
| RAC100-2     | 6.06               | 6.93               | 6.87               | 6.89               | 1.14                            | 0.99 | 1.00 |
| RAC100-3     | 7.75               | 8.59               | 8.49               | 8.73               | 1.13                            | 1.02 | 1.03 |

#### 4.3.5. GRANIČNA NOSIVOST NA SMICANJE

Iako je praktična primena elemenata konstrukcije koji nisu armirani poprečnom armaturom relativno ograničena, obim eksperimentalnog istraživanja podrazumevao je izradu 3 takve grede kako bi se analizirao uticaj različitih vrsta betona (NAC, RAC50, RAC100) na smičuću nosivost greda. Propisi generalno “priznaju” doprinos betona u prijemu smičućih sila, iako je to na razne načine sprovedeno u različitim propisima (poglavlje [4.2.2.2.](#)). U *tabeli 60* su prikazane eksperimentalne i proračunske vrednosti graničnih sila loma grednih nosača (i njihovi odnosi), koji su opterećeni kombinacijom momenta savijanja i transverzalnih sila, pri čemu je projektovana nosivost na savijanje svih greda bila bar 1.5 puta veća od nosivosti na smicanje. Računske vrednosti dobijene su primenom odredbi iz propisa (BAB, EC2, ACI), propisa za RAC elemente konstrukcije (CTC), modela propisa (MC), ili programom Response 2000 koji je baziran na modifikovanoj teoriji polja pritiska (MCFT). Proračun prema MC sproveden je prema izloženom prvom nivou proračuna, koji osim doprinosa uzengija podrazumeva i doprinos betona smičućoj nosivosti. Ako se analiziraju samo grede bez poprečne armature, najbolje predikcije, tj. proračunske vrednosti granične nosivosti najbliže

eksperimentalnim, dali su EC2 i Response. Ovo važi i za NAC i za RAC grede, nezavisno od količine RCA. Prema njima, proračunske vrednosti su od 6% do 31% veće od eksperimentalnih. Svi drugi proračuni daju značajno konzervativnije predikcije, sa proračunskim vrednostima koje su 2 do 3 puta veće od realnih.

*Tabela 60. Računske i eksperimentalne vrednosti graničnih sila smicanja*

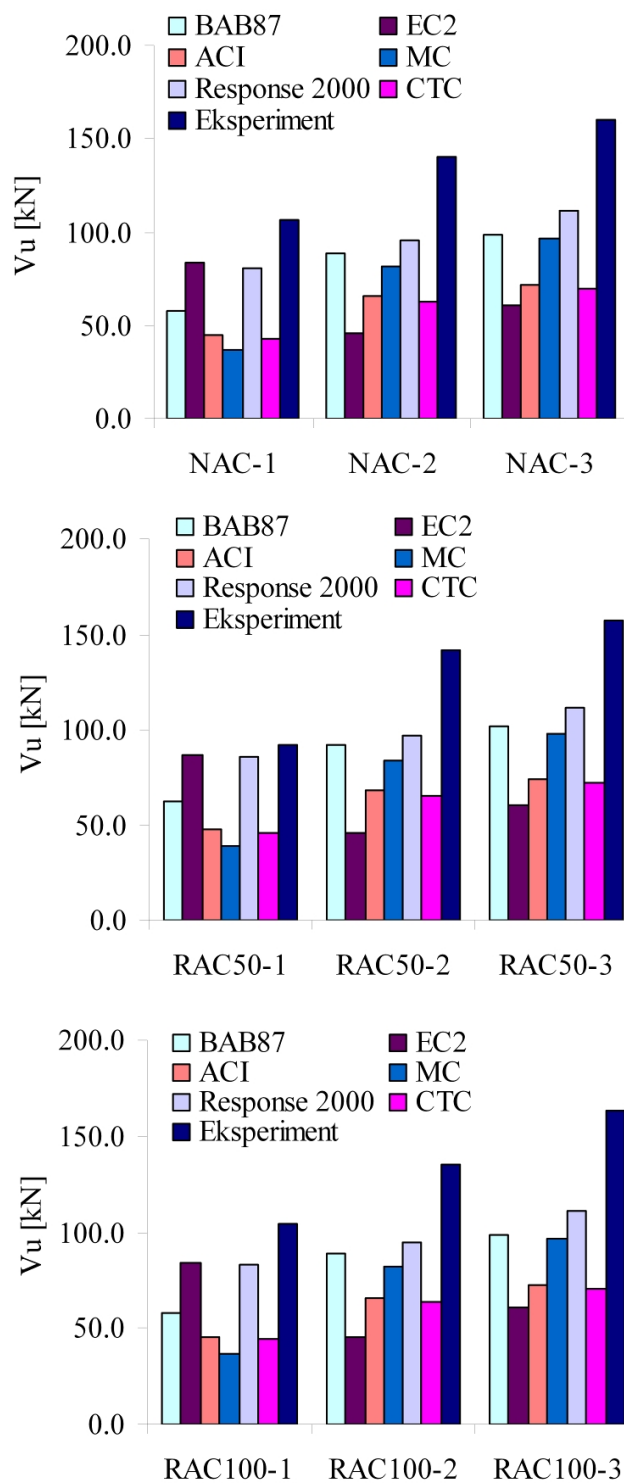
| Oznaka grede          | BAB           | EC2           | ACI           | MC            | R*            | CTC           | EXP           | $V_{u,exp}/V_{u,rač}$ |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
|                       | $V_u$<br>[kN] | $V_u$<br>[kN] | $V_u$<br>[kN] | $V_u$<br>[kN] | $V_u$<br>[kN] | $V_u$<br>[kN] | $V_u$<br>[kN] | BAB                   | EC2  | ACI  | MC   | R*   | CTC  |      |
| NAC-1                 | 57.9          | 83.5          | 45.1          | 36.5          | 80.8          | 42.7          | 106.3         | 1.84                  | 1.27 | 2.36 | 2.91 | 1.31 | 2.49 |      |
| NAC-2                 | 88.1          | 45.3          | 65.2          | 81.4          | 95.8          | 62.7          | 140.7         | 1.60                  | 3.10 | 2.16 | 1.73 | 1.47 | 2.24 |      |
| NAC-3                 | 98.2          | 60.4          | 71.9          | 96.4          | 111.2         | 69.3          | 159.9         | 1.63                  | 2.65 | 2.22 | 1.66 | 1.44 | 2.31 |      |
| RAC50-1               | 62.0          | 86.4          | 47.4          | 38.4          | 85.7          | 45.6          | 91.8          | 1.48                  | 1.06 | 1.93 | 2.39 | 1.07 | 2.01 |      |
| RAC50-2               | 92.2          | 45.3          | 67.5          | 83.3          | 97.5          | 65.5          | 142.0         | 1.54                  | 3.13 | 2.10 | 1.70 | 1.46 | 2.17 |      |
| RAC50-3               | 102.2         | 60.4          | 74.2          | 98.3          | 111.4         | 72.2          | 156.9         | 1.53                  | 2.60 | 2.11 | 1.60 | 1.41 | 2.17 |      |
| RAC100-1              | 58.5          | 83.9          | 45.4          | 36.8          | 82.7          | 44.1          | 104.8         | 1.79                  | 1.25 | 2.31 | 2.85 | 1.27 | 2.37 |      |
| RAC100-2              | 88.6          | 45.3          | 65.5          | 81.7          | 95.0          | 64.1          | 135.0         | 1.52                  | 2.98 | 2.06 | 1.65 | 1.42 | 2.11 |      |
| RAC100-3              | 98.7          | 60.4          | 72.2          | 96.7          | 111.5         | 70.7          | 163.4         | 1.66                  | 2.71 | 2.26 | 1.69 | 1.47 | 2.31 |      |
| Srednja vrednost      |               |               |               |               |               |               |               | NAC                   | 1.69 | 2.34 | 2.25 | 2.10 | 1.41 | 2.35 |
|                       |               |               |               |               |               |               |               | RAC                   | 1.59 | 2.29 | 2.13 | 1.98 | 1.35 | 2.19 |
| Standardna devijacija |               |               |               |               |               |               |               | NAC                   | 0.13 | 0.95 | 0.10 | 0.70 | 0.08 | 0.13 |
|                       |               |               |               |               |               |               |               | RAC                   | 0.12 | 0.90 | 0.14 | 0.52 | 0.15 | 0.13 |

\* Response 2000

Kod svih greda sa uzengijama, vrednosti koje su najbliže eksperimentalno utvrđenim dobijaju se na osnovu programa Response, pravilnika BAB i Modela Propisa. Dok je za Response, koji je baziran na “realnom” ponašanju isprskalog betona u zoni dejstva poprečnih sila i “realnom” naponsko-deformacijskom dijagramu armaturnog čelika, očekivano da daje dobru predikciju, malo iznenađenje predstavlja dobra korelacija merenih i računskih vrednosti dobijena prema algoritmu pravilnika BAB. Ovaj relativno jednostavan model dao je bolje rezultate kod svih greda od novijih pravilnika poput EC2. Evrokod 2 je kod armiranih dao izuzetno konzervativne predikcije koje su bile od 2.5 do 3 puta manje od realnih. Ovo je posledica zanemarivanja nosivosti betona u situacijama kada postoji poprečna armatura veća od minimalne. Pri tome, minimalna armatura je definisana u funkciji čvrstoće betona pri pritisku i granice razvlačenja čelika uzengija, umesto da mora biti bar jednaka nosivosti betona na smicanje. Tako se došlo u paradoksalnu situaciju da kod razmatranih greda veću proračunsku nosivost imaju one koje nemaju uzengije, *tabela 60*. S tim u vezi, novi Model Code (MC), koji je preteča Evrokoda 2 i koji predstavlja osnovu za budući Evrokod 2, izvršio je izvesne korekcije i

uzima u obzir doprinos betona u smičućoj otpornosti nosača, što je rezultovalo značajno boljim predikcijama, *Tabela 60*. Nezavisno od procenta armiranja uzengijama, ACI daje prilično konzervativne predikcije graničnih sila smicanja, koje su od 2 do 2.3 puta veće od merenih, nezavisno da li se radi o RAC ili NAC gredama. U istom rangu tačnosti predikcija je i CTC pravilnik za RAC elemente konstrukcija. Ipak, u oba slučaja radi se o relativno pouzdanim predikcijama imajući u vidu malu vrednost standardne devijacije.

Primetne su, dakle, relativno velike razlike u predikcijama nosivosti greda na smicanje, kako RAC tako i NAC, računane na osnovu različitih propisa. To je u skladu sa razlikama u modelima na kojima se ti propisi baziraju i dalje otvorenim pitanjem mehanizma prenosa smičućih sila u betonskim elementima, kao i velikim rasipanjem rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Prosečne vrednosti odnosa  $V_{u,exp}/V_{u,rač}$ , bez obzira na način proračuna, manje su kod RAC nego kod NAC greda za svega oko 5%. Imajući u vidu i prilično veliku sigurnosnu rezervu, to ne ugrožava mogućnost da se za proračun nosivosti na smicanje RAC greda primeni metodologija iz postojećih propisa i pravilnika. Primena postojećeg propisa za RAC elemente konstrukcija (CTC) nema neku posebnu prednost, imajući u vidu njegovu konzervativnost. Usporedni prikaz računskih i merenih graničnih sila loma pri smicanju dat je na *slici 110*.



Slika 110. Uporedni prikaz računskih i merenih graničnih sila loma pri smicanju

#### 4.3.6. ZAKLJUČAK

Iz prethodne analize u kojoj su upoređivane računске i eksperimentalne vrednosti momenta pri pojavi prsline, ugiba i graničnih nosivosti na savijanje i smicanje, mogu se doneti sledeći zaključci:

- Nezavisno od izabranog propisa (BAB'87, EC2, ACI), odnosi eksperimentalnih i proračunskih vrednosti momenta savijanja pri pojavi prsline manji su kod RAC nego kod NAC greda, što ukazuje da se kod RAC greda pojava prsline od savijanja dešava pri nižem opterećenju nego što predviđa proračun za NAC grede,
- Manje konzervativnu predikciju prema svim analiziranim propisima, tj. približnije vrednosti  $M_{cr,rač}$  i  $M_{cr,exp}$  daju analitički izrazi bazirani na čvrstoći pri zatezanju savijanjem koja se sračunava na osnovu čvrstoće pri pritisku, u odnosu na rezultate dobijene preko čvrstoće pri zatezanju cepanjem,
- Proračun momenta savijanja pri pojavi prsline kod RAC greda treba bazirati na čvrstoći pri zatezanju cepanjem jer se na taj način, prema svim testiranim propisima, dobijaju vrednosti koje su na strani sigurnosti, tj. nešto manji momenti savijanja u odnosu na eksperimentalno utvrđene,
- Nezavisno od izabranog propisa, odnosi eksperimentalnih i proračunskih vrednosti graničnih momenta savijanja kod NAC i RAC greda praktično su isti; prilikom proračuna graničnog momenta savijanja RAC greda mogu se primeniti postojeći propisi za NAC elemente konstrukcija uz postizanje iste tačnosti kao kod NAC greda,
- Proračun ugiba RAC greda pod kratkotrajnim opterećenjem moguće je sprovesti prema algoritmima propisa za NAC grede uz postizanje iste tačnosti,
- Uzimanje u obzir efekata ranog skupljanja betona značajno unapređuje preciznost proračuna ugiba pod kratkotrajnim opterećenjem kod NAC i RAC greda,
- Odnosi proračunskih i eksperimentalnih vrednosti granične sile smicanja kod RAC greda manji su od 3% do 6% u odnosu na iste odnose kod NAC greda, bez obzira na količinu poprečne armature; proračun granične sile smicanja iz propisa za NAC grede moguće je sa sličnom tačnošću primeniti na RAC elemente konstrukcija,

- Najbolje predikcije granične nosivosti na smicanje RAC greda bez poprečne armature, tj. najbolje ocenjeni doprinos betona smičućoj nosivosti daje propis EC2,
- Najbolje predikcije granične nosivosti na smicanje RAC greda sa poprečnom armaturom daju BAB i Model Propisa,
- Ponašanje RAC greda u oblasti granične nosivosti na smicanje moguće je precizno modelirati pomoću programa Response; modifikovana teorija polja pritiska uspešno se može primeniti na RAC gredne elemente konstrukcija.

#### 4.4 UPOREDNA ANALIZA SOPSTVENIH I DRUGIH EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

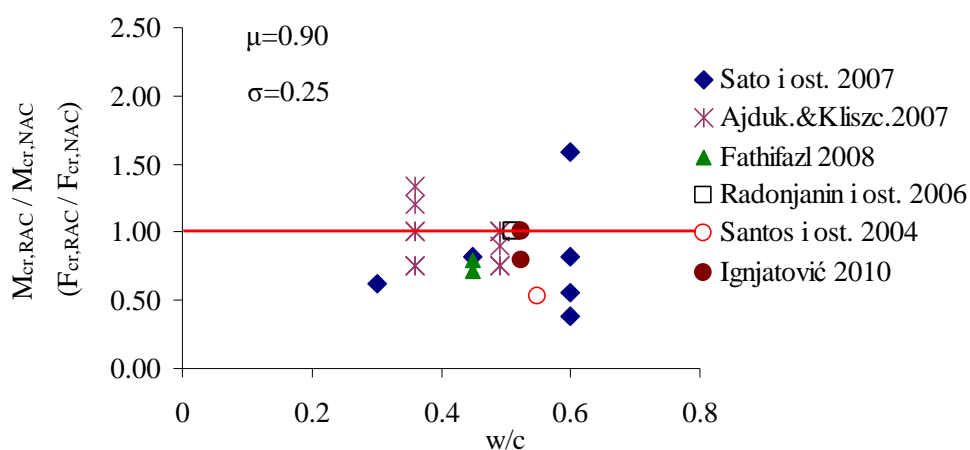
##### 4.4.1. SAVIJANJE GREDA POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM

U ovom poglavlju analizirani su sopstveni i eksperimentalni podaci drugih autora ([Sato i ost., 2007](#); [Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2007](#), [Fathifazl i ostali., 2009](#)). koji se odnose na ponašanje RAC greda pri savijanju. U navedenim istraživanjima, eksperimenti su sprovedeni na RAC gredama sa različitim sadržajem recikliranog agregata (od 50% do 100%) i na kontrolnim, uporednim NAC gredama. Prirodni pesak korišćen je kao sitna frakcija (0/4 mm) u svim gredama. Beton za uporedne NAC grede spravljen je sa istim efektivnim vodocementnim faktorom ([Sato i ost., 2007](#), [Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2007](#)), ili sa istom čvrstoćom pri pritisku (sopstveno istraživanje) ili sa istom ukupnom zapreminom cementnog maltera, kao i RAC beton ([Fathifazl, 2008](#)). Da bi podaci iz različitih istraživanja mogli da se porede, izvršena je analiza projektovanih sastava betona i za uporednu analizu odvojeni samo oni rezultati koji se odnose na NAC i RAC betone spravljene sa istim efektivnim vodocementnim faktorom. Takvom selekcijom prikupljen je najveći broj podataka. Sve ispitane grede bile su statičkog sistema prosta greda, izložene opterećenju sa dve koncentrisane sile približno u trećinama raspona. Podaci iz analiziranih istraživanja prikazani su u *tabeli 61*. Analiza se odnosi samo na izvesne parametre koji se mogu porediti, s obzirom da se grede iz različitih istraživanja razlikuju u veličini, procentu armiranja, rasponu itd.

Odnos momenata savijanja ( $M_{cr,RAC}$ ) ili sile ( $F_{cr,RAC}$ ) pri formiranju prslina RAC greda i momenata savijanja ( $M_{cr,NAC}$ ) ili sile ( $F_{cr,NAC}$ ) uporednih NAC greda sa istim



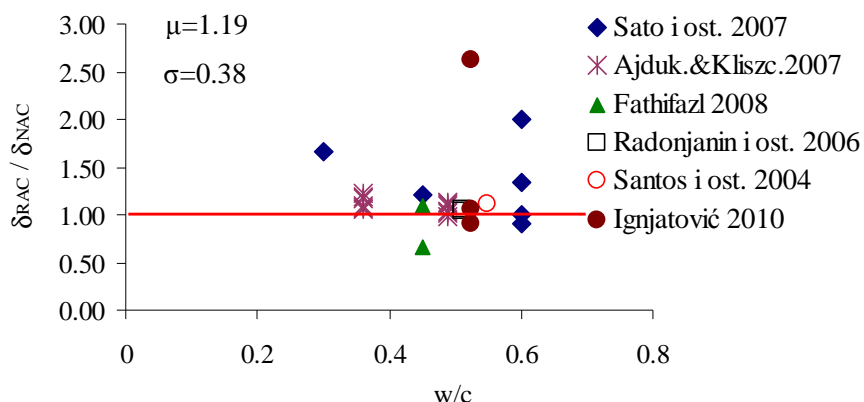
procentom armiranja, za različite vodocementne faktore ( $w/c$ ) primenjenih betona, prikazan je na slici 111.



Slika 111. Odnos momenta savijanja (sile) pri pojavi prslina kod RAC i NAC greda

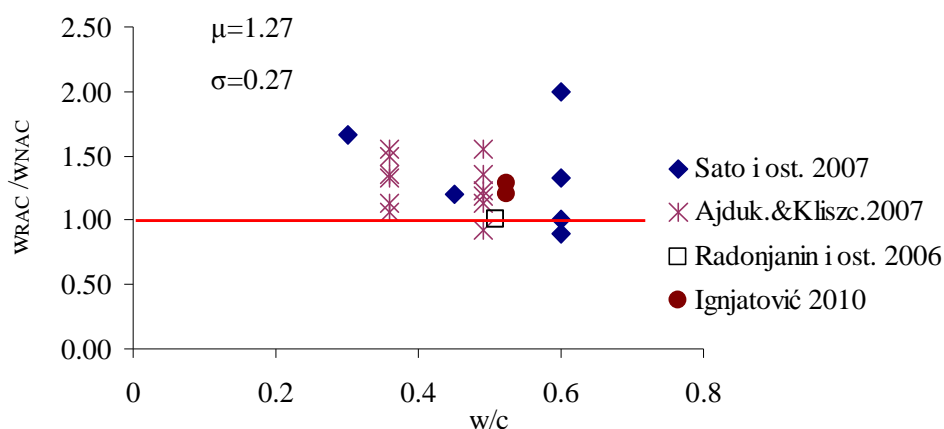
Prosečna vrednost ovog odnosa ( $\mu$ ) je 0.90, što znači da je sila pri pojavi prslina kod RAC greda za 10% manja od sile pri pojavi prslina kod uporedne NAC grede. Rasipanje rezultata ocenjeno je putem standardne devijacije ( $\sigma$ ) koja iznosi 0.25. Moment (sila) pri pojavi prslina kod greda dominantno opterećenih na savijanje zavisi uglavnom od čvrstoće betona na zatezanje, a u manjoj meri i od količine podužne zategnute armature. U analiziranim istraživanjima, prosečna vrednost odnosa čvrstoća pri zatezanju RAC i NAC betona iznosi 0.90, što znači da približno 10% manji moment savijanja (sila) pri pojavi prsline RAC greda (u poređenju sa NAC gredom), korespondira sa 10% nižom čvrstoćom pri zatezanju betona sa RC agregatom (u poređenju sa betonom od prirodnog agregata).

Odnos ugiba od kratkotrajnog eksploatacionog opterećenja u sredini raspona RAC grede ( $\delta_{RAC}$ ) i ugiba u sredini raspona uporedne NAC grede ( $\delta_{NAC}$ ) iznosi 1.19, slika 112. Dakle, ugibi RAC greda veći su u proseku za 19% od ugiba uporednih NAC greda. Analiza modula elastičnosti primenjenih betona pokazala je da su moduli RAC betona manji od modula NAC betona u proseku za 11%. S obzirom da je ugib obrnuto proporcionalan modulu, sledi da 11% manji modul izaziva 9% manje ugibe, što se ne poklapa sa utvrđenom prosečnom razlikom ugiba RAC i NAC greda od 19%. Ipak, ne treba zaboraviti da ugibi armiranobetonskih greda osim od modula elastičnosti zavise i od slike prslina. Autori analiziranih radova izneli su različite i u nekim slučajevima samo kvalitativne zaključke o stanju prslina pri eksploatacionom opterećenju RAC i uporednih NAC greda.



Slika 112. Odnos ugiba pri eksploatacionom opterećenju kod RAC i NAC greda

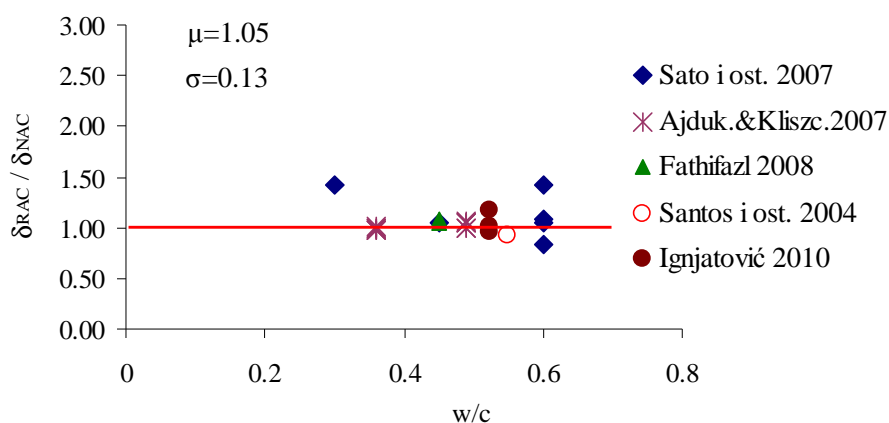
Na slici 113 prikazani su rezultati poređenja odnosa širine prslina kod NAC i RAC greda i to prosečnih merenih širina prslina (Sato i ost. 2007; Radonjanin i ost. 2006) ili sume širina prslina sa obe strane greda (Ajdukiewicz&Klischzewicz 2007 i sopstveno istraživanje). Jasno je da su prosečne širine prslina kod RAC greda veće ili ih ima više nego kod NAC greda, što utiče na krutost nosača pa tako i na veći ugib RAC greda. Pored toga, moment pri pojavi prslina RAC greda niži je od momenta pojave prslina uporednih NAC greda u proseku za 10%, a taj podatak, bez obzira na metodologiju proračuna, bitno utiče na veličinu ugiba. Dakle, ne sme se uspostaviti relacija između parametra koji definiše ponašanje konstrukcijskog elementa (ugiba) i karakteristike betona (modul elastičnosti), s obzirom da parametri poput slike prslina i trenutka njihovog formiranja nisu isti kod NAC i RAC greda, a bitno utiču na ugib nosača.



Slika 113. Odnos širina prslina pri eksploatacionom opterećenju kod RAC i NAC greda

Na osnovu analiziranih podataka, granična nosivost na savijanje ( $M_u$  ili  $F_u$ ) RAC greda je za 5% veća od granične nosivosti uporednih NAC greda, slika 114. Pri tome, rasipanje rezultata je relativno malo ( $\sigma=0.13$ ). Prosečan odnos čvrstoća pri pritisku RAC

i uporednih NAC betona koji su korišćeni u ovim ispitivanjima iznosi 0.95. Dakle, postignuta je 5% veća granična nosivost na savijanje RAC u odnosu na uporedne NAC grede, pri čemu je čvrstoća pri pritisku RAC betona za 5% manja od čvrstoće NAC. Ovo se može objasniti izvesnim razlikama u naponsko-deformacijskim dijagramima RAC i NAC betona i položaju neutralne linije pri lomu kod RAC i NAC greda, tj. izvesnim razlikama u dilatacijama u betonu i armaturi za fazu loma kod analiziranih NAC i RAC greda.



Slika 114. Odnos graničnih nosivosti na savijanje RAC i NAC greda

Tabela 61. Podaci za uporednu analizu ponašanja RAC greda pri savijanju

|                               | Oznaka grede | b [cm] | d [cm] | L [m] | $\mu$ [%] | w/c  | $f_{ck}^1$ [Mpa] | $f_{ct,sp}^2$ [Mpa] | $E_c^3$ [Gpa] | $P_{cr}^4$ [kN] | $w^5$ [mm] | $\delta$ [mm] | $P_u^6$ [kN] | $\frac{P_{cr,RAC}}{P_{cr,NAC}}$ | $\frac{w_{s,RAC}}{w_{s,NAC}}$ | $\frac{\delta_{s,RAC}}{\delta_{s,NAC}}$ | $\frac{P_{u,RAC}}{P_{u,NAC}}$ |
|-------------------------------|--------------|--------|--------|-------|-----------|------|------------------|---------------------|---------------|-----------------|------------|---------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|
| Sato i ost. 2007              | NAC-1        | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.3  | 106.4            | 6.3                 | -             | 7.2             | 0.03       | 1.4           | 15.6         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-2        | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.45 | 57.0             | 3.0                 | -             | 4.3             | 0.05       | 2.6           | 15.0         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-3        | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.6  | 40.2             | 3.5                 | -             | 3.3             | 0.05       | 2.9           | 15.8         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-4        | 15     | 20     | 2.2   | 0.59      | 0.6  | 30.6             | 2.9                 | -             | 1.7             | 0.03       | 1.8           | 8.0          |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-5        | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.6  | 30.6             | 2.9                 | -             | 3.6             | 0.07       | 3.7           | 13.7         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-6        | 15     | 20     | 2.2   | 1.65      | 0.6  | 30.6             | 2.9                 | -             | 3.4             | 0.10       | 4.7           | 19.4         |                                 |                               |   |                               |
|                               | RAC100-1     | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.3  | 69.0             | 3.9                 | -             | 4.5             | 0.05       | 2.0           | 15.3         | 0.63                            | 1.67                          | 1.67                                    | 1.43                          |
|                               | RAC100-2     | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.45 | 46.5             | 3.0                 | -             | 3.5             | 0.06       | 2.7           | 14.8         | 0.81                            | 1.20                          | 1.20                                    | 1.04                          |
|                               | RAC100-3     | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.6  | 32.9             | 2.7                 | -             | 2.7             | 0.10       | 4.1           | 15.3         | 0.82                            | 2.00                          | 2.00                                    | 1.41                          |
|                               | RAC100-4     | 15     | 20     | 2.2   | 0.59      | 0.6  | 34.5             | 2.8                 | -             | 2.7             | 0.04       | 1.5           | 9.3          | 1.59                            | 1.33                          | 1.33                                    | 0.83                          |
|                               | RAC100-5     | 15     | 20     | 2.2   | 1.06      | 0.6  | 34.5             | 2.8                 | -             | 2.0             | 0.07       | 4.0           | 14.1         | 0.56                            | 1.00                          | 1.00                                    | 1.08                          |
|                               | RAC100-6     | 15     | 20     | 2.2   | 1.65      | 0.6  | 34.5             | 2.8                 | -             | 1.3             | 0.09       | 4.9           | 19.9         | 0.38                            | 0.90                          | 0.90                                    | 1.04                          |
| Ajdukiewicz&Kliszczewicz 2007 | NAC-1        | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.49 | 37.7             | 2.9                 | 31.9          | 20.0            | 0.85       | 3.2           | 64.5         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-2        | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.36 | 57.9             | 3.5                 | 35.6          | 20.0            | 0.80       | 3.4           | 80.0         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-3        | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.49 | 39.8             | 3.2                 | 27.3          | 15.0            | 0.66       | 3.6           | 78.0         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-4        | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.36 | 58.3             | 4.4                 | 32.5          | 20.0            | 0.55       | 2.4           | 70.0         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-5        | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.49 | 40.1             | 3.4                 | 36.2          | 20.0            | 0.51       | 3.8           | 75.5         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-6        | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.36 | 61.8             | 4.5                 | 41.9          | 20.0            | 0.49       | 2.6           | 73.0         |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-7        | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.49 | 38.2             | 3.4                 | 37.3          | 20.0            | 0.86       | 4.4           | 113.5        |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-8        | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.36 | 59.1             | 3.6                 | 37.4          | 15.0            | 0.81       | 4.1           | 117.0        |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-9        | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.49 | 38.7             | 3.1                 | 28.5          | 20.0            | 0.93       | 4.2           | 108.5        |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-10       | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.36 | 63.7             | 4.4                 | 31.8          | 20.0            | 1.25       | 3.9           | 119.0        |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-11       | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.49 | 39.6             | 3.5                 | 37.4          | 25.0            | 0.75       | 4.0           | 115.5        |                                 |                               |   |                               |
|                               | NAC-12       | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.36 | 60.8             | 4.1                 | 41.5          | 25.0            | 0.51       | 3.6           | 119.0        |                                 |                               |   |                               |

Analiza eksperimentalnih rezultata

|  | Oznaka grede | b [cm] | d [cm] | L [m] | $\mu$ [%] | w/c   | $f_{ck}^1$ [Mpa] | $f_{ct,sp}^2$ [Mpa] | $E_c^3$ [Gpa] | $P_{cr}^4$ [kN] | $w^5$ [mm] | $\delta$ [mm] | $P_u^6$ [kN] | $P_{cr,RAC}/P_{cr,NAC}$ | $W_{s,RAC}/W_{s,NAC}$ | $\delta_{s,RAC}/\delta_{s,NAC}$ | $P_{u,RAC}/P_{u,NAC}$ |
|--|--------------|--------|--------|-------|-----------|-------|------------------|---------------------|---------------|-----------------|------------|---------------|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| <b>Ajdukiewicz &amp; Kliszczewicz 2007</b> | RAC100-1     | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.49  | 34.6             | 2.6                 | 25.9          | 20.0            | 1.15       | 3.6           | 64.0         | 1.00                    | 1.35                  | 1.13                            | 0.99                  |
|  | RAC100-2     | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.36  | 56.4             | 3.3                 | 31.8          | 15.0            | 1.20       | 3.9           | 78.0         | 0.75                    | 1.50                  | 1.17                            | 0.98                  |
|  | RAC100-3     | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.49  | 40.1             | 2.9                 | 24.3          | 15.0            | 0.81       | 3.6           | 81.5         | 1.00                    | 1.23                  | 0.99                            | 1.04                  |
|  | RAC100-4     | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.36  | 60.2             | 4.3                 | 28.5          | 20.0            | 0.62       | 2.9           | 68.0         | 1.00                    | 1.13                  | 1.23                            | 0.97                  |
|  | RAC100-5     | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.49  | 35.3             | 3.0                 | 31.7          | 20.0            | 0.79       | 3.9           | 75.0         | 1.00                    | 1.55                  | 1.02                            | 0.99                  |
|  | RAC100-6     | 20     | 30     | 2.4   | 0.87      | 0.36  | 57.6             | 3.7                 | 35.9          | 20.0            | 0.65       | 2.7           | 71.5         | 1.00                    | 1.33                  | 1.06                            | 0.98                  |
|  | RAC100-7     | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.49  | 36.6             | 2.9                 | 28.1          | 15.0            | 0.79       | 4.9           | 118.0        | 0.75                    | 0.92                  | 1.12                            | 1.04                  |
|  | RAC100-8     | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.36  | 58.3             | 3.2                 | 31.8          | 20.0            | 1.26       | 4.4           | 118.5        | 1.33                    | 1.56                  | 1.08                            | 1.01                  |
|  | RAC100-9     | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.49  | 39.3             | 3.0                 | 25.5          | 15.0            | 1.11       | 4.6           | 116.5        | 0.75                    | 1.19                  | 1.09                            | 1.07                  |
|  | RAC100-10    | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.36  | 59.6             | 4.1                 | 30.1          | 15.0            | 1.33       | 4.6           | 118.5        | 0.75                    | 1.06                  | 1.18                            | 1.00                  |
|  | RAC100-11    | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.49  | 35.8             | 3.2                 | 33.4          | 22.5            | 0.85       | 4.1           | 120.5        | 0.90                    | 1.13                  | 1.04                            | 1.04                  |
|  | RAC100-12    | 20     | 30     | 2.4   | 1.55      | 0.36  | 59.6             | 3.6                 | 35.7          | 30.0            | 0.69       | 3.9           | 119.0        | 1.20                    | 1.35                  | 1.09                            | 1.00                  |
| <b>Radonjanin i ost. 2006</b>              | NAC          | 15     | 25     | 2.8   | 1.03      | 0.51  | 43.4             | 2.7                 | 35.6          | 20.0            | 0.10       | 2.7           | 50.0         |                         |                       |                                 |                       |
|  | RAC50        | 15     | 25     | 2.8   | 1.03      | 0.51  | 45.2             | 3.2                 | 32.3          | 20.0            | 0.10       | 2.8           | 50.0         | 1.00                    | 1.00                  | 1.04                            | 1.00                  |
|  | RAC100       | 15     | 25     | 2.8   | 1.03      | 0.51  | 45.7             | 2.8                 | 29.1          | 20.0            | 0.10       | 2.9           | 50.0         | 1.00                    | 1.00                  | 1.06                            | 1.00                  |
| <b>Fathifazi 2008</b>                      | NAC-1        | 20     | 37.5   | 2.2   | 1.991     | 0.45  | 38               | 3                   | 24.5          | 19.2            | -          | 2.6           | 142.7        |                         |                       |                                 |                       |
|  | NAC-2        | 20     | 37.5   | 2.2   | 1.991     | 0.45  | 35.9             | 3.2                 | 27.9          | 19.2            | -          | 2.4           | 139.1        |                         |                       |                                 |                       |
|  | RAC64-1      | 20     | 37.5   | 2.2   | 1.991     | 0.45  | 36.9             | 2.8                 | 24.6          | 13.8            | -          | 1.7           | 149.2        | 0.72                    | -                     | 0.67                            | 1.05                  |
|  | RAC74-2      | 20     | 37.5   | 2.2   | 1.991     | 0.45  | 43.5             | 3.4                 | 27.1          | 15.2            | -          | 2.7           | 150.2        | 0.79                    | -                     | 1.10                            | 1.08                  |
| <b>Santos 2004</b>                         | NAC          | 15     | 20     | 2.2   | 1.176     | 0.55  | 38.4             | 3.3                 | 32.4          | 5.3             | -          | 7.1           | 57           |                         |                       |                                 |                       |
|  | RAC          | 15     | 20     | 2.2   | 1.176     | 0.55  | 38.4             | 1.8                 | 28            | 2.8             | -          | 7.86          | 53           | 0.53                    | -                     | 1.11                            | 0.93                  |
| <b>Ignjatović 2010</b>                     | NAC-1        | 20     | 30     | 3.0   | 0.28      | 0.524 | 47.3             | 3.1                 | 26.6          | 25              | -          | 0.8           | 56.7         |                         |                       |                                 |                       |
|  | NAC-2        | 20     | 30     | 3.0   | 1.46      | 0.524 | 47.3             | 3.1                 | 26.6          | 40              | 1.05       | 7.0           | 217.1        |                         |                       |                                 |                       |
|  | NAC-3        | 20     | 30     | 3.0   | 2.54      | 0.524 | 47.3             | 3.1                 | 26.6          | 60              | 1.25       | 8.9           | 275.2        |                         |                       |                                 |                       |
|  | RAC50-1      | 20     | 30     | 3.0   | 0.28      | 0.524 | 46.2             | 2.7                 | 26.2          | 20              | 0.40       | 2.2           | 54.0         | 0.80                    | -                     | 2.62                            | 0.95                  |
|  | RAC50-2      | 20     | 30     | 3.0   | 1.46      | 0.524 | 46.2             | 2.7                 | 26.2          | 40              | 1.35       | 7.4           | 221.1        | 1.00                    | 1.29                  | 1.06                            | 1.02                  |
|  | RAC50-3      | 20     | 30     | 3.0   | 2.54      | 0.524 | 46.2             | 2.7                 | 26.2          | 60              | 1.50       | 8.1           | 320.7        | 1.00                    | 1.20                  | 0.91                            | 1.17                  |

## *Analiza eksperimentalnih rezultata*

---

<sup>1</sup> probna tela [cm]: Sato i ost., Fathifazl: cilindar 10/20; Radonanin. i ost., Ignjatović: kocka 15

<sup>2</sup> probna tela [cm] : Sato i ost.: cilindar 15/20, Fathifazl.: cilindar 10/20; Radonanin. i ost.: kocka 15, Ignjatović: cilindar 15/15

<sup>3</sup> probna tela [cm] : Sato i ost.: cilindar 10/20, Fathifazl i ost., Radonjanin i ost., Ignjatović: cilindar 15/30

<sup>4</sup> Sato i ost.:  $M_{cr}$  [kNm]

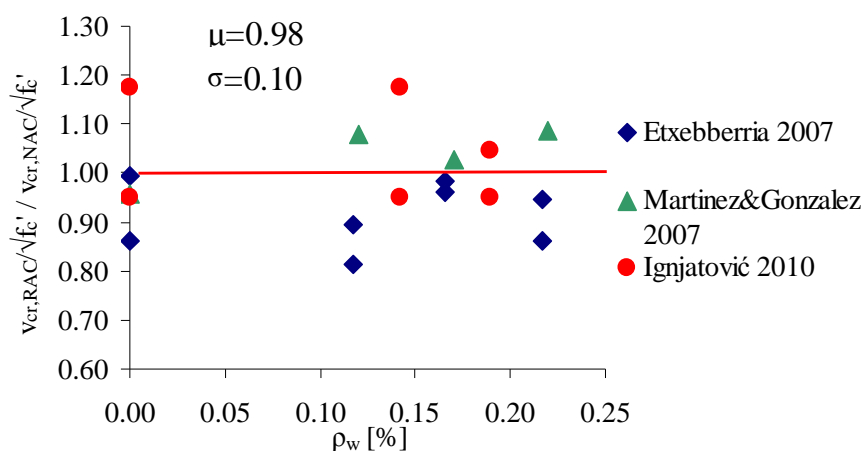
<sup>5</sup> Sato i ost., Radonjanin i ost.: prosečne širine prslina; Ajdukiewicz&Klischewicz, Ignjatović: suma širina prslina

<sup>6</sup> Sato i ost.:  $M_u$  [kNm]

#### 4.4.2. SMICANJE GREDA POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM

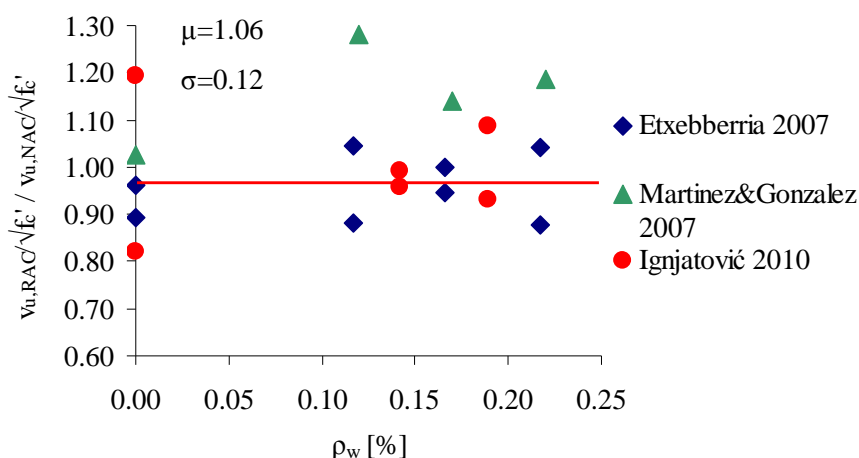
U ovom poglavlju analizirani su sopstveni i eksperimentalni podaci drugih autora ([Etxeberria, 2007](#); [Gonzalez& Martinez 2006](#)), koji se odnose na ponašanje RAC greda pri smicanju. U navedenim istraživanjima, eksperimenti su sprovedeni na RAC gredama sa različitim sadržajem recikliranog agregata (od 50% do 100%) i na kontrolnim, uporednim NAC gredama. Prirodni pesak korišćen je kao sitna frakcija (0/4 mm) u svim gredama. Sve ispitane grede bile su statičkog sistema prosta greda, izložene opterećenju sa dve koncentrisane sile približno u trećinama raspona. Analizom su obuhvaćena ispitivanja kod kojih je odnos smičućeg raspona i statičke visine preseka veći od 3.0, jer je takvom selekcijom prikupljen najveći broj podataka, a istovremeno je obezbeđeno da kod svih greda bude dominantno gredno dejstvo pri smicanju. Uporedne NAC grede armirane su istim procentom armiranja podužnom i poprečnom armaturom, ali su bile od betona čija čvrstoća pri pritisku i vodocementni faktor nisu nužno bili isti kao kod posmatrane RAC grede. Zbog toga su rezultati ispitivanja prikazani u obliku napona i normirani sa kvadratnim korenom čvrstoće pri pritisku za svaki beton. Time je čvrstoća pri pritisku eliminisana kao parametar. Dodatna selekcija podataka izvršena je uzimanjem u obzir samo rezultata koji se odnose na smičući lom, uglavnom usled kombinacije napona pritisaka i smicanja u pritisnutoj zoni preseka u blizini koncentrisane sile. Podaci iz analiziranih istraživanja prikazani su u *tabeli 62*. Analiza se odnosi na normalizovani napon pri pojavi prve kose prsline i pri lomu nosača.

Odnosi normalizovanih smičućih napona pri pojavi kose prsline kod RAC i uporednih NAC greda u funkciji procenta armiranja poprečnom armaturom ( $\rho_w$ ), prikazani su na *slici 115*. Prosečna vrednost ovog odnosa ( $\mu$ ) iznosi 0.98, tj. normalizovani napon pri pojavi kose prsline kod RAC greda za 2% je manji nego kod uporednih NAC greda. Pri tome, rasipanje rezultata nije veliko s obzirom da standardna devijacija ( $\sigma$ ) iznosi 0.10. Sračunata prosečna vrednost od  $\mu = 0.98$  dobra je aproksimacija odnosa smičućih napona pri pojavi prsline i kod greda bez uzengija ( $\mu = 0.99$ ,  $\rho_w = 0$ ) i kod greda koje imaju poprečnu armaturu ( $\mu = 0.98$ ,  $\rho_w > 0$ ).



Slika 115. Odnos normalizovanih napona pri pojavi kose prsline kod RAC i NAC greda

Odnosi normalizovanih smičućih napona pri lomu RAC i uporednih NAC greda u funkciji procenta armiranja poprečnom armaturom ( $\rho_w$ ), prikazani su na slici 116.



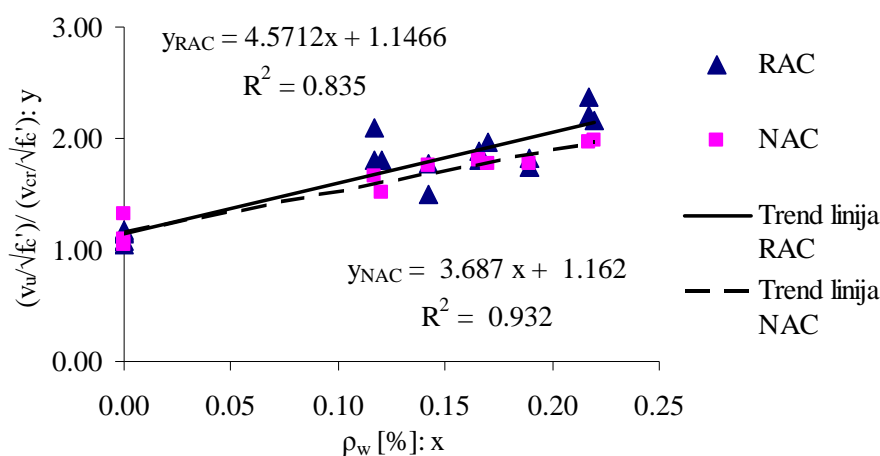
Slika 116. Odnos normalizovanih napona pri lomu kod RAC i NAC greda

Na osnovu podataka sa slike 116, sračunato je da je normalizovani smičući napon pri lomu RAC grede prosečno za 6% veći od normalizovanog smičućeg napona uporedne NAC grede. To praktično znači da je granična nosivost na smicanje RAC greda za 6% veća od granične nosivosti isto armirane NAC grede.

Na slici 117 je prikazan odnos normalizovanih napona pri lomu i pri formiranju prve kose prsline za RAC i NAC grede u funkciji procenta armiranja uzengijama. Ovaj odnos koristi se kao mera duktilnosti kod greda dominantno izloženih smicanju. Korišćeni su podaci iz tabele 62. Za grede bez poprečne armature, taj odnos je blizak jedinici, jer praktično odmah nakon formiranja dijagonalne prsline dolazi do krtog loma. To se vidi na slici 117, a može se pokazati da je odnos  $v_u/\sqrt{f_c'}$  praktično isti kod NAC i RAC greda bez uzengija i iznosi 1.16 i 1.12 respektivno. Ovaj odnos je pre svega



funkcija procenta armiranja poprečnom armaturom i može se reći da linearno raste sa porastom količine poprečne armature kod RAC i NAC grede, *slika 117*. Bolja aproksimacija, tj. manje rasipanje rezultata od uspostavljene trend zavisnosti važi za NAC grede, što je izraženo većim koeficijentom determinacije (R). Sa porastom procenta armiranja uzengijama rastu i razlike između trend linija za NAC i RAC grede, pri čemu se veće vrednosti odnosa  $v_u/\sqrt{f_c}'$  za isti procenat armiranja odnose na RAC grede. Dakle, s obzirom da je ranije pokazano da se formiranje prve kose prsline kod NAC i RAC grede dešava praktično pri istom normalizovanom naponu, može se zaključiti da RAC grede sa poprečnom armaturom imaju veću duktilnost u odnosu na uporedne NAC grede.



Slika 117. Odnos normalizovanih napona pri lomu kod RAC i NAC grede

#### 4.4.3. ZAKLJUČAK

Na osnovu baze podataka koju osim sopstvenih čine i rezultati istraživanja drugih istraživača, mogu se doneti sledeći zaključci:

1. U odnosu na uporedne NAC grede napravljene od betona sa istim efektivnim vodocementnim faktorom, kod RAC grede dominantno opterećenih na savijanje, sa količinom krupnog recikliranog agregata u iznosima od 50% do 100% prosečno je:
  - a. 10% manji moment savijanja pri pojavi prvih prsline, što je u korelaciji sa 10% nižom čvrstoćom pri zatezanju RAC betona u poređenju sa NAC
  - b. 19% veći ugibi pri eksploatacionom kraktotrajnom opterećenju
  - c. 5% veći granični moment savijanja

2. U odnosu na uporedne NAC grede sa istim procentom armiranja podužnom i poprečnom armaturom, kod RAC greda dominantno opterećenih na smicanje, sa količinom krupnog recikliranog agregata u iznosima od 50% do 100% prosečno je:
- a. 2% manji normalizovani napon smicanja pri pojavi prve kose prsline
  - b. 6% veći normalizovani granični napon smicanja
  - c. veća duktilnost greda armiranih poprečnom armaturom, pri čemu duktilnost raste sa povećanjem količine poprečne armature.

Tabela 62. Podaci za uporednu analizu ponašanja RAC greda pri smicanju

|                                    | Oznaka grede | b [cm] | d [cm] | L [m] | a/h | $\rho_l$ [%] | $\rho_w$ [%] | w/c  | $f_{ck}^1$ [Mpa] | $V_{cr}$ [kN] | $V_u$ [kN] | $v_{cr}^2$ [MPa] | $v_u^3$ [MPa] | $v_{cr}/\sqrt{f_c'}$ [MPa] | $v_u/\sqrt{f_c'}$ [MPa] | $(v_{cr,RAC}/\sqrt{f_c'}) / (v_{cr,NAC}/\sqrt{f_c'})$ | $(v_{u,RAC}/\sqrt{f_c'}) / (v_{u,NAC}/\sqrt{f_c'})$ |
|------------------------------------|--------------|--------|--------|-------|-----|--------------|--------------|------|------------------|---------------|------------|------------------|---------------|----------------------------|-------------------------|---|---|
| <b>Etxeberria 2007</b>             | NAC-1        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.920        | 0.000        | 0.55 | 41.9             | 96.0          | 100.5      | 1.8              | 1.8           | 0.27                       | 0.3                     |   |   |
|                                    | NAC-2        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.217        | 0.55 | 41.9             | 108.0         | 213.0      | 2.0              | 3.9           | 0.31                       | 0.6                     |   |   |
|                                    | NAC-3        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.166        | 0.55 | 41.9             | 98.0          | 177.0      | 1.8              | 3.2           | 0.28                       | 0.5                     |   |   |
|                                    | NAC-4        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.117        | 0.55 | 41.9             | 112.5         | 187.5      | 2.1              | 3.4           | 0.32                       | 0.5                     |   |   |
|                                    | RAC50-1      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.920        | 0.000        | 0.52 | 41.3             | 82.0          | 89.0       | 1.5              | 1.6           | 0.23                       | 0.3                     | 0.86  | 0.89  |
|                                    | RAC50-2      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.217        | 0.52 | 41.3             | 92.5          | 220.0      | 1.7              | 4.0           | 0.26                       | 0.6                     | 0.86  | 1.04  |
|                                    | RAC50-3      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.166        | 0.52 | 41.3             | 93.5          | 176.0      | 1.7              | 3.2           | 0.27                       | 0.5                     | 0.96  | 1.00  |
|                                    | RAC50-4      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.117        | 0.52 | 41.3             | 91.0          | 164.0      | 1.7              | 3.0           | 0.26                       | 0.5                     | 0.81  | 0.88  |
|                                    | RAC100-1     | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.920        | 0.000        | 0.50 | 39.8             | 80.0          | 84.0       | 1.5              | 1.5           | 0.23                       | 0.2                     | 0.99  | 0.96  |
|                                    | RAC100-2     | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.217        | 0.50 | 39.8             | 86.0          | 189.5      | 1.6              | 3.5           | 0.25                       | 0.6                     | 0.95  | 0.88  |
|                                    | RAC100-3     | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.166        | 0.50 | 39.8             | 90.0          | 163.0      | 1.7              | 3.0           | 0.26                       | 0.5                     | 0.98  | 0.94  |
|                                    | RAC100-4     | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.970        | 0.117        | 0.50 | 39.8             | 80.0          | 168.0      | 1.5              | 3.1           | 0.23                       | 0.5                     | 0.90  | 1.04  |
| <b>Gonzalez&amp; Martinez 2006</b> | NAC-1        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.000        | 0.55 | 40.2             | 81.0          | 88.9       | 1.5              | 1.6           | 0.23                       | 0.3                     |   |   |
|                                    | NAC-2        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.120        | 0.55 | 39.2             | 84.3          | 128.0      | 1.5              | 2.3           | 0.25                       | 0.4                     |   |   |
|                                    | NAC-3        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.170        | 0.55 | 39.1             | 85.0          | 150.8      | 1.6              | 2.8           | 0.25                       | 0.4                     |   |   |
|                                    | NAC-4        | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.220        | 0.55 | 37.7             | 96.0          | 190.3      | 1.8              | 3.5           | 0.29                       | 0.6                     |   |   |
|                                    | RAC50-1      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.000        | 0.55 | 39.7             | 77.0          | 90.6       | 1.4              | 1.7           | 0.22                       | 0.3                     | 0.96  | 1.03  |
|                                    | RAC50-2      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.120        | 0.55 | 39.2             | 91.0          | 164.3      | 1.7              | 3.0           | 0.27                       | 0.5                     | 1.08  | 1.28  |
|                                    | RAC50-3      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.170        | 0.55 | 41.5             | 90.0          | 177.0      | 1.7              | 3.2           | 0.26                       | 0.5                     | 1.03  | 1.14  |
|                                    | RAC50-4      | 20     | 35     | 2.6   | 3.3 | 2.980        | 0.220        | 0.55 | 40.5             | 108.0         | 233.6      | 2.0              | 4.3           | 0.31                       | 0.7                     | 1.09  | 1.18  |
| <b>Ignjatović 2010</b>             | NAC-1        | 20     | 30     | 3.0   | 4.0 | 4.080        | 0.000        | 0.60 | 41.8             | 80.0          | 106.3      | 1.9              | 2.5           | 0.33                       | 0.4                     |   |   |
|                                    | NAC-2        | 20     | 30     | 3.0   | 4.0 | 4.080        | 0.142        | 0.60 | 41.8             | 80.0          | 140.7      | 1.9              | 3.3           | 0.33                       | 0.6                     |   |   |
|                                    | NAC-3        | 20     | 30     | 3.0   | 4.0 | 4.080        | 0.189        | 0.60 | 41.8             | 90.0          | 159.9      | 2.1              | 3.8           | 0.37                       | 0.7                     |   |   |
|                                    | RAC50-1      | 20     | 30     | 3.0   | 4.0 | 4.080        | 0.000        | 0.60 | 46.3             | 80.0          | 91.8       | 1.9              | 2.2           | 0.31                       | 0.4                     | 0.95  | 0.82  |
|                                    | RAC50-2      | 20     | 30     | 3.0   | 4.0 | 4.080        | 0.142        | 0.60 | 46.3             | 80.0          | 142.0      | 1.9              | 3.4           | 0.31                       | 0.6                     | 0.95  | 0.96  |
|                                    | RAC50-3      | 20     | 30     | 3.0   | 4.0 | 4.080        | 0.189        | 0.60 | 46.3             | 90.0          | 156.9      | 2.1              | 3.7           | 0.35                       | 0.6                     | 0.95  | 0.93  |

*Analiza eksperimentalnih rezultata*

---

|          |    |    |     |     |       |       |      |      |      |       |     |     |      |     |      |      |
|----------|----|----|-----|-----|-------|-------|------|------|------|-------|-----|-----|------|-----|------|------|
| RAC100-1 | 20 | 30 | 3.0 | 4.0 | 4.080 | 0.000 | 0.58 | 42.4 | 90.0 | 104.8 | 2.1 | 2.5 | 0.37 | 0.4 | 1.18 | 1.19 |
| RAC100-2 | 20 | 30 | 3.0 | 4.0 | 4.080 | 0.142 | 0.58 | 42.4 | 90.0 | 135.0 | 2.1 | 3.2 | 0.37 | 0.6 | 1.18 | 0.99 |
| RAC100-3 | 20 | 30 | 3.0 | 4.0 | 4.080 | 0.189 | 0.58 | 42.4 | 90.0 | 163.4 | 2.1 | 3.9 | 0.37 | 0.7 | 1.04 | 1.09 |

---

<sup>1</sup> probna tela [cm]: Etxeberria, Gonzalez& Martinez: cilindar 15/30; Ignjatović: kocka 15

<sup>2</sup>  $v_{cr}=V_{cr}/bh$

<sup>3</sup>  $v_u=V_u/bh$

## **5. Zaključci i smernice za buduća istraživanja**

### **5.1 ZAKLJUČCI**

Recikliranje betona i proizvodnja recikliranog agregata predstavlja veliki korak ka ispunjenju ciljeva održivog razvoja i očuvanja životne sredine koji su nakon Zemaljskog samita u Rio de Ženeiru 1992. godine i promovisanja Agende 21 (Hansen, 1992), postali ključni ciljevi modernog društva. Ipak, sama proizvodnja agregata bez iznalaženja adekvatnih načina za efikasan plasman, tj. primenu, takođe nije održiva akcija. Osim u zastorima puteva, izgradnji nasipa i za spravljanje nekonstruktivnih betonskih elemenata (staza, ivičnjaka, ograda), reciklirani agregat se vrlo malo koristi za konstrukcijske betone. Svojevremeno je glavni razlog bio loš kvalitet agregata od recikliranog betona koji je imao puno primesa, ali, tokom poslednjih 20 godina usavršen je tehnološki postupak dobijanja betonskog recikliranog agregata iz građevinskog otpada, tj. da se dobija RCA sve boljeg kvaliteta. Manja poroznost cementnog kamena u zrnu RCA kao rezultat drobljenja, manje upijanje i veća zapreminska masa, sadržaj ostalih materija sveden na minimum, uslovi su koje treba ispuniti kako bi se dobio RCA sa kvalitetom pogodnim za primenu u konstrukcijskim RAC. Svako novo znanje iz ove oblasti korak je ka uspostavljanju nove, veće vrednosti, kako samog reciklažnog postupka, tako i svih proizvoda od recikliranog agregata. Zato je cilj ove disertacije da se sa tehničke strane daju odgovori o mogućnostima primene betona na bazi recikliranog agregata u elementima armiranobetonskih konstrukcija.

Na osnovu analize podataka iz formirane baze istraživanja koji se odnose na fizičko-mehanička svojstva betona sa različitim sadržajem recikliranog agregata, može se zaključiti sledeće:

- 1) Statističkom i regresionom analizom uspostavljene su analitičke zavisnosti odnosa čvrstoća pri pritisku RAC sa različitim sadržajem krupnog RCA i uporednog NAC; uspostavljene su dve pouzdane funkcionalne veze ovih veličina, jedna za srednje vrednosti i jedna za karakteristične vrednosti sa fraktilom od 5% - jednačine (1) i (2),
- 2) Sitna frakcija recikliranog agregata ima i za relativno mala procentualna učešća izražen negativni efekat na čvrstoću pri pritisku RAC; imajući u vidu i probleme vezane za obezbeđivanje zahtevane konzistencije svežeg betona i

kontrolisanje efektivnog vodocementnog faktora, zaključak je da je proizvodnja konstrukcijskih RAC sa sitnom frakcijom recikliranog agregata moguća, ali da zahteva značajno veću kontrolu i poznavanje većeg broja parametara pri projektovanju sastava, u odnosu na betone sa krupnim RCA,

- 3) Odnos čvrstoća pri zatezanju RAC i uporenih NAC nije osetljiv na procenat zamene krupnog prirodnog agregata recikliranim,
- 4) Statističkom i regresionom analizom uspostavljene su analitičke zavisnosti odnosa modula elastičnosti RAC sa različitim sadržajem krupnog RCA i uporednog NAC; uspostavljene su dve pouzdane funkcionalne veze ovih veličina, jedna za srednje vrednosti i jedna za karakteristične vrednosti sa fraktilom od 5%- jednačine (3) i (4),
- 5) Zamena cementa silikatnom prašinom u RAC mešavinama, u iznosu od 10%, dovodi do povećanja čvrstoće pri pritisku RAC i povećanja prosečnog odnosa čvrstoća RAC i uporednog NAC; nije zabeležen negativni efekat silikatne prašine na ostala mehanička svojstva RAC.

Na osnovu sprovedenih sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja RAC betona i RAC grednih nosača zaključuje se sledeće:

- 6) Beton sa 50% krupnog recikliranog agregata moguće je spraviti tako da ima praktično istu čvrstoću pri pritisku (veću za 1.1%) i modul elastičnosti (manji za 1.5%) i sličnu čvrstoću pri zatezanju (manju za 13%) u odnosu na uporedni NAC spravljen sa istim efektivnim vodocementnim faktorom,
- 7) Beton sa 100% krupnog recikliranog agregata spravljen je sa oko 3% cementa više u odnosu na NAC iste čvrstoće pri pritisku,
- 8) Razlike u ugibima greda od betona sa 0%, 50% i 100% RC agregata sa istom količinom poprečne i podužne armature, pri eksploatacionom opterećenju, u okviru su granice od 10%, bez obzira da li su dominantno izložene savijanju ili smicanju. Veće razlike u odnosu na uporedne NAC grede, tj. veći ugibi kod RAC greda mogu se očekivati za minimalne procenat armiranja podužnom armaturom, ali radi se o malim ugibima posmatrano u apsolutnim vrednostima.

- 9) Širina i raspored prslina, kao i mehanizam loma greda sa istom količinom podužne i poprečne armature ne zavisi od količine, tj. procentualnog sadržaja recikliranog agregata u betonskim gredama,
- 10) Doprinis “agregat interlock” mehanizma u prenošenju smicanja veći je kod RAC greda u odnosu na NAC grede iste nosivosti na smicanje,
- 11) Duktilnost greda dominantno izloženih smicanju, koje imaju poprečnu armaturu, ne zavisi od količine RC agregata u betonu,
- 12) Normalizovane granične sile loma pri smicanju kod greda od betona sa 0%, 50% i 100% recikliranog agregata i istim procentom armiranja poprečnom armaturom, praktično su iste,
- 13) Razlike u obliku dijagrama sila-pomeranje ( $P-\Delta$ ) između NAC, RAC50 i RAC100 greda armiranih istom količinom armature i dominantno izloženih savijanju, mogu se smatrati zanemarljivim,
- 14) Grede od RAC100 i RAC50 betona imaju istu graničnu nosivost na savijanje kao i greda od NAC betona iste čvrstoće pri pritisku,
- 15) Veličina površi loma kao i nivo destrukcije betona pri lomu greda na savijanje značajno je uslovljena količinom recikliranog agregata. Sa povećanjem količine recikliranog agregata raste veličina površi loma, a veći je i nivo destrukcije betona.

Na osnovu poređenja eksperimentalnih veličina kod RAC greda i proračunskih vrednosti istih veličina prema propisima za NAC grede, glavni zaključci su:

- 16) Pojava prslina od savijanja kod RAC greda dešava se pri opterećenju koje je, u zavisnosti od primenjenog propisa, od 10% do 15% manje nego što predviđa proračun za NAC grede,
- 17) Proračun ugiba RAC greda pod kratkotrajnim opterećenjem moguće je sprovesti prema algoritmima propisa za NAC grede uz postizanje iste tačnosti,
- 18) Prilikom proračuna graničnog momenta savijanja RAC greda mogu se primeniti postojeći propisi za NAC elemente konstrukcija uz postizanje iste tačnosti kao kod NAC greda,
- 19) Proračun granične sile smicanja na osnovu propisa za NAC grede moguće je sa sličnom tačnošću primeniti i na RAC elemente konstrukcija.

Zaključci kao rezultat poređenja ponašanja pri savijanju i smicanju greda sa RCA (između 50% i 100%) i isto armiranih NAC greda od betona sa istim efektivnim vodocementnim faktorom, iz sopstvenih i drugih eksperimentalnih ispitivanja, su:

20) RAC grede imaju 10% manji moment savijanja pri pojavi prvih prslina, 19% veće ugibe pri eksploatacionom kraktotrajnom opterećenju i 5% veći granični moment savijanja u odnosu na uporedne NAC grede,

21) RAC grede imaju 2% manji normalizovani napon smicanja pri pojavi prve kose prsline i 6% veći normalizovani granični napon smicanja u odnosu na uporedne NAC grede.

Kao opšti zaključak celokupnog istraživanja treba istaći da je primena agregata od recikliranog betona u elementima armiranobetonskih konstrukcija koji su izloženi savijanju i/ili smicanju, tehnički izvodljiva, komparativna i kompetitivna primeni betona od prirodnog agregata.

## **5.2 SMERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA**

Prostor za buduća istraživanja na temu primene agregata od recikliranog betona u konstrukcijskim betonima postoji na više nivoa. Iako su fizičko-mehanička svojstva betona na bazi recikliranog agregata uglavnom dobro poznata, nedostaju istraživanja koja će pripremiti osnovu za proračun elemenata konstrukcije od takvog betona. To pre svega znači istraživanje naponsko-deformacijskog dijagrama, kako bi bilo moguće formirati radni dijagram betona na bazi recikliranog agregata. Veliki nedostatak istraživanja oseća se u dve oblasti koje su od izuzetnog značaja za primenu u konstrukcijskim betonima, a to su ispitivanja reoloških svojstava i trajnosti. Naravno, potrebno je obogatiti fond istraživanja vezanih za ponašanje RAC elemenata konstrukcije. Naročito je važno istražiti uticaj vremenskih efekata i dugotrajnog opterećenja na deformacijske karakteristike savijanih RAC elemenata konstrukcije. Istraživanja na ovu temu praktično ne postoje. Na kraju, potrebno je sprovesti uporednu analizu uticaja RAC i NAC elemenata konstrukcije na životnu sredinu, primenom metodologije ocene životnog ciklusa prema ISO standardima 14000. Time bi se nakon zadovoljenja tehničkog aspekta, primeni RAC u konstruktivnim elementima dodao i aspekt održivosti.



## 6. Literatura

- [1] Abbas A., Fathifazl G., Isgor B.O., Razaqpur G.A., Fournier B., Foo S. (2009): Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and Concrete Composites* 31: 555-563.
- [2] Abukersh S.A., Fairfield C.A. (2011): Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. *Construction and Building Materials* 25: 4088-4094.
- [3] ACI Committee 318 (2008): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, ACI 318M-08. Farmington Hills, M.I., U.S.A.
- [4] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A. (2002): Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites* 24: 269-279.
- [5] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A. (2007): Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol. 5, No. 2: 259-273.
- [6] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A. (2012): Structural recycled aggregate concrete - Instantaneous and long-term properties. *Proceedings of the fib Symposium – Concrete structures for sustainable community*, Stockholm, Sweden, str.67-70.
- [7] Amorim P., de Brito J., Evangelista L. (2012): Concrete Made with Coarse Concrete Aggregate: Influence of Curing on Durability. *ACI Materials Journal*: 195-204.
- [8] Angulo S.C., Carrijo P.M., Figueiredo A.D., Chaves A.P., John V.M. (2010): On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Mater. and Struct.* 43: 519-528.
- [9] Ann K.Y., Moon H.Y., Kim Y.B., Ryou J. (2008): Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste management* 23: 993-999.
- [10] ASCE-ACI Committee 445 (1998): Recent approaches to shear design of structural concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 12: 1375-1417.
- [11] Balazs G., Kausay T., Simon T. (2008): Technical guideline for recycled aggregate concrete in Hungary, *Concrete Structures*: 45-55.
- [12] Barra M., Vazquez E. (1998): Properties of concrete with recycled aggregates: Influence of properties of the aggregates and their interpretation. *Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“*. Tomas Telford, London, UK. str. 19-30.

- [13] Bassan M., Quattrone M., Basilico V. (2009): Structural concretes made from recycled precast elements. Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, Sao Paulo, Brasil, str.129-139.
- [14] Bentz E.C. (2000): Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 310.
- [15] Berndt M.L. (2009): Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials 23: 2606-2613.
- [16] Beton i armirani beton prema BAB '87- Priručnik (1995): Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Beograd, str. 115-160 i str. 240-265.
- [17] Boehme L., Vrijders J., Van Gysel A. (2012): Assessment of Recycled Concrete Aggregates in Concrete C20/25 & C25/30. Proceedings of the fib Symposium – Concrete structures for sustainable community, Stockholm, Sweden, str.71-74.
- [18] BS EN 12260 (2002): Aggregates for concrete. British Standard Institution, BSI, London.
- [19] BS 8500-2 (2006): Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1- Part 2: Specification for constituent materials and concrete. British Standard Institution, BSI, London.
- [20] Butler L., West J.S., Tighe S.L. (2011): The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. Cement and Concrete Research 41: 1037-1049.
- [21] Chakradhara Rao M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. (2011): Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. Mater. and Struct. 44: 205-220.
- [22] Choi W.C., Yun H.D. (2012): Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading. Engineering Structures 41:285-293.
- [23] Collins M.P., Mitchell D. (1991): Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, New Jersey.
- [24] Corinaldesi V., Moriconi G. (2009): Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 23: 2869-2876.
- [25] Corinaldesi V. (2010): Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. Construction and Building Materials 24: 1616-1620.
- [26] Corinaldesi V., Moriconi G. (2011): Behavior of beam-column joints made of recycled aggregate concrete under cyclic loading. Construction and Building Materials 25: 1877-1882.

- [27] CUR Recommendation 112 (2007): Concrete with recycled concrete as coarse aggregate, CURNET, Netherland
- [28] Dapena E., Alaejos P., Lobet A., Perez D. (2011): Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. ASCE: Journal of Materials in Civil Engineering: 414-422.
- [29] DafStb (1998): Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag. DIN Deutsches Institut für Normunge.V., Berlin, Germany.
- [30] Dillman R. (1998): Concrete with recycled concrete aggregate. Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“. Tomas Telford, London, UK. str. 239-254.
- [31] DIN 4226-100 (2002): Aggregates for concrete and mortar - Part 100: Recycled aggregates, Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.
- [32] DIN 1045-1 (2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Berlin, Germany.
- [33] Domingo A., Lazaro C., Gayarre F.L., Serrano M.A., Lopez-Colina C. (2010): Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. Mater. and Struct. 43: 1147-1160.
- [34] Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M.A. Serrano-López, P. Serna, J.O. Castaño-Tabares (2009): Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 23:2545-2553.
- [35] Dosho Y., Kikuchi M., Narikawha M., Ohshima A., Koyama A., Miura T. (1998): Application of Recycled Concrete for Structural Concrete – Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, ACI – Special Publication, SP 179-61A: 1073-1101.
- [36] EN 12620 (2002): Aggregates for concrete. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [37] Etxeberria M. (2004): Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete, Doctoral Thesis, Barcelona, Spain.
- [38] Etxeberria M., Mari A., Vasquez E. (2007): Recycled aggregate concrete as structural material. Materials and Structures 40: 529-541.
- [39] Eurocode 2 (2004): Design of concrete structures, part 1–1. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- [40] European Concrete Platform ASBL (2008): Eurocode 2 Commentary, Brussels, Belgium.
- [41] Evangelista L., Brito J. (2007): Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregate. Cement and Concrete Composites 29: 397-401.

- [42] Evangelista L., Brito J. (2010): Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites* 32: 9-14.
- [43] Fathifazl G. (2008): Structural performance of steel reinforced recycled concrete members. Doctoral thesis, University of Ottawa, Ontario, Canada.
- [44] Fathifazl G., Razaqpur G.A., Isgor B.O., Abbas A., Fournier B., Foo S. (2009): Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams. *ACI Structural Journal* 106(6):858-867.
- [45] Fathifazl G., Razaqpur G.A., Isgor B.O., Abbas A., Fournier B., Foo S (2011<sup>a</sup>): Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Composites* 33: 1026-1037.
- [46] Fathifazl G., Razaqpur G.A., Isgor B.O., Abbas A., Fournier B., Foo S (2011<sup>b</sup>): Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams, *Engineering Structures* 33: 1025-1033.
- [47] Fonseca N., de Brito J., Evangelista L. (2011): The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites* 33:637-643.
- [48] Gettu R., Mobasher B., Carmona S., Jansen D.C. (1996): Testing of concrete under closed-loop control. *Advanced Cement Based Materials*, Vol .3, Issue 2, str. 54-71.
- [49] Gomez Soberon, J.M.V. (2002<sup>a</sup>): Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study. *Cement and Concrete Research* 32:1301-1311.
- [50] Gomez Soberon, J.M.V.(2002<sup>b</sup>): Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate. A: Malhotra, V.M.(ed.)"SP-209: ACI Fifth International Conference on Innovation in Design with Emphasis on Seismic, Wind and Environmental Loading, Quality Control, and Innovation in Materials/Hot Weather Concreting". str. 475-495.
- [51] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Carro Lopez D., Seara-Paz S (2011<sup>a</sup>): Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Construction and Building Materials* 25: 2335-2342.
- [52] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Eiras-Lopez J, Seara-Paz S (2011<sup>b</sup>): Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Mater. and Struct.* 44: 1759-1770.
- [53] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F. (2007): Shear strenght of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials* 21: 887-893.

- [54] Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella F. (2008): Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. *Materials and mechanical properties. Building and Environment* 43: 429-437.
- [55] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F. (2009): Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume. *Construction and Building Materials* 23: 3406-3410.
- [56] Grdic Z., Toplicic-Curcic G., Despotovic I., Ristic N. (2010): Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 24: 1129-1133.
- [57] Han B. C., Yun H. D., Chung S. Y. (2001): Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Made with Recycled Aggregate. *ACI Special publication*: 503-515.
- [58] Hansen T. C. (1992): Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, *Third State-of-the-art Report 1945-1989 of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete)*, str. 157.
- [59] Hansen T. C., Narud H. (1983): Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International-Design and Construction* 5, No. 1: 79-83.
- [60] Ignjatović I. (2009): *Betoni na bazi recikliranog agregata i njihova primena u elementima armiranobetonskih konstrukcija. Magistarska teza, Građevinski fakultet, Beograd.*
- [61] Ignjatović I., Savić A., Marinković S. (2010): Eksperimentalno ispitivanje betona od recikliranog agregata. *Građevinski kalendar, Beograd, str. 101-147.*
- [62] Ignjatović I., Marinković S., Mišković Z., Savić A. (2012): Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading. *Materials and structures* 46: 1045-1059.
- [63] ISS (1982): SRPS B.B8.036: Kameni agregat - Određivanje količine sitnih čestica metodom mokrog sejanja. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [64] ISS (1984<sup>a</sup>): SRPS B.B8.049: Kameni agregat - Određivanje oblika zrna metodom zapreminskog koeficijenta. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [65] ISS (1984<sup>b</sup>): SRPS U.M1.057: Beton - Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [66] ISS (1985): SRPS B.B0.001: Prirodni kamen - Uzimanje uzoraka kamena i kamenih agregata. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [67] ISS (1986): SRPS B.B2.010: Separisani agregat (granulat) za beton - Tehnički uslovi. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.

- [68] ISS (1993): SRPS U.M1.026: Beton - Određivanje dinamičkog modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [69] ISS (1994): SRPS B.B8.033: Kameni agregat - Određivanje drobljivosti u cilindru. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [70] ISS (1997): SRPS ISO 6276: Beton-Zbijeni sveži beton- Određivanje zapreminske mase. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [71] ISS (1998): SRPS U.M1.060: Beton - Uzorkovanje agregata normalne mase. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [72] ISS (1999<sup>a</sup>): SRPS ISO 6782: Agregati za beton - određivanje nasute zapreminske mase. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [73] ISS (1999<sup>b</sup>): SRPS ISO 7033: Sitni i krupni agregati za beton - određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode - Piknometarska metoda. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [74] ISS (2000<sup>a</sup>): SRPS ISO 6784: Određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [75] ISS (2000<sup>b</sup>): SRPS ISO 4013: Beton - Određivanje čvrstoće epruveta pri savijanju. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [76] ISS (2006): SRPS ISO/IEC 17025: Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [77] ISS (2007): SRPS ISO 5725-2: Tačnost (istinitost i preciznost) metoda i rezultata merenja (Deo 2: Osnovna metoda za određivanje ponovljivosti i reproducibilnosti standardne metode merenja). Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [78] ISS (2008<sup>a</sup>): SRPS EN 12390-6: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 6: Čvrstoća pri zatezanju cepanjem uzoraka za ispitivanje. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [79] ISS (2008<sup>b</sup>): SRPS EN 10080: Betonski čelik - Zavarivi betonski čelik - Opšti deo. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [80] ISS (2009): SRPS EN 1097-3: Ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 3: Određivanje šupljina i zapreminske mase u rastresitom stanju. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [81] ISS (2010<sup>a</sup>): SRPS EN 12350-2: Ispitivanje svežeg betona- Deo 2: Ispitivanje sleganja. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [82] ISS (2010<sup>b</sup>): SRPS EN 12390-3: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje. Institut za standardizaciju Srbije ISS, Beograd.
- [83] JIS A 5021 (2005): Recycled aggregate for concrete-class H. Japanese Standard Association, Japan.

- [84] Jurić B., Hanžić L., Ilić R., Samec N. (2006): Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete. *Waste Management*, 26: 1436-1442.
- [85] Katz A. (2003): Performance of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research* 33: 703-711.
- [86] Khatib J.M. (2005): Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, *Cement and Concrete Research* 35: 763-769.
- [87] Kerkhoff B., Siebel E. (2003): Properties of concrete with recycled aggregates. German Cement Works Association, *Concrete Technology Reports*, str. 47-58.
- [88] Knights J. (1998): Relative performance of high quality concretes containing recycled aggregates and their use in construction. *Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“*. Tomas Telford, London, UK. str. 275-286.
- [89] Kottegoda N., Rosso R. (2008): *Applied statistics for civil and environmental engineers*, Blackwell Publishing, United Kingdom.
- [90] Kou S.C., Poon C. S., Chan D. (2007): Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of materials in civil engineering*, ASCE, str. 709-717.
- [91] Kou S.C., Poon C. S., Argela F. (2011<sup>a</sup>): Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites* 33: 788-795.
- [92] Kou S.C., Poon C. S., Etxeberria M. (2011<sup>b</sup>): Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites* 33: 286-291.
- [93] Kou S.C., Poon C. S. (2012): Enhancing durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and building materials* 35: 69-76.
- [94] Lauritzen E. (2004): *Recycling Concrete – An overview of development and challenges*. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. Barcelona, Spain.
- [95] Lauritzen E. (2006): Research needs on regeneration of construction and demolition waste. Workshop “Research in waste area - Towards the FP7”, Brussels, Belgium.
- [96] Li X. (2008): Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I-Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resour.Conserv.Recycl.* 53: 36-44.
- [97] Li X. (2009): Recycling and reuse of waste concrete in China. Part II -Structural behaviour of recycled aggregate concrete and

- engineering applications. Resources, Conservation and Recycling 53: 107-112.
- [98] Limbachiya M.C., Leelawat T., Dhir R.K. (2000): Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete, Materials and Structures 33: 574-580.
- [99] Limbachiya M. (2010): Recycled aggregates: Production, properties and value-added sustainable applications. Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition, str. 1011-1016.
- [100] Lovato P.S., Possan E., Dal Molin D.C.C, Masuero A.B., Ribeiro J.L.D. (2012): Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. Construction and building materials 26: 437-447.
- [101] Malešev M., Radonjanin V., Dimča M. (2006): Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete – Part I. Proceeding of the 4th International Scientific Conference INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry, Novi Sad, Serbia, str. 495-504.
- [102] Malešev M., Radonjanin V., Marinković S. (2010): Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. Sustainability 2: 1204-1225, doi:10.3390/su2051204.
- [103] Malešev M., Radonjanin V., Marinković S., Al Maly A.M.S. (2012): GRAC- Green Recycled Aggregate Concrete. Proceeding of the 14th International Conference and Exhibition: Structural Faults and Repairs, Edinburgh, Scotland.
- [104] Marinković S., Radonjanin V., Malešev M., Ignjatović I. (2010): Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. Waste manag. 30: 2255-2264.
- [105] Marinković S., Ignjatović I., Radonjanin V., Malešev M., (2012): Recycled Aggregate Concrete for Structural Use – An Overview of Technologies, Properties and Applications. In book: Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction (Editor: Fardis M.) Springer Science+Business media B.V, str. 115-130.
- [106] Meyer C. (2009).: The greening of the concrete industry. Cement and Concrete Composites 31: 601-605.
- [107] Meyer C. (2002): Concrete and Sustainable Development, Special Publication ACI 206. American Concrete Institute, Farmington Hills, M.I., U.S.A.
- [108] Model Code (2010): First complete draft, Volume 2. Fédération de l'Industrie du Béton (*fib*), Lausanne, Switzerland.
- [109] Muller C. (1998): Requirements on concrete for future recycling. Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“. Tomas Telford, London, UK. str. 19-30.



- [110] Muravljev M. (1998): Građevinski materijali, DIP “ Građevinska knjiga”.
- [111] NEN 5905 (1997): Toeslagmaterialen voor beton – Materialen met een volumieke massa van ten minste 2000 kg/m<sup>2</sup>. Dutch Normalization Institute.
- [112] NEN 8005 (2008): Dutch supplement to NEN-EN 206-1: Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. Dutch Normalization Institute.
- [113] Nevil A.M.(1976): Svojtva betona, Građevinska knjiga, str. 530.
- [114] Noguchi T. (2010): Lifecycle Perspective of Technologies and Properties of Recycled Aggregate Concrete in Japan. International Concrete Sustainability Conference, Dubai, UAE.
- [115] Oikonomou ND (2005): Recycled concrete aggregates. Cem. and Concr. Compos. 27: 315-318.
- [116] Padmini A.K., Ramamurthy K., Mathews M.S. (2009): Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 23: 829-836.
- [117] Poon C.S., Azhar S., Kou S.C. (2003): Recycled Aggregates for Concrete Applications. Proceedings of the conference: Materials Science and Technology in Engineering, Hong Kong.
- [118] Poon C. S., Shui Z. H., Lam C. S., Fok H., Kou S.C. (2004<sup>a</sup>): Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research 34: 31-36.
- [119] Poon C.S., Shui Z.H., Lam L. (2004<sup>b</sup>): Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. Constr. and Build. Mater. 18: 461-468.
- [120] Poon C. S., Kou S.C., Lam C. S. (2007): Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. Materials and Structures 40: 981-988.
- [121] Radonjanin V., Malešev M., Dimča M. (2006): Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete – Part II, Proceedings of the 4th International Scientific Conference INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry, Novi Sad, Serbia: 505-516.
- [122] Rahal K. (2007): Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. Build. and Environ. 42: 407-415.
- [123] Reis C.N.S., Leite M.B., Lima P.R.L. (2009): Influence of the diameter of the bar and CDW content on the bond behaviour of recycled reinforced concrete. Proceeding of the 2nd RILEM Conference on Progress of recycling in the built environment, Sao Paulo, Brasil, str. 207-214.

- [124] RILEM Recommendation (1994): Specifications for concrete with recycled aggregates. *Mater. Struct.* 27: 557-559.
- [125] RILEM TC (1983): RC 6 - Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, in Book: RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials (1994), str. 218-220.
- [126] Roos F. (1998): Verification of the dimensioning values for concrete with recycled concrete aggregate. Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“. Tomas Telford, London, UK. str. 309-319.
- [127] Safiuddin, M., Alengaram, U., Salam, M., Jumaat, M., Jaafar, F., & Saad, H. (2011). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. *Materials Research* 14: 248-255.
- [128] Sagoe-Crentsil K.K., Brown T., Taylor A.H. (2001): Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Research* 31: 707-712.
- [129] Sakai K. (2005): Environmental design for concrete structures. *J. of Advanc. Concr. Technol.* 3(1):17-28.
- [130] Sakai K. (2009): Recycling concrete – the present state and future perspective. TCG-JSCE Joint Seminar, Athens, Greece. [library.tce.gr/digital/m2469/m2469\\_sakai.pdf](http://library.tce.gr/digital/m2469/m2469_sakai.pdf). Dostupno: 23.jul 2012.
- [131] Sanchez de Juan M., Gutierrez P.A. (2004): Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, str. 9.
- [132] Santos J. R., Branco F., Brito J. (2004): Mechanical Properties of Concrete with Coarse Recycled Aggregates. *Structural Engineering International* 14 (3): 213-215.
- [133] Sato R., Maruyama I., Sogabe T., Sogo M. (2007): Flexural Behaviour of Reinforced Recycled Concrete Beams. Japan Concrete Insitute, *Journal of Advanced Concrete Technology* 5 (1): 43-61.
- [134] Sogo M., Sogabe T., Maruyama I., Sato R., Kawai K.(2004): Shear Behaviour of Reinforced Recycled Concrete Beams, International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, str. 610-618.
- [135] Somna R, Jaturapitakkul C., Rattanachu P., Chalee W. (2012): Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Design* 36: 597-603.
- [136] Symonds, Argus, Cowi and PRC Bouwcentrum (1999): Construction and Demolition Waste Management Practices and their Economic Impact. Report of the Project Group to the European Commission. [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw\\_chapter1-6.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.pdf). Accessed on July 23, 2012.

- [137] Tam V. (2005): Recycled aggregate from concrete waste for higher grades of concrete construction. Doctoral thesis. City University of Hong Kong.
- [138] Tam W.Y.V., Tam C.M. (2008): Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA<sub>sc</sub>. *Constr. and Build. Mater.* 22: 2067-2077.
- [139] Tam W.Y.V., Wang K., Tam C.M. (2008): Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis, *J.Hazard.Mater.* 152(2): 703-714.
- [140] Tam W.Y.V., Gao X.F., Tam C.M., Ng K.M. (2009): Physio-chemical reactions in recycled aggregate concrete. *J.Hazard.Mater.* 163(2-3), 823-828.
- [141] Tangchirapat W., Buranasing R., Jaturapitakkul C. (2010): Use of High Fineness of Fly Ash to Improve Properties of Recycled Aggregate Concrete. *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*, 565-571.
- [142] Tavakoli M., Soroushian P. (1996): Strength of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate, *ACI Materials Journal* 93(2).
- [143] Teranishi K., Dosho Y., Narikawa M., Kikuchi M. (1998): Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part 3 – Production of recycled aggregate by real-scale plant and quality of recycled concrete aggregate. *Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“*. Tomas Telford, London, UK. str. 143-156.
- [144] Van der Wegen G., Haverkort R. (1998): Recycled construction and demolition waste as a fine aggregate for concrete. *Proceedings of the International Symposium „Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate“*. Tomas Telford, London, UK. str. 333-346.
- [145] Vecchio F.J., Collins M.P. (1986): The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*, March-April, str.219-231.
- [146] Villagran-Zaccardi Y.A., Zega C.J., Di Maio A.A. (2008): Chloride penetration and binding in recycled concrete. *ASCE: Journal of materials in civil engineering*: 449-455.
- [147] Works Bureau (2002) Works Bureau Technical Circular 12/2002, Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates, Hong Kong SAR Government.
- [148] Xiao J., Li J., Zhang Ch. (2005): Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research* 35: 1187-1194.

- [149] Xiao J., Sun Y., Falkner H.(2006): Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete, *Engineering Structures* 28:1-8.
- [150] Xiao J., Falkner H. (2007): Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Construction and building materials* 21: 395-401.
- [151] Xiao J., Huang Y., Yang J., Chang C.(2012): Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression, *Construction and Building Materials* 26: 591-603.
- [152] Xiao J., Xie H., Yang Z. (2012): Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research* 42: 700-709.
- [153] Xiao J., T. L. Pham, P. J. Wang, G. Gao (2013): Behaviors of semi-precast beam made of recycled aggregate concrete, *Struct. Design Tall Spec. Build.* Published online in Wiley Online Library ([wileyonlinelibrary.com/journal/tal](http://wileyonlinelibrary.com/journal/tal)). DOI: 10.1002/tal.1071
- [154] Xudong C., Wanshan H., Jikai Z.(2012): Effect of moisture content on compressive and split tensile strength of concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 19: 427-435.
- [155] Yagishita F., Sano M., Yamada M. (1994): Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Aggregate. *Proceeding of 3rd International RILEM Symposium Demolition Reuse Concrete Masonry*, str. 331-342.
- [156] Yang K.H., Chung H.S., Ashour A. (2008): Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Mater. J.* 105(3): 289-296.
- [157] Yang Y.F., Han L.H. (2006): Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns, *Journal of constructional steel research* 62: 1310-1324.
- [158] Yang J., Du Q., Bao Y. (2011): Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and building materials* 25: 1935-1945.

**PRILOG A: NUMERIČKI PODACI IZ LITERATURE****A.1 ČVRSTOĆA PRI PRITISKU NAC I RAC BETONA SA KRUPNIM RCA**

| Istraživanje                  | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Ajdukiewicz&Klischewicz, 2002 | 0                              | 0.36                             | 48.4                                 |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 44.5                                 | 91.9                                       |
|                               | 0                              | 0.36                             | 48.9                                 |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 46.1                                 | 94.3                                       |
|                               | 0                              | 0.36                             | 48.9                                 |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 52.5                                 | 107.4                                      |
|                               | 0                              | 0.36                             | 48.9                                 |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 45.2                                 | 92.4                                       |
|                               | 0                              | 0.36                             | 48.9                                 |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 49.6                                 | 101.4                                      |
|                               | 0                              | 0.36                             | 52.3                                 |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 54.4                                 | 104.0                                      |
|                               | 0                              | 0.36                             | 64                                   |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 55.8                                 | 87.2                                       |
|                               | 0                              | 0.36                             | 64                                   |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 55.8                                 | 87.2                                       |
|                               | 0                              | 0.36                             | 64                                   |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 60.8                                 | 95.0                                       |
|                               | 0                              | 0.36                             | 64                                   |  |
|                               | 100                            | 0.36                             | 60.9                                 | 95.2                                       |
| 0                             | 0.36                           | 64                               |                                      |  |
| 100                           | 0.36                           | 58.4                             | 91.3                                 |  |
| 0                             | 0.36                           | 60.2                             |                                      |  |
| 100                           | 0.36                           | 63.3                             | 105.1                                |  |
| Rahal, 2007                   | 0                              | 0.65                             | 22.7                                 |  |
|                               | 100                            | 0.65                             | 20.3                                 | 89.4                                       |
|                               | 0                              | 0.65                             | 23.6                                 |  |
|                               | 100                            | 0.65                             | 22.1                                 | 93.6                                       |
|                               | 0                              | 0.5                              | 32.3                                 |  |
|                               | 100                            | 0.5                              | 29.2                                 | 90.4                                       |
|                               | 0                              | 0.5                              | 26.7                                 |  |
|                               | 100                            | 0.5                              | 25.1                                 | 94.0                                       |
|                               | 0                              | 0.48                             | 36                                   |  |
|                               | 100                            | 0.48                             | 32.2                                 | 89.4                                       |
|                               | 0                              | 0.48                             | 28.9                                 |  |
|                               | 100                            | 0.48                             | 27.2                                 | 94.1                                       |
|                               | 0                              | 0.43                             | 46                                   |  |
|                               | 100                            | 0.43                             | 39.4                                 | 85.7                                       |
|                               | 0                              | 0.43                             | 31.1                                 |  |
|                               | 100                            | 0.43                             | 28.7                                 | 92.3                                       |
|                               | 0                              | 0.4                              | 53.5                                 |  |
|                               | 100                            | 0.4                              | 46.5                                 | 86.9                                       |
|                               | 0                              | 0.4                              | 33.7                                 |  |
|                               | 100                            | 0.4                              | 29.5                                 | 87.5                                       |

Prilog A

| Istraživanje                     | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Katz, 2003                       | 0                              | 0.55                             | 42.1                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 24.1                                 | 57.2                                       |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 29.1                                 | 69.1                                       |
|                                  | 100                            | 0.56                             | 25.8                                 | 61.3                                       |
|                                  | 0                              | 0.55                             | 34.6                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 30.5                                 | 88.2                                       |
|                                  | 100                            | 0.56                             | 26.6                                 | 76.9                                       |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 26.8                                 | 77.5                                       |
| Xiao i ost., 2005                | 0                              | 0.43                             | 35.9                                 |  |
|                                  | 30                             | 0.43                             | 34.1                                 | 95.0                                       |
|                                  | 50                             | 0.43                             | 29.6                                 | 82.5                                       |
|                                  | 70                             | 0.43                             | 30.3                                 | 84.4                                       |
|                                  | 100                            | 0.43                             | 26.7                                 | 74.4                                       |
|                                  | 0                              | 0.43                             | 29.6                                 |  |
|                                  | 30                             | 0.43                             | 25.4                                 | 85.8                                       |
|                                  | 50                             | 0.43                             | 23.6                                 | 79.7                                       |
|                                  | 70                             | 0.43                             | 24.2                                 | 81.8                                       |
|                                  | 100                            | 0.43                             | 23.8                                 | 80.4                                       |
| Poon i ost., 2004 <sup>a</sup>   | 0                              | 0.57                             | 48.3                                 |  |
|                                  | 20                             | 0.57                             | 44.9                                 | 93.0                                       |
|                                  | 50                             | 0.57                             | 44.7                                 | 92.5                                       |
|                                  | 100                            | 0.57                             | 46.8                                 | 96.9                                       |
|                                  | 0                              | 0.57                             | 40.2                                 |  |
|                                  | 20                             | 0.57                             | 43.2                                 | 107.5                                      |
|                                  | 50                             | 0.57                             | 39.7                                 | 98.8                                       |
|                                  | 100                            | 0.57                             | 43.3                                 | 107.7                                      |
|                                  | 0                              | 0.57                             | 46                                   |  |
|                                  | 20                             | 0.57                             | 43                                   | 93.5                                       |
|                                  | 50                             | 0.57                             | 38.1                                 | 82.8                                       |
|                                  | 100                            | 0.57                             | 39.1                                 | 85.0                                       |
| Poon i ost., 2007                | 0                              | 0.55                             | 48.6                                 |  |
|                                  | 20                             | 0.55                             | 45.3                                 | 93.2                                       |
|                                  | 50                             | 0.55                             | 42.5                                 | 87.4                                       |
|                                  | 80                             | 0.55                             | 39.2                                 | 80.7                                       |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 37.1                                 | 76.3                                       |
| Poon i ost., 2004 <sup>b</sup>   | 0                              | 0.5                              | 41.5                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.5                              | 32.6                                 | 78.6                                       |
|                                  | 100                            | 0.5                              | 38.7                                 | 93.3                                       |
| Gomez-Soberon, 2002 <sup>a</sup> | 0                              | 0.52                             | 39                                   |  |
|                                  | 15                             | 0.52                             | 38.1                                 | 97.7                                       |
|                                  | 30                             | 0.52                             | 37                                   | 94.9                                       |
|                                  | 60                             | 0.52                             | 35.8                                 | 91.8                                       |
|                                  | 100                            | 0.52                             | 34.5                                 | 88.5                                       |
| Xiao&Falkner, 2007               | 0                              | 0.43                             | 43.5                                 |  |
|                                  | 50                             | 0.43                             | 39.3                                 | 90.2                                       |
|                                  | 100                            | 0.43                             | 34.6                                 | 79.6                                       |
| Yang&Han, 2006                   | 0                              | 0.5                              | 42.7                                 |  |

Prilog A

| Istraživanje         | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Yang&Han, 2006       | 25                             | 0.5                              | 41.8                                 | 97.9                                       |
|                      | 50                             | 0.5                              | 36.6                                 | 85.7                                       |
| Padmini i ost., 2009 | 0                              | 0.58                             | 35                                   |  |
|                      | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 77.1                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 77.1                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 77.1                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 28                                   | 80.0                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 77.1                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 25                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 28                                   | 80.0                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 26                                   | 74.3                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 26                                   | 74.3                                       |
|                      | 0                              | 0.43                             | 49                                   |  |
|                      | 100                            | 0.43                             | 33                                   | 67.3                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 35                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 35                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 32                                   | 65.3                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 35                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 36                                   | 73.5                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 34                                   | 69.4                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 33                                   | 67.3                                       |
|                      | 100                            | 0.43                             | 34                                   | 69.4                                       |
|                      | 0                              | 0.34                             | 56                                   |  |
|                      | 100                            | 0.34                             | 37                                   | 66.1                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 39                                   | 69.6                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 40                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 36                                   | 64.3                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 40                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 40                                   | 71.4                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 36                                   | 64.3                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 39                                   | 69.6                                       |
|                      | 100                            | 0.34                             | 41                                   | 73.2                                       |
|                      | 0                              | 0.58                             | 37                                   |  |
|                      | 100                            | 0.58                             | 29                                   | 78.4                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 73.0                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 24                                   | 64.9                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 32                                   | 86.5                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 30                                   | 81.1                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 29                                   | 78.4                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 32                                   | 86.5                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 31                                   | 83.8                                       |
|                      | 100                            | 0.58                             | 31                                   | 83.8                                       |
|                      | 0                              | 0.43                             | 50                                   |  |
|                      | 100                            | 0.43                             | 35                                   | 70.0                                       |
| 100                  | 0.43                           | 40                               | 80.0                                 |  |
| 100                  | 0.43                           | 39                               | 78.0                                 |  |
| 100                  | 0.43                           | 37                               | 74.0                                 |  |
| 100                  | 0.43                           | 38                               | 76.0                                 |  |
| 100                  | 0.43                           | 38                               | 76.0                                 |  |
| 100                  | 0.43                           | 37                               | 74.0                                 |  |

Prilog A

| Istraživanje                        | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Padmini i ost., 2009                | 100                            | 0.43                             | 39                                   | 78.0                                       |
|                                     | 100                            | 0.43                             | 36                                   | 72.0                                       |
|                                     | 0                              | 0.34                             | 57                                   |  |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 40                                   | 70.2                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 42                                   | 73.7                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 43                                   | 75.4                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 41                                   | 71.9                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 42                                   | 73.7                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 42                                   | 73.7                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 39                                   | 68.4                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 39                                   | 68.4                                       |
|                                     | 100                            | 0.34                             | 44                                   | 77.2                                       |
|                                     | 0                              | 0.58                             | 31                                   |  |
|                                     | 100                            | 0.58                             | 28                                   | 90.3                                       |
|                                     | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 87.1                                       |
|                                     | 100                            | 0.58                             | 27                                   | 87.1                                       |
|                                     | 0                              | 0.43                             | 45                                   |  |
|                                     | 100                            | 0.43                             | 36                                   | 80.0                                       |
|                                     | 100                            | 0.43                             | 37                                   | 82.2                                       |
|                                     | 100                            | 0.43                             | 39                                   | 86.7                                       |
| Abas i ost., 2009                   | 0                              | 0.45                             | 36.9                                 |  |
|                                     | 63.5                           | 0.45                             | 39.2                                 | 106.2                                      |
|                                     | 100                            | 0.45                             | 41.8                                 | 113.3                                      |
|                                     | 0                              | 0.45                             | 35.6                                 |  |
|                                     | 74.3                           | 0.45                             | 40                                   | 112.4                                      |
|                                     | 100                            | 0.45                             | 39.7                                 | 111.5                                      |
| Gomez-Soberon, 2002 <sup>b</sup>    | 0                              | 0.52                             | 39                                   |  |
|                                     | 15                             | 0.52                             | 38.1                                 | 97.7                                       |
|                                     | 30                             | 0.52                             | 37                                   | 94.9                                       |
|                                     | 60                             | 0.52                             | 35.8                                 | 91.8                                       |
|                                     | 100                            | 0.52                             | 34.5                                 | 88.5                                       |
| Fathifazl i ost., 2011 <sup>a</sup> | 0                              | 0.45                             | 35.2                                 |  |
|                                     | 63.5                           | 0.45                             | 41.4                                 | 117.6                                      |
|                                     | 100                            | 0.45                             | 43.9                                 | 124.7                                      |
| Corinaldesi, 2010                   | 0                              | 0.4                              | 58.6                                 |  |
|                                     | 100                            | 0.4                              | 46.1                                 | 78.7                                       |
|                                     | 0                              | 0.45                             | 56.1                                 |  |
|                                     | 100                            | 0.45                             | 45.8                                 | 81.6                                       |
|                                     | 0                              | 0.5                              | 51.2                                 |  |
|                                     | 100                            | 0.5                              | 39.9                                 | 77.9                                       |
|                                     | 0                              | 0.55                             | 47.1                                 |  |
|                                     | 100                            | 0.55                             | 36.3                                 | 77.1                                       |
|                                     | 0                              | 0.6                              | 43.9                                 |  |
|                                     | 100                            | 0.6                              | 34.7                                 | 79.0                                       |



Prilog A

| Istraživanje                                | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|---|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Fathifazl i ost., 2011 <sup>b</sup>         | 0                              | 0.45                             | 38.8                                 |  |
|   | 63.5                           | 0.45                             | 41.6                                 | 107.2                                      |
|   | 0                              | 0.45                             | 34.4                                 |  |
|   | 74.3                           | 0.45                             | 49.1                                 | 142.7                                      |
| Fonseca i ost., 2011                        | 0                              | 0.43                             | 51                                   |  |
|   | 20                             | 0.43                             | 48.8                                 | 95.7                                       |
|   | 50                             | 0.43                             | 51.3                                 | 100.6                                      |
|   | 100                            | 0.43                             | 51.2                                 | 100.4                                      |
|   | 0                              | 0.43                             | 51.7                                 |  |
|   | 20                             | 0.43                             | 50.6                                 | 97.9                                       |
|   | 50                             | 0.43                             | 50.3                                 | 97.3                                       |
|   | 100                            | 0.43                             | 49.2                                 | 95.2                                       |
|   | 0                              | 0.43                             | 48.8                                 |  |
|   | 20                             | 0.43                             | 48                                   | 98.4                                       |
|   | 50                             | 0.43                             | 52                                   | 106.6                                      |
|   | 100                            | 0.43                             | 51.4                                 | 105.3                                      |
|   | 0                              | 0.43                             | 50.5                                 |  |
|   | 20                             | 0.43                             | 50.1                                 | 99.2                                       |
|   | 50                             | 0.43                             | 48.8                                 | 96.6                                       |
|   | 100                            | 0.43                             | 50                                   | 99.0                                       |
| Gonzalez-Fonteboa & Martinez-Abella, 2007   | 0                              | 0.55                             | 40.2                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 39.6                                 | 98.6                                       |
|   | 0                              | 0.55                             | 39.2                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 39.2                                 | 100.2                                      |
|   | 0                              | 0.55                             | 39.1                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 41.5                                 | 106.2                                      |
|   | 0                              | 0.55                             | 37.7                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 40.5                                 | 107.4                                      |
| Gonzalez-Fonteboa i ost., 2011 <sup>a</sup> | 0                              | 0.65                             | 31.9                                 |  |
|   | 20                             | 0.65                             | 31.7                                 | 99.3                                       |
|   | 50                             | 0.65                             | 32.4                                 | 101.3                                      |
|   | 100                            | 0.65                             | 30.1                                 | 94.4                                       |
|   | 0                              | 0.65                             | 41.5                                 |  |
|   | 20                             | 0.65                             | 37.0                                 | 89.3                                       |
|   | 50                             | 0.65                             | 37.6                                 | 90.6                                       |
|   | 100                            | 0.65                             | 37.1                                 | 89.4                                       |
|   | 0                              | 0.5                              | 44.8                                 |  |
|   | 20                             | 0.5                              | 43.7                                 | 97.6                                       |
|   | 50                             | 0.5                              | 37.5                                 | 83.6                                       |
|   | 100                            | 0.5                              | 40.5                                 | 90.5                                       |
|   | 0                              | 0.5                              | 58.5                                 |  |
|   | 20                             | 0.5                              | 50.8                                 | 86.8                                       |
|   | 50                             | 0.5                              | 43.4                                 | 74.1                                       |
|   | 100                            | 0.5                              | 46.6                                 | 79.6                                       |
| Kou i ost., 2007                            | 0                              | 0.45                             | 66.8                                 |  |
|   | 20                             | 0.45                             | 62.4                                 | 93.4                                       |
|   | 50                             | 0.45                             | 55.8                                 | 83.5                                       |
|   | 100                            | 0.45                             | 42.0                                 | 62.9                                       |

Prilog A

| Istraživanje                    | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Kou i ost., 2011 <sup>b</sup>   | 0                              | 0.55                             | 43.8                                 |  |
|                                 | 100                            | 0.55                             | 34.3                                 | 78.3                                       |
|                                 | 100                            | 0.55                             | 35.6                                 | 81.3                                       |
| Villagran-Zaccardi i ost., 2008 | 0                              | 0.35                             | 37.7                                 |  |
|                                 | 73                             | 0.35                             | 36.5                                 | 96.8                                       |
|                                 | 0                              | 0.45                             | 28.8                                 |  |
|                                 | 50                             | 0.45                             | 29.9                                 | 103.8                                      |
|                                 | 0                              | 0.45                             | 30.7                                 |  |
|                                 | 50                             | 0.45                             | 33                                   | 107.5                                      |
|                                 | 0                              | 0.5                              | 26.5                                 |  |
| 73                              | 0.5                            | 23.6                             | 89.1                                 |  |
| Yang i ost., 2011               | 0                              | 0.47                             | 54.7                                 |  |
|                                 | 100                            | 0.47                             | 51.2                                 | 93.6                                       |
|                                 | 0                              | 0.47                             | 54.6                                 |  |
|                                 | 100                            | 0.47                             | 51.9                                 | 95.1                                       |
| Butler i ost., 2011             | 0                              | 0.6                              | 34.4                                 |  |
|                                 | 100                            | 0.6                              | 44.1                                 | 128.2                                      |
|                                 | 100                            | 0.6                              | 36.9                                 | 107.3                                      |
|                                 | 0                              | 0.38                             | 54.7                                 |  |
|                                 | 100                            | 0.38                             | 59                                   | 107.9                                      |
| 100                             | 0.38                           | 54                               | 98.7                                 |  |
| Amorim i ost., 2012             | 0                              | 0.43                             | 51.7                                 |  |
|                                 | 20                             | 0.43                             | 50.6                                 | 97.9                                       |
|                                 | 50                             | 0.43                             | 50.3                                 | 97.3                                       |
|                                 | 100                            | 0.43                             | 49.2                                 | 95.2                                       |
|                                 | 0                              | 0.43                             | 51                                   |  |
|                                 | 20                             | 0.43                             | 48.8                                 | 95.7                                       |
|                                 | 50                             | 0.43                             | 51.3                                 | 100.6                                      |
|                                 | 100                            | 0.43                             | 51.2                                 | 100.4                                      |
|                                 | 0                              | 0.43                             | 48.8                                 |  |
|                                 | 20                             | 0.43                             | 48                                   | 98.4                                       |
|                                 | 50                             | 0.43                             | 47.7                                 | 97.7                                       |
|                                 | 100                            | 0.43                             | 47.2                                 | 96.7                                       |
|                                 | 0                              | 0.43                             | 50.5                                 |  |
|                                 | 20                             | 0.43                             | 50.1                                 | 99.2                                       |
| 50                              | 0.43                           | 48.8                             | 96.6                                 |  |
| 100                             | 0.43                           | 50                               | 99.0                                 |  |
| Choi&Yun, 2012                  | 0                              | 0.44                             | 37.1                                 |  |
|                                 | 30                             | 0.44                             | 33.8                                 | 91.3                                       |
|                                 | 60                             | 0.44                             | 32.4                                 | 87.3                                       |
|                                 | 100                            | 0.44                             | 29.2                                 | 78.7                                       |
|                                 | 0                              | 0.33                             | 36.8                                 |  |
|                                 | 30                             | 0.33                             | 34.9                                 | 94.8                                       |
|                                 | 60                             | 0.33                             | 37.7                                 | 102.5                                      |
|                                 | 100                            | 0.33                             | 36.6                                 | 99.5                                       |
| Kou&Poon, 2012                  | 0                              | 0.55                             | 48.6                                 |  |
|                                 | 20                             | 0.55                             | 45.3                                 | 93.2                                       |
|                                 | 50                             | 0.55                             | 42.5                                 | 87.4                                       |

Prilog A

| Istraživanje        | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Kou&Poon, 2012      | 100                            | 0.55                             | 38.1                                 | 78.4                                       |
| Xiao i ost., 2012   | 0                              | 0.49                             | 29                                   |  |
|                     | 50                             | 0.49                             | 24.9                                 | 85.9                                       |
|                     | 100                            | 0.49                             | 19.3                                 | 66.6                                       |
|                     | 0                              | 0.43                             | 29.6                                 |  |
|                     | 100                            | 0.43                             | 27                                   | 91.2                                       |
| Barra&Vasquez, 1998 | 0                              | 0.41                             | 67.6                                 |  |
|                     | 100                            | 0.42                             | 58.2                                 | 86.1                                       |
|                     | 0                              | 0.53                             | 55.7                                 |  |
|                     | 100                            | 0.54                             | 50.2                                 | 90.1                                       |
|                     | 0                              | 0.66                             | 44.4                                 |  |
| Knights, 1998       | 100                            | 0.67                             | 40.3                                 | 90.8                                       |
|                     | 0                              | 0.56                             | 45.2                                 |  |
|                     | 30                             | 0.56                             | 46.7                                 | 103.3                                      |
|                     | 60                             | 0.56                             | 44.7                                 | 98.9                                       |
|                     | 30                             | 0.56                             | 43                                   | 95.1                                       |
|                     | 60                             | 0.56                             | 34.8                                 | 77.0                                       |
|                     | 0                              | 0.56                             | 46.3                                 |  |
|                     | 30                             | 0.56                             | 46.5                                 | 100.4                                      |
|                     | 60                             | 0.56                             | 43.8                                 | 94.6                                       |
|                     | 30                             | 0.56                             | 40                                   | 86.4                                       |
|                     | 60                             | 0.56                             | 37.3                                 | 80.6                                       |
|                     | 0                              | 0.43                             | 70                                   |  |
|                     | 30                             | 0.43                             | 63.3                                 | 90.4                                       |
|                     | 60                             | 0.43                             | 58.8                                 | 84.0                                       |
|                     | 30                             | 0.43                             | 58.7                                 | 83.9                                       |
|                     | 60                             | 0.43                             | 48.3                                 | 69.0                                       |
|                     | 0                              | 0.43                             | 66.7                                 |  |
| 30                  | 0.43                           | 65                               | 97.5                                 |  |
| 60                  | 0.43                           | 56.2                             | 84.3                                 |  |
| 30                  | 0.43                           | 57.7                             | 86.5                                 |  |
| 60                  | 0.43                           | 51.7                             | 77.5                                 |  |
| Roos, 1998          | 0                              | 0.55                             | 47                                   |  |
|                     | 100                            | 0.55                             | 44                                   | 93.6                                       |
|                     | 0                              | 0.55                             | 48                                   |  |
|                     | 100                            | 0.55                             | 44                                   | 91.7                                       |
|                     | 0                              | 0.55                             | 42                                   |  |
| Muller, 1998        | 100                            | 0.55                             | 35                                   | 83.3                                       |
|                     | 0                              | 0.55                             | 42.6                                 |  |
|                     | 100                            | 0.55                             | 32.8                                 | 77.0                                       |
|                     | 0                              | 0.33                             | 82.5                                 |  |
|                     | 100                            | 0.33                             | 65.9                                 | 79.9                                       |
|                     | 0                              | 0.55                             | 35                                   |  |
|                     | 100                            | 0.55                             | 27.6                                 | 78.9                                       |
| 0                   | 0.33                           | 61.3                             |                                      |  |
|                     | 100                            | 0.33                             | 47.7                                 | 77.8                                       |

Prilog A

| Istraživanje    | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Fathifazl, 2008 | 0                              | 0.35                             | 46.6                                 |  |
|                 | 30                             | 0.35                             | 47.8                                 | 102.6                                      |
|                 | 50                             | 0.35                             | 41.3                                 | 88.6                                       |
|                 | 100                            | 0.35                             | 44.8                                 | 96.1                                       |
|                 | 0                              | 0.45                             | 36.2                                 |  |
|                 | 30                             | 0.45                             | 33.1                                 | 91.4                                       |
|                 | 50                             | 0.45                             | 32.5                                 | 89.8                                       |
|                 | 100                            | 0.45                             | 30.9                                 | 85.4                                       |
| Fathifazl, 2008 | 0                              | 0.55                             | 28.8                                 |  |
|                 | 30                             | 0.55                             | 28.4                                 | 98.6                                       |
|                 | 50                             | 0.55                             | 25.2                                 | 87.5                                       |
|                 | 100                            | 0.55                             | 19.8                                 | 68.8                                       |
|                 | 0                              | 0.35                             | 54.4                                 |  |
|                 | 30                             | 0.35                             | 57.5                                 | 105.7                                      |
|                 | 50                             | 0.35                             | 54.2                                 | 99.6                                       |
|                 | 100                            | 0.35                             | 51.5                                 | 94.7                                       |
|                 | 0                              | 0.45                             | 45.3                                 |  |
|                 | 30                             | 0.45                             | 48.7                                 | 107.5                                      |
|                 | 50                             | 0.45                             | 49.6                                 | 109.5                                      |
|                 | 100                            | 0.45                             | 43                                   | 94.9                                       |
|                 | 0                              | 0.55                             | 37.5                                 |  |
|                 | 30                             | 0.55                             | 38.7                                 | 103.2                                      |
|                 | 50                             | 0.55                             | 42.4                                 | 113.1                                      |
|                 | 100                            | 0.55                             | 31.5                                 | 84.0                                       |
|                 | 0                              | 0.35                             | 40.8                                 |  |
|                 | 30                             | 0.35                             | 40.9                                 | 100.2                                      |
|                 | 50                             | 0.35                             | 36.6                                 | 89.7                                       |
|                 | 100                            | 0.35                             | 44.9                                 | 110.0                                      |
|                 | 0                              | 0.45                             | 33.7                                 |  |
|                 | 30                             | 0.45                             | 34.7                                 | 103.0                                      |
|                 | 50                             | 0.45                             | 36.6                                 | 108.6                                      |
|                 | 100                            | 0.45                             | 34.3                                 | 101.8                                      |
|                 | 0                              | 0.55                             | 30                                   |  |
|                 | 30                             | 0.55                             | 27                                   | 90.0                                       |
|                 | 50                             | 0.55                             | 26.5                                 | 88.3                                       |
|                 | 100                            | 0.55                             | 26.8                                 | 89.3                                       |
|                 | 0                              | 0.35                             | 53.1                                 |  |
|                 | 30                             | 0.35                             | 53.5                                 | 100.8                                      |
|                 | 50                             | 0.35                             | 48.6                                 | 91.5                                       |
|                 | 100                            | 0.35                             | 54.7                                 | 103.0                                      |
| 0               | 0.45                           | 40.7                             |                                      |  |
| 30              | 0.45                           | 46.4                             | 114.0                                |  |
| 50              | 0.45                           | 42.6                             | 104.7                                |  |
| 100             | 0.45                           | 43.9                             | 107.9                                |  |
| 0               | 0.55                           | 40.5                             |                                      |  |
| 30              | 0.55                           | 39.1                             | 96.5                                 |  |
| 50              | 0.55                           | 36.1                             | 89.1                                 |  |
| 100             | 0.55                           | 37.9                             | 93.6                                 |  |

*Prilog A*

| Istraživanje                   | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2012 | 0                              | 0.5                              | 42.6                                 |  |
|                                | 100                            | 0.5                              | 45.2                                 | 106.1                                      |
|                                | 0                              | 0.36                             | 53.6                                 |  |
|                                | 100                            | 0.36                             | 54.4                                 | 101.4                                      |
| Ignjatović i ost., 2012        | 0                              | 0.524                            | 43.7                                 |  |
|                                | 50                             | 0.524                            | 44.2                                 | 101.1                                      |
| Tam, 2005                      | 0                              | 0.45                             | 55.7                                 |  |
|                                | 5                              | 0.45                             | 57.3                                 | 102.8                                      |
|                                | 10                             | 0.45                             | 59.0                                 | 105.9                                      |
|                                | 15                             | 0.45                             | 56.3                                 | 101.0                                      |
|                                | 20                             | 0.45                             | 53.7                                 | 96.3                                       |
|                                | 25                             | 0.45                             | 52.3                                 | 93.9                                       |
|                                | 30                             | 0.45                             | 58.1                                 | 104.2                                      |
|                                | 40                             | 0.45                             | 52.1                                 | 93.6                                       |
|                                | 50                             | 0.45                             | 52.5                                 | 94.2                                       |
|                                | 60                             | 0.45                             | 52.0                                 | 93.3                                       |
|                                | 70                             | 0.45                             | 55.0                                 | 98.8                                       |
|                                | 80                             | 0.45                             | 46.9                                 | 84.2                                       |
|                                | 90                             | 0.45                             | 51.9                                 | 93.1                                       |
|                                | 100                            | 0.45                             | 51.7                                 | 92.8                                       |
|                                | 0                              | 0.45                             | 56.0                                 |  |
|                                | 5                              | 0.45                             | 63.8                                 | 113.9                                      |
|                                | 10                             | 0.45                             | 64.5                                 | 115.2                                      |
|                                | 15                             | 0.45                             | 61.3                                 | 109.4                                      |
|                                | 20                             | 0.45                             | 65.1                                 | 116.2                                      |
|                                | 25                             | 0.45                             | 63.1                                 | 112.7                                      |
| 30                             | 0.45                           | 66.2                             | 118.1                                |  |
| 40                             | 0.45                           | 54.7                             | 97.6                                 |  |
| 50                             | 0.45                           | 54.6                             | 97.5                                 |  |
| 60                             | 0.45                           | 57.5                             | 102.6                                |  |
| 70                             | 0.45                           | 55.2                             | 98.5                                 |  |
| 80                             | 0.45                           | 48.9                             | 87.4                                 |  |
| 90                             | 0.45                           | 52.7                             | 94.1                                 |  |
| 100                            | 0.45                           | 55.6                             | 99.2                                 |  |

<sup>1</sup> sadržaj od 0% krupnog RCA znači da se radi o betonu sa kompletno prirodnim agregatom; sitan agregat je u svakom slučaju prirodni agregat

<sup>2</sup> efektivni vodocementni faktor

<sup>3</sup> čvrstoća betona pri pritisku na 28 dana

## A.2 ČVRSTOĆA PRI PRITISKU NAC I RAC BETONA SA SITNIM RCA

| Istraživanje            | sitan RCA <sup>1</sup><br>[%] | w/c <sup>2</sup> | f <sub>c,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>c,RAC</sub> /f <sub>c,NAC</sub> [%] |
|-------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|--|
| Khatib, 2005            | 0                             | 0.5              | 46.7                                 |  |
|                         | 25                            | 0.5              | 35.3                                 | 75.6                                       |
|                         | 50                            | 0.5              | 35.2                                 | 75.4                                       |
|                         | 75                            | 0.5              | 35.1                                 | 75.2                                       |
|                         | 100                           | 0.5              | 30                                   | 64.2                                       |
| Evangelista&Brito, 2007 | 0                             | 0.41             | 59.4                                 |  |
|                         | 10                            | 0.42             | 62.2                                 | 104.7                                      |
|                         | 20                            | 0.44             | 58.4                                 | 98.3                                       |
|                         | 30                            | 0.45             | 61.3                                 | 103.2                                      |
|                         | 50                            | 0.46             | 60.8                                 | 102.4                                      |
|                         | 100                           | 0.48             | 61                                   | 102.7                                      |
|                         | 0                             | 0.41             | 59.3                                 |  |
|                         | 10                            | 0.42             | 59                                   | 99.5                                       |
|                         | 20                            | 0.44             | 57.3                                 | 96.6                                       |
|                         | 30                            | 0.45             | 57.1                                 | 96.3                                       |
|                         | 50                            | 0.46             | 58.8                                 | 99.2                                       |
|                         | 100                           | 0.48             | 54.8                                 | 92.4                                       |
|                         | Evangelista&Brito, 2010       | 0                | 0.41                                 | 59.3                                       |
| 30                      |                               | 0.45             | 57.3                                 | 96.6                                       |
| 100                     |                               | 0.48             | 54.8                                 | 92.4                                       |
| Lovato i ost., 2011     | 0                             | 0.5              | 32.4                                 |  |
|                         | 100                           | 0.6              | 24.3                                 | 75.0                                       |
| Choi&Yun, 2012          | 0                             | 0.44             | 31.51                                |  |
|                         | 30                            | 0.44             | 29.88                                | 94.8                                       |
|                         | 60                            | 0.44             | 31.04                                | 98.5                                       |
|                         | 100                           | 0.44             | 27.4                                 | 87.0                                       |
| Reis i ost., 2009       | 0                             | 0.42             | 37.22                                |  |
|                         | 25                            | 0.47             | 32.15                                | 86.4                                       |
|                         | 50                            | 0.52             | 32.56                                | 87.5                                       |
| Teranishi i ost., 1998  | 0                             | 0.5              | 44.6                                 |  |
|                         | 15                            | 0.5              | 41.7                                 | 93.5                                       |
|                         | 30                            | 0.5              | 41.1                                 | 92.2                                       |
|                         | 0                             | 0.5              | 42.7                                 |  |
|                         | 30                            | 0.5              | 41.4                                 | 97.0                                       |
|                         | 0                             | 0.5              | 49.2                                 |  |
|                         | 15                            | 0.5              | 49.4                                 | 100.4                                      |
|                         | 30                            | 0.5              | 46                                   | 93.5                                       |
|                         |                               |                  |                                      |  |
|                         |                               |                  |                                      |  |

Prilog A

| Istraživanje                  | sitan RCA [%] | w/c  | $f_{c,28}$ <sup>3</sup> [Mpa] | $f_{c,RAC}/f_{c,NAC}$ [%] |
|-------------------------------|---------------|------|-------------------------------|---------------------------|
| Van der Wegen&Haverkort, 1998 | 0             | 0.55 | 48.1                          |                           |
|                               | 50            | 0.55 | 43.8                          | 91.1                      |
|                               | 50            | 0.55 | 40.7                          | 84.6                      |
|                               | 50            | 0.55 | 39.9                          | 83.0                      |
|                               | 50            | 0.55 | 39                            | 81.1                      |
|                               | 50            | 0.55 | 36.7                          | 76.3                      |
|                               | 50            | 0.55 | 37.6                          | 78.2                      |
|                               | 0             | 0.55 | 46.1                          |                           |
|                               | 100           | 0.55 | 40.8                          | 88.5                      |
|                               | 100           | 0.55 | 38.1                          | 82.6                      |
|                               | 25            | 0.55 | 42.8                          | 92.8                      |
|                               | 25            | 0.55 | 43.8                          | 95.0                      |
|                               | 25            | 0.55 | 41.6                          | 90.2                      |
|                               | 25            | 0.55 | 42.1                          | 91.3                      |

<sup>1</sup> sadržaj od 0% sitnog RCA znači da se radi o betonu sa kompletno prirodnim agregatom; krupan agregat je u svakom slučaju prirodni agregat

<sup>2</sup> vodocementni faktor

<sup>3</sup> čvrstoća betona pri pritisku na 28 dana

## A.3 ČVRSTOĆA PRI ZATEZANJU NAC I RAC BETONA SA KRUPNIM RCA

| Istraživanje                     | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>t,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>t,RAC</sub> /f <sub>t,NAC</sub> [%] |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2002   | 0                              | 0.36                             | 4.10                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.36                             | 4.00                                 | 97.6                                       |
|                                  | 0                              | 0.36                             | 3.60                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.36                             | 3.40                                 | 94.4                                       |
|                                  | 0                              | 0.36                             | 3.60                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.36                             | 4.00                                 | 111.1                                      |
|                                  | 0                              | 0.36                             | 3.60                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.36                             | 3.50                                 | 97.2                                       |
|                                  | 0                              | 0.36                             | 3.60                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.36                             | 3.80                                 | 105.6                                      |
| Katz, 2003                       | 0                              | 0.55                             | 5.00                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 4.70                                 | 94.0                                       |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 4.60                                 | 92.0                                       |
|                                  | 100                            | 0.56                             | 5.40                                 | 108.0                                      |
|                                  | 0                              | 0.55                             | 6.10                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 5.30                                 | 86.9                                       |
|                                  | 100                            | 0.56                             | 6.10                                 | 100.0                                      |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 5.40                                 | 88.5                                       |
| Malešev i ost., 2010             | 0                              | 0.51                             | 2.66                                 |  |
|                                  | 50                             | 0.51                             | 3.20                                 | 120.2                                      |
|                                  | 100                            | 0.51                             | 2.78                                 | 104.5                                      |
| Gomez-Soberon, 2002 <sup>a</sup> | 0                              | 0.52                             | 3.70                                 |  |
|                                  | 15                             | 0.52                             | 3.70                                 | 100.0                                      |
|                                  | 30                             | 0.52                             | 3.60                                 | 97.3                                       |
|                                  | 60                             | 0.52                             | 3.40                                 | 91.9                                       |
|                                  | 100                            | 0.52                             | 3.30                                 | 89.2                                       |
| Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2012   | 0                              | 0.50                             | 3.00                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.50                             | 2.90                                 | 96.7                                       |
|                                  | 0                              | 0.36                             | 3.90                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.36                             | 3.80                                 | 97.4                                       |
| Fonseca i ost., 2011             | 0                              | 0.43                             | 2.83                                 |  |
|                                  | 20                             | 0.43                             | 2.35                                 | 83.1                                       |
|                                  | 50                             | 0.43                             | 2.86                                 | 101.0                                      |
|                                  | 100                            | 0.43                             | 3.14                                 | 110.8                                      |
| Kou i ost., 2011 <sup>b</sup>    | 0                              | 0.55                             | 2.43                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 2.21                                 | 90.9                                       |
|                                  | 100                            | 0.55                             | 2.26                                 | 93.0                                       |
| Yang i ost., 2011                | 0                              | 0.47                             | 4.29                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.47                             | 3.44                                 | 80.2                                       |
|                                  | 0                              | 0.47                             | 4.09                                 |  |
|                                  | 100                            | 0.47                             | 3.79                                 | 92.7                                       |



Prilog A

| Istraživanje                                | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>t,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>t,RAC</sub> /f <sub>t,NAC</sub> [%] |
|---|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Roos, 1998                                  | 0                              | 0.55                             | 3.70                                 |  |
|   | 100                            | 0.55                             | 3.20                                 | 86.5                                       |
|   | 0                              | 0.55                             | 3.50                                 |  |
|   | 100                            | 0.55                             | 2.80                                 | 80.0                                       |
| Muller, 1998                                | 0                              | 0.55                             | 2.80                                 |  |
|   | 100                            | 0.55                             | 2.40                                 | 85.7                                       |
| Gonzalez-Fonteboa & Martinez-Abella, 2007   | 0                              | 0.55                             | 3.48                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 3.41                                 | 98.0                                       |
|   | 0                              | 0.55                             | 3.55                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 3.30                                 | 93.0                                       |
|   | 0                              | 0.55                             | 3.32                                 |  |
|   | 50                             | 0.55                             | 3.36                                 | 101.2                                      |
|   | 0                              | 0.55                             | 2.94                                 |  |
| Gonzalez-Fonteboa i ost., 2011 <sup>b</sup> | 50                             | 0.55                             | 3.40                                 | 115.6                                      |
|   | 0                              | 0.65                             | 2.91                                 |  |
|   | 20                             | 0.65                             | 2.40                                 | 82.5                                       |
|   | 50                             | 0.65                             | 2.48                                 | 85.2                                       |
|   | 100                            | 0.65                             | 2.62                                 | 90.0                                       |
|   | 0                              | 0.50                             | 2.83                                 |  |
|   | 20                             | 0.50                             | 3.07                                 | 108.5                                      |
| Kou i ost., 2007                            | 50                             | 0.50                             | 2.90                                 | 102.5                                      |
|   | 100                            | 0.50                             | 2.93                                 | 103.5                                      |
|   | 0                              | 0.45                             | 3.43                                 |  |
|   | 20                             | 0.45                             | 3.16                                 | 92.1                                       |
|   | 50                             | 0.45                             | 2.97                                 | 86.6                                       |
|   | 100                            | 0.45                             | 2.84                                 | 82.8                                       |
|   | 0                              | 0.55                             | 3.32                                 |  |
| Tam, 2005                                   | 20                             | 0.55                             | 3.21                                 | 96.7                                       |
|   | 50                             | 0.55                             | 3.16                                 | 95.2                                       |
|   | 100                            | 0.55                             | 3.06                                 | 92.2                                       |
|   | 0                              | 0.45                             | 4.44                                 |  |
|   | 5                              | 0.45                             | 3.71                                 | 83.6                                       |
|   | 10                             | 0.45                             | 3.57                                 | 80.4                                       |
|   | 15                             | 0.45                             | 3.65                                 | 82.2                                       |
| 20  | 0.45                           | 3.81                             | 85.8                                 |  |
| 25  | 0.45                           | 3.66                             | 82.4                                 |  |
| 30  | 0.45                           | 3.59                             | 80.9                                 |  |
| 40  | 0.45                           | 4.09                             | 92.1                                 |  |
| 50  | 0.45                           | 3.87                             | 87.2                                 |  |
| 60  | 0.45                           | 3.76                             | 84.7                                 |  |
| 70  | 0.45                           | 3.49                             | 78.6                                 |  |
| 80  | 0.45                           | 3.45                             | 77.7                                 |  |
| 90  | 0.45                           | 2.88                             | 64.9                                 |  |
| 100   | 0.45                           | 3.11                             | 70.0                                 |  |
|   | 0                              | 0.45                             | 4.60                                 |  |
|   | 5                              | 0.45                             | 4.12                                 | 89.6                                       |
|   | 10                             | 0.45                             | 4.28                                 | 93.0                                       |
|   | 15                             | 0.45                             | 4.37                                 | 95.0                                       |
|   | 20                             | 0.45                             | 4.86                                 | 105.7                                      |

*Prilog A*

| Istraživanje    | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | f <sub>i,28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | f <sub>i,RAC</sub> /f <sub>i,NAC</sub> [%] |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Tam, 2005       | 25                             | 0.45                             | 4.09                                 | 88.9                                       |
|                 | 30                             | 0.45                             | 3.91                                 | 85.0                                       |
|                 | 40                             | 0.45                             | 4.32                                 | 93.9                                       |
|                 | 50                             | 0.45                             | 4.22                                 | 91.7                                       |
|                 | 60                             | 0.45                             | 3.85                                 | 83.7                                       |
|                 | 70                             | 0.45                             | 4.02                                 | 87.4                                       |
|                 | 80                             | 0.45                             | 4.08                                 | 88.7                                       |
|                 | 90                             | 0.45                             | 3.00                                 | 65.2                                       |
|                 | 100                            | 0.45                             | 3.13                                 | 68.0                                       |
| Fathifazl, 2008 | 0                              | 0.35                             | 4.50                                 |  |
|                 | 30                             | 0.35                             | 4.50                                 | 100.0                                      |
|                 | 50                             | 0.35                             | 4.90                                 | 108.9                                      |
|                 | 100                            | 0.35                             | 4.20                                 | 93.3                                       |
|                 | 0                              | 0.45                             | 4.00                                 |  |
|                 | 30                             | 0.45                             | 4.40                                 | 110.0                                      |
|                 | 50                             | 0.45                             | 4.30                                 | 107.5                                      |
|                 | 100                            | 0.45                             | 4.00                                 | 100.0                                      |
|                 | 0                              | 0.55                             | 3.50                                 |  |
|                 | 30                             | 0.55                             | 3.40                                 | 97.1                                       |
|                 | 50                             | 0.55                             | 4.10                                 | 117.1                                      |
|                 | 100                            | 0.55                             | 4.20                                 | 120.0                                      |
|                 | 0                              | 0.35                             | 3.70                                 |  |
|                 | 30                             | 0.35                             | 4.90                                 | 132.4                                      |
|                 | 50                             | 0.35                             | 4.10                                 | 110.8                                      |
|                 | 100                            | 0.35                             | 4.00                                 | 108.1                                      |
|                 | 0                              | 0.45                             | 4.40                                 |  |
|                 | 30                             | 0.45                             | 5.60                                 | 127.3                                      |
|                 | 50                             | 0.45                             | 4.60                                 | 104.5                                      |
|                 | 100                            | 0.45                             | 4.40                                 | 100.0                                      |
|                 | 0                              | 0.55                             | 4.50                                 |  |
|                 | 30                             | 0.55                             | 4.80                                 | 106.7                                      |
|                 | 50                             | 0.55                             | 4.30                                 | 95.6                                       |
|                 | 100                            | 0.55                             | 3.00                                 | 66.7                                       |

<sup>1</sup> sadržaj od 0% krupnog RCA znači da se radi o betonu sa kompletno prirodnim agregatom; sitan agregat je u svakom slučaju prirodni agregat

<sup>2</sup> efektivni vodocementni faktor

<sup>3</sup> čvrstoća pri zatezanju cepanjem na 28 dana

## A.4 MODUL ELASTIČNOSTI NAC I RAC BETONA SA KRUPNIM RCA

| Istraživanje                     | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] |      | $E_{28}$ <sup>3</sup> [Mpa] | $E_{RAC}/E_{NAC}$ [%] |
|----------------------------------|--------------------------------|------|-----------------------------|-----------------------|
| Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2002   | 0                              | 0.36 | 30.0                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.36 | 27.4                        | 81.4                  |
|                                  | 0                              | 0.36 | 30.9                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.36 | 28.1                        | 82.6                  |
|                                  | 0                              | 0.36 | 30.9                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.36 | 30.1                        | 82.7                  |
|                                  | 0                              | 0.36 | 30.9                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.38 | 27.5                        | 77.5                  |
|                                  | 0                              | 0.36 | 30.9                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.36 | 28.5                        | 81.8                  |
|                                  | 0                              | 0.36 | 39.8                        |                       |
| 100                              | 0.36                           | 36.5 | 81.6                        |                       |
| Rahal, 2007                      | 0                              | 0.65 | 11.4                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.65 | 12.4                        | 108.8                 |
|                                  | 0                              | 0.5  | 14.9                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.5  | 11.3                        | 75.8                  |
|                                  | 0                              | 0.48 | 15.7                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.48 | 14.9                        | 94.9                  |
|                                  | 0                              | 0.43 | 17.8                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.43 | 14.7                        | 82.6                  |
|                                  | 0                              | 0.4  | 17.1                        |                       |
| 100                              | 0.4                            | 13.4 | 78.4                        |                       |
| Katz, 2003                       | 0                              | 0.55 | 23.1                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.55 | 11.4                        | 49.4                  |
|                                  | 100                            | 0.55 | 11.5                        | 49.8                  |
|                                  | 100                            | 0.56 | 13.3                        | 57.6                  |
|                                  | 0                              | 0.55 | 22.7                        |                       |
|                                  | 100                            | 0.55 | 13.7                        | 60.4                  |
|                                  | 100                            | 0.56 | 14.2                        | 62.6                  |
|                                  | 100                            | 0.55 | 11.3                        | 49.8                  |
| Gomez-Soberon, 2002 <sup>a</sup> | 0                              | 0.52 | 29.7                        |                       |
|                                  | 15                             | 0.52 | 29.1                        | 98.0                  |
|                                  | 30                             | 0.52 | 27.8                        | 93.6                  |
|                                  | 60                             | 0.52 | 26.6                        | 89.6                  |
|                                  | 100                            | 0.52 | 26.7                        | 89.9                  |
| Domingo -Cabo i ost., 2009       | 0                              | 0.5  | 33.3                        |                       |
|                                  | 20                             | 0.5  | 32.4                        | 97.2                  |
|                                  | 50                             | 0.5  | 33.5                        | 100.6                 |
|                                  | 100                            | 0.5  | 30.3                        | 91.1                  |
|                                  | 0                              | 0.5  | 36.2                        |                       |
|                                  | 20                             | 0.5  | 32.4                        | 89.3                  |
|                                  | 50                             | 0.5  | 34.1                        | 94.1                  |
|                                  | 100                            | 0.5  | 31.0                        | 85.6                  |

Prilog A

| Istraživanje                                | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | E <sub>28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | E <sub>RAC</sub> /E <sub>NAC</sub> [%] |      |
|---|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|------|
| Domingo -Cabo i ost., 2009                  | 0                              | n.d.                             | 32.2                               |  |      |
|   | 20                             | n.d.                             | 31.2                               | 97.0                                   |      |
|   | 50                             | n.d.                             | 31.2                               | 97.0                                   |      |
|   | 100                            | n.d.                             | 31.6                               | 98.2                                   |      |
| Yang&Han, 2006                              | 0                              | 0.5                              | 27.5                               |  |      |
|   | 25                             | 0.5                              | 26.1                               | 94.9                                   |      |
|   | 50                             | 0.5                              | 24.6                               | 89.5                                   |      |
| Gonzalez-Fonteboa&<br>Martinez-Abella, 2007 | 0                              | 0.55                             | 32.2                               |  |      |
|   | 50                             | 0.55                             | 28.6                               | 88.7                                   |      |
| Malešev i ost., 2010                        | 0                              | 0.514                            | 35.6                               |  |      |
|   | 50                             | 0.514                            | 32.3                               | 90.7                                   |      |
|   | 100                            | 0.514                            | 29.1                               | 81.9                                   |      |
| Gomez-Soberon, 2002 <sup>b</sup>            | 0                              | 0.52                             | 29.7                               |  |      |
|   | 15                             | 0.52                             | 29.1                               | 98.0                                   |      |
|   | 30                             | 0.52                             | 27.8                               | 93.6                                   |      |
|   | 60                             | 0.52                             | 26.6                               | 89.6                                   |      |
|   | 100                            | 0.52                             | 26.7                               | 89.9                                   |      |
| Limbachiya i ost., 2000                     | 0                              | n.d.                             | 27.0                               |  |      |
|   | 30                             | n.d.                             | 27.5                               | 101.9                                  |      |
|   | 50                             | n.d.                             | 27.5                               | 101.9                                  |      |
|   | 100                            | n.d.                             | 26.5                               | 98.1                                   |      |
|   | 0                              | n.d.                             | 28.5                               |  |      |
|   | 30                             | n.d.                             | 28.0                               | 98.2                                   |      |
|   | 50                             | n.d.                             | 28.0                               | 98.2                                   |      |
|   | 100                            | n.d.                             | 27.5                               | 96.5                                   |      |
|   | 0                              | n.d.                             | 30.0                               |  |      |
|   | 30                             | n.d.                             | 30.0                               | 100.0                                  |      |
|   | 50                             | n.d.                             | 31.0                               | 103.3                                  |      |
|   | 100                            | n.d.                             | 30.5                               | 101.7                                  |      |
|   | Abukersh&Fairfield, 2011       | 0                                | n.d.                               | 36.3                                   |      |
|   |                                | 100                              | n.d.                               | 28.3                                   | 78.0 |
| 0   |                                | n.d.                             | 51.4                               |  |      |
| 100   |                                | n.d.                             | 40.0                               | 77.8                                   |      |
| Corinaldesi, 2010                           | 0                              | 0.4                              | 37.3                               |  |      |
|   | 100                            | 0.4                              | 32.7                               | 87.7                                   |      |
|   | 0                              | 0.45                             | 36.9                               |  |      |
|   | 100                            | 0.45                             | 33.3                               | 90.2                                   |      |
|   | 0                              | 0.5                              | 35.6                               |  |      |
|   | 100                            | 0.5                              | 27.7                               | 77.8                                   |      |
|   | 0                              | 0.6                              | 33.9                               |  |      |
|   | 100                            | 0.6                              | 22.8                               | 67.3                                   |      |
| Depena i ost., 2011                         | 0                              | 0.5                              | 40.7                               |  |      |
|   | 20                             | 0.5                              | 39.4                               | 96.7                                   |      |
|   | 50                             | 0.5                              | 31.1                               | 76.4                                   |      |
|   | 100                            | 0.5                              | 29.3                               | 71.9                                   |      |

Prilog A

| Istraživanje                   | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | E <sub>28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | E <sub>RAC</sub> /E <sub>NAC</sub> [%] |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| Gonzalez-Fonteboa i ost., 2011 | 0                              | 0.65                             | 29.6                               |  |
|                                | 20                             | 0.65                             | 28.2                               | 95.3                                   |
|                                | 50                             | 0.65                             | 26.4                               | 89.1                                   |
|                                | 100                            | 0.65                             | 24.3                               | 82.0                                   |
|                                | 0                              | 0.5                              | 33.9                               |  |
|                                | 20                             | 0.5                              | 32.6                               | 96.2                                   |
|                                | 50                             | 0.5                              | 28.8                               | 85.1                                   |
|                                | 100                            | 0.5                              | 24.0                               | 70.8                                   |
| Xiao i ost., 2012              | 0                              | 0.43                             | 33.1                               |  |
|                                | 30                             | 0.43                             | 30.9                               | 93.5                                   |
|                                | 50                             | 0.43                             | 31.9                               | 96.4                                   |
|                                | 70                             | 0.43                             | 29.1                               | 87.9                                   |
|                                | 100                            | 0.43                             | 26.5                               | 80.1                                   |
|                                | 0                              | 0.43                             | 37.5                               |  |
|                                | 50                             | 0.43                             | 29.3                               | 78.0                                   |
|                                | 100                            | 0.43                             | 26.5                               | 70.6                                   |
| Choi&Yun, 2012                 | 0                              | 0.44                             | 24.2                               |  |
|                                | 30                             | 0.44                             | 22.1                               | 91.3                                   |
|                                | 60                             | 0.44                             | 20.5                               | 84.9                                   |
|                                | 100                            | 0.44                             | 20.8                               | 86.2                                   |
|                                | 0                              | 0.33                             | 23.8                               |  |
|                                | 30                             | 0.33                             | 21.5                               | 90.4                                   |
|                                | 60                             | 0.33                             | 23.2                               | 97.4                                   |
|                                | 100                            | 0.33                             | 21.1                               | 88.8                                   |
| Teranishi i ost., 1998         | 0                              | 0.6                              | 26.9                               |  |
|                                | 30                             | 0.6                              | 24.7                               | 91.8                                   |
|                                | 50                             | 0.6                              | 24.7                               | 91.8                                   |
|                                | 100                            | 0.6                              | 22.9                               | 85.1                                   |
|                                | 0                              | 0.6                              | 30.9                               |  |
|                                | 30                             | 0.6                              | 28.2                               | 91.3                                   |
|                                | 30                             | 0.6                              | 26.8                               | 86.7                                   |
|                                | 0                              | 0.6                              | 26.7                               |  |
|                                | 30                             | 0.6                              | 26.1                               | 97.8                                   |
|                                | 100                            | 0.6                              | 23.4                               | 87.6                                   |
|                                | 100                            | 0.6                              | 23.0                               | 86.1                                   |
|                                | 100                            | 0.6                              | 23.1                               | 86.5                                   |
|                                | 0                              | 0.6                              | 27.1                               |  |
|                                | 30                             | 0.6                              | 25.5                               | 94.1                                   |
|                                | 50                             | 0.6                              | 25.5                               | 94.1                                   |
|                                | 100                            | 0.6                              | 23.8                               | 87.8                                   |
|                                | 0                              | 0.5                              | 28.5                               |  |
|                                | 15                             | 0.5                              | 28.3                               | 99.3                                   |
|                                | 30                             | 0.5                              | 26.9                               | 94.4                                   |
|                                | 50                             | 0.5                              | 26.0                               | 91.2                                   |
| 100                            | 0.5                            | 23.8                             | 83.5                               |  |
| 0                              | 0.5                            | 27.3                             |                                    |  |
| 15                             | 0.5                            | 27.2                             | 99.6                               |  |
| 30                             | 0.5                            | 26.3                             | 96.3                               |  |

Prilog A

| Istraživanje           | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | E <sub>28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | E <sub>RAC</sub> /E <sub>NAC</sub> [%] |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| Teranishi i ost., 1998 | 50                             | 0.5                              | 25.6                               | 93.8                                   |
|                        | 100                            | 0.5                              | 25.3                               | 92.7                                   |
|                        | 0                              | 0.5                              | 30.3                               |  |
|                        | 15                             | 0.5                              | 29.5                               | 97.4                                   |
|                        | 30                             | 0.5                              | 29.0                               | 95.7                                   |
|                        | 50                             | 0.5                              | 27.4                               | 90.4                                   |
|                        | 100                            | 0.5                              | 27.6                               | 91.1                                   |
|                        | 0                              | 0.4                              | 29.7                               |  |
|                        | 30                             | 0.4                              | 28.8                               | 97.0                                   |
|                        | 50                             | 0.4                              | 29.1                               | 98.0                                   |
|                        | 100                            | 0.4                              | 27.7                               | 93.3                                   |
|                        | 0                              | 0.4                              | 33.1                               |  |
|                        | 30                             | 0.4                              | 30.4                               | 91.8                                   |
|                        | 50                             | 0.4                              | 31.4                               | 94.9                                   |
|                        | 100                            | 0.4                              | 29.0                               | 87.6                                   |
| Roos, 1998             | 0                              | 0.55                             | 33.0                               |  |
|                        | 100                            | 0.55                             | 25.1                               | 76.1                                   |
|                        | 0                              | 0.55                             | 36.2                               |  |
|                        | 100                            | 0.55                             | 27.5                               | 76.1                                   |
| Muller, 1998           | 0                              | 0.55                             | 31.8                               |  |
|                        | 100                            | 0.55                             | 21.8                               | 68.6                                   |
|                        | 0                              | 0.33                             | 37.5                               |  |
|                        | 100                            | 0.33                             | 26.3                               | 70.1                                   |
| Fathifazl, 2008        | 0                              | 0.35                             | 34.4                               |  |
|                        | 30                             | 0.35                             | 31.7                               | 92.2                                   |
|                        | 50                             | 0.35                             | 28.4                               | 82.6                                   |
|                        | 100                            | 0.35                             | 27.4                               | 79.7                                   |
|                        | 0                              | 0.45                             | 31.0                               |  |
|                        | 30                             | 0.45                             | 26.8                               | 86.5                                   |
|                        | 50                             | 0.45                             | 25.8                               | 83.2                                   |
|                        | 100                            | 0.45                             | 20.8                               | 67.1                                   |
|                        | 0                              | 0.55                             | 26.0                               |  |
|                        | 30                             | 0.55                             | 25.2                               | 96.9                                   |
|                        | 50                             | 0.55                             | 24.3                               | 93.5                                   |
|                        | 100                            | 0.55                             | 24.5                               | 94.2                                   |
|                        | 0                              | 0.35                             | 36.7                               |  |
|                        | 30                             | 0.35                             | 34.1                               | 92.9                                   |
|                        | 50                             | 0.35                             | 33.8                               | 92.1                                   |
|                        | 100                            | 0.35                             | 31.0                               | 84.5                                   |
|                        | 0                              | 0.45                             | 34.5                               |  |
|                        | 30                             | 0.45                             | 32.4                               | 93.9                                   |
|                        | 50                             | 0.45                             | 32.0                               | 92.8                                   |
|                        | 100                            | 0.45                             | 28.5                               | 82.6                                   |
|                        | 0                              | 0.55                             | 32.1                               |  |
|                        | 30                             | 0.55                             | 30.6                               | 95.3                                   |
|                        | 50                             | 0.55                             | 28.8                               | 89.7                                   |
|                        | 100                            | 0.55                             | 27.1                               | 84.4                                   |
| 0                      | 0.35                           | 29.9                             |                                    |  |
| 30                     | 0.35                           | 32.9                             | 110.0                              |  |

Prilog A

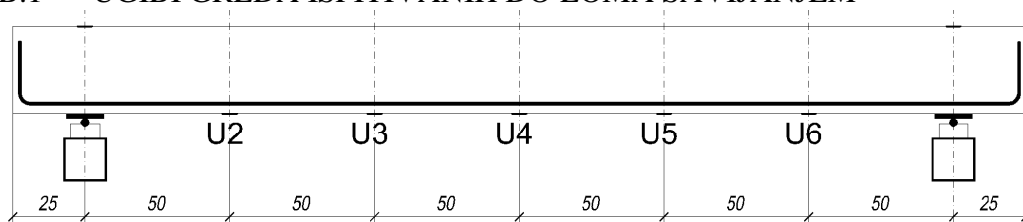
| Istraživanje                   | krupan RCA <sup>1</sup><br>[%] | (w/c) <sub>ef</sub> <sup>2</sup> | E <sub>28</sub> <sup>3</sup> [Mpa] | E <sub>RAC</sub> /E <sub>NAC</sub> [%] |       |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|-------|
|                                | 50                             | 0.35                             | 32.9                               | 110.0                                  |       |
|                                | 100                            | 0.35                             | 30.9                               | 103.3                                  |       |
|                                | 0                              | 0.45                             | 28.8                               |  |       |
|                                | 30                             | 0.45                             | 28.7                               | 99.7                                   |       |
|                                | 50                             | 0.45                             | 29.4                               | 102.1                                  |       |
|                                | 100                            | 0.45                             | 25.9                               | 89.9                                   |       |
|                                | 0                              | 0.55                             | 29.1                               |  |       |
|                                | 30                             | 0.55                             | 27.0                               | 92.8                                   |       |
|                                | 50                             | 0.55                             | 26.8                               | 92.1                                   |       |
|                                | 100                            | 0.55                             | 23.0                               | 79.0                                   |       |
|                                | Fathifazl, 2008                | 0                                | 0.35                               | 35.1                                   |       |
|                                |                                | 30                               | 0.35                               | 36.4                                   | 103.7 |
|                                |                                | 50                               | 0.35                               | 35.3                                   | 100.6 |
|                                |                                | 100                              | 0.35                               | 34.2                                   | 97.4  |
|                                |                                | 0                                | 0.45                               | 35.4                                   |       |
|                                |                                | 30                               | 0.45                               | 32.8                                   | 92.7  |
| 50                             |                                | 0.45                             | 32.3                               | 91.2                                   |       |
| 100                            |                                | 0.45                             | 31.4                               | 88.7                                   |       |
| 0                              |                                | 0.55                             | 33.5                               |  |       |
| 30                             |                                | 0.55                             | 32.1                               | 95.8                                   |       |
| 50                             |                                | 0.55                             | 30.2                               | 90.1                                   |       |
| 100                            |                                | 0.55                             | 29.3                               | 87.5                                   |       |
| Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2012 | 0                              | 0.36                             | 32.1                               |  |       |
|                                | 100                            | 0.36                             | 30.6                               | 95.3                                   |       |
| Boehme i ost., 2012            | 0                              | 0.55                             | 33.7                               |  |       |
|                                | 100                            | 0.55                             | 22.8                               | 67.7                                   |       |
|                                | 0                              | 0.55                             | 33.9                               |  |       |
|                                | 100                            | 0.55                             | 23.3                               | 68.7                                   |       |

<sup>1</sup> sadržaj od 0% krupnog RCA znači da se radi o betonu sa kompletno prirodnim agregatom; sitan agregat je u svakom slučaju prirodni agregat

<sup>2</sup> efektivni vodocementni faktor

<sup>3</sup> modul elastičnosti na 28 dana

<sup>4</sup> n.d.: nije definisano

**PRIOLOG B: NUMERIČKI PODACI IZ EKSPERIMENTA****B.1 UGIBI GREDA ISPITIVANIH DO LOMA SAVIJANJEM**

\* sve dimenzije u [cm]

|       | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5    | U6    |
|-------|-------------|-----------|--------|--------|-------|-------|
|       | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |       |       |
| NAC-1 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
|       | 5           | -0.05     | -0.14  | -0.14  | -0.12 | -0.08 |
|       | 10          | -0.15     | -0.33  | -0.32  | -0.29 | -0.23 |
|       | 15          | -0.28     | -0.55  | -0.57  | -0.53 | -0.29 |
|       | 20          | -0.41     | -0.83  | -0.84  | -0.77 | -0.39 |
|       | 25          | -1.03     | -2.06  | -2.15  | -1.88 | -0.96 |
|       | 0           | -0.43     | -0.84  | -0.99  | -0.82 | -0.42 |
|       | 15          | -0.79     | -1.60  | -1.78  | -1.53 | -0.78 |
|       | 20          | -0.97     | -1.93  | -2.13  | -1.84 | -0.95 |
|       | 25          | -1.17     | -2.33  | -2.61  | -2.23 | -1.09 |
|       | 30          | -2.34     | -4.44  | -4.99  | -4.47 | -2.23 |
|       | 35          | -3.23     | -6.11  | -6.88  | -6.12 | -3.14 |
|       | 40          | -4.09     | -7.77  | -8.67  | -7.70 | -3.96 |
|       | 45          | -4.92     | -9.35  | -10.43 | -9.31 | -4.79 |
|       | 50          | -14.17    | -29.16 | -34.00 | n.m.  | n.m.  |
|       | 56.7        | n.m.      | n.m.   | -75.43 | n.m.  | n.m.  |

|       | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6     |
|-------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|       | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |        |
| NAC-2 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|       | 20          | -0.35     | -0.70  | -0.80  | -0.70  | -0.39  |
|       | 40          | -1.08     | -2.14  | -2.39  | -2.11  | -0.65  |
|       | 60          | -2.04     | -3.83  | -4.32  | -3.79  | -2.04  |
|       | 80          | -3.16     | -5.86  | -6.55  | -5.85  | -3.10  |
|       | 0           | -0.78     | -1.32  | -1.57  | -1.31  | -0.69  |
|       | 40          | -1.92     | -3.55  | -4.08  | -3.59  | -1.94  |
|       | 80          | -3.33     | -6.12  | -6.95  | -6.12  | -3.29  |
|       | 100         | -4.11     | -7.53  | -8.56  | -7.57  | -3.54  |
|       | 120         | -5.08     | -9.32  | -10.44 | -9.37  | -5.00  |
|       | 140         | -5.99     | -11.11 | -12.42 | -11.18 | -5.98  |
|       | 160         | -7.17     | -13.35 | -14.95 | -13.44 | -7.17  |
|       | 180         | -8.55     | -15.90 | -17.69 | -15.94 | -10.01 |
|       | 200         | -10.60    | -19.21 | -21.82 | -19.70 | -9.48  |
|       | 217.1       | n.m.      | n.m.   | -45.82 | n.m.   | n.m.   |



*Prilog B*

|       | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6     |
|-------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|       | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |        |
| NAC-3 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|       | 30          | -0.77     | -1.41  | -1.55  | -1.33  | -0.75  |
|       | 60          | -1.83     | -3.32  | -3.70  | -3.11  | -1.80  |
|       | 90          | -3.03     | -5.45  | -6.11  | -5.23  | -2.97  |
|       | 120         | -4.20     | -7.53  | -8.49  | -7.27  | -4.18  |
|       | 0           | -0.74     | -1.41  | -1.69  | -1.52  | -2.62  |
|       | 60          | -2.52     | -4.62  | -5.21  | -4.49  | -0.78  |
|       | 90          | -3.38     | -6.18  | -6.94  | -5.98  | -2.51  |
|       | 120         | -4.38     | -7.98  | -8.89  | -7.63  | -3.36  |
|       | 150         | -5.82     | -10.53 | -11.79 | -10.16 | -5.53  |
|       | 180         | -6.95     | -12.56 | -14.03 | -12.11 | -6.84  |
|       | 210         | -8.38     | -15.22 | -17.04 | -14.69 | -7.77  |
|       | 240         | -10.33    | -18.86 | -21.24 | -18.22 | -10.27 |
|       | 270         | -12.59    | -23.30 | -26.59 | -21.89 | -12.58 |
|       | 275.1       | n.m.      | n.m.   | -28.51 | n.m.   | n.m.   |

|         | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6    |
|---------|-------------|-----------|--------|--------|--------|-------|
|         | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |       |
| RAC50-1 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  |
|         | 5           | -0.08     | -0.18  | -0.17  | -0.17  | -0.11 |
|         | 10          | -0.24     | -0.43  | -0.45  | -0.42  | -0.23 |
|         | 15          | -0.48     | -0.82  | -0.91  | -0.81  | -0.43 |
|         | 20          | -1.11     | -2.02  | -2.20  | -1.81  | -0.96 |
|         | 25          | -2.22     | -4.14  | -4.59  | -3.93  | -2.07 |
|         | 0           | -1.05     | -1.81  | -2.03  | -1.70  | -1.75 |
|         | 10          | -1.44     | -2.68  | -2.95  | -2.55  | -0.90 |
|         | 20          | -2.01     | -3.74  | -4.13  | -3.54  | -1.33 |
|         | 30          | -3.16     | -5.82  | -6.50  | -5.53  | -2.87 |
|         | 35          | -4.03     | -7.39  | -8.23  | -8.81  | -3.80 |
|         | 40          | -4.97     | -9.12  | -10.12 | -9.01  | -4.67 |
|         | 45          | -7.46     | -13.94 | -15.49 | -12.81 | -6.81 |
|         | 50          | -23.72    | -47.84 | -55.84 | n.m.   | n.m.  |
|         | 53.95       | n.m.      | n.m.   | -97.92 | n.m.   | n.m.  |

*Prilog B*

|         | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6     |
|---------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|         | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |        |
| RAC50-2 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|         | 20          | -0.55     | -1.03  | -1.14  | -0.98  | -0.55  |
|         | 40          | -1.51     | -2.72  | -3.18  | -2.56  | -1.44  |
|         | 60          | -2.54     | -4.50  | -5.16  | -4.35  | -2.34  |
|         | 80          | -3.55     | -6.36  | -7.27  | -6.15  | -3.31  |
|         | 0           | -0.95     | -1.37  | -1.70  | -1.28  | -0.70  |
|         | 40          | -2.14     | -3.78  | -4.39  | -3.65  | -1.97  |
|         | 80          | -3.63     | -6.43  | -7.36  | -6.21  | -4.29  |
|         | 100         | -4.66     | -8.24  | -9.35  | -7.99  | -5.32  |
|         | 120         | -5.70     | -10.10 | -11.45 | -9.87  | -6.38  |
|         | 140         | -6.78     | -12.08 | -13.63 | -11.79 | -7.45  |
|         | 160         | -8.00     | -14.29 | -16.07 | -13.96 | -8.87  |
|         | 180         | -9.46     | -17.00 | -19.14 | -16.63 | -9.72  |
|         | 200         | -10.89    | -19.78 | -22.25 | -19.34 | -10.40 |
|         | 221.09      | n.m.      | n.m.   | -46.16 | n.m.   | n.m.   |

|         | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6     |
|---------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|         | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |        |
| RAC50-3 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|         | 30          | -0.77     | -1.42  | -1.41  | -1.34  | -0.55  |
|         | 60          | -1.88     | -3.38  | -3.59  | -3.27  | -1.57  |
|         | 90          | -3.01     | -5.39  | -5.86  | -5.21  | -2.68  |
|         | 120         | -4.15     | -7.44  | -8.04  | -7.23  | -3.78  |
|         | 0           | -0.70     | -1.20  | -1.34  | -1.20  | -0.53  |
|         | 30          | -1.47     | -2.62  | -2.83  | -2.62  | -1.24  |
|         | 60          | -2.37     | -4.25  | -4.59  | -4.21  | -2.10  |
|         | 90          | -3.28     | -5.86  | -6.30  | -5.77  | -2.98  |
|         | 120         | -4.21     | -7.52  | -8.09  | -7.39  | -3.86  |
|         | 150         | -5.40     | -9.60  | -10.49 | -9.46  | -4.94  |
|         | 180         | -6.71     | -11.91 | -13.11 | -11.68 | -6.19  |
|         | 210         | -8.06     | -14.44 | -15.87 | -14.21 | -7.59  |
|         | 240         | -9.53     | -17.23 | -19.00 | -16.92 | -9.15  |
|         | 270         | -11.37    | -20.94 | -23.32 | -20.53 | -10.90 |
|         | 300         | -13.48    | -25.06 | -28.16 | -24.74 | -0.41  |
|         | 320.75      | n.m.      | n.m.   | -34.54 | n.m.   | n.m.   |

*Prilog B*

|          | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6     |
|----------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|          | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |        |
| RAC100-1 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|          | 5           | -0.08     | -0.16  | -0.21  | -0.18  | -0.06  |
|          | 10          | -0.18     | -0.35  | -0.42  | -0.35  | -0.16  |
|          | 15          | -0.37     | -0.66  | -0.78  | -0.64  | -0.35  |
|          | 20          | -0.73     | -1.33  | -1.65  | -1.30  | -0.87  |
|          | 25          | -1.66     | -3.17  | -3.79  | -2.98  | -1.96  |
|          | 0           | -0.52     | -1.10  | -1.39  | -1.01  | -1.66  |
|          | 10          | -1.04     | -1.98  | -2.38  | -1.87  | -0.89  |
|          | 20          | -1.55     | -2.92  | -3.45  | -2.74  | -1.28  |
|          | 30          | -2.86     | -5.39  | -6.29  | -5.12  | -2.73  |
|          | 35          | -3.89     | -7.30  | -8.32  | -6.88  | -3.66  |
|          | 40          | -4.80     | -8.99  | -10.22 | -8.57  | -4.57  |
|          | 45          | -6.02     | -11.32 | -12.90 | -10.74 | -5.73  |
|          | 50          | -20.25    | -40.03 | -47.38 | -35.03 | -19.59 |
|          | 53.65       | n.m.      | n.m.   | -92.63 | n.m.   | n.m.   |

|          | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6     |
|----------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|          | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |        |
| RAC100-2 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|          | 20          | -0.58     | -1.05  | -1.17  | -1.12  | -0.77  |
|          | 40          | -1.43     | -2.63  | -2.93  | -2.68  | -1.61  |
|          | 60          | -2.42     | -4.44  | -4.93  | -4.44  | -2.65  |
|          | 80          | -3.43     | -6.27  | -6.89  | -6.23  | -3.65  |
|          | 0           | -0.66     | -1.25  | -1.38  | -1.33  | -0.87  |
|          | 40          | -2.11     | -3.80  | -4.18  | -3.87  | -2.39  |
|          | 80          | -3.51     | -6.41  | -7.08  | -6.41  | -4.41  |
|          | 100         | -4.46     | -8.15  | -8.91  | -8.09  | -5.48  |
|          | 120         | -5.56     | -10.17 | -11.18 | -10.11 | -6.52  |
|          | 140         | -6.60     | -12.06 | -13.17 | -12.00 | -7.77  |
|          | 160         | -7.84     | -14.29 | -15.54 | -14.23 | -9.36  |
|          | 180         | -9.40     | -17.25 | -18.87 | -17.17 | -10.27 |
|          | 200         | -11.89    | -21.98 | -24.12 | -21.78 | -11.29 |
|          | 210.79      | n.m.      | n.m.   | -38.85 | n.m.   | n.m.   |

*Prilog B*

|          | Merno mesto | U2        | U3     | U4     | U5     | U6    |
|----------|-------------|-----------|--------|--------|--------|-------|
|          | Sila [kN]   | Ugib [mm] |        |        |        |       |
| RAC100-3 | 0           | 0.00      | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  |
|          | 30          | -0.85     | -1.53  | -1.67  | -1.49  | -0.80 |
|          | 60          | -1.99     | -3.66  | -3.90  | -3.49  | -1.90 |
|          | 90          | -3.23     | -5.89  | -6.23  | -5.66  | -3.11 |
|          | 120         | -4.46     | -8.14  | -8.73  | -7.80  | -4.36 |
|          | 0           | -0.79     | -1.48  | -1.66  | -1.42  | -2.79 |
|          | 30          | -1.60     | -2.97  | -3.15  | -2.80  | -0.77 |
|          | 60          | -2.60     | -4.78  | -5.19  | -4.59  | -1.56 |
|          | 90          | -3.57     | -6.54  | -7.07  | -6.28  | -2.52 |
|          | 120         | -4.59     | -8.38  | -8.95  | -8.03  | -3.49 |
|          | 150         | -5.91     | -10.76 | -11.74 | -10.34 | -5.68 |
|          | 180         | -7.34     | -13.36 | -14.48 | -12.90 | -7.13 |
|          | 210         | -8.69     | -15.89 | -17.24 | -15.37 | -8.56 |
|          | 240         | -10.74    | -21.05 | -21.74 | -19.33 | -8.51 |
|          | 270         | -13.38    | -25.74 | -27.05 | -24.51 | 0.00  |
|          |             | 285.21    | n.m.   | n.m.   | -30.38 | n.m.  |

<sup>1</sup> n.m. – nije mereno

## B.2 DILATACIJE U BETONU KOD GREDA ISPITIVANIH DO LOMA SAVIJANJEM

Napomena: oznake mernih mesta su u skladu sa šemama na slici 35.

| Sila na presi<br>2P [kN] | merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |                            |       |       |                  |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------|-------|------------------|
|                          | presek 3<br>v3-2                      | presek 4<br>v4-1 v4-2 v4-3 |       |       | presek 5<br>v5-2 |
| 0                        | 0.000                                 | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000            |
| 5                        | 0.022                                 | 0.032                      | 0.027 | 0.016 | 0.023            |
| 10                       | 0.047                                 | 0.066                      | 0.056 | 0.032 | 0.048            |
| 15                       | 0.077                                 | 0.112                      | 0.094 | 0.053 | 0.076            |
| 20                       | 0.114                                 | 0.175                      | 0.144 | 0.072 | 0.104            |
| 25                       | 0.207                                 | 0.336                      | 0.254 | 0.075 | 0.145            |
| 30                       | 0.308                                 | 0.516                      | 0.361 | 0.052 | 0.316            |
| 35                       | 0.374                                 | 0.659                      | 0.444 | 0.042 | 0.381            |
| 40                       | 0.440                                 | 0.794                      | 0.524 | 0.030 | 0.446            |
| 45                       | 0.505                                 | 0.919                      | 0.598 | 0.017 | 0.511            |
| 50                       | 0.825                                 | 2.137                      | 1.017 | 0.233 | 0.588            |

| Sila na presi<br>2P [kN] | merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |                            |       |       |                  |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------|-------|------------------|
|                          | presek 3<br>v3-2                      | presek 4<br>v4-1 v4-2 v4-3 |       |       | presek 5<br>v5-2 |
| 0                        | 0.000                                 | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000            |
| 20                       | 0.107                                 | 0.160                      | 0.141 | 0.091 | 0.170            |
| 40                       | 0.272                                 | 0.389                      | 0.313 | 0.172 | 0.320            |
| 60                       | 0.427                                 | 0.572                      | 0.439 | 0.214 | 0.379            |
| 80                       | 0.625                                 | 0.818                      | 0.623 | 0.296 | 0.612            |
| 100                      | 0.793                                 | 1.061                      | 0.823 | 0.384 | 0.795            |
| 120                      | 0.974                                 | 1.251                      | 0.958 | 0.444 | 0.879            |
| 140                      | 1.163                                 | 1.469                      | 1.128 | 0.513 | 1.060            |
| 160                      | 1.429                                 | 1.761                      | 1.361 | 0.628 | 1.341            |
| 180                      | 1.694                                 | 2.068                      | 1.589 | 0.705 | 1.540            |
| 200                      | 2.045                                 | 2.745                      | 2.033 | 0.756 | 1.842            |

| Sila na presi<br>2P [kN] | merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |                            |       |       |       |                  |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|------------------|
|                          | presek 3<br>v3-2                      | presek 4<br>v4-1 v4-2 v4-3 |       |       | v4-4  | presek 5<br>v5-2 |
| 0                        | 0.000                                 | 0.000                      | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000            |
| 30                       | 0.182                                 | 0.249                      | 0.220 | 0.134 | 0.032 | 0.196            |
| 60                       | 0.397                                 | 0.510                      | 0.439 | 0.238 | 0.036 | 0.358            |
| 90                       | 0.644                                 | 0.820                      | 0.700 | 0.373 | 0.071 | 0.586            |
| 120                      | 0.903                                 | 1.133                      | 0.962 | 0.514 | 0.110 | 0.822            |
| 150                      | 1.283                                 | 1.567                      | 1.326 | 0.718 | 0.167 | 1.154            |
| 180                      | 1.571                                 | 1.895                      | 1.605 | 0.888 | 0.233 | 1.470            |
| 210                      | 1.974                                 | 2.347                      | 1.995 | 1.114 | 0.331 | 1.773            |
| 240                      | 2.516                                 | 3.068                      | 2.603 | 1.471 | 0.489 | 2.287            |
| 270                      | 3.060                                 | 4.126                      | 3.399 | 1.979 | 0.875 | 2.715            |

*Prilog B*

| Sila na presi<br>2P [kN] | merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |          |       |        |          |
|--------------------------|---------------------------------------|----------|-------|--------|----------|
|                          | presek 3                              | presek 4 |       |        | presek 5 |
|                          | v3-2                                  | v4-1     | v4-2  | v4-3   | v5-2     |
| 0                        | 0.000                                 | 0.000    | 0.000 | 0.000  | 0.000    |
| 5                        | 0.025                                 | 0.036    | 0.031 | 0.018  | 0.029    |
| 10                       | 0.056                                 | 0.084    | 0.069 | 0.040  | 0.050    |
| 15                       | 0.102                                 | 0.179    | 0.140 | 0.064  | 0.086    |
| 20                       | 0.199                                 | 0.354    | 0.251 | 0.037  | 0.133    |
| 25                       | 0.309                                 | 0.501    | 0.342 | -0.037 | 0.280    |
| 30                       | 0.385                                 | 0.650    | 0.430 | -0.100 | 0.349    |
| 35                       | 0.452                                 | 0.787    | 0.508 | -0.145 | 0.409    |
| 40                       | 0.524                                 | 0.923    | 0.587 | -0.184 | 0.474    |
| 45                       | 0.600                                 | 1.478    | 0.794 | -0.958 | 0.532    |
| 50                       | 1.011                                 | 4.064    | 1.568 | -3.456 | 0.972    |

| Sila na presi<br>2P [kN] | merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |          |       |       |          |
|--------------------------|---------------------------------------|----------|-------|-------|----------|
|                          | presek 3                              | presek 4 |       |       | presek 5 |
|                          | v3-2                                  | v4-1     | v4-2  | v4-3  | v5-2     |
| 0                        | 0.000                                 | 0.000    | 0.000 | 0.000 | 0.000    |
| 20                       | 0.123                                 | 0.167    | 0.141 | 0.077 | 0.137    |
| 40                       | 0.292                                 | 0.392    | 0.324 | 0.148 | 0.318    |
| 60                       | 0.459                                 | 0.604    | 0.496 | 0.215 | 0.484    |
| 80                       | 0.646                                 | 0.824    | 0.678 | 0.290 | 0.647    |
| 100                      | 0.848                                 | 1.054    | 0.871 | 0.374 | 0.843    |
| 120                      | 1.069                                 | 1.292    | 1.072 | 0.463 | 1.051    |
| 140                      | 1.306                                 | 1.521    | 1.270 | 0.556 | 1.270    |
| 160                      | 1.598                                 | 1.803    | 1.515 | 0.669 | 1.526    |
| 180                      | 1.946                                 | 2.150    | 1.810 | 0.785 | 1.827    |
| 200                      | 2.301                                 | 2.496    | 2.106 | 0.896 | 2.143    |

| Sila na presi<br>2P [kN] | merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |          |       |       |       |          |
|--------------------------|---------------------------------------|----------|-------|-------|-------|----------|
|                          | presek 3                              | presek 4 |       |       |       | presek 5 |
|                          | v3-2                                  | v4-1     | v4-2  | v4-3  | v4-4  | v5-2     |
| 0                        | 0.000                                 | 0.000    | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000    |
| 30                       | 0.174                                 | 0.256    | 0.224 | 0.139 | 0.074 | 0.201    |
| 60                       | 0.374                                 | 0.515    | 0.437 | 0.250 | 0.111 | 0.383    |
| 90                       | 0.592                                 | 0.790    | 0.671 | 0.376 | 0.162 | 0.606    |
| 120                      | 0.835                                 | 1.079    | 0.919 | 0.512 | 0.187 | 0.839    |
| 150                      | 1.103                                 | 1.395    | 1.190 | 0.663 | 0.284 | 1.138    |
| 180                      | 1.408                                 | 1.741    | 1.491 | 0.837 | 0.373 | 1.459    |
| 210                      | 1.760                                 | 2.137    | 1.832 | 1.039 | 0.487 | 1.815    |
| 240                      | 2.148                                 | 2.603    | 2.231 | 1.271 | 0.620 | 2.213    |
| 270                      | 2.654                                 | 3.238    | 2.771 | 1.576 | 0.774 | 2.740    |

*Prilog B*

| <b>RAC100-1</b> merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |          |          |       |       |          |
|---|----------|----------|-------|-------|----------|
| Sila na presi<br>2P [kN]                              | presek 3 | presek 4 |       |       | presek 5 |
|   | v3-2     | v4-1     | v4-2  | v4-3  | v5-2     |
| 0   | 0.000    | 0.000    | 0.000 | 0.000 | 0.000    |
| 5   | 0.022    | 0.035    | 0.031 | 0.025 | 0.025    |
| 10  | 0.042    | 0.071    | 0.061 | 0.047 | 0.046    |
| 15  | 0.079    | 0.126    | 0.107 | 0.082 | 0.081    |
| 20  | 0.127    | 0.226    | 0.201 | 0.124 | 0.115    |
| 25  | 0.242    | 0.444    | 0.338 | 0.162 | 0.234    |
| 30  | 0.321    | 0.577    | 0.423 | 0.175 | 0.321    |
| 35  | 0.456    | 0.855    | 0.602 | 0.186 | 0.434    |
| 40  | 0.529    | 1.038    | 0.719 | 0.179 | 0.501    |
| 45  | 0.529    | 1.038    | 0.719 | 0.179 | 0.501    |
| 50  | n.m.     | 3.353    | n.m.  | n.m.  | n.m.     |

| <b>RAC100-2</b> merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |          |          |       |       |          |
|---|----------|----------|-------|-------|----------|
| Sila na presi<br>2P [kN]                              | presek 3 | presek 4 |       |       | presek 5 |
|   | v3-2     | v4-1     | v4-2  | v4-3  | v5-2     |
| 0   | 0.000    | 0.000    | 0.000 | 0.000 | 0.000    |
| 20  | 0.113    | 0.158    | 0.130 | 0.075 | 0.115    |
| 40  | 0.273    | 0.381    | 0.305 | 0.155 | 0.282    |
| 60  | 0.438    | 0.607    | 0.479 | 0.215 | 0.451    |
| 80  | 0.608    | 0.823    | 0.647 | 0.282 | 0.624    |
| 100   | 0.801    | 1.064    | 0.837 | 0.364 | 0.819    |
| 120   | 1.026    | 1.322    | 1.042 | 0.458 | 1.042    |
| 140   | 1.249    | 1.577    | 1.252 | 0.560 | 1.301    |
| 160   | 1.518    | 1.861    | 1.475 | 0.664 | 1.552    |
| 180   | 1.861    | 2.262    | 1.790 | 0.791 | 1.912    |
| 200   | 2.324    | 2.860    | 2.255 | 0.943 | 2.393    |

| <b>RAC100-3</b> merno mesto / dilatacija u betonu [‰] |          |          |       |       |       |          |
|---|----------|----------|-------|-------|-------|----------|
| Sila na presi<br>2P [kN]                              | presek 3 | presek 4 |       |       |       | presek 5 |
|   | v3-2     | v4-1     | v4-2  | v4-3  | v4-4  | v5-2     |
| 0   | 0.000    | 0.000    | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000    |
| 30  | 0.200    | 0.555    | 0.417 | 0.238 | 0.064 | 0.307    |
| 60  | 0.449    | 0.951    | 0.669 | 0.388 | 0.091 | 0.501    |
| 90  | 0.712    | 1.305    | 0.923 | 0.548 | 0.122 | 0.784    |
| 120   | 0.975    | 1.635    | 1.172 | 0.697 | 0.145 | 1.070    |
| 150   | 1.252    | 1.965    | 1.430 | 0.850 | 0.171 | 1.363    |
| 180   | 1.535    | 2.302    | 1.702 | 1.010 | 0.199 | 1.681    |
| 210   | 1.809    | 2.625    | 1.960 | 1.157 | 0.223 | 1.967    |
| 240   | 2.120    | 2.987    | 2.261 | 1.338 | 0.269 | 2.292    |
| 270   | 2.557    | 3.557    | 2.676 | 1.609 | 0.320 | 2.721    |

**B.3 DILATACIJE U ARMATURI KOD GREDA ISPITIVANIH DO LOMA SAVIJANJEM**

Napomena: oznake mernih mesta su u skladu sa šemama na slici 35.

| presek/dilatacija u armaturi |      |     |     |
|------------------------------|------|-----|-----|
| <b>NAC-1</b>                 | [%]  |     |     |
| 2P [kN]                      | 3    | 4   | 5   |
| 0                            | 0.0  | 0.0 | 0.0 |
| 5                            | 0.0  | 0.0 | 0.0 |
| 10                           | 0.2  | 0.6 | 0.1 |
| 15                           | 0.2  | 0.6 | 0.1 |
| 20                           | 0.3  | 0.6 | 0.1 |
| 25                           | 1.0  | 1.1 | 0.2 |
| 30                           | 1.7  | 1.5 | 1.2 |
| 35                           | 2.1  | 2.0 | 1.6 |
| 40                           | 2.6  | 2.5 | 2.1 |
| 45                           | 3.0  | 2.9 | 2.5 |
| 50                           | 17.2 | 4.3 | 3.0 |
| 56.7                         | 19.0 | 7.5 | 6.5 |

| presek/dilatacija u armaturi |     |      |     |
|------------------------------|-----|------|-----|
| <b>NAC-2</b>                 | [%] |      |     |
| 2P [kN]                      | 3   | 4    | 5   |
| 0                            | 0.0 | 0.0  | 0.0 |
| 20                           | 0.2 | 0.3  | 0.3 |
| 40                           | 0.5 | 0.7  | 0.6 |
| 60                           | 0.8 | 1.0  | 0.9 |
| 80                           | 1.2 | 1.3  | 1.2 |
| 100                          | 1.4 | 1.6  | 1.5 |
| 120                          | 1.7 | 1.9  | 1.8 |
| 140                          | 2.0 | 2.2  | 2.1 |
| 160                          | 2.3 | 2.6  | 2.4 |
| 180                          | 2.8 | 3.1  | 2.9 |
| 200                          | 3.4 | 4.0  | 3.5 |
| 217.1                        | 4.9 | 14.7 | 4.6 |

| presek/dilatacija u armaturi |     |     |     |
|------------------------------|-----|-----|-----|
| <b>NAC-3</b>                 | [%] |     |     |
| 2P [kN]                      | 3   | 4   | 5   |
| 0                            | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 30                           | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| 60                           | 0.5 | 0.6 | 0.5 |
| 90                           | 0.9 | 1.0 | 0.8 |
| 120                          | 1.2 | 1.3 | 1.2 |
| 150                          | 1.7 | 1.7 | 1.6 |
| 180                          | 2.0 | 2.0 | 1.9 |
| 210                          | 2.3 | 2.4 | 2.2 |
| 240                          | 2.8 | 3.0 | 2.8 |
| 270                          | 3.4 | 4.0 | 3.3 |
| 275.1                        | 3.6 | 6.4 | 3.5 |



| <b>RAC50-1</b> | presek/dilatacija u armaturi |                   |      |
|----------------|------------------------------|-------------------|------|
|                | [%]                          |                   |      |
| 2P [kN]        | 3                            | 4                 | 5    |
| 0              | 0.0                          | 0.0               | 0.0  |
| 5              | 0.0                          | 0.1               | 0.0  |
| 10             | 0.1                          | 0.1               | 0.2  |
| 15             | 0.1                          | 0.1               | 0.5  |
| 20             | 0.5                          | 0.2               | 1.2  |
| 25             | 1.1                          | 1.6               | 1.6  |
| 30             | 1.5                          | 2.1               | 2.1  |
| 35             | 1.8                          | 2.5               | 2.4  |
| 40             | 2.2                          | 2.9               | 2.8  |
| 45             | 2.6                          | 3.4               | 12.1 |
| 50             | 3.7                          | n.m. <sup>1</sup> | 47.1 |
| 54.0           | 10.5                         | n.m.              | 65.9 |

| <b>RAC50-2</b> | presek/dilatacija u armaturi |      |      |
|----------------|------------------------------|------|------|
|                | [%]                          |      |      |
| 2P [kN]        | 3                            | 4    | 5    |
| 0              | 0.0                          | 0.0  | 0.0  |
| 20             | 0.1                          | 0.2  | 0.2  |
| 40             | 0.5                          | 0.5  | 0.5  |
| 60             | 0.8                          | 0.8  | 0.9  |
| 80             | 1.1                          | 1.1  | 1.2  |
| 100            | 1.4                          | 1.4  | 1.5  |
| 120            | 1.7                          | 1.6  | 1.8  |
| 140            | 2.0                          | 1.9  | 2.1  |
| 160            | 2.3                          | 2.3  | 2.5  |
| 180            | 2.7                          | 2.8  | 3.0  |
| 200            | 3.3                          | 3.3  | 3.6  |
| 221.1          | 4.0                          | 14.6 | 11.2 |

| <b>RAC50-3</b> | presek/dilatacija u armaturi |      |     |
|----------------|------------------------------|------|-----|
|                | [%]                          |      |     |
| 2P [kN]        | 3                            | 4    | 5   |
| 0              | 0.0                          | 0.0  | 0.0 |
| 30             | 0.2                          | 0.2  | 0.2 |
| 60             | 0.6                          | 0.6  | 0.5 |
| 90             | 0.9                          | 0.9  | 0.9 |
| 120            | 1.2                          | 1.2  | 1.2 |
| 150            | 1.5                          | 1.5  | 1.5 |
| 180            | 1.8                          | 1.8  | 1.8 |
| 210            | 2.1                          | 2.1  | 2.2 |
| 240            | 2.5                          | 2.5  | 2.6 |
| 270            | 3.0                          | 3.2  | 3.1 |
| 300            | 3.7                          | 6.5  | 4.0 |
| 320.7          | 5.1                          | 22.6 | 8.8 |

| <b>RAC100-1</b> | presek/dilatacija u armaturi |     |     |
|-----------------|------------------------------|-----|-----|
|                 | [‰]                          |     |     |
| 2P [kN]         | 3                            | 4   | 5   |
| 0               | 0.0                          | 0.0 | 0.0 |
| 5               | 0.0                          | 0.0 | 0.0 |
| 10              | 0.0                          | 0.1 | 0.1 |
| 15              | 0.1                          | 0.1 | 0.1 |
| 20              | 0.2                          | 0.2 | 0.1 |
| 25              | 0.9                          | 0.8 | 1.0 |
| 30              | 1.4                          | 1.2 | 1.5 |
| 35              | 1.8                          | 1.7 | 2.1 |
| 40              | 2.1                          | 2.1 | 2.6 |
| 45              | 2.4                          | 2.5 | 3.1 |
| 50              | 3.0                          | 2.8 | 4.4 |
| 53.6            | 3.4                          | 3.8 | 6.2 |

| <b>RAC100-2</b> | presek/dilatacija u armaturi |     |     |
|-----------------|------------------------------|-----|-----|
|                 | [‰]                          |     |     |
| 2P [kN]         | 3                            | 4   | 5   |
| 0               | 0.0                          | 0.0 | 0.0 |
| 20              | 0.2                          | 0.1 | 0.1 |
| 40              | 0.5                          | 0.4 | 0.3 |
| 60              | 0.8                          | 0.7 | 0.6 |
| 80              | 1.1                          | 1.0 | 0.9 |
| 100             | 1.4                          | 1.3 | 1.2 |
| 120             | 1.7                          | 1.6 | 1.5 |
| 140             | 2.0                          | 1.9 | 1.8 |
| 160             | 2.3                          | 2.2 | 2.1 |
| 180             | 2.9                          | 2.7 | 2.5 |
| 200             | 4.1                          | 3.5 | 3.3 |
| 210.8           | 18.8                         | 4.3 | 3.4 |

| <b>RAC100-3</b> | presek/dilatacija u armaturi |     |     |
|-----------------|------------------------------|-----|-----|
|                 | [‰]                          |     |     |
| 2P [kN]         | 3                            | 4   | 5   |
| 0               | 0.0                          | 0.0 | 0.0 |
| 30              | 0.2                          | 0.3 | 0.2 |
| 60              | 0.6                          | 0.6 | 0.6 |
| 90              | 0.9                          | 1.0 | 0.9 |
| 120             | 1.3                          | 1.3 | 1.2 |
| 150             | 1.6                          | 1.6 | 1.6 |
| 180             | 2.0                          | 2.0 | 2.0 |
| 210             | 2.3                          | 2.3 | 2.3 |
| 240             | 2.6                          | 2.7 | 2.7 |
| 270             | 3.0                          | 3.2 | 3.8 |
| 285.2           | 3.8                          | 9.5 | 9.9 |

<sup>1</sup> n.m. – nije mereno

B.4 DILATACIJE U BETONU KOD GREDA ISPITIVANIH DO LOMA SMICANJEM

Napomena 1: oznake mernih mesta su u skladu sa šemama na slici 81 (D1– presek u sredini raspona grede; D2 – presek u sredini smičućeg raspona).

Napomena 2: dilatacije su u [%]

| NAC-1       | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno mesto | D1      | 0    | 0.08 | 0.18 | 0.27 | 0.37 | 0.47 | 0.56 |
|             | D2      | 0    | 0.04 | 0.07 | 0.11 | 0.16 | 0.20 | 0.24 |
| NAC-1       | 2P [kN] | 80   | 100  | 120  | 140  | 160  | 175  |      |
| Merno mesto | D1      | 0.76 | 0.96 | 1.15 | 1.37 | 1.62 | 1.78 |      |
|             | D2      | 0.34 | 0.42 | 0.50 | 0.57 | 0.64 | 0.29 |      |

| RAC50-1     | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| Merno mesto | D1      | 0    | 0.07 | 0.16 | 0.29 | 0.35 | 0.45 |
|             | D2      | 0    | 0.03 | 0.07 | 0.11 | 0.16 | 0.21 |
| RAC50-1     | 2P [kN] | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  | 160  |
| Merno mesto | D1      | 0.55 | 0.74 | 0.93 | 1.15 | 1.38 | 1.92 |
|             | D2      | 0.25 | 0.34 | 0.43 | 0.52 | 0.60 | 0.71 |

| RAC100-1    | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60    | 80   |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Merno mesto | D1      | 0    | 0.06 | 0.12 | 0.21 | 0.29 | 0.38 | 0.48  | 0.67 |
|             | D2      | 0    | 0.03 | 0.06 | 0.09 | 0.12 | 0.16 | 0.20  | 0.29 |
| RAC100-1    | 2P [kN] | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 190  | 200   |      |
| Merno mesto | D1      | 0.89 | 1.10 | 1.34 | 1.59 | 1.85 | 2.02 | 2.14  |      |
|             | D2      | 0.38 | 0.45 | 0.56 | 0.64 | 0.69 | 0.68 | -0.14 |      |

| NAC-2       | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 80   | 100  |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno mesto | D1      | 0    | 0.07 | 0.14 | 0.23 | 0.33 | 0.43 | 0.53 | 0.72 | 0.92 |
|             | D2      | 0    | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.18 | 0.23 | 0.28 | 0.38 | 0.47 |
| NAC-2       | 2P [kN] | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 250  |      |
| Merno mesto | D1      | 1.13 | 1.37 | 1.62 | 1.89 | 2.23 | 2.54 | 2.95 | 3.18 |      |
|             | D2      | 0.56 | 0.67 | 0.80 | 0.88 | 0.83 | 0.74 | 0.43 | 0.19 |      |

| RAC50-2     | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 80   | 100  |
|-------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno mesto | D1      | 0    | 0.07 | 0.15 | 0.26 | 0.35 | 0.46 | 0.57 | 0.80 | 1.02 |
|             | D2      | 0    | 0.03 | 0.07 | 0.11 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.35 | 0.44 |
| RAC50-2     | 2P [kN] | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 250  |      |
| Merno mesto | D1      | 1.26 | 1.51 | 1.82 | 2.13 | 2.46 | 2.86 | 3.44 | 3.81 |      |
|             | D2      | 0.53 | 0.60 | 0.69 | 0.75 | 0.81 | 0.79 | 0.67 | 0.55 |      |

*Prilog B*

| RAC100-2 | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 80   | 100  | 120  |
|----------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno    | D1      | 0    | 0.06 | 0.14 | 0.24 | 0.33 | 0.43 | 0.54 | 0.74 | 0.95 | 1.19 |
| mesto    | D2      | 0    | 0.03 | 0.07 | 0.10 | 0.14 | 0.19 | 0.23 | 0.31 | 0.40 | 0.48 |
| RAC100-2 | 2P [kN] | 140  | 160  | 180  | 200  | 200  | 220  | 220  | 220  | 240  |      |
| Merno    | D1      | 1.43 | 1.73 | 2.00 | 2.33 | 2.35 | 2.69 | 2.79 | 2.82 | 3.08 |      |
| mesto    | D2      | 0.55 | 0.62 | 0.71 | 0.80 | 0.81 | 0.69 | 0.65 | 0.61 | 0.43 |      |

| NAC-3 | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 80   | 100  | 120  |
|-------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno | D1      | 0    | 0.06 | 0.11 | 0.19 | 0.28 | 0.37 | 0.47 | 0.65 | 0.88 | 1.08 |
| mesto | D2      | 0    | 0.03 | 0.05 | 0.09 | 0.14 | 0.21 | 0.23 | 0.34 | 0.40 | 0.48 |
| NAC-3 | 2P [kN] | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  | 280  |      |
| Merno | D1      | 1.29 | 1.52 | 1.78 | 2.09 | 2.38 | 2.72 | 3.11 | 3.57 | 3.70 |      |
| mesto | D2      | 0.56 | 0.63 | 0.80 | 0.86 | 0.89 | 0.92 | 0.85 | 0.72 | 0.67 |      |

| RAC50-3 | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 80   | 100  | 120  |
|---------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno   | D1      | 0    | 0.07 | 0.14 | 0.21 | 0.30 | 0.39 | 0.48 | 0.67 | 0.86 | 1.06 |
| mesto   | D2      | 0    | 0.03 | 0.06 | 0.10 | 0.13 | 0.18 | 0.21 | 0.29 | 0.37 | 0.45 |
| RAC50-3 | 2P [kN] | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  | 280  |      |
| Merno   | D1      | 1.26 | 1.49 | 1.74 | 2.01 | 2.31 | 2.66 | 3.02 | 3.49 | 3.62 |      |
| mesto   | D2      | 0.52 | 0.61 | 0.70 | 0.74 | 0.78 | 0.81 | 0.79 | 0.71 | 0.69 |      |

| RAC100-3 | 2P [kN] | 0    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 80   | 100  | 120  |
|----------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Merno    | D1      | 0    | 0.06 | 0.13 | 0.21 | 0.38 | 0.37 | 0.46 | 0.62 | 0.80 | 0.98 |
| mesto    | D2      | 0    | 0.03 | 0.07 | 0.11 | 0.15 | 0.19 | 0.24 | 0.33 | 0.42 | 0.51 |
| RAC100-3 | 2P [kN] | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  | 280  |      |
| Merno    | D1      | 1.17 | 1.37 | 1.59 | 1.82 | 2.09 | 2.42 | 2.71 | 3.05 | 3.23 |      |
| mesto    | D2      | 0.59 | 0.66 | 0.74 | 0.83 | 0.86 | 0.88 | 0.92 | 0.81 | 0.78 |      |

## B.5 DILATACIJE U PODUŽNOJ ARMATURI KOD GREDA ISPITIVANIH DO LOMA SMICANJEM

Napomena 1: oznake mernih mesta su u skladu sa šemama na slici 81

Napomena 2: dilatacije su u [‰]

| NAC-1 |      |      | RAC50-1 |      |     | RAC100-1 |      |      |
|-------|------|------|---------|------|-----|----------|------|------|
| 2P    | M1   | M2   | 2P      | M1   | M2  | 2P       | M1   | M2   |
| [kN]  |      |      | [kN]    |      |     | [kN]     |      |      |
| 0     | 0    | 0    | 0       | 0    | 0   | 0        | 0    | 0    |
| 10    | 52   | 23   | 10      | 47   | 17  | 10       | 40   | 23   |
| 19    | 234  | 83   | 20      | 126  | 39  | 20       | 86   | 43   |
| 29    | 323  | 105  | 29      | 208  | 65  | 29       | 131  | 61   |
| 39    | 417  | 138  | 39      | 293  | 93  | 39       | 201  | 83   |
| 49    | 510  | 181  | 49      | 383  | 122 | 49       | 242  | 87   |
| 58    | 600  | 231  | 59      | 473  | 153 | 59       | 389  | 144  |
| 78    | 786  | 338  | 78      | 642  | 224 | 78       | 965  | 490  |
| 98    | 961  | 443  | 98      | 814  | 326 | 99       | 1162 | 557  |
| 118   | 1129 | 561  | 118     | 1006 | 447 | 118      | 1048 | 538  |
| 136   | 1297 | 686  | 138     | 1184 | 577 | 137      | 1292 | 717  |
| 157   | 1490 | 843  | 159     | 1373 | 717 | 155      | 1616 | 935  |
| 175   | 1644 | 1141 | 179     | 1533 | 860 | 174      | 1581 | 939  |
| 212   | 1961 | 1249 | 184     | 1555 | 872 | 190      | 1704 | 1007 |
|       |      |      |         |      |     | 187      | 1733 | o.*  |
|       |      |      |         |      |     | 210      | 1844 | o.   |

| NAC-2   |      |      | RAC50-2 |      |      | RAC100-2 |      |      |
|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|
| 2P [kN] | M1   | M4   | 2P [kN] | M1   | M4   | 2P [kN]  | M1   | M4   |
| 12      | 55   | 25   | 10      | 44   | 18   | 10       | 39   | 18   |
| 20      | 122  | 44   | 20      | 104  | 40   | 19       | 104  | 37   |
| 30      | 208  | 71   | 30      | 185  | 71   | 29       | 172  | 59   |
| 41      | 296  | 111  | 39      | 257  | 98   | 39       | 260  | 84   |
| 50      | 379  | 155  | 49      | 340  | 135  | 49       | 348  | 115  |
| 60      | 468  | 208  | 59      | 611  | 228  | 59       | 432  | 146  |
| 79      | 634  | 308  | 78      | 599  | 275  | 78       | 594  | 218  |
| 100     | 876  | 463  | 97      | 787  | 389  | 97       | 774  | 329  |
| 119     | 995  | 536  | 118     | 955  | 501  | 118      | 947  | 452  |
| 139     | 1184 | 661  | 138     | 1142 | 625  | 137      | 1144 | 586  |
| 158     | 1402 | 816  | 158     | 1341 | 740  | 156      | 1287 | 715  |
| 180     | 1624 | 1004 | 177     | 1527 | 876  | 176      | 1469 | 845  |
| 198     | 1782 | 1134 | 194     | 1704 | 1010 | 194      | 1647 | 994  |
| 216     | 1970 | 1289 | 215     | 1919 | 1181 | 199      | 1686 | 1022 |
| 236     | 2186 | 1491 | 234     | 2155 | 1414 | 215      | 1827 | 1158 |
| 246     | 2318 | 1577 | 252     | 2308 | 1512 | 211      | 1826 | 1184 |
| 281     | 2881 | 3000 | 284     | 2982 | 1655 | 227      | 1967 | 1334 |
|         |      |      |         |      |      | 235      | 2031 | 1372 |
|         |      |      |         |      |      | 250      | 2149 | 1441 |
|         |      |      |         |      |      | 259      | 2265 | 3000 |
|         |      |      |         |      |      | 270      | 2370 | 3000 |

*Prilog B*

---

| NAC-3   |      |      | RAC50-3 |      |      | RAC100-3 |      |      |
|---------|------|------|---------|------|------|----------|------|------|
| 2P [kN] | M1   | M5   | 2P [kN] | M1   | M5   | 2P [kN]  | M1   | M5   |
| 0       | 0    | 0    | 0       | 0    | 0    | 0        | 0    | 0    |
| 11      | -29  | -35  | 10      | 52   | 42   | 10       | 41   | 19   |
| 19      | 103  | 7    | 20      | 110  | 76   | 20       | 122  | 39   |
| 29      | 176  | 5    | 29      | 173  | 115  | 30       | 207  | 64   |
| 39      | 256  | 6    | 39      | 253  | 164  | 39       | 292  | 93   |
| 48      | 359  | 14   | 49      | 336  | 207  | 49       | 385  | 136  |
| 58      | 476  | 27   | 58      | 420  | 257  | 59       | 466  | 188  |
| 77      | 645  | 28   | 79      | 593  | 346  | 78       | 628  | 284  |
| 98      | 857  | 51   | 99      | 766  | 452  | 97       | 774  | 352  |
| 118     | 1038 | 83   | 118     | 850  | -37  | 118      | 963  | 484  |
| 139     | 1270 | 164  | 138     | 1080 | 590  | 138      | 1098 | 570  |
| 156     | 1420 | 233  | 157     | 1248 | 723  | 157      | 1279 | 709  |
| 175     | 1600 | 438  | 176     | 1412 | 843  | 175      | 1394 | 791  |
| 197     | 1793 | 659  | 195     | 1583 | 1003 | 195      | 1582 | 929  |
| 217     | 1964 | 890  | 215     | 1764 | 1168 | 214      | 1774 | 1089 |
| 236     | 2152 | 1214 | 235     | 2018 | 1600 | 234      | 1948 | 1207 |
| 255     | 2355 | 1361 | 253     | 2178 | 1573 | 250      | 2078 | 1340 |
| 274     | 2644 | 1440 | 270     | 2428 | 1714 | 267      | 2310 | 1513 |
| 280     | 2669 | 1445 | 273     | 2458 | 1705 | 274      | 2383 | 1561 |
| 320     | 3282 | 1806 | 314     | 2906 | 1986 | 327      | 2997 | 1797 |

## B.5 DILATACIJE U PODUŽNOJ ARMATURI KOD GREDA ISPITIVANIH DO LOMA SMICANJEM

Napomena 1: oznake mernih mesta su u skladu sa šemama na slici 81

| NAC-2   |                            |       |       |      | RAC50-2 |                            |      |      |      | RAC100-2 |                            |      |      |      |
|---------|----------------------------|-------|-------|------|---------|----------------------------|------|------|------|----------|----------------------------|------|------|------|
| 2P [kN] | merno mesto/dilatacija [‰] |       |       |      | 2P [kN] | merno mesto/dilatacija [‰] |      |      |      | 2P [kN]  | merno mesto/dilatacija [‰] |      |      |      |
|         | M2                         | M3    | M5    | M6   |         | M2                         | M3   | M5   | M6   |          | M2                         | M3   | M5   | M6   |
| 0       | 0                          | 0     | 0     | 0    | 0       | 0                          | 0    | 0    | 0    | 0        | 0                          | 0    | 0    | 0    |
| 12      | 4                          | 1     | 3     | 1    | 10      | 1                          | 3    | 6    | 0    | 10       | 7                          | 1    | 1    | 2    |
| 20      | 5                          | 2     | 5     | 2    | 20      | 9                          | 7    | 9    | 0    | 19       | 11                         | 2    | 0    | 1    |
| 30      | 7                          | 3     | 8     | 2    | 30      | 15                         | 11   | 12   | 0    | 29       | 19                         | 3    | 0    | 1    |
| 41      | 10                         | 3     | 9     | 3    | 39      | 19                         | 15   | 14   | -1   | 39       | 23                         | 3    | -1   | 2    |
| 50      | 12                         | 2     | 12    | 3    | 49      | 25                         | 19   | 15   | -2   | 49       | 26                         | 7    | -2   | 4    |
| 60      | 13                         | 4     | 17    | 4    | 59      | 53                         | 51   | 49   | 16   | 59       | 30                         | 9    | 0    | 4    |
| 79      | 5                          | 11    | 25    | 7    | 78      | 36                         | 35   | 20   | 2    | 78       | 35                         | 11   | 2    | 4    |
| 100     | 49                         | 31    | 65    | 17   | 97      | 45                         | 52   | 20   | 4    | 97       | 46                         | 16   | 1    | 5    |
| 119     | 5                          | 61    | 69    | 18   | 118     | 59                         | 76   | 17   | 6    | 118      | 57                         | 46   | 1    | 5    |
| 139     | 31                         | 118   | 157   | 26   | 138     | 94                         | 121  | 62   | 11   | 137      | 90                         | 143  | 21   | 18   |
| 158     | 128                        | 309   | 485   | 91   | 158     | 163                        | 142  | 208  | 22   | 156      | 127                        | 253  | 5    | 9    |
| 180     | 416                        | 903   | 1312  | 375  | 177     | 473                        | 357  | 628  | 40   | 176      | 334                        | 447  | 138  | 33   |
| 198     | 1223                       | 1559  | 4691  | 813  | 194     | 898                        | 1019 | 1377 | 273  | 194      | 870                        | 893  | 1016 | 284  |
| 216     | 1977                       | 1769  | 18762 | 1285 | 215     | 1249                       | 1508 | 1412 | 869  | 199      | 958                        | 984  | 1187 | 328  |
| 236     | 9773                       | 7568  | 18948 | 2393 | 234     | 1511                       | 1618 | 1498 | 1320 | 215      | 1268                       | 1448 | 1676 | 823  |
| 246     | 15053                      | 23150 | 19172 | 3078 | 252     | 1624                       | 1698 | 1542 | 1414 | 211      | 1114                       | 1552 | 1778 | 973  |
| 281     | o. <sup>1</sup>            | o.    | 19869 | 4015 | 284     | 3703                       | 8241 | 1559 | 1784 | 227      | 5166                       | 1491 | 2320 | 1238 |
|         |                            |       |       |      |         |                            |      |      |      | 235      | 7079                       | 1515 | 2428 | 1240 |
|         |                            |       |       |      |         |                            |      |      |      | 250      | 9829                       | 1688 | 2661 | 1269 |
|         |                            |       |       |      |         |                            |      |      |      | 259      | 14285                      | 1461 | 4696 | 1307 |
|         |                            |       |       |      |         |                            |      |      |      | 270      | 33981                      | 2022 | 5906 | 1336 |

Prilog B

| NAC-3                      |      |      |      |       |       |      | RAC50-3                    |      |      |      |      |       |      | RAC100-3                   |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|-------|-------|------|----------------------------|------|------|------|------|-------|------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| merno mesto/dilatacija [%] |      |      |      |       |       |      | merno mesto/dilatacija [%] |      |      |      |      |       |      | merno mesto/dilatacija [%] |      |      |      |      |      |      |
| 2P [kN]                    | M2   | M3   | M4   | M6    | M7    | M8   | 2P [kN]                    | M2   | M3   | M4   | M6   | M7    | M8   | 2P [kN]                    | M2   | M3   | M4   | M6   | M7   | M8   |
| 0                          | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     | 0    | 0                          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0    | 0                          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 11                         | -22  | -36  | -16  | -18   | -33   | -70  | 10                         | 4    | -8   | -4   | -1   | -11   | -1   | 10                         | 3    | 3    | 2    | -4   | 0    | 17   |
| 19                         | 16   | 26   | 44   | 27    | 6     | 4    | 20                         | 9    | -11  | -7   | -1   | -17   | -2   | 20                         | 5    | 8    | 2    | -8   | 1    | 29   |
| 29                         | 20   | 33   | 75   | 31    | 7     | -1   | 29                         | 13   | -16  | -10  | -2   | -24   | -2   | 30                         | 9    | 13   | 4    | -6   | 3    | 45   |
| 39                         | 27   | 44   | 111  | 39    | 10    | -1   | 39                         | 20   | -23  | -17  | -3   | -31   | -2   | 39                         | 27   | 26   | 15   | -7   | 6    | 64   |
| 48                         | 37   | 59   | 180  | 52    | 18    | 3    | 49                         | 26   | -25  | -17  | -4   | -34   | -3   | 49                         | 49   | 40   | 38   | -1   | 7    | 114  |
| 58                         | 52   | 81   | 252  | 70    | 27    | 15   | 58                         | 33   | -28  | -12  | -4   | -37   | -3   | 59                         | 65   | 48   | 55   | 5    | 7    | 129  |
| 77                         | 59   | 90   | 367  | 75    | 27    | 10   | 79                         | 39   | -34  | 0    | -7   | -41   | -4   | 78                         | 75   | 58   | 67   | 8    | 6    | 139  |
| 98                         | 82   | 116  | 519  | 92    | 34    | 23   | 99                         | 46   | -29  | 21   | -7   | -37   | -4   | 97                         | 59   | 67   | 41   | 12   | 11   | 135  |
| 118                        | 98   | 138  | 649  | 122   | 45    | 24   | 118                        | 1    | 43   | 70   | 15   | 37    | -3   | 118                        | 87   | 92   | 66   | 10   | 12   | 152  |
| 139                        | 130  | 213  | 796  | 205   | 71    | 37   | 138                        | 50   | 1    | 99   | -6   | -30   | -6   | 138                        | 64   | 104  | 49   | 18   | 19   | 143  |
| 156                        | 145  | 254  | 935  | 336   | 138   | 38   | 157                        | 78   | 44   | 150  | 197  | 35    | 3    | 157                        | 100  | 121  | 135  | 39   | 35   | 165  |
| 175                        | 183  | 408  | 1100 | 1109  | 702   | 57   | 176                        | 159  | 190  | 277  | 550  | 321   | 19   | 175                        | 71   | 131  | 256  | 229  | 144  | 148  |
| 197                        | 301  | 618  | 1276 | 1773  | 1111  | 91   | 195                        | 311  | 550  | 502  | 1091 | 1133  | 153  | 195                        | 131  | 326  | 529  | 569  | 368  | 172  |
| 217                        | 473  | 775  | 1440 | 2317  | 1487  | 251  | 215                        | 636  | 815  | 842  | 1232 | 1513  | 266  | 214                        | 254  | 862  | 824  | 1128 | 817  | 307  |
| 236                        | 649  | 956  | 1541 | 7304  | 1886  | 618  | 235                        | 1043 | 1191 | 1088 | 1572 | 5576  | 622  | 234                        | 364  | 1100 | 1235 | 2234 | 1308 | 486  |
| 255                        | 908  | 1108 | 1779 | 17776 | 2642  | 1013 | 253                        | 1262 | 1269 | 1151 | 1682 | 10140 | 809  | 250                        | 811  | 1179 | 1377 | 2502 | 1859 | 672  |
| 274                        | 1040 | 1193 | 1999 | 25749 | 10174 | 1538 | 270                        | 1628 | 1368 | 1257 | 1573 | 13046 | 1002 | 267                        | 1452 | 1293 | 1661 | 2435 | 4059 | 1165 |
| 280                        | 1041 | 1197 | 2030 | 25831 | 10333 | 1539 | 273                        | 1686 | 1372 | 1273 | 1583 | 13261 | 1034 | 274                        | 1661 | 1326 | 1681 | 2655 | 4180 | 1246 |
| 320                        | 1365 | 1680 | o.   | o.    | o.    | 2758 | 314                        | 3285 | 1947 | 1542 | 1713 | 15848 | 1310 | 327                        | 9624 | 3855 | 3383 | 3674 | o.   | 1507 |

<sup>1</sup> o. – otkaz merne trake



## **BIOGRAFIJA AUTORA**

Mr Ivan Ignjatović, dipl.inž.građ. rođen je 27.07.1979. godine u Požarevcu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 1998. godine, gde je diplomirao 16.03.2004. godine na Odseku za konstrukcije, sa prosečnom ocenom 8,81 i ocenom 10 na diplomskom radu. Dobitnik je nagrade “Prof. dr. Vladimir Korolija” kao najbolji student Odseka za konstrukcije na Građevinskom fakultetu. Odmah po završetku redovnih studija upisao se na poslediplomske studije na Građevinskom fakultetu u Beogradu, smer Betonske konstrukcije. Magistarsku tezu odbranio je 5.10.2009. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Od septembra 2004. godine izabran je u zvanje asistenta pripravnika na grupi predmeta Betonske konstrukcije, na Katedri za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. U zvanje asistenta na istoj grupi predmeta izabran je 14.05.2010. Za izvođenje vežbi u poslednjih pet školskih godina na grupi predmeta iz uže naučne oblasti Betonske konstrukcije ocenjen je od strane studenata ocenama preko 4.30. Kao konsultant, učestvovao je u izradi velikog broja završnih radova studenata iz oblasti projektovanja i građenja armiranobetonskih zgrada i mostova – 24 diplomska rada, 27 sintezna projekta i 1 master rad.

Autor je i koautor radova koji su objavljeni u vrhunskim međunarodnim časopisima, časopisima od nacionalnog značaja, koautor je i poglavlja u monografiji međunarodnog značaja. Izlagao je radove na više domaćih i međunarodnih naučnih i stručnih skupova i bio angažovan u okviru dva projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj. Član je domaćih i međunarodnih stručnih organizacija.

Kao deo stručnog rada, učestvovao je u izradi glavnih projekata, idejnih projekata i projekata rekonstrukcije za objekte kao što su pozorišta, tržni centari, hoteli, drumski mostovi, od kojih je većina izvedena u našoj zemlji i inostranstvu.

Kandidat aktivno govori engleski jezik i služi se ruskim jezikom. Koristi kompjuterske programe od opšteg i stručnog značaja.

Ivan Ignjatović je oženjen i otac dvoje dece.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а \_\_\_\_\_ мр ИВАН ИГЊАТОВИЋ \_\_\_\_\_

број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ГРАНИЧНА НОСИВОСТ АРМИРАНОБЕТОНСКИХ ГРЕДНИХ НОСАЧА ОД

БЕТОНА СА РЕЦИКЛИРАНИМ АГРЕГАТОМ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, \_\_\_\_\_ 1.07.2013. \_\_\_\_\_



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора

мр ИВАН ИГЊАТОВИЋ

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада

ГРАНИЧНА НОСИВОСТ АРМИРАНОБЕТОНСКИХ  
ГРЕДНИХ НОСАЧА ОД БЕТОНА СА РЕЦИКЛИРАНИМ  
АГРЕГАТОМ

Ментор

Проф. др Снежана Маринковић

Потписани/а \_\_\_\_\_

мр ИВАН ИГЊАТОВИЋ \_\_\_\_\_

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, \_\_\_\_\_ 1.07.2013. \_\_\_\_\_



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ГРАНИЧНА НОСИВОСТ АРМИРАНОБЕТОНСКИХ ГРЕДНИХ НОСАЧА ОД  
БЕТОНА СА РЕЦИКЛИРАНИМ АГРЕГАТОМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 1.07.2013.



1. Ауторство - Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.