



UDRUGA  
HRVATSKIH  
GRAĐEVINSKIH  
FAKULTETA



FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE



DOI:

## Utjecaj recikliranog agregata od gume na materijalnu nelinearnost betona

Kristina Strukar<sup>1</sup>, Tanja Kalman Šipoš<sup>2</sup>

(1) Građevinski fakultet Osijek, Zavod za tehnički mehaniku, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, Hrvatska, [kstrukar@gfos.hr](mailto:kstrukar@gfos.hr)

(2) Građevinski fakultet Osijek, Zavod za tehnički mehaniku, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek, Hrvatska, [tkalman@gfos.hr](mailto:tkalman@gfos.hr)

### Sažetak

Zbog sve većeg zagađenja okoliša uzrokovanog između ostalog i automobilskim gumama, rješenje se pokušava pronaći njihovim recikliranjem i upotrebom u građevinarstvu. U ovom radu će biti prikazan kratak pregled prethodnih istraživanja pomoću kojih su dobivene detaljne informacije o prednostima i nedostacima dodavanja gume kao agregata na svojstva betonske mješavine. Neke od prednosti uključuju i poboljšanje duktilnosti zbog čega postoji mogućnost korištenja ovakvog betona u konstrukcijama na mjestima gdje postoji povećani rizik od seizmičkog opterećenja. Zbog nedovoljno informacija o ponašanju betona s gumom pod tlačnim opterećenjem, odnosno odnosa naprezanje-deformacija, provedena su preliminarna ispitivanja valjkastih uzoraka, a dobiveni rezultati i zaključci će se prikazati u radu.

*Ključne riječi: zagađenje, reciklaža, guma, beton, naprezanje-deformacija*

### Abstract

Due to the increasingly environmental problems caused, among other pollutants, by tire-rubber, solution could be found by its recycling and use in constructions. Brief review of previous investigations on advantages and disadvantages of concrete's properties are presented in paper. Some of advantages include improvement in ductility of concrete and thus the usage possibility of rubberized concrete in constructions that are built in areas of increased seismic hazards. Due to the lack of informations about stress-strain behavior of rubberized concrete, preliminary experiments were carried out on cylindrical specimens. Obtained results and conclusions are also presented in this paper.

*Keywords: pollution, recycling, tire-rubber, rubberized concrete, stress-strain*

## 1. Uvod

Zahtjevi za primjenom recikliranih materijala u proizvodnji betona, kao jednog od najčešće korištenih materijala u građevinarstvu, postaju sve češći. Suprotno, sve veći problem predstavlja odlaganje automobilskih guma. Prema izvješću ETRMA-e [1] čak 3,5 milijuna tona ovog otpada nastaje u zemljama članicama Europske Unije. Trenutno je samo 5% recikliranih otpadnih guma iskorišteno u građevinarstvu iako je njihov potencijal za ponovnu upotrebu i stvaranje novih materijala i proizvoda puno veći [2].

Jedno od rješenja bila je upotreba reciklirane gume u proizvodnji betona kao djelomična zamjena agregatu u vidu gumenog praha (> 1 mm), gumenog granulata (1-10 mm) ili gumenih niti (20-30 mm). Pregledom literature ovog područja istraživanja uočene su prednosti u pogledu poboljšanja mehaničkih i dinamičkih svojstava kao što su poboljšanje tvrdoće, duktilnosti, dinamičkih svojstava uključujući i koeficijent prigušenje te otpornosti na stvaranje pukotina u betonu [3-7]. S druge strane, nedostaci su se očitovali u smanjenju smanjenu tlačne čvrstoće i modula elastičnosti [8-11]. Prema prethodno navedenom, može se zaključiti da se ovakav beton sa gumom može koristiti za proizvodnju lakoagregatnog betona koji bi bio pogodan za ugradnju u konstrukcije na područjima povećane opasnosti od potresa, a za koje je vrlo bitno svojstvo duktilnosti, odnosno sposobnosti konstrukcije da podnese deformacije i u postelastičnom području bez značajne redukcije u čvrstoći [12-15].

## 2. Pregled područja

Podatak o ponašanju i duktilnosti betona dobiva se iz  $\sigma - \varepsilon$  krivulja koje predstavljaju odnos naprezanja i deformacije i važne su za nelinearnu analizu betonskih elemenata. Pregledom literature uočen je velik broj ispitivanja mehaničkih svojstava, ali i nedostatak informacija o ispitivanju ponašanja betona sa gumom pod tlačnim opterećenjem, odnosno  $\sigma - \varepsilon$  krivulja. Bompa i ostali [3] ispitivali su valjkaste uzorke betona ( $\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ) sa 20% - 60% gume pomoću kontrole pomaka 0,1 mm/min. Slično ispitivanje proveli su Li i ostali [5] na uzorcima betona sa 6% - 18% gume. Kontrola pomaka iznosila je 0,001 mm/s, a deformacije uzoraka zabilježene su pomoću dodatnih deformetara koji su mjerili pomake gornje ploče. Khaloo i ostali [4] ispitivali su kako zamjena određenog volumena pijeska i šljunka sa gumenim prahom i gumenim granulatom utječe na ponašanje betona. Opterećenje je nanošeno brzinom 0,005 mm/s. Iz dobivenih krivulja zaključeno je da vršno naprezanje ovisi o udjelu pijeska u mješavini dok je oblik krivulje određen udjelom šljunka. Lijuan i ostali [16] ispitivali su utjecaj veličine i količine čestica gume na ponašanje betona. Opterećenje je nanošeno brzinom 0,003 mm/s. Iz dobivenih rezultata zaključili su da je maksimalna deformacija betona sa gumom veća, što je veći udio gume i što su čestice gume manje. Xie i ostali [17] zamijenili su 4% - 16% volumena pijeska sa gumenim granulatom i dodali čelična vlakna u betonsku mješavinu. Osim toga zamijenili su u potpunosti šljunak sa recikliranim krupnim agregatom. Uzorke su ispitivali brzinom 0,003 mm/s, a rezultati su pokazali veće deformacije pri vršnom naprezanju i ravniji padajući dio krivulje.

U ovom radu prikazat će se postupak i rezultati ispitivanja betona sa 10%, 20%, 30% i 40% volumena gume u betonskoj mješavini, trend opadanja čvrstoće sa povećanjem udjela gume,

$\sigma - \varepsilon$  krivulje za svaku od mješavina te će se na temelju ispitanih uzoraka vizualno procijeniti utjecaj količine gume na veličinu i broj pukotina.

### 3. Eksperimentalno ispitivanje

#### 3.1. Sastav betonske mješavine

Osnovni materijal korišteni pri izradi betonskih mješavina bio je Portland cement čvrstoće 32,5 MPa. Od prirodnih agregata (PA) korišten je pijesak veličine zrna 0-2 mm i 2-4 mm, šljunak veličine zrna 4-8 mm i 8-16 mm. Gumeni granulat (GG) dobiven mehaničkim usitnjavanjem otpadnih guma granulacije 0,5-2 mm korišten je kao reciklirani agregat. Kako bi se postigla optimalna konzistencija mješavine korišten je dodatak Glenium ACE 430 (GL ACE 430). U Tablici 1 prikazani su podatci o udjelu pojedinog materijala u betonskoj mješavini.

Oznake betonskih mješavine dane su sa RNC-X ili NC-X pri čemu se RNC i NC odnose na referentni normalni beton i normalni beton, a X označava udio gumenog granulata u mješavini kojim je 10%, 20%, 30% i 40% volumena pijeska frakcije 0-2 mm i 2-4 mm zamijenjeno gumenim granulatom.

**Tablica 1.** Sastav betonske mješavine

Oznaka mješavine	w/c	Cement 32,5 N	Voda	GL ACE 430	GG 0,5-2 mm	PA 0-2 mm	PA 2-4 mm	PA 4-8 mm	PA 8-16 mm
RNC-0	0,45	500	198,1	2,6	0	281	484,6	252	551,4
NC-10	0,45	500	225	2,6	58,4	208,6	403,8	252	551,4
NC-20	0,45	500	225	2,6	116,8	134	323	252	551,4
NC-30	0,45	500	225	2,6	175,2	59,6	242,4	252	551,4
NC-40	0,45	500	225	2,6	233,8	0	145,4	252	551,4

#### 3.2. Rezultati ispitivanja svježeg betona

Rezultati ispitivanja svojstava normalnog betona u svježem stanju dani su u Tablici 2. Može se uočiti da se povećanjem postotka GG masa betonske mješavine u odnosu na referentnu smanjuje do 17% pri čemu se poroznost povećava za čak 264%.

**Tablica 2.** Rezultati ispitivanja svojstava normalnog betona u svježem stanju

Oznaka mješavine	Masa betonske mješavine [kg]	Smanjenje u odnosu na referentnu	Poroznost [%]	Povećanje u odnosu na referentnu
RNC-0	18,845	-	1,4	-
NC-10	18,059	-4,17%	1,8	+28,57%
NC-20	17,288	-8,26%	2,5	+78,57%
NC-30	16,474	-12,58%	3,0	+114,28%
NC-40	15,643	-16,99%	5,1	+264,28%

### 3.3. Priprema uzoraka i postavke ispitivanja

U svrhu ispitivanja tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i odnosa naprezanje-deformacija, ukupno je pripremljeno 15 betonskih kocki, po tri za svaku mješavinu iz Tablice 1., dimenzija 150 mm × 150 mm × 150 mm i 30 valjaka, po šest za svaku mješavinu, promjera 150 mm i visine 300 mm. Ispitivanje tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i odnosa naprezanje-deformacija provedeno je nakon 28 dana na tlačnoj preši. Tlačna čvrstoća ispitivana je na betonskim kockama prema normi HRN EN 12390-3:2001, a modul elastičnosti na betonskim valjcima prema normi HRN EN 12390-13:2013.

Krivulja koja prikazuje odnos naprezanje-deformacija ( $\sigma - \varepsilon$  krivulja), dobivena je ispitivanjem betonskih valjaka na koje se opterećenje nanosilo kontroliranim naprezanjem 0,01 MPa/s. Podatci o deformacijama uzoraka dobiveni su pomoću dva dodatna deformetra koji su postavljeni s dvije strane uzorka kako je prikazano na Slici 1. a) i koji mjere pomake gornje ploče preko koje se nanosi opterećenje, a koji su jednaki deformacijama uzorka od trenutka kad je dotaknuta gornja ploha uzorka.

## 4. Rezultati ispitivanja očvrstlog betona i analiza

### 4.1. Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti

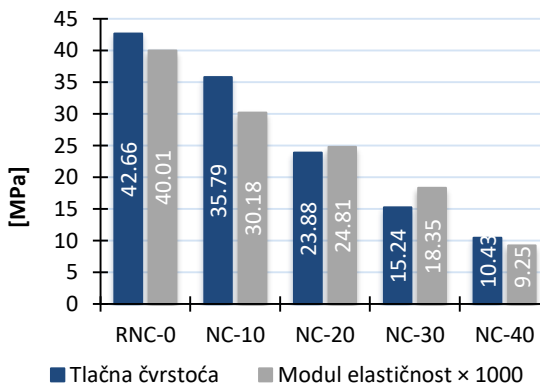
Rezultati dobiveni ispitivanjem tlačne čvrstoće i modula elastičnosti prikazani su na Slici 1. b) na kojoj je vidljivo da se tlačna čvrstoća pri lomu reducira sa povećanjem udjela GG u mješavini. Tlačna čvrstoća betonskih mješavina sa 10%, 20%, 30% i 40% udjela GG umanjena je za 22%, 52%, 62% i 87% u odnosu na referentnu mješavinu RNC-0.

Rezultati ispitivanja modula elastičnosti pokazali su da isto tako dolazi do njegove redukcije pa je tako za 10%, 20%, 30% i 40% modul elastičnosti umanjena za 4%, 27%, 67% i 90% u usporedbi sa modulom elastičnosti referentne mješavine RNC-0. Iz ovih rezultata može se zaključiti da povećanjem količine gumenih čestica u betonskog mješavini dolazi do veće redukcije ovih svojstava.

a)



b)



**Slika 1.** a) Postavke ispitivanja odnosa naprezanja i deformacije; b) Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i modula elastičnosti na betonskim kockama.

## 4.2. Odnos naprezanja i deformacije

Odnos tlačnog naprezanja  $\sigma$  i deformacije  $\varepsilon$  ispitanih uzoraka prikazan je krivuljama na Slici 3. a) od kojih svaka predstavlja ponašanje reprezentativnog uzorka od tri ispitana za svaku mješavinu.  $\sigma - \varepsilon$  krivulje mogu se podijeliti na dio prije maksimalnog naprezanja i na dio nakon doseganja maksimalnog naprezanja. Prvi dio krivulje je uglavnom linearan, dok se u blizini vršnog naprezanja zakrivljuje. Razlika između referentne mješavine i drugih mješavina s GG je u nagibu pravca linearnog dijela krivulje koji je manji za betonsku mješavinu s GG.

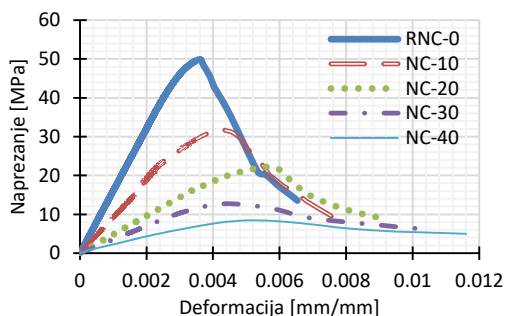
Na drugom dijelu krivulje razlike između ovih mješavine još su očitije jer je vidljivo da mješavine s GG podnose veće deformacije nakon dostizanja vršnog naprezanja u odnosu na referentnu što znači da im je unatoč smanjenju čvrstoće, povećana duktilnost. Može se primjetiti postepeno opadanje vršnog naprezanja i rast deformacija sa svakim povećanjem udjela GG.

Načini sloma ispitanih uzoraka na Slici 2. b) utvrđeni su vizualnim ocjenjivanjem nakon provedenog ispitivanja. Vidljivo je da je referentni uzorak pod brojem 1 imao najkratiji lom, obilježen dugim i širokim manjim brojem pukotina popraćenih odlamanjem manjih dijelova uzorka. Već sa 10% dodanih gumenih čestica primjetna je razlika u širini, duljini i broju pukotina. Sa sve većim udjelom gume u betonskoj mješavini, slom uzoraka je duktilniji, predvidljiviji, pukotine su brojnije, ali manje i uže te nema odlomljenih dijelova.

**Tablica 3.** Rezultati ispitivanja naprezanja i deformacije na betonskim valjcima

n	Oznaka mješavine	Maksimalno naprezanje	Deformacija pri maksimalnom naprezanju	Najveća deformacija
		[MPa]	[mm/mm]	[mm/mm]
1	RNC-0	49,90	0,0036	0,0065
2	NC-10	31,78	0,0043	0,0080
3	NC-20	22,29	0,0057	0,0090
4	NC-30	12,74	0,0044	0,0103
5	NC-40	8,43	0,0052	0,0116

a)



b)



**Slika 2.** a)  $\sigma - \varepsilon$  krivulje za normalan beton bez gume (RNC-0-500) i normalan beton sa 10%, 20%, 30% i 40% GG; b) Ispitani betonski valjci

## 5. Zaključak

Glavni cilj ispitivanja prikazanog u ovom radu bio je vidjeti utjecaj količine gumenog granulata kojim je zamijenjen određen postotak pijeska u betonskoj mješavini na tlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i na odnos naprezanja i deformacije. Ispitivanjem uzoraka pripremljenih od betona sa 0% - 40% gumenog granulata pod tlačnim opterećenjem rezultati su pokazali da se povećanjem postotka gumenog praha, smanjuje njegova masa, tlačna čvrstoća i modul elastičnosti, a povećava poroznost. Dobivene  $\sigma - \varepsilon$  krivulje ukazale su na nelinearno ponašanje u usporedbi sa referentnim normalnim betonom, bolju deformacijsku sposobnost i time na veću duktilnost i bolju apsorpciju energije, a isti zaključak dobiven je iz vidljivog načina sloma uzoraka sa većim brojem manjih pukotina i bez odlomljenih dijelova uzoraka.

Betonske mješavine prikazane u ovom radu nisu saržavale dodatke kojima bi se utjecalo na mehanička svojstva. Stoga će se u daljnjim istraživanjima dodacima poput silicijske prašine i letećeg pepela te optimalne granulacije gumenog agregata nastojati postići betonske mješavine koje će za iste postotke gumenog agregata u ovom istraživanju postizati veće tlačne čvrstoće i module elastičnosti kako bi bila moguća njihova primjena u konstrukcijama, osobito u onima na područjima povećane opasnosti od potresa.

## Zahvala

Autori zahvaljuju na potpori istraživanju koje je financirala Hrvatska zaklada za znanost kroz uspostavni istraživački projekt: Razvoj armiranobetonskih elemenata i sustava s otpadnim prahom automobilskih guma, UIP-05-2017-7113.

- [1] ETRMA, "End-of-life Tyre Report 2015," p. 36, 2015.
- [2] Council of the European Union, "Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the land fill of waste," 1999.
- [3] D. V. Bompá, A. Y. Elghazouli, B. Xu, P. J. Stafford, and A. M. Ruiz-Teran, "Experimental assessment and constitutive modelling of rubberised concrete materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 246–260, 2017; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.086
- [4] A. R. Khaloo, M. Dehestani, and P. Rahmatabadi, "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 12, pp. 2472–2482, 2008, DOI: 10.1016/j.wasman.2008.01.015
- [5] D. Li, Y. Zhuge, R. Gravina, and J. E. Mills, "Compressive stress strain behavior of crumb rubber concrete (CRC) and application in reinforced CRC slab," *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 745–759, 2018, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.142
- [6] L. Zheng, X. Sharon Huo, and Y. Yuan, "Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 939–947, 2008, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.005
- [7] F. Hernández-Olivares, G. Barluenga, M. Bollati, and B. Witoszek, "Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 10, pp. 1587–1596, 2002, DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00833-5
- [8] T. Gupta, S. Chaudhary, and R. K. Sharma, "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 562–574, 2014, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102

- [9] N. Ganesan, B. Raj, A. P. Shashikala, and N. S. Nair, "Effect of steel fibres on the strength and behaviour of Self Compacting Rubberised Concrete," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 94–107, 2012.
- [10] M. K. Ismail, M. T. De Grazia, and A. A. A. Hassan, "Mechanical Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete with Different Supplementary Cementing Materials," *Int. Conf. Transp. Civ. Eng.*, pp. 68–74, 2015, DOI: 10.17758/UR.U0315331
- [11] B. H. AbdelAleem and A. A. A. Hassan, "Development of self-consolidating rubberized concrete incorporating silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 389–397, 2018, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.146
- [12] M. K. Ismail and A. A. A. Hassan, "Performance of full-scale self-consolidating rubberized concrete beams in flexure," *ACI Mater. J.*, vol. 113, no. 2, pp. 207–218, 2016, DOI: 10.14359/51688640
- [13] M. K. Ismail, A. A. A. Hassan, and B. H. Abdelaleem, "Flexural behaviour of reinforced SCC beams containing recycled crumb rubber," in *RESILIENT INFRASTRUCTURE*, 2016, p. 11.
- [14] K. S. Son, I. Hajirasouliha, and K. Pilakoutas, "Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 218–226, 2011, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.035
- [15] A. Moustafa, A. Ghenni, and M. A. ElGawady, "Shaking-Table Testing of High Energy–Dissipating Rubberized Concrete Columns," *J. Bridg. Eng.*, vol. 22, no. 8, p. 4017042, 2017, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001077
- [16] L. Li, S. Ruan, and L. Zeng, "Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 291–308, 2014, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105
- [17] J. H. Xie, Y. C. Guo, L. S. Liu, and Z. H. Xie, "Compressive and flexural behaviours of a new steel-fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 263–272, 2015, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.036