

Primljen / Received: 20.6.2013.

Ispravljen / Corrected: 30.10.2013.

Prihvaćen / Accepted: 14.12.2013.

Dostupno online / Available online: 10.2.2014.

Otpornost na hidroabraziju i mehanička svojstva betona s dodatkom gume

Autori:



Prof. dr. sc. **Zoran Grdić**
Sveučilište u Nišu
Fakultet građevinarstva i arh.
zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs



Doc. dr. sc. **Gordana Topličić-Ćurčić**
Sveučilište u Nišu
Fakultet građevinarstva i arh.
gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs



Mr. sc. **Nenad Ristić**
Sveučilište u Nišu
Fakultet građevinarstva i arh.
nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs



Mr. sc. **Dušan Grdić**
Sveučilište u Nišu
Fakultet građevinarstva i arh.
dusan.grdic@hotmail.rs



Prof. dr. sc. **Petar Mitković**
Sveučilište u Nišu
Fakultet građevinarstva i arh.
petar.mitkovic@gaf.ni.ac.rs

Prethodno priopćenje

[Zoran Grdić, Gordana Topličić-Ćurčić, Nenad Ristić, Dušan Grdić, Petar Mitković](#)

Otpornost na hidroabraziju i mehanička svojstva betona s dodatkom gume

U radu su prikazani rezultati ispitivanja hidroabrazivne otpornosti i mehaničkih svojstava betona s dodatkom gumenih granula. Sitni riječni agregat zamijenjen je s 10, 20 i 30 posto reciklirane granulirane gume (u odnosu na ukupan volumen). Rezultati ispitivanja pokazuju da zamjenom sitnog riječnog agregata granuliranom gumom dolazi do povećanja hidroabrazivne otpornosti betona do 10 posto. Zamjena sitnog riječnog agregata gumenim materijalom dovodi do povećanja sposobnost raspodjele energije i duktilnosti.

Ključne riječi:

hidroabrazivna otpornost, beton, reciklirana guma, ubrzano ispitivanje, mehanička svojstva

Preliminary note

[Zoran Grdić, Gordana Topličić-Ćurčić, Nenad Ristić, Dušan Grdić, Petar Mitković](#)

Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete

Results obtained by testing hydro-abrasive resistance and mechanical properties of concrete with rubber granules are presented in the paper. Fine river aggregate is replaced with 10, 20, and 30 percent of recycled granulated rubber (with respect to the total volume). Research results demonstrate that replacement of fine river aggregate by granulated rubber increases hydro-abrasive resistance of concrete by up to 10 percent. The replacement of fine river aggregate by rubber increases the energy dissipation capacity and ductility.

Key words:

hydro-abrasive resistance, concrete, recycled rubber, accelerated test, mechanical properties

Vorherige Mitteilung

[Zoran Grdić, Gordana Topličić-Ćurčić, Nenad Ristić, Dušan Grdić, Petar Mitković](#)

Hydro-Abriebfestigkeit und mechanischen Eigenschaften von Beton mit Gummigranulat

In der vorliegenden Arbeit sind Resultate von Messungen der Hydro-Abriebfestigkeit und der mechanischen Eigenschaften von Beton mit Gummigranulat dargestellt. Feines Betonaggregat ist durch rezykliertes Gummigranulat in einen Anteil von 10%, 20% und 30% des Gesamtvolumens ersetzt worden. Die Resultate zeigen, dass durch den Austausch von Betonaggregat mit Gummigranulat die Hydro-Abriebfestigkeit des Betons bis zu 10% ansteigt. Außerdem steigen durch das Ersetzen des Betonaggregats mit Gummigranulat sowohl die Energiedissipationskapazität als auch die Duktilität an.

Schlüsselwörter:

Hydro-Abriebfestigkeit, Beton, rezykliertes Gummi, beschleunigte Prüfung, mechanische Eigenschaften

1. Uvod

U današnje se vrijeme uspješno koriste velike količine otpadnih materijala ili industrijskih nusproizvoda kao rezultat napretka koji se danas bilježi u tehnologiji izrade betona. Takvi se materijali mogu koristiti kao mineralni dodaci ili kao punila-agregati, za djelomičnu ili potpunu zamjenu prirodnog kamenog agregata [1-3]. Otpadne automobilske gume postale su ekološki problem svjetskih razmjera. U okviru reciklažnih postupaka proizvode se granule i niti različitih dimenzija te se ulažu napor da se pronađu mogućnosti za korištenje takve gume kao materijala za djelomičnu zamjenu kamenog agregata u betonu. Primjena reciklirane gume betonu kao otpadnog materijala doprinosi u očuvanju prirodnih resursa, ali i poboljšanju fizikalno-mehaničkih svojstava betona. Brojna su ispitivanja betona obavljena s ciljem definiranjem utjecaja zamjene kamenog agregata recikliranom gumom u različitim udjelima.

U svom istraživanju [4], Issa i Salem koristili su recikliranu gumu kao zamjenu za drobljeni agregat (pijesak) u slijedećim udjelima: 15, 25, 50 i 100 posto. Analizom rezultata dobivenih tijekom ispitivanja fizikalno-mehaničkih karakteristika betona, oni su ustanovili da se beton u kojem je 25 % sitnog agregata zamijenjeno gumom može koristiti u proizvodnji nosivih elemenata konstrukcije. U radu [5], Sukontasukkul i Tiamiom zamijenili su agregat s 10, 20 i 30 posto gume. Oni su zaključili da skupljanje betona raste usporedo s porastom udjela gume u betonu. U svom istraživanju, Al-Tayeb i dr. [6] i Ozbay i dr. [7] zamijenili su sitnozrnati agregat s 5, 10 i 20 posto, te s 5, 15 i 20 posto gume. Ispitivanjem je ustanovljeno da se čvrstoća i statički modul elastičnosti betona smanjuju usporedo s povećanjem količine gume. Također je ustanovljeno da se otpornost betona na udar i sposobnost raspodjele energije povećava s povećanjem udjela gume. U svom radu [8], Gesoglu i Guneyisi zamijenili su agregat s 5, 15 i 25 posto gume, te su zaključili da zbog povećanja udjela gume dolazi i do većeg prodiranja iona klorida u beton. U radu [9], Lakušić, Bjegović i dr. koriste recikliranu gumu za poboljšavanje mehaničkih svojstava i trajnosti inovativnog i ekološki prihvatljivog materijala za proizvodnju suvremenih željezničkih kolosijeka na čvrstoj betonskoj podlozi. Oni su zamijenili pet posto kamenog agregata recikliranom granuliranom gumom te tako utjecali na smanjenje modula elastičnosti, vodopropusnosti, kapilarnog upijanja te prodora klorida u beton. Isto tako, Bjegović i dr. zaključuju u radu [10] da reciklirana guma dovodi do povećanja duktilnosti betona, te do povećanja otpornosti betona na habanje i udar. U svom radu [11] Serdar i dr. između ostalih materijala koriste i gumene granule u svrhu izrade zidova za zaštitu od buke. Uz dobra svojstva apsorpcije buke (kategorija apsorpcije: A3) takvi zidovi pokazuju i dobru otpornost na smrzavanje i požar. Općenito uzevši, beton pripremljen s granuliranom gumom pokazuje bolju otpornost na dinamičko opterećenje [12], udar [6], pojavu pukotina i buku [13], ima nisku toplinsku provodljivost uz veću sposobnost

deformacije uslijed bubrenja ili skupljanja zbog duktilnosti gume. Kako dodavanje granulirane gume betonu dovodi do smanjenja čvrstoće betona, izbor količine primijenjene gume znatno utječe na ponašanje betona u uvjetima uporabe.

Abrazivno trošenje betona na hidrotehničkim građevinama najčešće je uzrokovano djelovanjem čestica koje se prenose vodom (prah, pijesak, šljunak i ostale krute čestice), te koje na površinu betona djeluju pomoću hidrauličkih procesa. To abrazivno-erozivno oštećivanje betona važno je pitanje za uspješno održavanje hidrotehničkih građevina, pa se zato taj proces treba uzeti u obzir pri projektiranju takvih građevina te pri odabiru betonskih mješavina. Oštećenja su obično reda veličine od nekoliko centimetara, iako mogu biti i mnogo značajnija već nakon samo nekoliko godina abrazivnog djelovanja. Iako slabija abrazivno-erozivna djelovanja ne predstavljaju veći problem, jaka djelovanja mogu ugroziti konstrukcijsku stabilnost betona, pa čak i stabilnost čitave građevine [14]. Betonske hidrotehničke građevine mogu se zaštititi od abrazivnog-erozivnog djelovanja primjenom trajnih betonskih mješavina otpornih na abraziju-eroziju.

U literaturi se daju preporuke za projektiranje betonskih mješavina koje su otporne na hidroabrazivno djelovanje [15]. U tom se smislu predlaže priprema betona niskog vodocementnog omjera korištenjem kemijskih i mineralnih dodataka poput superplastifikatora i silicijske prašine ali i agregata većih čvrstoća. Osim sastava betonske mješavine, na otpornost betona na abrazivno djelovanje također utječu i vanjski uvjeti kojima je beton izložen. Istraživanja koja su proveli razni autori pokazuju da betoni s raznim mineralnim aditivima (silicijska prašina, leteći pepeo, zgura iz visokih peći, drobljeni bazalt) [16-20], s dodatkom čeličnih vlakana [21-24] i polipropilenskih vlakana [25-26], ili s aluminatnim cementom, te betoni visoke čvrstoće i valjani betoni s dodatkom reciklirane granulirane gume [27-28], iskazuju veću otpornost od referentnog betona proizvedenog bez aditiva s običnim portlandskim cementom.

Beton koji se koristi u gradnji hidrotehničkih građevina, a u izravnom je kontaktu s vodom, treba uz dobra mehanička svojstva biti i otporan na hidroabraziju. Mnoga ispitivanja pokazuju da se hidroabrazivna otpornost betona može predvidjeti na temelju mehaničkih karakteristika betona. Siddique i Khatib, Yen i dr., Lui Y.W. i dr. [18, 29-30] dokazuju da postoji uzajamni odnos između abrazivne otpornosti betona te tlačne i savojne čvrstoće. Šušterčić u svom radu [28] pokazuje da beton u kojem je 9,5 posto riječnog agregata zamijenjeno s granuliranom gumom ima bolju hidroabrazivnu čvrstoću od referentnog betona bez gumenih granula. On također upućuje i na čvrsti odnos između hidroabrazivne otpornosti betona s jedne strane, i tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i otpornosti na habanje prema Böhmeu s druge.

Izuzetno je značajan pravilan odabir metode za određivanje otpornosti betona na habanje abrazijom. Erozijska betona koji se koristi na hidrotehničkim građevinama dugotrajan je proces

koji se obično razvija u vremenu od nekoliko mjeseci, iako čak i više godina može proći prije negoli se otkriju oštećenja. Zbog toga se trebaju primijeniti metode za ubrzano otkrivanje abrazivnog djelovanja na beton. Do sada je objavljeno nekoliko studija u kojima se opisuju analize bazirane na ubrzanom ispitivanjima. Većina opreme za određivanje otpornosti betona na abrazivno djelovanje koja se opisuje u stručnoj literaturi temelji se na simulaciji mehanizama pjeskarenja [31-33] te na abraziji suhim trenjem [34-36]. U mnogim radovima [37-39] i metodama ispitivanja prema ASTM normama [40] opisana su istraživanja obavljena pod uvjetima simuliranja prirodnog okruženja primjenom opreme koja omogućuje abraziju betona, a bazira se na modelu miješanja agregata i vode. Momber i Kovačević [41] također primjenjuju ubranu metodu ispitivanja vodenim mlazom za određivanje hidrauličkog habanja betona. Za rješavanje problema koji se obrađuju u ovoj studiji mogla bi se primijeniti metoda abrazivnog djelovanja vodenim mlazom, čime bi se postiglo vrlo brzo habanje betona zbog djelovanja mješavine vode i krutih čestica koje se kreću velikom brzinom. U ovom se radu istražuje utjecaj zamjene sitnog agregata recikliranom granuliranom gumom na fizikalno-mehanička svojstva i hidroabrazivnu otpornost betona.

2. Detaljan opis eksperimenta

2.1. Materijali korišteni za provedbu eksperimenta

Referentni beton proizveden je korištenje običnog Portland cementa CEM I 42.5 R, čija su svojstva iskazana u tablici 1.

Tablica 1. Fizikalno-mehanička svojstva cementa prema SRPS EN 196-1:2008 i SRPS EN 196-3:2010

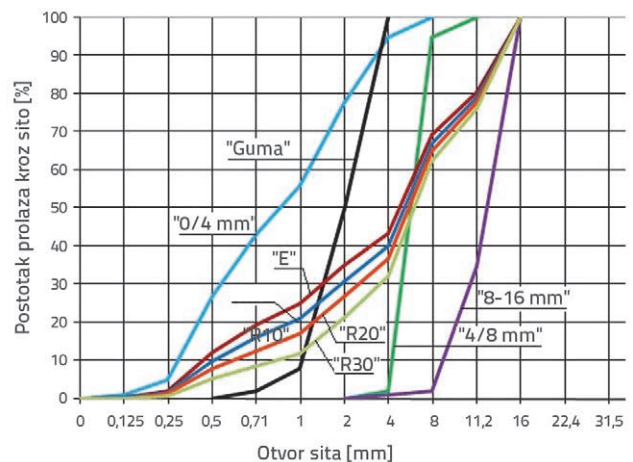
Svojstva cementa	Vrijednost
Vrijeme slijeganja	početak 135 min kraj 160 min
Finoća mljevenja – ostatak na situ 0.09 mm	3,2 %
Gustoća	3000 kg/m ³
Prostorna masa rahlog materijala	925 kg/m ³
Prostorna masa zbijenog materijala	1521 kg/m ³
Čvrstoća na savijanje nakon 2 dana	5,99 N/mm ²
Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana	7,21 N/mm ²
Tlačna čvrstoća nakon 2 dana	33,67 N/mm ²
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana	54,21 N/mm ²

Tablica 2. Sastav betonskih mješavina za 1 m³

Uzorak	Agregat						Guma		Cement	Voda	Superplastifikator
	0/4 mm		4/8 mm		8/16 mm		1/4 mm				
	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]			
E	45	810	25	450	30	540	-	-	400	168	3,20
R10	35	638	25	456	30	547	10	64	405	170	3,65
R20	26	465	25	450	30	540	20	126	400	168	4,00
R30	16	290	25	456	30	547	30	189	405	168	4,40

U izradi betona korišten je agregat dobiven miješanjem triju frakcija (0/4, 4/8 i 8/16 mm) riječnog agregata iz južne Morave. Slika 1. prikazuje granulometrijski sastav spomenutih frakcija i korištenih mješavina agregata.

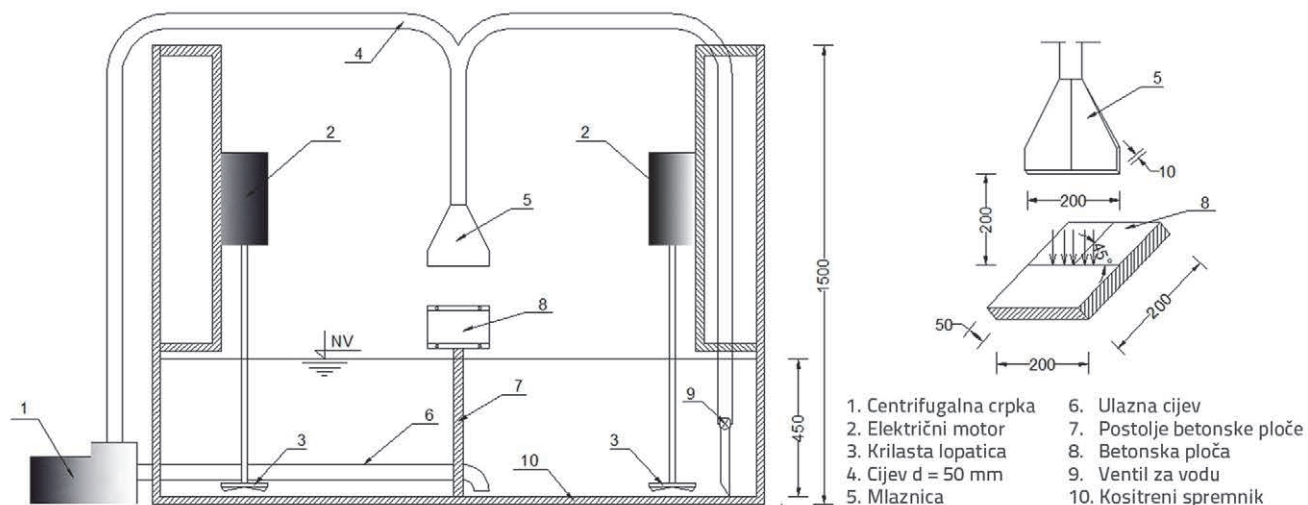
Za recikliranu gumu korištena je frakcija 0,5 – 4 mm. Vrijednosti gustoće i volumnske mase gumenog agregata u rastresitom stanju određene su prema SRPS ISO 6783:1999, a dobivena je vrijednost od 1150 kg/m³ za gustoću i 480 kg/m³ za prostornu masu. Granulometrijski sastav reciklirane granulirane gume prikazan je na slici 1. Korišten je i superplastifikator za poboljšanu obradivost mješavine uz smanjenu potrebu za vodom.



Slika 1. Granulometrijski sastav pojedinačnih frakcija i mješavina agregata

2.2. Sastav betonske mješavine

Četiri su mješavine pripravljene za ispitivanje svojstava svježeg i očvrstlog betona. Referentna mješavina (mješavina oznake E) izrađena je od riječnog agregata, cementa, vode i superplastifikatora. Također su pripravljene i tri mješavine u kojima je riječni agregat djelomično zamijenjen recikliranom gumom. Zamjena agregata obavljena je po volumenu. Mješavina koja nosi oznaku R10 sadržavala je 10 % reciklirane gume, R20 20 % i R30 30 % gumenih granula. Mješavine su imale isti vodocementni faktor $v_c = 0.42$ i sličnu konzistenciju betona (slijeganje: 90 – 110 mm), što je postignuto primjenom superplastifikatora. Sastavi betonskih mješavina prikazani su u tablici 2.



Slika 2. Shematski prikaz opreme za ispitivanje otpornosti betona na abraziju

3. Eksperimentalna analiza

Ispitivanje hidroabrazivne otpornosti betona obavljeno je pomoću originalne opreme izrađene u Laboratoriju za građevinske materijale Fakulteta građevinarstva i arhitekture u Nišu. Shematski dijagram opreme za ispitivanje otpornosti betona na abraziju prikazan je na slici 2. Sličnu su opremu koristili i tajvanski istraživači za ispitivanje otpornosti betona na abrazivno djelovanje [17, 30].

Oprema se sastoji od kositrenog spremnika dimenzija 2,0 x 2,0 m u bazi, visine 1,5 m. Prednja strana sastoji se od prozirnog pleksiglasa čime je omogućeno vizualno opažanje tijekom ispitivanja. Za obavljanje ispitivanja, spremnik se do trećine puni mješavinom vode i pijeska granulacije od 0,6 mm do 1,2 mm, s masenim omjerom 10:1. Za abraziju betona koristi se silicijski pijesak. Četiri električna motora okreću lopaticice pa se tako dobiva homogena mješavina vode i pijeska. Centrifugalnom se crpkom usisava ta mješavina te se zatim izbacuje pod tlakom kroz mlaznicu na betonsku ispitnu ploču dimenzija 200 x 200 x 50 mm. Betonska je ploča postavljena na postolje koje se može rotirati po horizontalnoj osi pa se tako može mijenjati kut mlaza i uzorka koji se ispituje.

Uzorak, tj. betonska ploča najprije se suši do konstantne mase od $105 \pm 5^\circ\text{C}$ te se nakon toga mjeri masa (m_1). Zatim se obavlja zasićenje uzorka vodom metodom postupnog uranjanja te se uzorak izlaže djelovanju mlaza vode i pijeska u vremenu od 120 minuta. Temperatura vode za vrijeme ispitivanja iznosi 30°C . Nakon toga se uzorak još jednom suši do konstantne mase te se mjeri masa abradiranog uzorka (m_2). Pri mjerenju mase dopušteno odstupanje iznosi $\pm 0,1$ g. Mlaz vode i pijeska djeluje na površinu betonske ploče pod kutom od 45° , a koristi se pravokutna mlaznica dimenzija 10 x 200 mm. Brzina mlaza iznosi 20 m/s što odgovara pritisku od 2,4 bara ili 0,24 MPa. Kako je brzina tj. pritisak na mlaznici bio veći u ovom ispitivanju od pritiska kojim su se koristili Lui

dr. [17, 30], ovo je ispitivanje nešto kraće i traje 120 minuta. Razlika u masi Δm je masa materijala oljuštenog pomoću abrazivne smjese pijeska i vode. Brzina abrazivne erozije $E_{R,m}$ u odnosu na masu izračunava se kako slijedi:

$$E_{R,m} = \frac{\Delta m}{t} = \frac{m_1 - m_2}{t} \text{ [g/min]} \quad (1)$$

gdje je:

m_1 i m_2 – masa uzorka osušenog do konstantne mase prije i nakon djelovanja mješavine vode i pijeska.

t – vrijeme u kojem mješavina djeluje na uzorak ($t = 120$ min).

Gustoća betona značajno se smanjuje s povećanjem količine reciklirane gume. Djelotvornije je bilježiti promjenu volumena uzorka usporedbom stanja prije i nakon ispitivanja, jer to omogućuje bolje razumijevanje oštećenja do kojeg dolazi uslijed hidroabrazivnog djelovanja. Promjena volumena uzorka određuje se u skladu sa sljedećom formulom:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\gamma_{\text{hard,conc}}} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (2)$$

gdje je brzina abrazivne erozije po obujmu

$$E_{R,V} = \frac{\Delta V}{t} = \frac{m_1 - m_2}{t \cdot \gamma_{\text{hard,conc}}} \text{ [cm}^3\text{/min]} \quad (3)$$

gdje je

$\gamma_{\text{hard,conc}}$ – gustoća očvrstlog betona osušenog do konstantne mase (g/cm^3) određene prema SRPS EN 12390-7:2010.

Habanje do kojeg dolazi tijekom ispitivanja otpornosti na habanje prema Boehmeu određuje se na sličan način. Za svaku vrstu betona, otpornost na hidroabrazivno djelovanje ispituje se na tri uzorka.

Tablica 3. Ostala ispitivanja svojstava betona u svježem i očvrslom stanju

Vrsta ispitivanja	Naziv norme
Konzistencija svježeg betona	SRPS EN 12350-2:2010: Ispitivanje svježeg betona – Drugi dio: Ispitivanje slijeganja
Gustoća svježeg betona	SRPS EN 12350-6:2010: Ispitivanje svježeg betona – Šesti dio: Gustoća
Tlačna čvrstoća	SRPS ISO 4012:2000: Beton – Određivanje tlačne čvrstoće ispitnih uzoraka
Čvrstoća na savijanje	SRPS ISO 4013:2000: Beton – Određivanje čvrstoće na savijanje ispitnih uzoraka
Određivanje indeksa odskoka sklerometra	SRPS EN 12504-2:2008: Ispitivanje betona u konstrukcijama – Drugi dio: Nerazorno ispitivanje – Određivanje indeksa odskoka sklerometra
Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa	SRPS EN 12504-4:2008: Ispitivanje betona – Četvrti dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa
Određivanje statičkog modula elastičnosti	SRPS ISO 6784:2000: Beton – Određivanje statičkog modula elastičnosti pri tlaku
Mjerenje vlačne čvrstoće pull-off metodom	EN 1542:1999: Proizvod i sustav za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Mjerenje vlačne čvrstoće pull-off metodom

Ostala ispitivanja svojstava betona u svježem i očvrslom stanju provedena su na adekvatnog broju uzoraka odgovarajućeg oblika, a sve prema važećim SRPS i EN normama, tablica 3. Uzorci za navedena ispitivanja izrađeni su za svaku od četiri ispitivane mješavine. Pull-off metodom određena je sila čupanja okrugle pločice s površine betona pri čemu je dubina ureza napravljena pomoću bušilice Ø50 iznosila 5 mm, dok odredbe iz ranije spomenute norme zahtijevaju dubinu ureza od 15±5 mm. Ispitivanja na očvrslom betonu obavljena su pri starosti betona od 28 dana.

4. Rezultati eksperimentalne analize i rasprava

Rezultati ispitivanja svježeg i očvrslom betona prikazani su u tablicama 4., 5. i 6. Ti su rezultati iskazani kao srednje vrijednosti pojedinačnih mjerenja dobivene na bazi odgovarajućeg broja uzoraka u skladu sa zahtjevima iz norme. Nije uočen veliki rasip srednjih vrijednosti. Na primjer, odstupanje pojedinih rezultata tlačne čvrstoće od srednje vrijednosti iznosi ±3 % za uzorke s oznakom "E", ±4 % za uzorke R10, ±5 % za uzorke R20 i ±5 % za uzorke R30. Slični su rezultati dobiveni i za ostala svojstva betona.

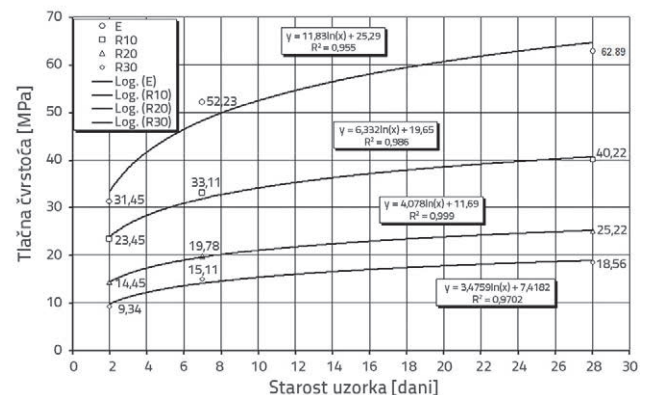
Tablica 4. Karakteristike svježeg betona

Oznaka mješavine	Gustoća [kg/m ³]	Razred slijeganja	Udio zraka [%]
E	2375	S3 (110 mm)	3,1
R10	2285	S3 (100 mm)	3,5
R20	2155	S2 (90 mm)	5,2
R30	2060	S3 (100 mm)	7,2

Tablica 5. Svojstva betona u očvrslom stanju (nakon 28 dana)

Oznaka mješavine	Gustoća [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]	Indeks sklerometra	Brzina ultrazvučnog impulsa [m/s]	Statički modul elastičnosti E _s [GPa]	Vlačna čvrstoća pull-off metodom [MPa]
E	2370	62,89	6,48	48,23	4733	32,0	2,47
R10	2260	40,22	5,18	44,47	4479	26,8	2,11
R20	2145	25,22	4,25	38,31	4073	17,3	1,72
R30	2057	18,56	2,90	34,72	3726	14,6	1,21

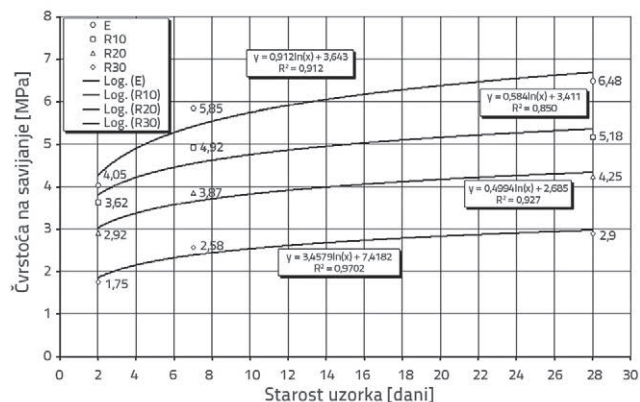
Na temelju rezultata iskazanih u tablicama 4. i 5. može se zaključiti da zamjena riječnog agregata recikliranim gumenim granulatom pri izradi betona uzrokuje znatne promjene u ponašanju betona, kako u svježem tako i u očvrslom stanju. U vezi sa svježim betonom ustanovljeno je da se gustoća smanjuje s povećanjem udjela reciklirane gume, i to u rasponu od 90 do 315 kg/m³, tj. od 4 do 13%. Isto tako, udio uvučenog zraka u betonu povećava se s povećanjem udjela gumenog agregata, pa se dodaje superplastifikator da bi se konzistencija održala u rasponu od 90 do 110 mm.



Slika 3. Ovisnost tlačne čvrstoće i starosti betona

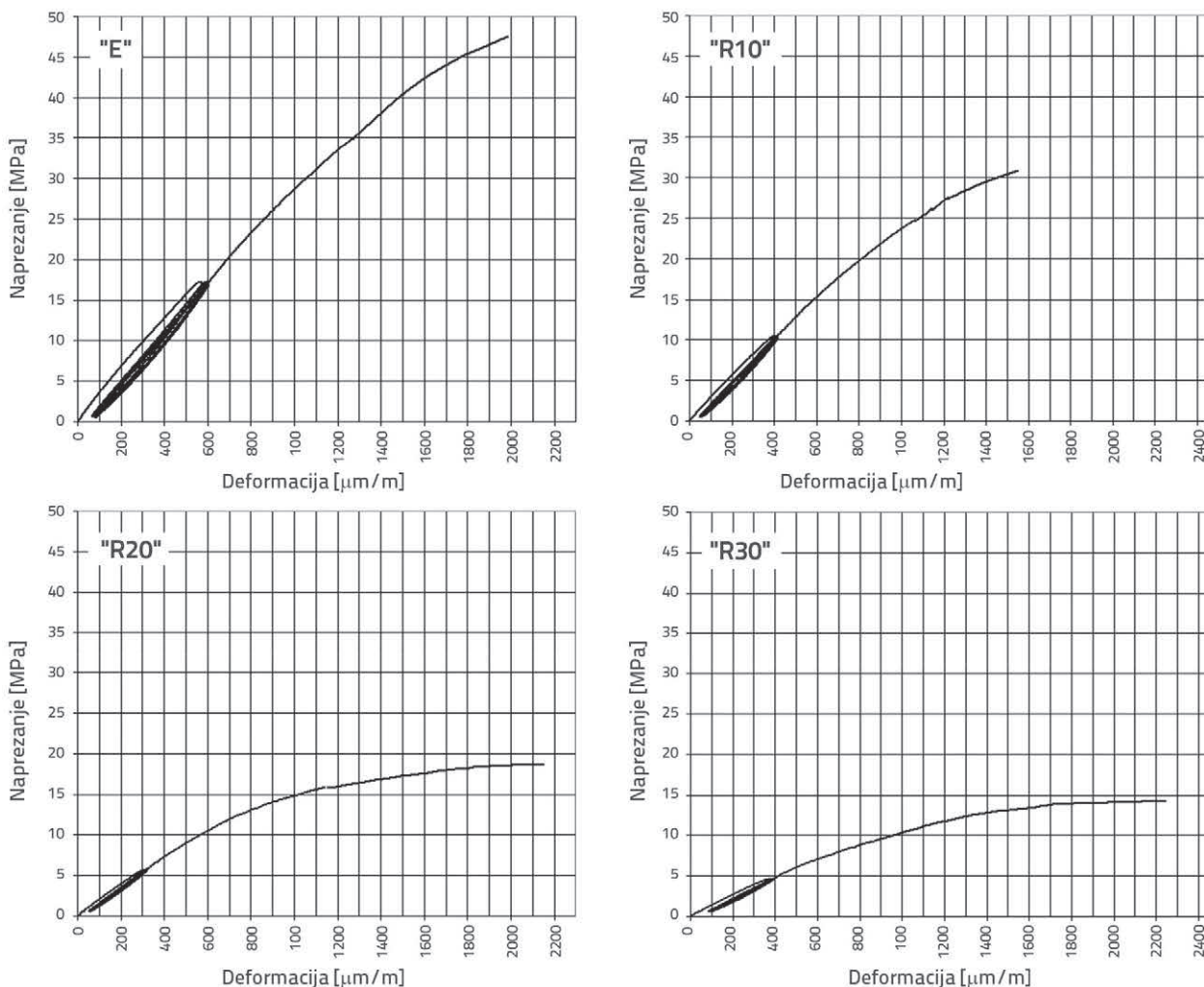
Možemo reći da je potpuno logično smanjenje gustoće očvrslom betona usporedo s povećanjem udjela gumenog granulata, koje je istog reda veličine kao i kod svježeg betona. Vrijednosti tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje bitno se smanjuju usporedo s porastom količine gumenog granulata, neovisno o starosti betonskih uzoraka (slike 3. i 4.). Pri starosti od 28 dana, smanjenje

tlačne čvrstoće kod uzoraka s 10 % posto reciklirane gume iznosi 36 % u usporedbi s referentnim betonom, dok smanjenje tlačne čvrstoće uzoraka s 20 % i 30 % reciklirane gume iznosi 60 % u prvom slučaju i 70 % u drugom. Smanjenje čvrstoće na savijanje ispitano na uzorcima starosti od 28 dana iznosi 20 %, 34 % i 55 % za uzorke s 10 %, 20 % i 30 % reciklirane gume.



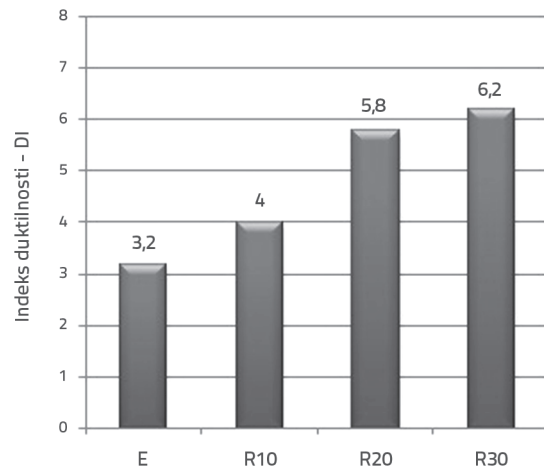
Slika 4. Ovisnost čvrstoće na savijanje i starosti betona

Što se tiče određivanja brzine prolaska ultrazvučnih valova kroz beton, možemo iz dobivenih rezultata zaključiti da se brzina valova u betonu smanjuje usporedo s povećanjem količine recikliranog gumenog agregata u betonu, vidi tablicu 5. Primjerice za betone s 10 % gumenog agregata, smanjenje brzine prolaska valova iznosi 5 % u usporedbi s referentnom mješavinom dok za betone s 20 %, tj. 30 % gumenog agregata smanjenje iznosi 14 odnosno 21 %. To pokazuje da su gumene granule u betonu slaba točka konstrukcije te da ne doprinose poboljšanju mehaničkih karakteristika betona, kao što to izravno pokazuju rezultati tlačne i vlačne čvrstoće. Treba međutim napomenuti da se guma odlikuje sposobnošću apsorpcije zvuka, pa je to jedan od razloga manje brzine širenja ultrazvučnih valova kroz beton. Veći udio zahvaćenog zraka također utječe na smanjenje širenja ultrazvučnih valova kroz beton koji sadrži gumene granule. Prema podacima iz tablice 4., udio zahvaćenog zraka povećava se usporedo s povećanjem udjela gumenih granula u betonu. Khaloo, Dehestani i Rahmatabadi dolaze do sličnih zaključaka u svom radu [42].



Slika 5. Dijagram naprezanje-deformacija pri statičkom ispitivanju modula elastičnosti

Određivanje površinske tvrdoće korištenjem sklerometra dobivaju se rezultati slični onima iz gore spomenutih ispitivanja (tablica 5.). Indeks odskoka sklerometra smanjuje se s povećanjem udjela gumenog agregata u betonu. Indeks odskoka sklerometra za beton s 10, 20 i 30 % gumenog granulata manji je za 8, 21 i 28 posto u usporedbi s referentnim betonom. Ovdje trebamo napomenuti da guma sadržana u očvrslom betonu donekle amortizira udare čekića, čime utječe na smanjenu vrijednost indeksa sklerometra. Mohammed, Azmi i Abdullahi dobili su slične rezultate u svom radu [43]. Uspoređivanjem dijagrama koji su prikazani na slici 5. može se zaključiti da nelinearnost raste pri višim razinama opterećenja usporedo s povećanjem količine gumenog materijala, pri čemu su izuzetak smanjenje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. To dovodi do povećanja duktilnosti ispitanog betona, što je povoljno svojstvo u smislu ponašanja konstrukcije (naročito u slučaju aseizmičkih građevina) [44]. Indeks duktilnosti (DI) izračunan prema jednadžbi $DI = \varepsilon_u / \varepsilon_e$ na bazi odnosa deformacije pri slomu i vrijednosti u elastičnoj zoni, pri 1/3 tlačne čvrstoće, prikazan je na slici 6. Kada je količina gume veća od 20 %, tada vrijednost deformacije prelazi 2 %. Pad krivulje je lako uočljiv u elastičnom području nakon što količina gume iznosi više od 10 %. Statički modul elastičnosti betona s 10 % recikliranog gumenog granulata manji je za 16 % ako se uspoređi s istom vrijednosti za referentni beton, dok je statički modul niži za 46 i 54 posto za beton s 20 tj. 30 posto gumenog materijala.

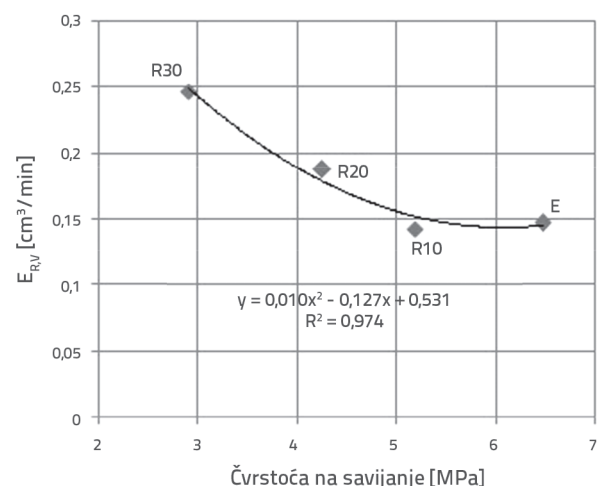
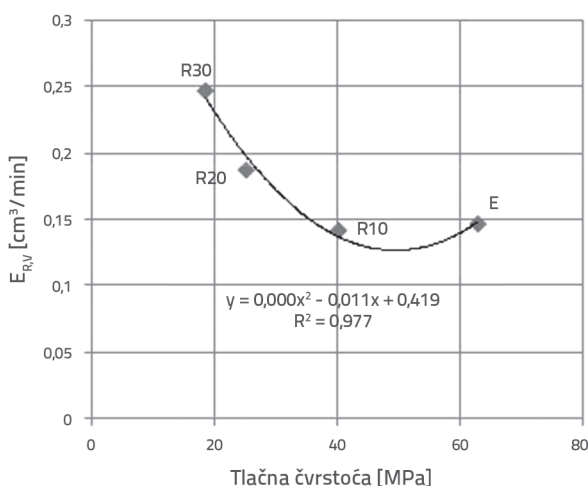


Slika 6. Indeks duktilnosti

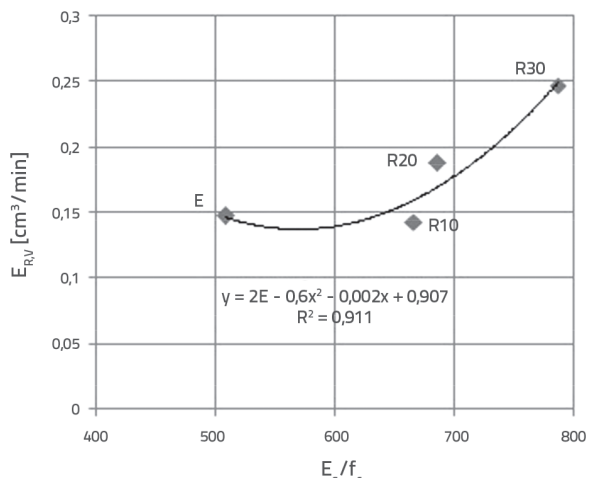
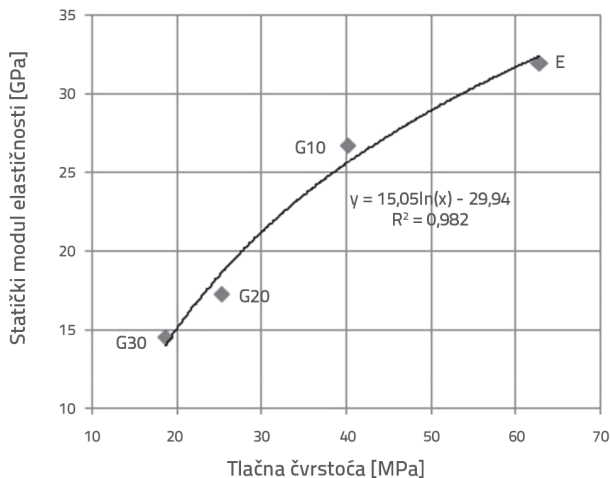
Analize rezultata vlačne čvrstoće pull-off metodom (tablica 5.) pokazuju da se vrijednosti takve čvrstoće smanjuju usporedo sa smanjenjem udjela reciklirane gume u betonu. Najviša vrijednost dobivena je na referentnom uzorku E, dok je vlačna čvrstoća pull-off metodom uzorka s 10 % reciklirane gume (R10) manja za 15 % u odnosu na referentni uzorak. Vlačna čvrstoća pull-off metodom uzorka s 20 % reciklirane gume (R20) manja je za 30 %, dok je čvrstoća uzorka s 30 % reciklirane gume (R30) manja za 51 % u odnosu na referentni beton. Tijekom ispitivanja vlačne čvrstoće pull-off metodom, slom betona nastao je između cementne paste i zrna riječnog agregata, isto kao i na kontaktu gumenog

Tablica 6. Gubitak mase i volumena uzorka te brzina erozije uslijed abrazivnog djelovanja

Oznaka mješavine	Gubitak mase Δm [g]	E_{Rm} [g/min]	$\gamma_{hard, conc}$ [g/cm ³]	Gubitak volumena ΔV [cm ³]	E_{RV} [cm ³ /min]
E	41,4	0,3450	2,340	17,69	0,1474
R10	36,5	0,3042	2,135	17,10	0,1425
R20	45,6	0,3800	2,025	22,52	0,1877
R30	57,7	0,4808	1,945	29,67	0,2473



Slika 7. Odnos između tlačne čvrstoće (lijevo) i čvrstoće na savijanje (desno) i brzine erozije abrazivnim djelovanjem

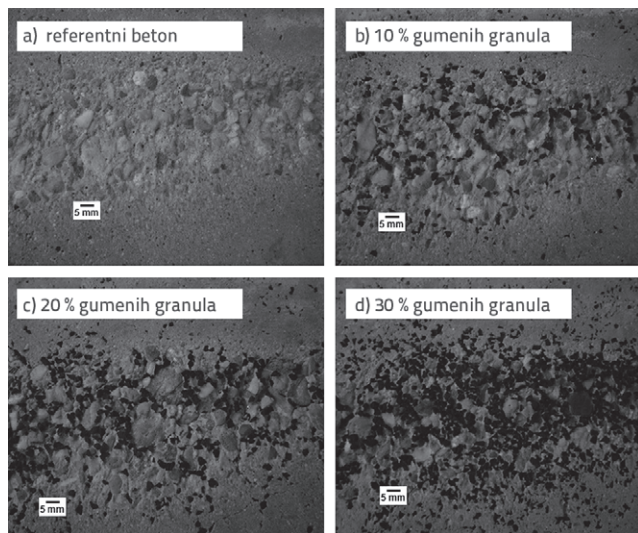


Slika 8. Veza između tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti (lijevo) i omjer statičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće prema erozijskom djelovanju po volumenu (desno)

granulata i cementne paste. Osnovni razlog za smanjenje vlačne čvrstoće pull-off metodom kod uzoraka s dodatkom gume u odnosu na referentni beton leži u slabijoj kvaliteti sučeljka cementne paste i gumenog granulata, u usporedbi s kvalitetom sučeljka cementne paste i riječnog agregata.

Što se tiče otpornosti betona na abraziju, analiza napredovanja oštećenja po volumenu pokazuje (tablica 6.) da je beton s 10 % zamjene riječnog agregata s recikliranim gumenim granulatom bolji od referentnog betona, bez obzira na činjenicu da su mu vrijednosti tlačne i savojne čvrstoće niže nego kod referentnog betona. Kako se na istom uzorku ne može ispitati nekoliko karakteristika betona, uzajamni odnos između otpornosti betona na hidroabraziju i ostalih svojstava betona može se odrediti samo na bazi srednje vrijednosti rezultata ispitivanja. U dijagramu u kojem se pokazuje ovisnost erozije o volumenu i tlačnoj tj. savojnoj čvrstoći (slika 7.), možemo uočiti da beton koji sadrži manje od 10 % recikliranog gumenog agregata ima veću otpornost na abraziju nego beton koji sadrži više od 10 % gume, ali i u odnosu na običan beton bez gume. Korelacijska krivulja dobivena na bazi rezultata ovog istraživanja pokazuje da beton ima najveću otpornost na hidroabraziju u području između "E" i "R10", ali bi se to ipak trebalo potvrditi dodatnim istraživanjima. Ustanovljena je vrlo dobra korelacija između tlačne čvrstoće uzoraka nakon 28 dana i statičkog modula elastičnosti određenog također nakon 28 dana (slika 8. lijevo). Statički modul elastičnosti smanjuje se sa smanjenjem tlačne čvrstoće betona, kao posljedica povećanja udjela gumenog granulata u betonu. Postignuta je vrlo dobra podudarnost između odnosa statičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće (E_s/f_c) s jedne strane i vrijednosti E_{RV} s druge (slika 8. desno). Taj odnos pokazuje da je beton otporniji na hidroabrazivno djelovanje, tj. da će vrijednost E_{RV} biti manja ako se poveća odnos E_s/f_c , ali samo ako udio recikliranog gumenog granulata ne bude viši od 10 %. Beton s većim odnosom E_s/f_c pokazuje tendenciju k elastičnoj deformaciji kada krute čestice nošene vodom abrazivno djeluju na površinu betona, pa je stoga gubitak mase betona manji [28]. Trebala bi se provesti dodatna istraživanja da bi se ova pojava detaljnije objasnila, tj. da bi se razvio beton trajno otporan na

abrazivno djelovanje. Međutim, kada je udio gume veći od 10 %, odnos također raste, tj. površina betona postaje elastičnija, s tim da se smanjuje otpornost na abrazivno djelovanje. U tom slučaju, beton može apsorbirati veću količinu energije prisutne uslijed djelovanja krutih čestica nošenih vodom, ali je istovremeno zbog većeg broja nekvalitetnih sučeljaka potrebno manje energije za erodiranje površine betona. Tome je razlog činjenica da veza između cementa i agregata slabi pri većoj koncentraciji gumenog granulata, što se vidi iz rezultata prionjivosti dobivenih metodom ispitivanja čvrstoće na otkid. Prethodno je već navedeno da je kvaliteta sučeljka guma/cementna pasta znatno slabije kvalitete od sučeljka cementne paste i agregata što se povezuje s karakteristikama površine gume. Nakon ispitivanja otpornosti betona na abraziju površina referentnog betona ima manje nepravilnosti u odnosu na uzorke s recikliranom gumom, s obzirom da zbog neadekvatne kvalitete sučeljka tijekom ispitivanja dolazi do odvajanja i ispadanja površinskih zrna agregata i gumenih granula iz betona. Izgled površine nakon abrazivnog djelovanja prikazan je na slici 9.



Slika 9. Izgled površine betonskih uzoraka nakon ispitivanja otpornosti na abrazivno djelovanje

6. Zaključak

Sljedeći se zaključci mogu izvesti na temelju rezultata istraživanja:

- Postupak ispitivanja i oprema koji se koriste u ovom radu pogodni su za praktično eksperimentalno ocjenjivanje hidroabrazivne otpornosti betona pod utjecajem mlaza vode i pijeska.
- Beton u kojem je 10 % sitnog riječnog agregata zamijenjeno s granulatom od reciklirane gume odlikuje se nešto boljom otpornošću na hidroabraziju od referentnog betona koji ne sadrži gumeni materijal, iako su mu vrijednosti tlačne i savojne čvrstoće niže od odgovarajućih vrijednosti referentnog betona. Otpornost betona na hidroabraziju smanjuje se kada se udio reciklirane gume poveća iznad 10 %.
- Omjer statičkog modula elastičnosti i tlačne čvrstoće (E_c/f_c) može biti pokazatelj otpornosti betona na hidroabraziju. Brzina prostornog napredovanja erozije zbog hidroabrazivnog djelovanja ($E_{R,V}$) niža je kada je omjer E_s/f_c veći, u slučajevima kada udio recikliranog gumenog granulata nije veći od 10 %.
- Zamjena sitnog riječnog agregate recikliranim gumenim granulatom dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje, vlačne čvrstoće pull-off metodom i statičkog modula elastičnosti. Na primjer, tlačna čvrstoća nakon 28 dana smanjuje se za 36 do 70 %, čvrstoća na savijanje za 20 do 55 %, vlačna čvrstoća pull-off metodom za 15 do 51 %, te modul elastičnosti za 16 do 54 %, ovisno o udjelu gumenog granulata.

- Širenje ultrazvučnih valova kroz beton i indeks odskoka sklerometra smanjuju se s povećanjem količine recikliranog gumenog granulata u betonu. Na primjer, nakon 28 dana, brzina širenja ultrazvučnih valova kroz beton smanjuje se za 5 do 21 %, a indeks odskoka sklerometra smanjuje se za 8 do 28 % ovisno o udjelu gumenog granulata.
- Indeks duktilnosti povećava se s povećanjem udjela gumenog granulata u betonu. Beton s dodatkom recikliranog gumenog granulata omogućuje bolju disipaciju energije i odlikuje se boljom duktilnošću u usporedbi s običnim betonom pa bi se stoga mogao koristiti u protupotresnim građevinama. Pritom se međutim treba uzeti u obzir naglo smanjenje tlačne čvrstoće i statičkog modula elastičnosti pri povećanju količine gumenog granulata u betonu.
- Prema rezultatima dobivenima u okviru ovog istraživanja, najbolja se otpornost na hidroabraziju može očekivati u betonu kod kojeg je pet posto sitnog riječnog agregata zamijenjeno gumenim granulatom. Trebala bi se provesti dodatna istraživanja da bi se dokazala otpornost površine takvog betona na djelovanje krutih čestica nošenih vodom.

Zahvale

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u okviru znanstvenoistraživačkog projekta TR 36017 "Upotreba nusproizvoda i recikliranih otpadnih materijala u betonskim kompozitima u okviru razvoja održivog graditeljstva u Srbiji: istraživački rad i ekološka ocjena mogućih primjena", koji je realiziran uz potporu Ministarstva nauke i tehnologije, Republika Srbija. Autori izražavaju svoju zahvalnost na pruženoj potpori.

LITERATURA

- [1] Siddique, R.: Waste Materials and By-Products in Concrete. Scrap Tires, Chapter 4, Springer; 1st. ed., pp. 121-145, 2007.
- [2] Kerševicius, V.: Rubber waste – raw materials for building: technical and economical aspects of utilization environmental research, Eng Manag, 3 (21), pp.72-77, 2002.
- [3] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A.: Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, Constr Build Mater, 23, pp.1828-1836, 2009.
- [4] Issa, C.A., Salem, G.: Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design, Constr Build Mater, 42, pp. 48-52, 2013.
- [5] Sukontasukkul, P., Tiamlom, K.: Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size, Constr Build Mater, 29, pp. 520-526, 2012.
- [6] Al-Tayeb, M.M., Abu Bakar, B.H., Ismail, H., Akil, H.M.: Effect of partial replacement of sand by fine crumb rubber on impact load behavior of concrete beam: experiment and nonlinear dynamic analysis, Mater Struct doi: 10.1617/s11527-012-9974-3, 2012.
- [7] Ozbay, E., Lachemi, M., Sevim, U.K.: Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag, Mater Struct, 44, pp.1297-1307, 2011.
- [8] Gesoglu, M., Guneyisi, E.: Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume, Mater Struct, 40, pp. 953-964, 2007.
- [9] Lakusic, S., Bjegovic, D., Baricevic, A., Haladin, I.: Development of high performance concrete for high speed railways, International symposium about research and application of modern achievements in civil engineering in the field of materials and structures, Tara, Serbia, pp. 81 – 88, 2011.
- [10] Bjegovic, D., Serdar, M., Jelcic Rukavina, M., Baricevic, A.: Study of reinforced-concrete sustainability criteria, Građevinar 62 (10), pp. 931-940, 2010.
- [11] Serdar, M., Baricevic, A., Lakusic, S., Bjegovic, D.: Special purpose concrete product from waste tyre recyclates, Građevinar 65 (2013) 9, pp. 793-801, 2013.

- [12] Najim, K.B., Hall, M.R.: Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete, *Constr Build Mater*, 27, pp. 521-530, 2012.
- [13] Han, Z., Chunsheng, L., Kombe, T., Thong-On, N. Crumb rubber blend in noise absorption study. *Mater Struct*, 41, pp. 383-390, 2008.
- [14] Graham, J.R.: Erosion of concrete in hydraulic structure, Report by ACI Comm 210, ACI man Pract, Part I, 1998.
- [15] ACI 210R-93 – Erosion of concrete in hydraulic Structures
- [16] Binici, H., Aksogan, O., Gorur, E.B., Kaplan, H., Bodur, M.N.: Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice. *Constr Build Mater*, 23, pp. 804-811, 2009.
- [17] Lui, Y.W.: Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume, *Constr Build Mater*, 21, pp. 972-977, 2007.
- [18] Siddique, R., Khatib, J.M.: Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fly ash concrete, *Mater Struct*, 43, pp. 709-718, 2010.
- [19] Choi, S., Bolander, J.E.: A topology measurement method examining hydraulic abrasion of high workability concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16 (5), pp. 771-778, 2012.
- [20] Ristic, N., Grdic, Z., Toplicic-Curcic, G.: Influence of fly ash on the hydroabrasion-erosion resistance on concrete in hydraulic structures, *Proceedings of the 12th International Scientific Conference "Planning, design, construction and renewal in the civil engineering"*, Novi Sad, Serbia, pp. 658 – 665, 2012.
- [21] Horszczaruk, E.K.: Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete, *Wear*, 267, pp. 110-115, 2009.
- [22] Hu, X.G., Momber, A.W., Yin, Y.G.: Hydro-abrasive erosion of steel-fibre reinforced hydraulic concrete, *Wear* 253, pp. 848-854, 2002.
- [23] Hu, X.G., Momber, A.W., Yin, Y., Wang, H., Cui, D.M.: High-speed hydrodynamic wear of steel-fibre reinforced hydraulic concrete, *Wear* 257, pp. 441-450, 2004.
- [24] Ristic, N., Grdic, Z., Toplicic-Curcic, G., Despotovic, I.: Hydro-abrasive resistance of micro-reinforced concrete with steel and polypropylene fibres, *International symposium about research and application of modern achievements in civil engineering in the field of materials and structures*, Tara, Serbia, pp. 125 – 134., 2011.
- [25] Chernov, V., Zlotnikov, H., Shadalov, M.: Structural synthetic fiber-reinforced concrete. Experience with marine applications, *Concr Int*, 8, pp. 56-61, 2006.
- [26] Grdic, Z., Curcic, G.T., Ristic, N., Despotovic, I.: Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers, *Constr Build Mater*, 27, pp. 305-312, 2012.
- [27] Toutanji, H.A.: The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates, *Cem Concr Compos*, Vol. 16, pp.135-139, 1996.
- [28] Šušteršič, J.: Abrazijsko odporni betoni, 11. slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, *Zbornik gradiv in referatov*, Ljubljana, Slovenia , pp. 41-48, 2004.
- [29] Yen, T., Hsu, T.H., Lui, Y.W., Chen, S.H.: Influence of class F ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete, *Constr Build Mater*, 21, pp. 458-63, 2007.
- [30] Lui, Y.W., Yen, T., Hsu, T.H.: Abrasion erosion of concrete by water-borne sand, *Cem Concr Res*, 36, pp.1814-20, 2006.
- [31] ASTM C 418-98: Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting.
- [32] Małasiwicz, A.: Test systems for abrasion of hydraulic concrete, *Gospodarka Wodna*, 4, pp.152-155, 1974.
- [33] Misra, A., Finnie, I.: On the size effect in abrasive and erosive wear, *Wear* 65, pp. 359-373, 1981.
- [34] ASTM C 944-99: Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method.
- [35] Nanni, A.: Abrasion resistance of roller compacted concrete, *ACI Mater J*, 86 (10), pp. 559-565, 1989.
- [36] Shi, Z.Q., Chung, D.D.L.: Improving the abrasion resistance of mortary by adding latex and carbon fibers, *Cem Concr Res*, 27 (8), pp. 1149-1153, 1997.
- [37] Bania, A.: Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinstoff-Wassergemisches, *Dissertation B*, TH Wismar, 248 p., 1989.
- [38] Haroske, G.: Erosionsverschleiss an Betonoberflächen durch Geschiebetransport, *Dissertation*, TH Wismar; p. 53-63., 1998.
- [39] Horszczaruk, E.: New test method for abrasion erosion of concrete, *Proceedings of 15th World Conference on Nondestructive Testing*, Roma, Italy, 2000.
- [40] ASTM C 1138-97: Standard test method for abrasion resistance of concrete (underwater method).
- [41] Momber, A.W., Kovacevic, R.: Accelerated high speed water erosion test for concrete wear debris analysis, *Tibol Trans*, 39, pp. 943-949, 1996.
- [42] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, R.: Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles, *Waste Manag*, 28, pp. 2472 – 2482, 2008.
- [43] Mohammed, B.S., Azmi, N.J., Abdullahi, M.: Evaluation of rubbercrete based of ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests, *Constr Build Mater*, 25, pp. 1388-1397, 2011.
- [44] Son, K.S., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K.: Strenght and deformability of waste tyre rubber reinforced concrete columns, *Constr Build Mater*, 25, pp. 218-226, 2011.