

ODPORNOST BETONA Z DODATKOM RECIKLIRANE GUME PROTI ZMRZOVANJU IN TAJANJU

FREEZE-THAW DURABILITY OF CONCRETE WITH RECYCLE TIRE RUBBER AND CHEMICAL ADMIXTURES

Primož Jelusič, univ. dipl. gosp. inž.

primoz.jelusic@um.si

doc. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si

doc. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
Smetanova 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 665.9:691.3:699.86

Povzetek | Odpadne gume in elektrofiltrski pepel se zbirajo v velikih količinah, zato njihova uporaba prispeva k reševanju problema onesnaževanja okolja. V članku je predstavljena receptura betonske mešanice z dodatkom reciklirane gume kot nadomestkom dela agregata in z elektrofiltrskim pepelom kot delnim nadomestkom cementa. Tak beton ustreza trdnostnemu razredu C12/15 in je primeren za izdelavo podložnih betonov. Na laboratorijskih preizkušanjih so bili analizirani vplivi reciklirane gume in elektrofiltrskega pepela na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Ugotovljeno je bilo, da je za doseganje notranje odpornosti betona potrebno povečanje prostornine por z dodatkom aeranta.

Ključne besede: beton, reciklirana guma, elektrofiltrski pepel, aerant, odpornost betona

Summary | Scrap tires and fly ash are being generated and accumulated in large volumes causing an increasing threat to the environment. There are mechanical, environmental and economic reasons to include recycled rubber and fly ash in concrete mixture. The concrete mixture with recycled rubber and fly ash is presented. Concrete used in foundations of non-load bearing structures should be a minimum strength classification of C12/15. In the paper, the freeze-thaw resistance of rubber included concrete with fly ash were investigated. Rubber included concrete is not freeze-thaw resistant, without entrained air.

Keywords: concrete, recycled rubber, fly ash, air-entrainer, resistance of concrete

1 • UVOD

Problematika odpadkov je čedalje bolj aktualna, saj njeno reševanje ni samo moralna, ampak tudi zakonodajna obveza. Ponovna uporaba industrijskih odpadkov je ključnega pomena pri reševanju problema onesnaževanja okolja.

V gradbeništvu je že znana uporaba elektrofiltrskega pepela (EFP) kot stranskega produkta pri izogrevanju premoga, s katerim lahko delno nadomestimo cement in s tem zmanjšamo stroške betona. Zaloge mineralnega agregata

so v naravnem okolju omejene, zato je smiselno razmišljati tudi o primernih nadomestkih. Ker se odpadne gume zbirajo v velikih količinah in s tem predstavljajo veliko obremenitev okolja, lahko takšen delni nadomestek naravnega agregata predstavlja reciklirana guma (RG) različnih velikosti in oblik.

Beton z dodatkom RG ima številne prednosti pred navadnim betonom, kot so večja de-

formabilnost, manjša toplotna prevodnost in boljša odpornost proti zmrzovanju in tajanju (Popit, 2012). Številni raziskovalci so preučili vpliv vsebnosti RG na tlačno, upogibno in natezno trdnost ter na statični in dinamični modul elastičnosti ((Topcu, 1995), (Toutanji, 1996), (Benazzouk, 2006), (Ganijan, 2009), (Son, 2011)). Vpliv RG na odpornost proti zmrzovanju in tajanju betona pa je še vedno slabo raziskan (Oikonomou, 2009). Pomembna ugotovitev na tem področju je, da pri cementni pasti z dodanimi delci gume opazimo zmanjšanje količine kapilarne vode, manjšo hitrost absorpcije vode in manjšo odprto poroznost (Segre, 2001).

Stranski produkti industrijskih panog (EFP, mikosilika, žlindra, metakaolin) se uporabljajo v betonu kot hidravlični dodatki, ki lahko delno nadomestijo cement, ki je najdražja komponenta betona. EFP je najpogosteje uporabljen dodatek, ki nastaja pri izgorevanju premoga in premogovega prahu. Uporaba EFP v betonu je zanimiva za raziskovalce povsod po svetu, zato so vplivi EFP na fizikalne in mehanske lastnosti betona podrobno raziskani (Siddique, 2003). Namen raziskav je bil izdelati recepturo za beton trdnostnega razreda C 12/15, kjer smo delež agregata nadomestili z RG, delež cementa pa z EFP. Tak beton se v

praksi lahko uporablja kot podložni beton in je pogosto izpostavljen zmrzovanju in tajanju. Odpornost strjenega betona proti zmrzovanju in tajanju se bistveno izboljša z namenskim povečanjem prostornine por. To povečanje lahko dosežemo z aerantom, kot je navedeno v literaturi ((Bates, 1952), (Lerch, 1960), (Pinto, 2001)). Vpliv aeranta in EFP na odpornost proti zmrzovanju in tajanju betona z dodatkom RG je bil raziskan na podlagi eksperimenta. Kot delni nadomestek agregata so bili uporabljeni gumeni sekanci iz silikonske gume, EPDM in EPM, ki so odporni proti vplivu staranja (UV-obsevanje).

2 • NOTRANJA ODPORNOST BETONA PROTI ZMRZOVANJU/TAJANJU

2.1 Opis mehanizma zmrzovanja in tajanja betona

Delovanje mehanizma nastanka poškodb v betonu so opisali ((Collins, 1944), (Powers, 1956), (Pigeon, 1995)). Na zmrzlinso odpornost betona vplivajo predvsem lastnosti cementnega kamna in agregata. Odpornost agregata proti zmrzovanju in tajanju je odvisna tudi od poroznosti, absorpcije, prepustnosti in strukture por v agregatu. Za zagotovitev dobre zmrzlinse odpornosti betona je treba zagotoviti mineralni agregat z nizko prepustnostjo in visoko trdnostjo. Pri grobozrnatih agregatih, ki imajo kapilarni sistem prekinjen s številnimi makroporami, ne pride do propada zrn, četudi agregat absorbira veliko vode, ker so makropore prevelike za zadrževanje vlage zaradi kapilarnosti.

Odpornost agregata proti zmrzovanju in tajanju lahko ocenimo na dva načina:

- (1) na podlagi preteklih izkušenj in
- (2) na podlagi laboratorijskih testov zmrzovanja/tajanja betonskih preizkušancev.

Če so agregati iz znanega nahajališča predhodno dali zadovoljive rezultate, jih lahko smatramo za primerne.

Voda, ki je prodrla v beton, ob zmrzovanju poveča svojo prostornino za 9%. Med zmrzovanjem v kapilarnih porah nastane hidravlični pritisk. Velikost hidravličnega pritiska je odvisna od prepustnosti materialov, oddaljenosti do mest, kjer se lahko pritisk sprost, in hitrosti, s katero nastaja led. Hidravlični pritisk v kapilarnih porah ne nastane, če te niso popolnoma zasičene.

(Powers, 1975) je pojasnil tudi rast ledenih kristalov pri konstantni temperaturi pod 0 °C.

Led, ki nastane v porah, ima nižjo koncentracijo alkalij in kloridov kot voda. Potovanje raztopljenih snovi skozi polprepustno sredstvo (kapilare) v smeri nižje koncentracije se imenuje osmoza. V cementnem kamnu torej nastane osmotski tlak zaradi razlike v koncentraciji alkalnih raztopin.

2.2 Vpliv aeranta na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju

Glede na velikost in nastanek lahko pore v betonu razdelimo na gelne pore, kapilare in zračne mehurčke. Odpornost strjenega betona proti zmrzovanju in tajanju v vlažnem stanju se bistveno izboljša z namenskim povečanjem prostornine zračnih mehurčkov, kar dosežemo z aerantom. Raziskovalca ((Bates, 1952), (Lerch, 1960)) sta prikazala vpliv prostornine zračnih mehurčkov na odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Ugotovila sta, da se betonu brez dodatka aeranta relativni dinamični modul zmanjša za 50 % že pred izvedbo 200 ciklov zmrzovanja in tajanja. Z dodatkom aeranta in prostornino por 4 % pa se število ciklov zmrzovanja in tajanja poveča za osemkrat.

Zračni mehurčki v betonu delujejo kot prazne komore v cementnem kamnu, kamor lahko voda vstopi in zmrzne. Tako hidravlični pritiski, ki povzročajo propad betona, ne nastanejo. V procesu tajanja se voda večinoma vrne v kapilare. Zračni mehurčki v betonu so ponovno prazni in omogočajo vstop vode v naslednjem ciklu zmrzovanja. Hidravlični pritiski zaradi povečanja prostornine vode so odvisni predvsem od razdalje, ki jo mora voda prepotovati do najbližjega zračnega mehurčka. Zato

morajo biti zračni mehurčki dovolj blizu, da je pritisk manjši od natezne trdnosti cementnega kamna. Intenziteta hidravličnega pritiska je odvisna tudi od hitrosti zmrzovanja, stopnje zasičenosti, prepustnosti cementnega kamna in razdalje med porami ter od velikosti por. Beton je odporen proti zmrzovanju in tajanju, če je razdalja med porami manjša od 0,2 mm (Powers, 1965) in specifična površina por večja od 24 mm²/mm³. Vpliv razdalje med zračnimi mehurčki na zmrzlinso odpornost betona so raziskovali ((Klieger, 1952), (Klieger, 1956), (Klieger, 1966), (Powers, 1965), (Whiting, 1998)). Korelacijo med prostornino por in razdaljo med porami je podal tudi (Pinto, 2001).

2.3 Vpliv EFP na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju

V tehnologiji betona je poznano, da imajo betoni, ki vsebujejo več kot 20 % EFP na maso cementa, manjšo poroznost od betona brez tega dodatka. Povprečni premer zrna EFP znaša od 0,015 mm do 0,02 mm. EFP povečuje obdelavnost svežega betona, podaljšuje proces hidratacije, omogoča večjo trdnost in zmanjšuje poroznost. Nižja toplota hidratacije zmanjša zgodnjo trdnost betona. EFP se lahko uporablja kot hidravlični dodatek pri izdelavi cementa in kot dodatek pri izdelavi betona. EFP zmanjša tudi porabo vode oziroma poveča pretočnost svežega betona. Z zmanjšano količino vode se zmanjša krvavenje betona in prav tako tudi krčenje betona. EFP poveča tlačno trdnost betona zaradi pucolanske aktivnosti. Ker pa je pucolanska aktivnost počasna, beton počasi pridobiva trdnost. Struktura betona postane gostejša, kar zmanjša prepustnost betona.

ASTM C618 razdeli EFP na tri skupine: (1) razred F: manj kot 5 % CaO, (2) razred C: več

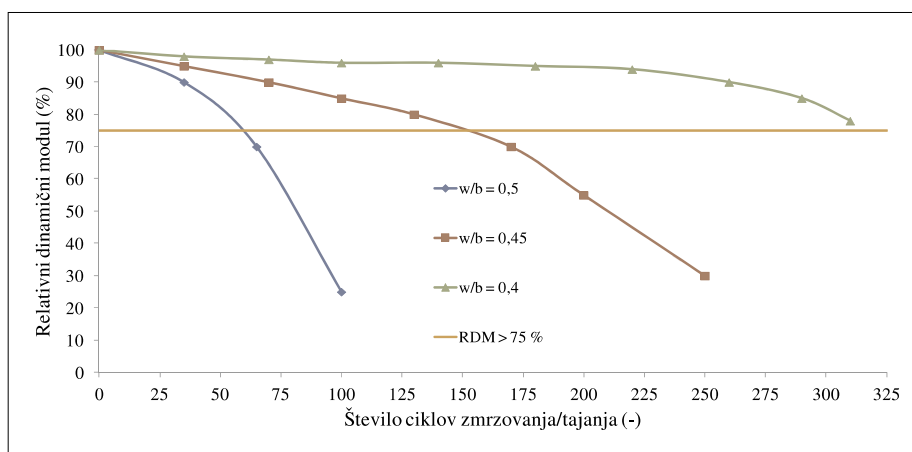
kot 10 % CaO (z žganjem lignita) in (3) razred N (Siddique, 2003). Lastnosti EFP so odvisne od njihove kemične sestave.

2.4 Metode preskušanja odpornosti betona proti zmrzovanju/tajanju

Odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju se poveča, če uporabimo mineralni agregat, ki je zmrzljivo obstojen. Zagotoviti moramo nizko vodovozivno razmerje (maksimalno 0,45) ob minimalni količini cementa 335 kg/m³ svežega betona. Beton je treba pravilno negovati, da doseže minimalno trdnost 28 MPa (Pinto, 2001).

Tudi beton z majhno prostornino por je bolj odporen proti zmrzovanju in tajanju, če se uporabi nizko vodovozivno razmerje. Slika 1 prikazuje vpliv vodovozivnega razmerja na trajnost betona brez dodatkov aeranta.

Odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju se lahko določi na različne načine. Ena izmed metod je določitev izgube mase vzorca po določenem številu ciklov zmrzovanja in tajanja. Druga metoda je merjenje spremembe transverzalne frekvence nihanja, iz katere lahko izračunamo dinamični modul elastičnosti. Po standardu SIST 1026:2004 se notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju ugotavlja z relativnim dinamičnim



Slika 1 • Vpliv vodovozivnega razmerja na trajnost betona brez dodatkov aeranta (Pinto, 2001)

modulom (RDM) elastičnosti betona po N -ciklih zmrzovanja/tajanja. Beton je odporen proti zmrzovanju in tajanju, če pri 28-dnevni starosti in po predpisanem številu ciklov zmrzovanja in tajanja znaša RDM najmanj 75 %. Število ciklov N je lahko 50 ali 100, kar je odvisno od predvidene stopnje izpostavljenosti betona zmrzovanju in tajanju v objektu.

Odpornost betona lahko določimo tudi s faktorjem odpornosti (D_f). Standard ASTM C 666:2008 definira faktor odpornosti z enačbo:

$$D_f = \frac{N \times RDM (\%) }{300}, \quad (1)$$

kjer je N število ciklov, RDM pa relativni dinamični modul pri številu ciklov N .

Standard ASTM C 666 priporoča zmrzovanje do 300 ciklov oziroma dokler RDM ni manjši od 60 % začetne vrednosti. Točni kriteriji za odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju niso določeni. Faktor odpornosti se pogosto uporabi zgolj za primerjavo med različnimi betoni. Beton ni odporen proti zmrzovanju/tajanju, če je faktor odpornosti D_f manjši od 40.

3 • EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Za izdelavo betonskih vzorcev je bil uporabljen cement Portland proizvajalca Lafarge Cement iz Trbovelj, z oznako Modri cement CEM II/B-M (W-L) 42.5 N. Z EFP je bilo nadomeščenih 30 % količine vezi-

va, uporabljena sta bila dva različna tipa EFP. V preglednici 1 sta podani kemični sestavi EFP. Uporabljena pepela se razlikujeta tudi po specifični površini, ki za EFP TIP 1 znaša 5025 cm²/g, za EFP TIP 2 pa 3288 cm²/g.

	EFP – TIP 1 % (m/m)	EFP – TIP 2 % (m/m)
Žarilna izguba pri 950 °C	2,63	0,41
Netopni ostanek	10,23	16,67
SiO ₂ v netopnem ostanku	5,77	13,08
SiO ₂ , čisti	42,82	47,62
SiO ₂ , raztopljeni	0,48	0,64
SiO ₂ , celokupni	43,30	48,26
SiO ₂ , reaktivni	37,53	35,18
CaO, reaktivni	8,01	7,65
SO ₃	1,88	1,88
CaO, prosti	1,22	2,00

Preglednica 1 • Rezultati laboratorijskih analiz EFP, ki jih določa standard SIST EN 450-1

Uporabljeni naravni mineralni agregat je bil drobljenec dolomitnega izvora (iz nahajališča Golubovec) z največjim zrnem 16 mm. Uporabljene so bile tri frakcije drobljenega agregata: 0/4 mm, 4/8 mm in 8/16 mm. Sekanci RG frakcije 0/8 mm, dobavljeni iz podjetja Sava Kranj, so bili uporabljeni kot delno nadomestilo naravnega mineralnega agregata. S sekanci je bilo nadomeščenih 10 % naravnega mineralnega agregata. Namensko povečanje prostornine por v betonski mešanici smo dosegli z dodatkom aeranta (Kemacol LPA), ki smo ga dozirali v količini 0,65 % na skupno maso veziva.

3.2 Priprava preizkušancev

Betonske mešanice so bile zamešane z laboratorijskim mešalcem kapacitete 56 litrov in hitrostjo 56 obr./min. Čas mešanja je znašal 5 minut. Sledila je določitev konsistence z metodo poseda po določilih standarda SIST EN 12350-2. Beton v kalupu je bil zgoščen z vibracijsko mizo pri frekvenci 3600 obr./min. in amplitudo 0,75 ± 0,1 mm. Recepture betonskih mešanic so podane v preglednici 2, iz katere je razvidno, da je bilo izdelanih pet

različnih mešanic. Izračun mase posameznih frakcij agregata je bil narejen po enačbi Fuller (Fuller, 1907).

Sveži beton je bil vgrajen v standardne kalupe dimenzij 400/100/100 mm. Izdelanih je bilo 27 vzorcev, in sicer:

- 3 vzorci po recepturi 1 (R1-1, R1-2, R1-3),
- 6 vzorcev po recepturi 2 (R2-1, R2-2, R2-3, R2-4, R2-5, R2-6),
- 6 vzorcev po recepturi 3 (R3-1, R3-2, R3-3, R3-4, R3-5, R3-6),
- 6 vzorcev po recepturi 4 (R4-1, R4-2, R4-3, R4-4, R4-5, R4-6),
- 6 vzorcev po recepturi 5 (R5-1, R5-2, R5-3, R5-4, R5-5, R5-6).

Standard SIST 1026:2004 določa, da je treba izdelati najmanj tri preskušance betona iste vrste. Zaradi še vedno neraziskanega vpliva kombinacije RG, EFP in aeranta na zmrzlin-sko odpornost betona je bilo izdelanih 6 preskušancev pri recepturah R2, R3, R4 in R5. Vzorci so bili razopaženi po 24 urah in položeni v kad z vodo temperature 20 ± 2 °C. Po treh dneh so bili vzorci prestavljeni v komoro s stalno vlago > 95 % in temperaturo 20 ± 2 °C. Pred začetkom preizkusa so bili vzorci štiro dni v vodi, ki je segala približno 2 cm nad njihovo površino.

Za določitev tlačne trdnosti betona je bilo izdelanih 16 vzorcev dimenzij 150/150/150 mm:

- 4 vzorci po recepturi 1 (R1-C1, R1-C2, R1-C3, R1-C4),
- 3 vzorci po recepturi 2 (R2-C1, R2-C2, R2-C3),
- 3 vzorci po recepturi 3 (R3-C1, R3-C2, R3-C3),

	RECEPTURA					GOSTOTA (kg/m ³)
	R1	R2	R3	R4	R5	
CEMENT (kg)	250	252	252	252	252	3100
EFP (kg)	0	108 (TIP 1)	108 (TIP 1)	108 (TIP 2)	108 (TIP 2)	2600
VODA (kg)	180	180	180	180	180	1000
AGREGAT 0/4 mm (kg)	884,8	781	781	781	781	2800
AGREGAT 4/8 mm (kg)	241,7	328	328	328	328	2810
AGREGAT 8/16 mm (kg)	688,1	453	453	453	453	2820
R. GUMA 0/8 mm (kg)	86,4	174	174	174	174	1200
AERANT (kg)	0	0	2,88	0	2,88	1000

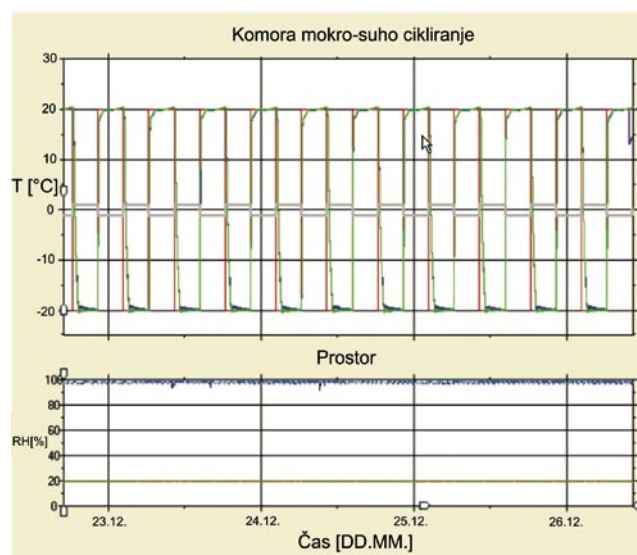
Preglednica 2 • Receptura betonske mešanice z vsebnostjo sekancev reciklirane gume kot delnega nadomestila naravnega mineralnega agregata

	RECEPTURA				
	R1	R2	R3	R4	R5
POROZNOST (%)	2	2	6	2	6
w/b*	0,72	0,5	0,5	0,5	0,5

Preglednica 3 • Poroznost in *vodovozivno razmerje betonskih mešanic



Slika 2 • Meritev časa prehoda ultrazvoka z napravo PUNDIT plus (model PC1006)



Slika 3 • Računalniško zapisovanje ciklov zmrzovanja in tajanja

- 3 vzorci po recepturi 4 (R4-C1, R4-C2, R4-C3),
- 3 vzorci po recepturi 5 (R5-C1, R5-C2, R5-C3).

3.3 Eksperimentalna metoda določitve odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju

Pred začetkom preizkusa v klimatski komori je bil z napravo PUNDIT plus (model PC1006) izmerjen začetni čas prehoda ultrazvoka (t_0). Oddajnik in sprejemnik sta bila prekrita z gelom in nameščena na stranici prizme (400/100/100 mm), kot je prikazano na sliki 2.

Opravljenih je bilo 10 meritev časa prehoda ultrazvoka na posameznemu vzorcu, nato je sledil izračun srednje vrednosti. Preizkus odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju je bil opravljen po standardu SIST 1026:2004. Cikel je trajal 8 ur in je bil sestavljen iz 4 ur suhega zmrzovanja pri $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ter 4 ur tajanja v vodi s temperaturo $+20\text{ }^\circ\text{C}$. Čas prehoda ultrazvoka je bil izmerjen vsakih 25 ± 2 ciklov. Meritve je bilo treba opraviti na popolnoma od-taljenih in vlažnih vzorcih, torej pred začetkom zmrzovanja. Slika 3 prikazuje računalniško zapisovanje ciklov zmrzovanja in tajanja.

3.4 Rezultati eksperimentalnih meritev

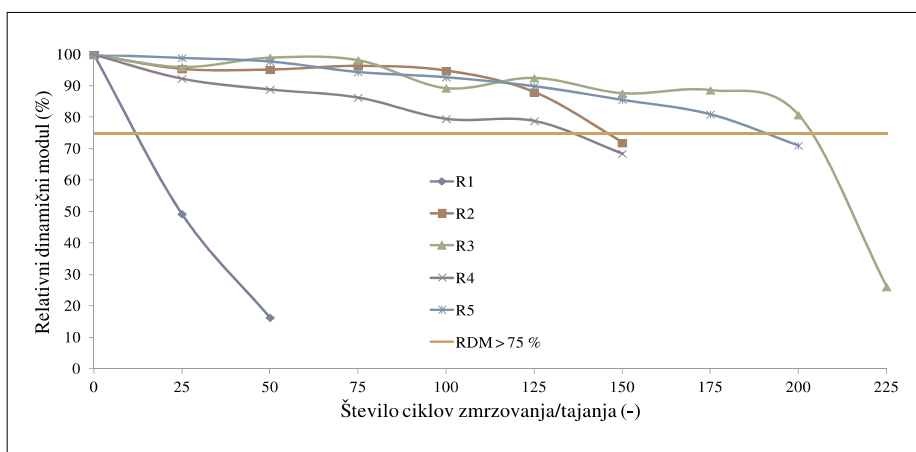
Po končanem mešanju je bil najprej opravljen preizkus konsistence betona z metodo poseda po določilih standarda SIST EN 12350-2:2001. Zahtevani posedek stožca je bil med 10 in 40 mm (razred S1). Tlačna trdnost je bila določena v skladu s standardom SIST EN 12390-3:2002. Rezultati poseda in tlačne trdnosti za posamezno betonsko mešanico so podani v preglednici 4.

Izmerjeni časi prehodov ultrazvoka so se uporabili za izračun RDM po enačbi:

$$RDM = \left(\frac{t_0}{t_N} \right)^2 \cdot 100\%, \quad (2)$$

Oznaka vzorca	$f_{c,cube}$ (MPa)	Povprečni posedek stožca Δh (mm)	Povprečna tlačna trdnost $f_{c,cube}$ (MPa)	Gostota (kg/m^3)
R1-C1 R1-C2 R1-C3 R1-C4	22 19,4 20,8 21,1	11	20,8	2397
R2-C1 R2-C2 R2-C3	19 15,8 16	15	16,9	2230
R3-C1 R3-C2 R3-C3	17 16,4 17,3	15	16,9	2145
R4-C1 R4-C2 R4-C3	18,8 18,3 18,9	16	18,7	2219
R5-C1 R5-C2 R5-C3	18,1 17,6 16,5	17	17,4	2159

Preglednica 4 • Posedek, tlačna trdnost in gostota za posamezno betonsko mešanico



Slika 4 • RDM v odvisnosti od števila ciklov zmrzovanja/tajanja

kjer je RDM relativni dinamični modul (%), t_0 čas prehoda ultrazvoka (μs) in t_N čas prehoda ultrazvoka po N -ciklih zmrzovanja/tajanja (μs). Na sliki 4 je prikazana odvisnost RDM od števila ciklov zmrzovanja/tajanja vseh

eksperimentalnih betonskih mešanic. Meritve časa prehoda ultrazvoka skozi vzorec so se zaključile takrat, ko se je relativni dinamični modul znižal pod 75 %.

4 • DISKUSIJA

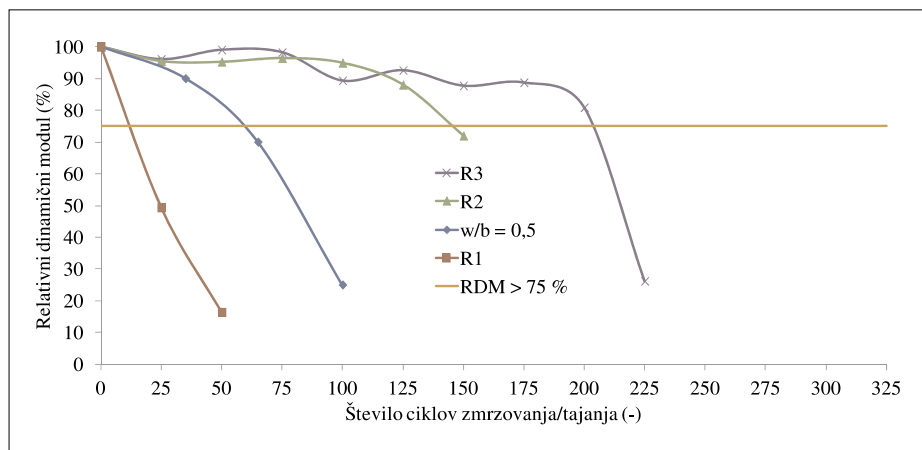
Z enačbo 1 so bili izračunani faktorji odpornosti (D_r), ki so podani v preglednici 5. Na podlagi teh faktorjev se lahko določi odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. V tem članku so bile vrednosti D_r uporabljene za primerjavo med betoni eksperimentalnih

receptur, ki smo jih analizirali. Izračuni so bili opravljeni tako, da se je določilo število ciklov pri vrednosti $RDM = 75\%$. Za primerjavo so bili dodani faktorji odpornosti betonov pri različnih vodovozivnih razmerjih, podanih v (Pinto, 2001).

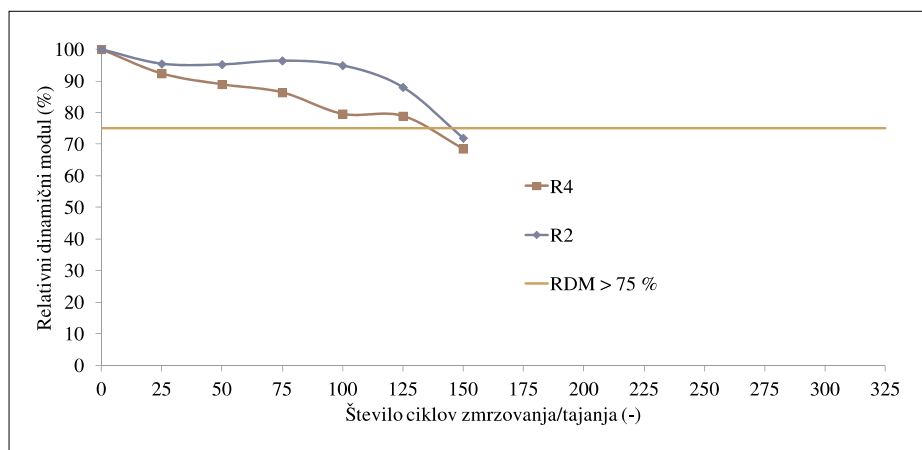
Receptura R1 ima visoko vodovozivno razmerje ($w/b = 0,72$). Čeprav je cementna pasta modificirana z delci gume, ki zmanjšujejo količino kapilarne vode, hitrost absorpcije vode in odprto poroznost, bi bilo treba uporabiti nižje vodovozivno razmerje. S slike 5 je razvidno, da beton po recepturi R1 ni odporen proti zmrzovanju in tajanju, saj je RDM manjši od 75 % že pri 25 ciklih. Faktor odpornosti betona po recepturi R1 znaša samo 3,3.

	R1	R2	R3	R4	R5	w/b = 0,5	w/b = 0,45	w/b = 0,4
D_f	3,3	36,3	51,3	32,0	47,5	16,3	40,0	77,5

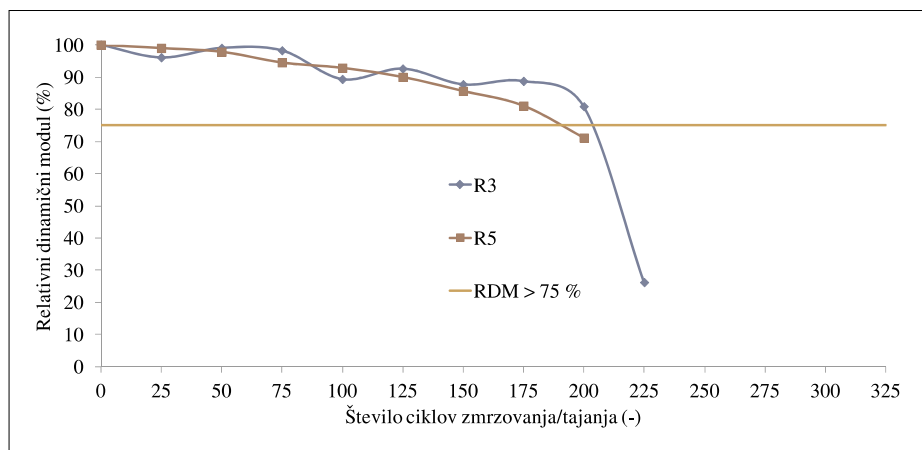
Preglednica 5 • Faktorji odpornosti za posamezno recepturo in primerjale betone



Slika 5 • Primerjava betonov z različno recepturo in betonom z vodovezivnim razmerjem 0,5



Slika 6 • Receptura R2 (EFP-TIP 1) in receptura R4 (EFP-TIP 2)



Slika 7 • Receptura R3 (EFP-TIP 1) in receptura R5 (EFP-TIP 2)

Ker beton R1 ni bil odporen proti zmrzovanju in tajanju, je bil dodan EFP. Z EFP je bilo nadomeščenih 30 % količine veziva, kar je po ASTM tudi maksimalna količina, ki se lahko dodaja v betonske mešanice. Slika 5 prikazuje, da je beton z vodovezivnim razmerjem 0,5 manj odporen proti zmrzovanju in tajanju pri katerem je 30 % veziva EFP. Faktor odpornosti za beton R2 znaša $D_f = 36,3$. Čeprav dodana reciklirana guma zmanjša absorpcijo vode in EFP zmanjša poroznost betona, beton še vedno ne ustreza kriteriju $D_f > 40$.

Pri recepturi R3 so bile uporabljene enake količine komponent kot pri recepturi R2, le da je bil dodan aerant. Odpornost strjenega betona proti zmrzovanju in tajanju se bistveno izboljša s povečanjem prostornine por (slika 5). Faktor odpornosti betona z dodatkom RG (10 % agregata), EFP (30 % veziva) in aeranta (0,65 % veziva) znaša $D_f = 51,3$. Tak beton je odporen proti ciklom zmrzovanja in tajanja.

EFP-TIP1 in EFP-TIP2 se razlikujeta po vrednosti specifične površine, manj pa po kemični sestavi. Oba tipa EFP vsebujeta približno 10 % CaO. Faktorja odpornosti D_f se zato bistveno ne razlikujeta. Primerjava različnih tipov receptur z EFP je prikazana na sliki 6 (brez aeranta) in sliki 7 (z aerantom).

5 • SKLEP

V tem prispevku je prikazana receptura za beton z dodatkom RG in EFP, ki je odporen proti zmrzovanju in tajanju. To je bilo doseženo šele z dodatkom aeranta, za katerega je znano, da bistveno izboljša notranjo odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Ugotovljeno je bilo, da specifična površina in sestava EFP nimata

večjega vpliva na faktor notranje odpornosti. Beton z recepturo R3 (RG, EFP, aerant) ima 3,1-krat večji faktor odpornosti kot navadni beton pri enakem vodovozivnem razmerju. Povprečna tlačna trdnost betona po recepturi R3 znaša 16,9 MPa. Takšna tlačna trdnost ustreza betonu C12/15, ki je primeren za

podložne betone. Dodatek aeranta je povečal faktor odpornosti za 1,4-krat, pri čemer pa se povprečna tlačna trdnost ni zmanjšala. Iz slednjega je mogoče sklepati, da obstaja optimalna količina veziva in aeranta v betonih z reciklirano gumo, pri kateri se odpornost proti zmrzovanju in tajanju poveča, medtem ko tlačna trdnost ostane nespremenjena. Na podlagi faktorjev odpornosti je mogoče sklepati, da mora biti vodovozivno razmerje neaeriranega betona z dodatkom 10 % RG največ 0,45.

6 • LITERATURA

- Bates, A. A., Woods, H., Tyler, I. L., Verbeck, G., Powers, T. C., Rigid-Type Pavement, Association of Highway Officials of the North Atlantic States, 28th Annual Convention Proceedings, 164–200, 1952.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Queneudec, M., Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste, *Cement and Concrete Composites*, 28, 650–657, 2006.
- Collins, A. R., The destruction of concrete by frost, *Journal of Institute of Civil Engineers*, 23, 29–41, 1944.
- Fuller, W. B., Thompson, E., The Laws of Proportioning Concrete, *ASCE Transactions* LIX, 67–118, 1907.
- Ganijan, E., Khorami, M., Maghsoudi, A. K., Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Construction and Building Materials*, 23, 1828–1836, 2009.
- Klieger, P., Studies of the Effect of Entrained Air on the Strength and Durability of Concretes Made with Various Maximum Sizes of Aggregates, *Research Department Bulletin RX040*, Portland Cement Association, 1952.
- Klieger, P., Further Studies on the Effect of Entrained Air on Strength and Durability of Concrete with Various Sizes of Aggregate, *Research Department Bulletin RX077*, Portland Cement Association, 1956.
- Klieger, P., Air-Entraining Admixtures, *Research Department Bulletin RX199*, Portland Cement Association, 1966.
- Lerch, W., Basic Principles of Air-Entrained Concrete, T-101, Portland Cement Association, 1960.
- Oikonomou, N., Mavridou, S., The use of waste tyre rubber in civil engineering works, *Sustainability of construction materials*, Woodhead Publishing Limited, 213–235, 2009.
- Pigeon, M., Pleau, R., *Durability of Concrete in Cold Climates*, E&FN Spon, New York, 1995.
- Pinto, R. C. A., Hover, K. C., Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete, *Research and Development Bulletin RD122*, Portland Cement Association, 2001.
- Popit, A., Nikonov, A., Emri, I., Overview about research of properties and applicability of concrete with added granular rubber from scrap tires, *Gradbeni vestnik*, 61, 284–297, 2012.
- Powers, T. C., Resistance to weathering – freezing and thawing, *ASTM Sp. Tech. Publ.*, 169, 182–187, 1956.
- Powers, T. C., Topics in Concrete Technology ... (3) Mixtures Containing Intentionally Entrained Air; (4) Characteristics of Air-Void Systems, *Research Department Bulletin RX174*, Portland Cement Association, 1965.
- Powers, T. C., Freezing Effects in Concrete, Paper from symposium sessions, held in Atlantic City, New Jersey and Ottawa, Ontario, 1973, Published in, *Durability of concrete*, SP-47, American Concrete Institute, Detroit, 1975.
- Segre, N., Joekes, I., Use of tire rubber particles in addition to cement paste, *Cement and Concrete Research* 30, 1421–1425, 2001.
- Siddique, R., Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 539–547, 2003.
- Son, K. S., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns, *Construction & Building Materials*, 25, 218–226, 2011
- Topcu, I. B., The properties of rubberized concretes, *Cement and Concrete Research*, 25, 304–310, 1995.
- Toutanji, H. A., The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 18, 135–139, 1996.
- Whiting, D. A., Nagi, M. A., *Manual on Control of Air Content in Concrete*, EB116, National Ready Mixed Concrete Association and Portland Cement Association, 1998.