

Primljen / Received: 23.11.2016.

Ispravljen / Corrected: 10.4.2017.

Prihvaćen / Accepted: 22.5.2017.

Dostupno online / Available online: 10.3.2018.

Fizikalno-mehanička svojstva betonskih mješavina za izradu kolnika na autobusnim stajalištima

Autori:



¹Mr.sc. **Miloš Šešlija**, dipl.ing.građ.
slavijasrb@gmail.com



¹Prof.dr.sc. **Nebojša Radović**, dipl.ing.građ.
radovic.nebojsa62@gmail.com



¹Doc.dr.sc. **Andrija Rašeta**, dipl.ing.građ.
araseta@gmail.com



¹Mr.sc. **Anka Starčev-Čurčin**, dipl.ing.građ.
astarcev@uns.ac.rs



²Prof.dr.sc. **Danije Kukaras** dipl.ing.građ.
danijel.kukaras@gmail.com

¹Sveučilište u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka
Odjel za građevinarstvo i geodeziju

²Sveučilište u Novom Sadu
Građevinski fakultet u Subotici

Stručni rad

Miloš Šešlija, Nebojša Radović, Andrija Rašeta, Anka Starčev-Čurčin, Danijel Kukaras

Fizikalno-mehanička svojstva betonskih mješavina za izradu kolnika na autobusnim stajalištima

U radu su prikazana detaljna istraživanja tri betonske mješavine, koje su korištene za izradu autobusnih stajališta u Novom Sadu. Mješavine se razlikuju po udjelu agregata, različitoj količini i tipu cementa, kao i po različitim vrstama i količinama dodataka koji su korišteni za spravljanje betonskih mješavina. Nakon utvrđenih fizikalno-mehaničkih svojstava betona, primijećeno je da sve mješavine ispunjavaju zahtjeve za izgradnju betonskog kolnika za autobusna stajališta. Dobiveni rezultati ukazuju da su analizirane mješavine povoljne i za izradu betonskih kolnika na cestama.

Ključne riječi:

betonski kolnik, autobusna stajališta, fizikalno-mehanička svojstva

Professional paper

Miloš Šešlija, Nebojša Radović, Andrija Rašeta, Anka Starčev-Čurčin, Danijel Kukaras

Physicomechanical properties of concrete mixtures for construction of pavements at bus stations

A detailed research of three concrete mixtures, used in construction of pavements at bus stations in Novi Sad, is presented in the paper. The mixtures differ by aggregate content, quantity and type of cement, as well as by the type and quantity of additives used for the preparation of concrete mixtures. After examination of physicomechanical properties of concrete, it was established that all mixtures meet the requirements for construction of concrete pavements at bus stations. The obtained results show that the analysed mixtures are also favourable for construction of concrete pavements on roads.

Key words:

concrete pavement, bus stations, physicomechanical properties

Fachbericht

Miloš Šešlija, Nebojša Radović, Andrija Rašeta, Anka Starčev-Čurčin, Danijel Kukaras

Physikalische und mechanische Eigenschaften der Betonmischungen für die Ausführung von Pflastern an Bushaltestellen

In der Abhandlung werden detaillierte Untersuchungen von drei Betonmischungen dargestellt, die bei der Ausführung von Bushaltestellen in Novi Sad verwendet wurden. Die Mischungen unterscheiden sich durch den Gehalt an Gesteinskörnung, durch die unterschiedliche Zementmenge und -typ, wie auch durch unterschiedliche Arten und Mengen an Zusätzen, die bei der Vorbereitung der Betonmischungen verwendet wurden. Aufgrund der festgestellten physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Betons bemerkte man, dass alle Mischungen die Anforderungen für die Ausführung von Betonpflastern für Bushaltestellen erfüllen.

Schlüsselwörter:

Betonpflaster, Bushaltestelle, physikalische und mechanische Eigenschaften

1. Uvod

Danas su u upotrebi dva tipa kolničke konstrukcije: asfaltni i betonski kolnik. Kod fleksibilne kolničke konstrukcije, djelovanjem opterećenja kotača vozila se po dubini do posteljice prenosi na osnovu međudjelovanja zrna granuliranih materijala. Posljedica je toga niska čvrstoća na savijanje fleksibilne kolničke konstrukcije. Fleksibilna kolnička konstrukcija se, uslijed djelovanja opterećenja, ponaša kao fleksibilna ploča. Kod betonskih kolničkih konstrukcija, djelovanjem opterećenja kotača vozila se prenosi kao ravnomjerno raspoređeno opterećenje preko betonske ploče na donje slojeve, a nakon toga se prenosi do posteljice preko međudjelovanja zrna granuliranih materijala [1].

Betonski kolnik se uglavnom primjenjuje na mjestima gdje je teški promet, kao što su autobusna stajališta, naplatne kućice, benzinske postaje, autoceste i tuneli. Ovakva vrsta kolnika u Novom Sadu prvi je put upotrijebljena 1994. godine za izradu autobusnih stajališta, jer se asfaltni kolnik pokazao lošim zbog pojave kolotraga i nabora. Nakon prve izrade betonskih kolnika, počela je sve veća upotreba na ostalim autobusnim stajalištima u Novom Sadu. Od 1994. do danas izvedeno je oko 60 autobusnih stajališta, ukupne duljine oko 2100 m. Mnogi autori bavili su se ispitivanjem i analiziranjem betonskog kolnika. Riffel [2] analizirao je betonski kolnik za proizvodnju u industrijskoj zoni, tj. brz popravak cesta i aerodroma. U radu [2] zaključuje se da ispitne betonske mješavine zadovoljavaju fizikalno-mehanička svojstva za primjenu betonskog kolnika pri teškom prometu. Giergiczny [3] navodi određene faktore primjene betonskog kolnika, kao i osnovne ekonomske pokazatelje održavanja i sigurnosti ceste. Na kraju je dan prikaz alternativnih prometnica za izgradnju betonskog kolnika do 2020. godine u Poljskoj kako bi se povećala sigurnost i trajnost kolnika nekoliko desetljeća. Neki od autora [4] ispitivali su otpornost betonskog kolnika na smrzavanje i odmrzavanje te tlačnu čvrstoću. Prilikom pripremanja betona dodali su određenu količinu superplastifikatora i aeranata kako bi poboljšali otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, a ujedno je i dodana mala količina silicijeva dioksida. Nakon završenog istraživanja zapaža se da udio silicijeva dioksida povoljno utječe na ponašanje betonskog kolnika. Također ispitana je čvrstoća pri savijanju [5, 6], kao i koeficijent apsorpcije zvuka, otpornost na habanje i vlačna čvrstoća [7]. Osim tih ispitivanja, dodatno je ispitivana vlačna čvrstoća pri savijanju i skupljanje betonskih kolnika [8, 9]. U radovima [10-16] provedena je analiza ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava različitih sastava betonskih mješavina, nakon čega su uspostavljene određene korelacije kod ispitnih uzoraka.

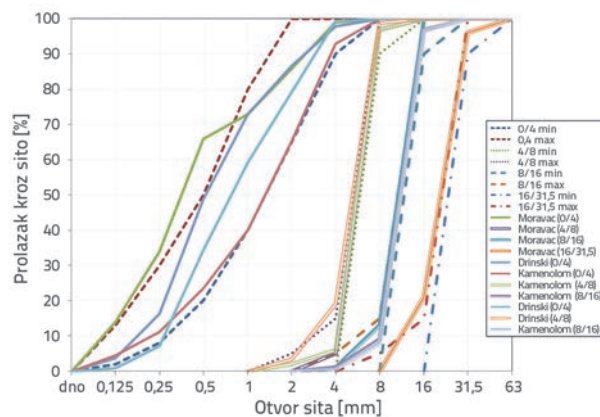
Predmet istraživanja u ovom radu su laboratorijska ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava betonskog kolnika za izradu autobusnih stajališta od nearmiranog betona s prividnim razdjelnicama (s moždanicima) u poprečnom pravcu. Fizikalno-mehanička svojstva (tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana, vlačna čvrstoća pri savijanju, otpornost na habanja suhim i mokrim

postupkom, gustoća, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje s upotrebom soli ili bez soli za odmrzavanje i vodonepropusnost betona) omogućavaju njihovu primjenu u uvjetima vrlo teškog prometa, pri čemu se produžava uporabljivost kolnika ali i smanjuju troškovi održavanja. Cilj ovog rada se temelji na ispitivanjima i usporednoj analizi fizikalno-mehaničkih svojstava betonskih mješavina za izradu autobusnih stajališta.

2. Eksperimentalno istraživanje

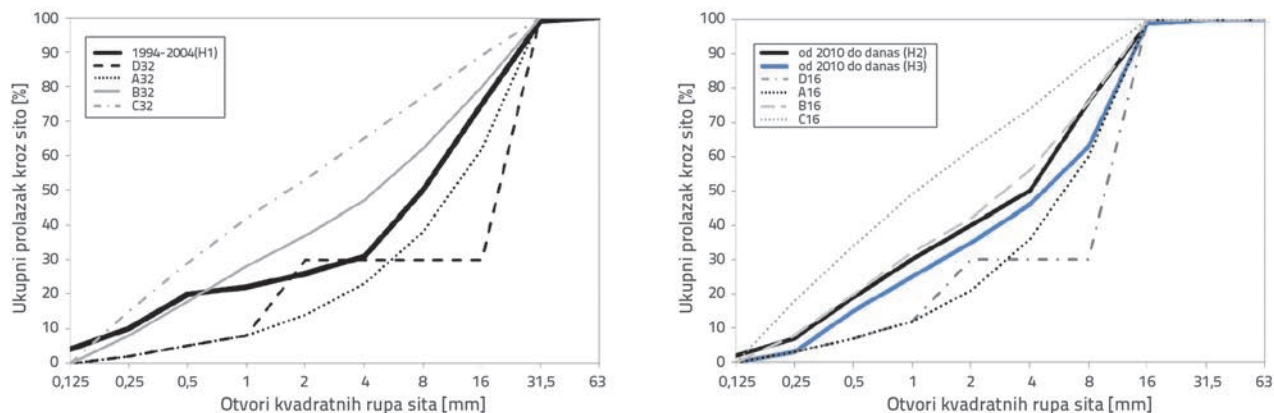
Za potrebe ovog istraživanja kao vezivo korištena su dva tipa cementa. Prvi tip cementa je portland cement s miješanim dodatkom letećeg pepela i vapnenca (CEM II/B-M (V-L) 42.5R iz Beočina) korišten za mješavine H1, a drugi tip cementa (veziva) je portland cement s miješanim dodatkom granulirane zgre i vapnenca (CEM II/A-M(S-L) 42.5R) od dva različita proizvođača (LaFarge (H2) i Titan Kosjerić (H3)). Za pripremu autobusnih stajališta izgrađenih u periodu od 1994 do 2004. korištene su četiri frakcije prirodnog riječnog agregata Moravac, a za autobusna stajališta izgrađenih u periodu od 2010 do danas korištene su tri frakcije agregata koji je bio mješavina prirodnog riječnog agregata iz rijeke Drine i drobljenog agregata (nalazište je Rakovac nedaleko Novog Sada). Granulometrijske krivulje agregata prikazane su na slici 1. Na slici se primjećuje da frakcije 0.50, 0.25 i 0.125 prirodnog agregata Moravac izlaze iz referentnog područja za 16 %, 4 % i 1 %, a frakcije 0.25 i 0.125 prirodnog riječnog agregata (nalazište: rijeka Drina) za približno 1 % u oba slučaja.

Frakcija 4/8 mm prirodnog riječnog agregata (nalazište: rijeka Drina) ima 4,1 % podzrna, a prirodni agregat Moravac ima 6 % podzrna za frakciju 16/31,5 mm. Uvjeti kvalitete granulometrijskog sastava su određeni prema normama SRPS B.B2.010 [17] i SRPS B.B3.100 [18].



Slika 1. Granulometrijske krivulje agregata

Uvjeti kvalitete na graničnim područjima granulometrijskog sastava odabranih mješavina određeni su prema normi SRPS U.M1.057 [19]. Krivulje prosijavanja i krivulje graničnih područja prikazane su na slici 2., gdje se primjećuje da odabrani prirodni agregat Moravac ima odstupanja kod



Slika 2. Granulometrijski sastav agregata s graničnim krivuljama za riječni agregat Moravac (lijevo), odnosno krivuljama za riječni agregat (nalazište: rijeka Drina) i drobljeni agregat (desno)

Tablica 1. Modul finoće sitnog agregata

Naziv uzorka (nalazišta)	Frakcija [mm]	Dobivena vrijednost modula finoće [%]	Zahtijevana vrijednost modula finoće [%]
Riječni agregat - nalazište Moravac	0/4	2,90	min. 2,3 - maks. 3,6
Riječni agregat - nalazište rijeka Drina		3,20	
Drobljeni agregat - kamenolom Rakovac		2,50	

Tablica 2. Udio sitnih čestica

Naziv uzorka (nalazišta)	Frakcija [mm]	Udio sitnih čestica [%]			
		Ispitano		Zahtijevano	
		< 0,09 mm	< 0,063 mm	< 0,09 mm	< 0,063 mm
Riječni agregat Moravac	0/4	1,20	0,00	maks. 5 (10) %	
	4/8	0,90	0,10	maks. 1 %	
	8/16	0,70	0,30	maks. 1 %	
	16/31,5	0,40	0,20	maks. 1 %	
Riječni agregat Drina	0/4	1,10	0,00	maks. 5 (10) %	
	4/8	0,80	0,30	maks. 1 %	
	8/16	0,50	0,30	maks. 1 %	
Drobljeni agregat iz kamenoloma Rakovac	0/4	1,00	0,00	maks. 5 (10) %	
	4/8	0,80	0,20	maks. 1 %	
	8/16	0,60	0,40	maks. 1 %	

udjela sitnih čestica agregata, a prirodni riječni agregat Drina i drobljeni agregat iz kamenoloma pogodni su za proizvodnju betonskog kolnika.

Osim granulometrijskog sastava agregata, ispitan je modul finoće agregata 0/4 mm, udio sitnih čestica agregata, otpornost agregata na drobljenje (Los Angeles) i otpornost zrna drobljenog agregata prema zamrzavanju. Modul finoće agregata 0/4 mm ispitan je prema normi SRPS B.B2.010 [17]. Dobiveni rezultati ispitivanja modula finoće prikazani su u tablici 1.

Rezultati ispitivanja sadržaja udjela čestica agregata po frakcijama prikazani su u tablici 2. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom SRPS B.B8.036 [20]. U tablici su dane ispitne

i zahtijevane vrijednosti, pažeći pri tome da je udio sitnih čestica u propisanim granicama prema standardu [20].

Tehnički uvjeti za ispitivanje riječnog i drobljenog agregata na otpornost prema drobljenju dobiveni su tzv. postupkom Los Angeles. Ispitane vrijednosti su izvršene prema standardom SRPS B.B8.045 [21] i prikazani su u tablici 3., gdje su prikazane i rezultati ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Otpornost agregata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ispitano je za veličinu zrna veću od 4 mm i ispitivanje je provedeno u skladu s normom SRPS B.B8.044 [22]. Nakon prikazanih ispitivanja agregata, primijećeno je da svi ispitivani agregati ispunjavaju propisane tehničke uvjete.

Tablica 3. Ispitivanje otpornosti drobljenog agregata metodom Los Angeles i otpornosti agregata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Uzorci ispitivanja	Otpornost agregata na drobljenje (Los Angeles)		Otpornost agregata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	
	Ispitne vrijednosti [%]	Maksimalne vrijednosti [%]	Ispitne vrijednosti [%]	Maksimalne vrijednosti [%]
Riječni agregat Moravac	28,00	40,00	0,56	5,00
Riječni agregat Drina	27,00	40,00	0,24	5,00
Drobljeni agregat iz kamenoloma Rakovac	15,00	40,00	2,10	5,00

Tablica 4. Parametri za definiranje habajućeg sloja cementnobetonkih ploča

Prometno opterećenje	Otpornost kamenog agregata na drobljenje (Los Angeles)		Otpornost zrna kamenog agregata veličine veće od 4 mm na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	
	Ispitni uzorci [%]	Maksimalna vrijednost [%]	Ispitni uzorci [%]	Maksimalna vrijednost [%]
vrlo teško	15,00	16,00	2,10	3,00
teško		18,00		
ostalo		22,00		

Propisane vrijednosti karakteristika agregata za pripremu betonske mješavine koje su korištene za habajući sloj betonskog kolnika određene su još i prema normi [23]. Ispitne i granične vrijednosti rezultata prikazane su u tablici 4. Rezultati ispitivanja drobljenog agregata ispunjavaju uvjete koji su propisani prema normi [23]. Autobusna stajališta koja su izrađena u periodu od 1994. do 2004. godine ne ispunjavaju uvjete svojstva agregata jer je normom propisano da za izradu habajućeg sloja betonskog kolnika za sve vrste prometnih opterećenja, mora sadržati iznad 8 mm najmanje 50 % mase drobljenih zrna. Riječni agregat ima bolja svojstva u pogledu ugradljivosti i obradljivosti, a drobljeni agregat ima veću hrapavost i bolja fizikalno-mehanička svojstva betonskih mješavina.

Za spravljanje betonskih mješavina upotrijebljena je voda iz gradskog vodovoda, a i određena količina aditiva. Mješavina H1 (1994–2004) se razlikuje po vrsti cementu, a i po vrsti agregata. Za agregat su korištene četiri frakcije riječnog agregata Moravac, a za mješavinu H2 (2010 do danas) korištena je druga vrsta

cementa. Za agregat je korišten riječni agregat Drina za frakciju 0/4 mm i to u količini od 30 %, dok ostalih 20 % prve frakcije (0/4mm) predstavlja drobljeni agregat, a druga (4/8 mm) i treća (8/16 mm) frakcija su spravljene od drobljenog agregata iz kamenoloma Rakovac. Mješavina H3 (2010. do danas) pripremljena je od iste vrste cementa kao i mješavina H2 samo drugog proizvođača, dok je za agregat korišten riječni agregat Drina za prvu (0/4 mm) i drugu (4/8 mm) frakciju, a za treću (8/16 mm) frakciju je korišten drobljeni agregat iz kamenoloma. Sastojci betonskih mješavina H1, H2 i H3 prikazani su u tablici 5. Ukupno su pripremljene tri mješavine s različitim udjelima agregata, različitom vrstom cementa, vode i dodataka. U periodu od 1994. do danas provedena je nova normizacija, pa su i JUS standardi promijenjeni u skladu sa srpskom normizacijom (SRPS). U periodu kada su pripremljene prethodne mješavine H1 tlačna čvrstoća je ispitana na uzorcima kocke veličine 20 x 20 x 20 cm prema JUS-u U.M1.020 [24], a na mješavinama H2 i H3 tlačna čvrstoća je ispitana na uzorcima kocke veličine 15 x 15

Tablica 5. Količine sastojaka za 1m³ betona

Sastojci mješavine [kg/m ³]		H1		H2		H3	
Cement		a)420,00		b)400,00		c)431,00	
Agregat	0/4	30 %	1776,00	50 %	1796,00	43 %	1727,00
	4/8	18 %		24 %		17 %	
	8/16	20 %		26 %		40 %	
	16/31,5	32 %		-		-	
Dodatak 1		(Reobet aerant) 0,80		(Sika viscoCrete 3070) 3,60		(Fluiding M1M, Ading) 5,18	
Dodatak 2		(Reobet SPRD 80) 4,20		(Sika Aer) 0,05		(Pročinitelj, Ading) 0,39	
Voda		170,00		170,00		166,00	
Vodocementni omjer		0,405		0,425		0,384	

a)-PC 35M (V-L) 42,5R (Beočin); b)-CEM II/A-M(S-L) 42,5R (LaFarge); c)-CEM II/A-M(S-L) 42,5R (Titan Kosjerić)

x 15 cm prema normi SRPS ISO 4012. Kako bi se uspostavila analiza tlačne čvrstoće tih rezultata, usvojen je koeficijent konverzije koji iznosi 0,95 da bi se uzorci koji su ispitani na kockama 20 x 20 x 20 cm mogli usporediti s rezultatima tlačne čvrstoće na uzorcima 15 x 15 x 15 cm [25]. Ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava betonskog kolnika su sljedeća:

- tlačna čvrstoća
- čvrstoća pri savijanju
- gustoća
- otpornost na djelovanje habanja
- određivanje prodora vode pod tlakom
- otpornost na smrzavanje i odmrzavanje - oštećenje unutrašnje strukture
- otpornost na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli.

2.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća definira se kao prosječno naprezanje u uzorku izloženom aksijalnom tlaku pri sili loma, a za slučaj određene starosti betona. Tlačna čvrstoća ispitana je na betonskim kockama 20 x 20 x 20 cm, odnosno 15 x 15 x 15 cm, na osnovi čega je definiran razred tlačne čvrstoće betona. Uzorci su njegovani u vlažnoj komori i ispitivani nakon 7 i 28 dana. Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je prema JUS-u U.M1.020 [24] za očvrnule betonske mješavine u periodu od 1994. do 2004. (H1), odnosno ispitana je tlačna čvrstoća prema normi SRPS ISO 4012:2000 [26] za betonske mješavine u periodu od 2010. do danas (H2 i H3).

2.2. Čvrstoća pri savijanju

Čvrstoća pri savijanju se ispituje na betonskim prizmama dimenzija 10 x 10 x 40 cm, koje se njeguju 28 dana u vlažnoj komori. Čvrstoća pri savijanju ispitana je prema JUS-u U.M1.010 [27] za betonsku mješavinu H1, odnosno prema normi SRPS ISO 4013:2000 [28] za betonske mješavine H2 i H3.

2.3. Otpornost na djelovanje habanja

Otpornost na djelovanje habanja jedan je od ključnih elemenata prilikom ispitivanja betonskog kolnika na autobusnim stajalištima. Habanje se ispituje na betonskim kockama dimenzija 7,1 x 7,1 x 7,1 cm i to tzv. suhim postupkom, gdje maksimalan gubitak mase ne smije biti veći od 18 cm³/50 cm², odnosno mokrim postupkom gdje je maksimalni dopušteni gubitak 35 cm³/50 cm² [29].

2.4. Određivanje prodora vode pod tlakom

Ispitivanje prodora vode pod tlakom kod betona zavisi od stupnja hidratacije cementa, poroznosti cementnog kamena, strukture pora te od svojstava cementa i pojedinačnog agregata. Vodonepropusnost betona definira se na osnovi razreda

vodonepropusnosti uz primjenu metode s slobodnim bočnim prodorom vode. Razredi su V-2, V-4, V-6, V-8 i V-12, pri čemu brojevi označavaju tlak u barima. Prodor vode pod tlakom (VDP) ispitivan je na uzorcima kocke 15 x 15 x 15 cm. Beton se smatra da je vodonepropusan ako je izmjerena dubina prodora manja od 5 cm [30].

2.5. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje

Otpornost prema smrzavanju i odmrzavanju podrazumijeva sposobnost betona da u stanju zasićenosti vodom podnese cikličko smrzavanje i odmrzavanje. Otpornost pri djelovanju mraza na cikličko smrzavanje i odmrzavanje ispitivano je na uzorcima kocke 15 x 15 x 15 cm [31], pri čemu je ispitivanje napravljeno na svakih 50 ciklusa, kako bi se došlo do što preciznijeg rezultata ispitivanja. Ispitivanje prethodnih pokusa za betonski kolnik provedi se na 250 ciklusa. Dođe li do gubitka tlačne čvrstoće više od 25 %, smatra se da betonski kolnik nije otporan na djelovanje mraza.

2.6. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli

Da bi se ispitala otpornost na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli, najprije se na površinu uzorka postavi okvir, nakon čega se nalije tropostotna otopina soli (NaCl), visine 3 mm i održava se na toj visini do početka ispitivanja. Prema normi SRPS U.M1.055 [32], propisani uzorci se točno definiraju prema načinu izlaganja djelovanja takve otopine. Poslije 25 ovakvih ciklusa mjeri se gubitak mase, a također i dubina i površina ljuštenja betona koja je bila pod utjecajem otopine soli. Nakon obavljenih ispitivanja, norma SRPS U.E3.020 [23] prikazuje kojoj grupi betonski kolnici pripadaju za izradu cesta.

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

Statistička analiza rezultata istraživanja fizikalno-mehaničkih svojstava nakon 7 i 28 dana prikazana je u tablici 6. Ovdje slijedi prikaz rezultata otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje, otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli, odnosno vrijednosti ispitivanja prodora vode pod tlakom. Vrijednosti tlačne čvrstoće koje su ispitane za mješavinu H1 podijeljene su s faktorom konverzije kako bi se dobile vrijednosti tlačne čvrstoće za betonske kocke dimenzija 15 x 15 x 15 cm. Pripremljene su tri različite vrste betonskih mješavina, a za svaka prethodna ispitivanja uzete su po tri serije uzoraka za ispitivanje. Budući da je prva mješavina pripremljena u periodu od 1994. do 2004., i za taj period je pripremljeno ukupno 30 kocki, odnosno za svaku godinu je pripremljena jedna mješavina koja sadrži tri uzorka za ispitivanje tlačne čvrstoće. Vrijednosti tlačne čvrstoće za prvu, drugu i treću seriju od po 10 uzoraka bile su u rasponu ±0,3 MPa. Uzorci pripremljeni u periodu od 2010. do 2016. nisu ispitivani svake

godine nego periodično (tijekom svake godine i pol), odnosno uzorci za tlačnu čvrstoću nakon 7 i 28 dana su pripremljeni prije izrade betonskog kolnika na autobusnim stajalištima. Ispitivanje čvrstoće pri savijanju i otpornosti prema djelovanju habanja (suhim i mokrim postupkom) ispitano je periodično za sve mješavine (tijekom svake 2 godine) pa je ukupno ispitano 27 uzoraka, odnosno za mješavinu H1 ispitano je ukupno 15 uzoraka, a za mješavine H2 i H3 ispitano je 6 uzoraka po mješavini. Aritmetička sredina (srednja vrijednost) uzorka izračunava se primjenom jednadžbe (1):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

gdje je:

\bar{x} - aritmetička sredina od n rezultata ispitivanja

x_i - vrijednost svakog pojedinačnog uzorka od n rezultata

n - broj uzoraka.

Određivanje vrijednosti standardne devijacije izvodi se pomoću jednadžbe (2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

gdje je:

σ - standardna devijacija

\bar{x} - aritmetička sredina od n rezultata ispitivanja

x_i - vrijednost svakog pojedinačnog uzorka od n rezultata

n - broj uzoraka.

Koeficijent varijacije (C_v) se određuje pomoću jednadžbe (3), pri čemu se najprije treba izračunati standardna devijacija.

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

gdje je:

C_v - koeficijent varijacije ispitivanog svojstva

σ - standardna devijacija

\bar{x} - aritmetička sredina od n rezultata ispitivanja.

U tablici 6. prikazane su srednje vrijednosti, standardne devijacije i koeficijenti varijacije dobiveni ispitivanjem. Ova statistička obrada podataka ujedno služi za određivanje odstupanja od aritmetičke sredine skupa, kao i prikaz varijabilnosti odnosno pripada li homogenom ili heterogenom skupu ($C_v < 30\%$ - homogenom skupu, $C_v > 30\%$ - heterogenom skupu), odnosno je li varijabilnost znatno niža od aritmetičke sredine. Nakon analiziranih rezultata primijećeno je da standardna devijacija zadovoljava sve uvjete prilikom ispitivanja, osim kod ispitivanja

Tablica 6. Srednja vrijednost, standardna devijacija i koeficijent varijacije rezultata u ispitivanjima očvrslulog betona

Svojstva očvrslulog betona		Betonske mješavine		
		H1	H2	H3
7-dnevna tlačna čvrstoća betona [MPa]	\bar{x}	38,03	41,07	40,67
	σ	1,50	0,85	1,10
	C_v	3,94	2,07	2,70
28-dnevna tlačna čvrstoća betona [MPa]	\bar{x}	48,2	52,9	53,03
	σ	2,05	3,34	3,45
	C_v	4,26	6,32	6,51
28-dnevna čvrstoća betona pri savijanju [MPa]	\bar{x}	6,73	6,87	6,67
	σ	0,42	0,15	0,15
	C_v	6,18	2,22	2,29
28-dnevna gustoća očvrslulog betona [kg/m ³]	\bar{x}	2398,00	2381,00	2362,00
	σ	11,55	12,12	13,61
	C_v	0,48	0,51	0,58
otpornost na djelovanje habanja* [cm ³ /50 cm ²]	\bar{x}	14,77	13,4	10,37
	σ	1,12	0,95	1,93
	C_v	7,55	7,12	18,61
otpornost na djelovanje habanja** [cm ³ /50 cm ²]	\bar{x}	31,67	29,00	21,03
	σ	1,99	2,49	0,57
	C_v	6,27	8,58	2,70

*ispitivanje otpornosti prema djelovanju habanja za suhe uzorke; **ispitivanje otpornosti prema djelovanju habanja za mokre uzorke;
 \bar{x} - aritmetička sredina; σ - standardno odstupanje; H1 - betonske mješavine u periodu od 1994. do 2004.;
H2 i H3 - betonske mješavine u periodu od 2010., do danas; C_v - koeficijent varijacije

Tablica 7. Karakteristike sastava betonskih mješavina

Br. rada	Vrsta agregata	Frakcija [mm]	Vrsta veziva	Kemijski i/ili mineralni dodatak	Vodocementni omjer (m_v/m_c)
[4]	-	0-20	portland cement	aeranti, nanoslikat, visok stupanj redukcije vode (HRWR)	0,39-0,45
[5]	vapnenac reciklirani beton	0-10	portland cement	-	0,52
[11]	riječni agregat	0-16	CEM I 42,5R	leteći pepeo, polipropilenska vlakna, plastifikatori	0,35
[13]	granit šljunak pijesak	0-20	portland cement	-	0,39-1,35
[14]	šljunak pijesak	0-20	portland cement	leteći pepeo, silikatna prašina	0,36-0,40
[15]	pijesak reciklirani agregat	0-12,5	CEM II 32,5N CEM II 42,5N	-	0,46-0,60
[16]	drobljeni kamen pijesak	0-12,5	portland cement	-	0,25-0,35
[33]	granit vapnenac riječni šljunak pijesak	-	CEM I	aeranti, leteći pepeo, retarderi, superplastifikator	0,30
[34]	vapnenac reciklirani beton pijesak	0-25	portland cement	elektrofiltarski pepeo, aeranti	0,37-0,42
[35]	drobljeni kamen pijesak	-	portland cement	aeranti, superplastifikator	0,30
[36]	vapnenac pijesak	-	portland cement	aeranti	0,21-0,34

gustoće gdje su vrijednosti standardne devijacije znatno veće u odnosu na ostale uzorke. Vrijednosti koeficijenta varijacije su niže i svi dobiveni rezultati pripadaju grupi homogenog skupa, odnosno varijabla je znatno niža od aritmetičke sredine. Vrijednost tlačne čvrstoće mješavine H1 pri starosti 7 dana iznosi 38,03 MPa, odnosno 48,2 MPa pri starosti 28 dana. Mješavine H2, njegovane u vlažnoj komori, nakon 7 dana postiču vrijednost 41,07 MPa, odnosno 52,9 MPa pri starosti 28 dana, a mješavine H3 postiču tlačnu čvrstoću nakon 7 dana od 40,67 MPa, odnosno 53,03 MPa nakon 28 dana. Smanjenje mješavine H1 iznosi oko 8 % u odnosu na tlačnu čvrstoću mješavine H2 pri starosti 7 dana, odnosno iznosi oko 10 % pri starosti nakon 28 dana. Očito da sastav mješavine (vrsta agregata, udio frakcije, vodocementni omjer i dodaci) ima utjecaj na promjene postizanja rezultata prilikom ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava.

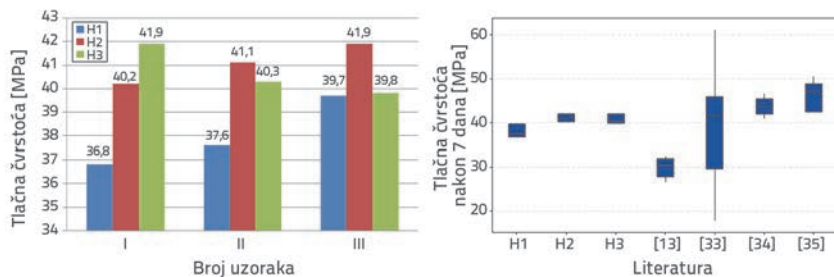
Eksperimentalna istraživanja su uspoređena s podacima iz literature, odnosno uspoređena su sljedeća fizikalno-mehanička svojstva očvrstelih betonskih mješavina:

- tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana
- čvrstoća pri savijanju nakon 28 dana
- gustoća očvrstelog betona nakon 28 dana
- otpornost na djelovanje habanja suhim postupkom.

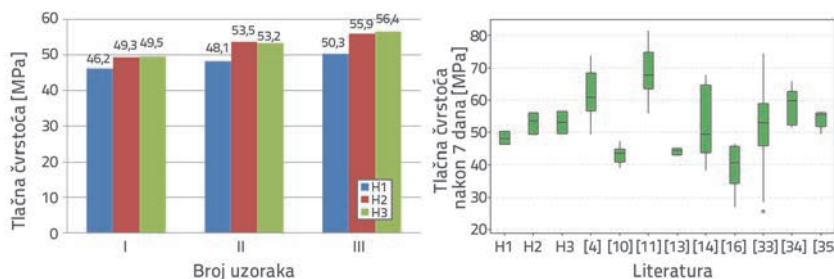
Osim osnovnih sastojaka materijala, radi postizanja većih zahtjevanih vrijednosti svježeg i očvrstelog betona, dodaju se kemijski i/ili mineralni dodaci. Karakteristike sastava betonskih mješavina koje se koriste za pripremu betonskog kolnika u analiziranoj literaturi prikazane su u tablici 7.

3.1. Tlačna čvrstoća

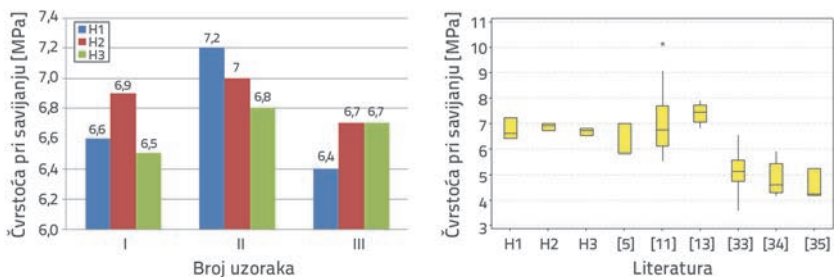
Na slici 3. lijevo prikazane su vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 7 dana ispitivanih uzoraka. Brojke I, II i III označavaju srednju vrijednost serije ispitanih uzoraka kako bi se kasnije mogli usporediti s ostalim mješavinama. Primijećeno je da uzorci mješavine H1 imaju niže vrijednosti tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke H2 i H3. Maksimalne vrijednosti tlačne čvrstoće



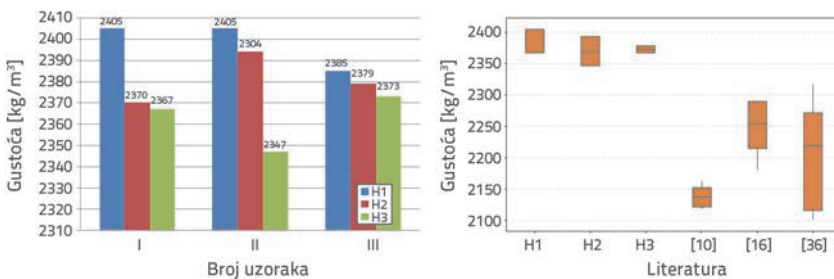
Slika 3. Tlačna čvrstoća nakon 7 dana (lijevo) i usporedni rezultati tlačne čvrstoće nakon 7 dana (desno)



Slika 4. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana



Slika 5. Čvrstoća pri savijanju



Slika 6. Gustoća

zabilježene su na uzorku H2. U usporedbi s drugim radovima, ispitne mješavine imaju osrednju vrijednost tlačne čvrstoće. Minimalne vrijednosti tlačnih čvrstoća u odnosu na ostale ispitne mješavine postignute su u radovima [13, 33] (slika 3. desno).

Značajni porast tlačne čvrstoće bilježi se pri starosti nakon 28 dana (slika 4. lijevo). Tlačna čvrstoća betona povećava se uslijed kombinacije riječnog i drobljenog agregata, odnosno zbog udjela triju frakcija agregata, kao i vrste cementa koja je

korištena za izradu betonskih mješavina H2 i H3. Maksimalne vrijednosti su postignute za mješavine H2 i H3, a minimalne vrijednosti su postignute na mješavini H1. Odstupanje rezultata između mješavina je manjeg intenziteta i iznosi približno oko 10 %. U usporedbi s literaturnim podacima (slika 4 desno), ispitne mješavine pripadaju srednjoj vrijednosti tlačne čvrstoće, jer je odstupanje rezultata otprilike od 25 MPa do 82 MPa.

3.2. Čvrstoća pri savijanju

Ispitane su i vrijednosti čvrstoće pri savijanju nakon 28 dana (slika 5.). Može se uočiti da trendovi čvrstoće pri savijanju nisu slični trendovima dobivenim za tlačnu čvrstoću nakon 28 dana. Maksimalne vrijednosti čvrstoće pri savijanju postignute su na mješavini H2. Približne vrijednosti čvrstoće pri savijanju dobivaju se kod mješavine H2 (slika 5. lijevo). Drugi autori su dobivali promjenjive vrijednosti čvrstoće pri savijanju i u velikom rasponu (3,5-10 MPa), dok je u ispitnim mješavinama H1, H2 i H3 odstupanje rezultata znatno manjeg intenziteta. Rezultati eksperimentalnih ispitnih mješavina prikazuju da su takve mješavine povoljnije za izradu betonskih kolnika u odnosu na podatke iz literature (slika 5. desno).

Nakon prikazane tlačne čvrstoće i čvrstoće pri savijanju, primijećeno je da su zadovoljeni minimalni kriteriji za teško prometno opterećenje od tlačne i vlačne čvrstoće prema normi SRPS U.E3.020 [23]. Minimalne vrijednosti tlačne čvrstoće kao i čvrstoće pri savijanju prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Zahtijevane vrijednosti tlačne čvrstoće i čvrstoće pri savijanju predviđene za prometno opterećenje [23]

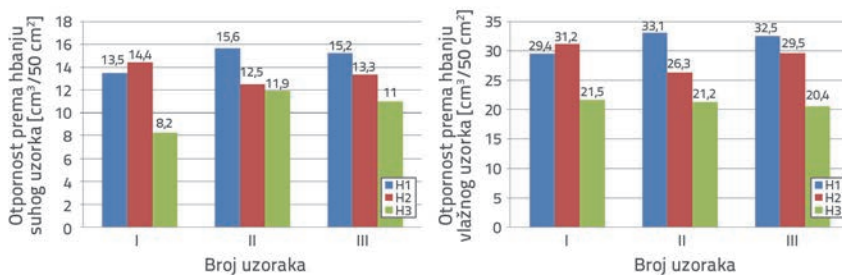
Predviđeno prometno opterećenje	Tlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća pri savijanju f_{zs} [MPa]
vrlo teško	40	5,0
teško	35	4,5
ostalo	30	4,0

3.3. Gustoća

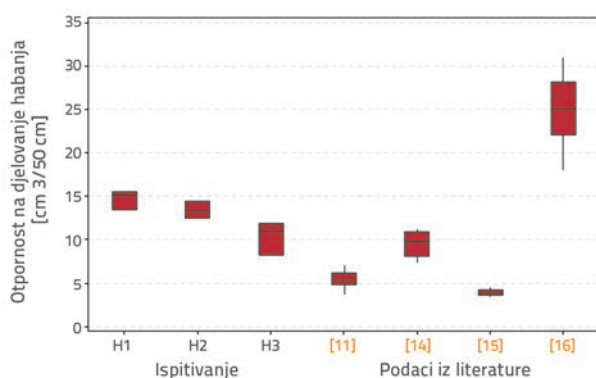
Rezultati ispitivanja gustoće za očvrstnule betonske uzorke nakon 28 dana prikazani su na slici 6. lijevo. Maksimalne vrijednosti gustoće su postignuti kod mješavine H1, a minimalne za mješavinu H3. U usporedbi s drugim vrijednostima literaturnih podataka [10, 16, 36], ispitne mješavine prikazuju maksimalne vrijednosti, a samo podaci u [10, 36] daju minimalne vrijednosti gustoće (slika 6. desno). Odstupanje rezultata ispitivanih mješavina (H1, H2 i H3) uglavnom je malog intenziteta.

3.4. Otpornost na djelovanje habanja

Na slici 7. lijevo prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na djelovanje habanja suhim postupkom, a na slici 7. desno mokrim postupkom. Ispitivanje otpornosti na habanje provodi se brušenjem habajućeg sloja u skladu s normom [29] pri starosti od 28 dana, nakon čega je utvrđeno normom [29] da gubitak mase ne smije biti veći od $18 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ u suhom stanju, odnosno $35 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ u vodom zasićenom stanju. Primijećeno je da uzorci H3 imaju niži gubitak mase za oba tipa ispitivanja otpornosti pri habanju. Maksimalne vrijednosti gubitka mase koje su prikazane u normama [23, 29] pri starosti nakon 28 dana ispunjavaju uvjete prilikom ispitivanja djelovanjem habanja suhim i mokrim postupkom za izradu betonskih kolnika. Mješavine H1 imaju kritične vrijednosti kod ispitivanja otpornosti djelovanja habanja mokrim postupkom.



Slika 7. Otpornost prema djelovanju habanja suhim postupkom (lijevo) i mokrim postupkom (desno)

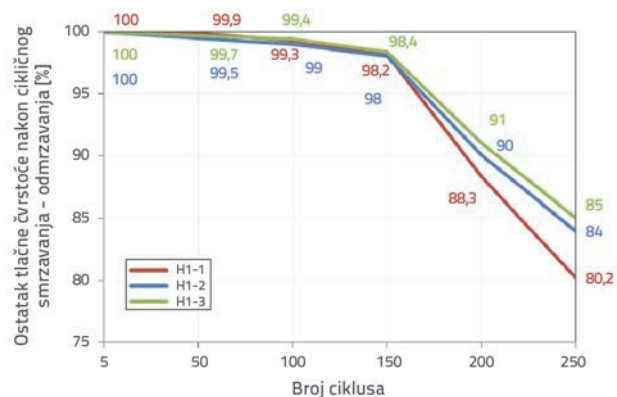


Slika 8. Otpornost na djelovanje habanja suhim postupkom

Usporedni rezultati eksperimentalnog istraživanja otpornosti prema djelovanju habanja suhim postupkom s podacima iz literature prikazani su na slici 8. Prikazani rezultati zadovoljavaju otpornost na djelovanje habanja, osim u radu [16] gdje većinski dio rezultata premašuje granicu propisanim normama [23, 29].

3.5. Otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje

Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje prikazana je na slici 9, gdje se zapažaju približno isti gubitci na 100 i 150 ciklusa.

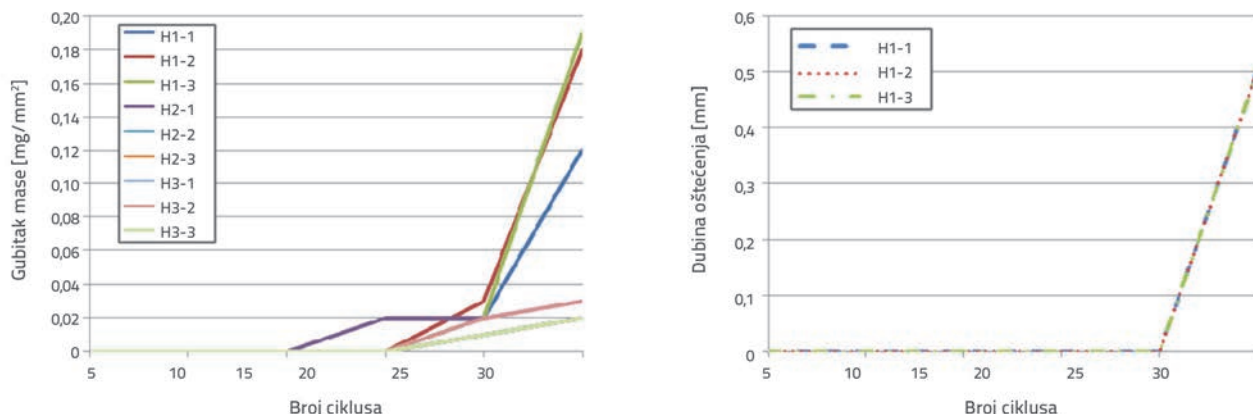


Slika 9. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje

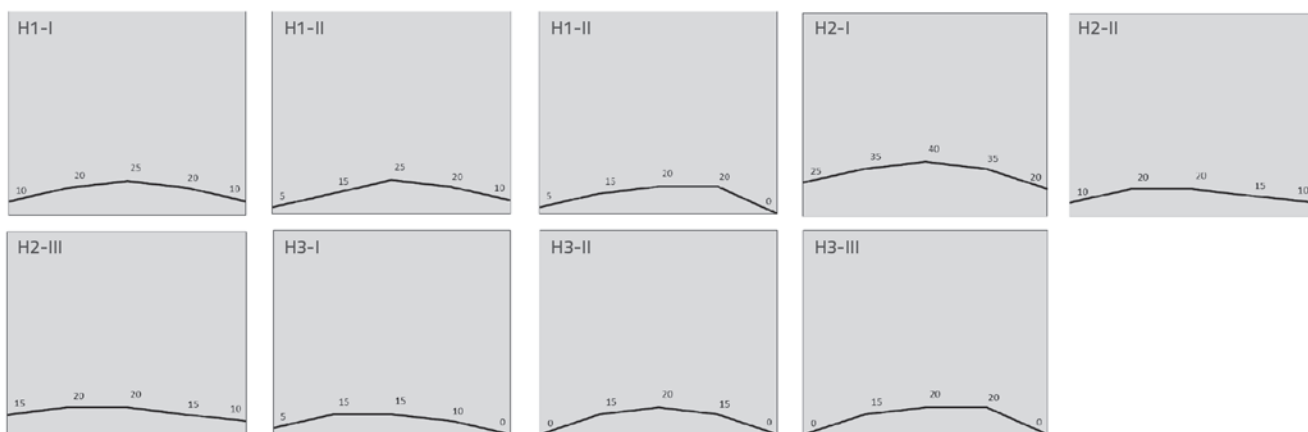
Nakon toga dolazi do značajnih gubitaka tlačne čvrstoće kod betonskih mješavina. Sve analizirane mješavine ispunjavaju uvjete, jer je gubitak tlačne čvrstoće manji od 25 % [31]. Jedina razlika koja je napravljena u ovom istraživanju u odnosu na normu [31] jest u tome što je za svakih 50 ciklusa ispitivanja spravljeno šest uzoraka, od kojih su tri etalonska uzorka koji su čuvani u vlažnoj komori, a tri uzorka su izlagani cikličnom smrzavanju-odmrzavanju.

3.6. Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli prikazani su na slici 10. Gubici mase su značajno zanemarivi kod sve tri mješavine (H1, H2 i H3), pa se ne pojavljuje dubina oštećenja kod ispitivanih uzoraka. Na osnovi dobivenih rezultata ispitivanja zaključuje se da uzorci betona ispitivani prema normi [30] u vezi sa smrzavanjem i odmrzavanjem uz djelovanje soli imaju stupanj oštećenja "0" poslije 25 ciklusa, odnosno ispitivani uzorci su otporni na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli.



Slika 10. Otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje uz djelovanje soli; gubitak mase (lijevo), dubina oštećenja (desno)



Slika 11. Grafički prikaz rezultata prodora vode pod tlakom

3.7. Prodor vode pod tlakom

Ispitivanje prodiranja vode pod tlakom napravljeno je prema normama [23, 30]. Naime, tehničkim uvjetima norme [23] je propisano da minimalni razred ne smije biti niži od V6 za betone koji su neposredno izloženi atmosferskim utjecajima. Nakon svega, na slici 11. su prikazani rezultati ispitivanja, gdje se zapaža da je veća propusnost vode pod tlakom kod mješavine H2 nego kod mješavina H1 i H3. Sve ispitivane mješavine ispunjavaju uvjete, jer je prodor vode bio manji od 5 cm.

4. Zaključak

Nakon analiziranih mješavina i prikazanih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Granulometrijski sastav riječnog agregata Moravac ima određenu količinu zrna koja odstupaju iz referentnog područja kod frakcije 0/4 mm i frakcije 16/31.5 mm agregata, dok granulometrijski sastav za mješavinu H3 ima manju količinu koja odstupa iz referentnog područja za frakciju 0/4 mm agregata.
- Ispitivanjem svojstava agregata primjenom norme SRPS U.E3.020, riječni agregat Moravac ne ispunjava uvjete u pogledu minimalnog udjela od 50 % drobljenog agregata

za frakcije iznad 8 mm, dok ispitivana svojstva agregata u kombinaciji drobljenog agregata i riječnog agregata Drina ispunjavaju zahtijevane uvjete.

- Ispitne mješavine H1, H2 i H3 ispunjavaju sve uvjete ispitnih fizikalno-mehaničkih svojstava očvrstelog betona za izradu kolnika na autobusnim stajalištima, pri čemu mješavina H3 ima znatno bolja svojstva.
- U usporedbi s drugim podacima iz literature, ispitne mješavine daju osrednje vrijednosti za tlačnu čvrstoću, jer u ispitnim mješavinama nisu korišteni mineralni dodaci kako bi povećali tlačnu čvrstoću, kao što je navedeno u nekim literaturnim podacima gdje se dobivaju maksimalne vrijednosti.
- Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju, gustoće i otpornosti na djelovanje habanja suhim postupkom predstavljaju maksimalne vrijednosti, jer nisu korišteni mineralni dodaci prilikom pripreme uzoraka.

Nakon prikazanih ispitivanja opći je zaključak da mješavina H1 koja je korištena u periodu 1994. do 2004. i mješavine koje se sada koriste (H2 i H3) za izradu betonskog kolnika na autobusnim stajalištima, povoljne su za izradu i na drugim državnim cestama. To je ujedno i najbolji način kako unaprijediti upotrebu betonskog kolnika s obzirom na njegovu veću nosivost i trajnost u odnosu na asfaltne kolnike.

Zahvala

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije uz čiju je pomoć, u okviru tehnološkog projekta TR 36017, provedeno istraživanje pod nazivom:

Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji, čiji je dio prikazan u ovom radu.

LITERATURA

- [1] Pozder, M.: Fleksibilna naspram krutih kolovoznih konstrukcija, Simpozijum Betonske saobraćajnice, Sarajevo, pp. 37-45, 2015.
- [2] Riffel, S.: Posebna rješenja za saobraćajnice na bazi hidrauličkih vezanih materijala - novi pogled na obnovu i poboljšanje infrastrukture, Simpozijum Betonske saobraćajnice, Sarajevo, pp. 2-22, 2015.
- [3] Giergiczny, Z.: Zašto koristiti beton u izgradnji saobraćajnica? Činjenice i mitovi, Simpozijum Betonske saobraćajnice, Sarajevo, pp. 23-29, 2015.
- [4] Gonzalez, M., Tighe, S., Hui, K., Rahman, S., Oliveira Lima, A.: Evaluation of freeze/thaw and sacling response of nanoconcrete for Portland Cement Concrete (PCC) pavement, Construction and Building Materials, 120 (2016), pp. 465-472, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.043>
- [5] Damodar Supe, J., Gupta, M.K.: Flexural Strength - A Measure to Control Quality of Rigid Concrete Pavements, International Journal of Scientific & Engineering Research, 5 (2014) 11, pp. 46-57.
- [6] Sarsam, S.I.: Influence of Nano Materials Addition as Partial Replacement of Cement in the Properties of Concrete Pavement, Journal of Nanoscience and Nanoengineering, 2 (2016) 1, pp. 1-5.
- [7] Gonzalez, M., Safiuddin, M., Cao, J., Tighe S.: Sound Absorption and Friction Response of Nano-concrete for Rigid Pavements, Journal of the Transportation Research Board, (2013), pp. 87-94, <https://doi.org/10.3141/2369-10>
- [8] Lane, D.S.: Evaluation of Concrete characteristics for rigid pavements, Virginia Transportation Research Council, 1998.
- [9] Zhang, J., Harvey, J., Ali, A., Roesler, J.: Goal 4 Long Life Pavement Rehabilitation Strategies - Rigid: Laboratory Strength, Shrinkage, and Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete Mixes, Report prepared for the California Department of Transportation (Caltrans), 2004.
- [10] Humpola, B., Bullen, F., Knapton, J.: Quick quality control of concrete block pavers in Australia, The Fifth International Conference on Concrete Block Paving, Tel-Aviv, Israel, pp. 55-64, 1996.
- [11] Atis, C.D., Karahan, O., Ari, K., Sola, O.C., Bilim, C.: Relation between Strength Properties (Flexural and Compressive) and Abrasion Resistance of Fiber (Steel and Polypropylene)-Reinforced Fly Ash Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, (2009), pp. 402-408, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:8\(402\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:8(402))
- [12] Atis, C.D., Celik, O.N.: Relation between abrasion resistance and flexural strength of high volume fly ash concrete, Materials and Structures, 35 (2002), pp. 257-260, <https://doi.org/10.1617/13827>
- [13] Krishna Rao, S., Sravana, P., Chandrasekhar Rao, T.: Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS, Construction and Building Materials, 114 (2016), pp. 925-933, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.004>
- [14] Turk, K., Karatas, M.: Abrasion resistance and mechanical properties of self-compacting concrete with different dosages of fly ash/silica fume, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 18 (2011), pp. 49-60.
- [15] Gencil, O., Ozel, C., Koksai, F., Erdogmus, E., Martinez-Barrera, G., Brostow, W.: Properties of concrete paving blocks made with waste marble, Journal of Cleaner Production, 21 (2012), pp. 62-70.
- [16] Aslantas, O.: A study on abrasion resistance of concrete paving blocks, Master thesis, The Graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, 2004.
- [17] SRPS B.B2.010: Seperisani agregat (granulat) za beton, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1986.
- [18] SRPS B.B3.100: Frakcionisani kameni agregat za beton i asfalt, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1983.
- [19] SRPS U.M1.057: Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1984.
- [20] SRPS B.B8.036: Određivanje količine sitnih čestica metodom mokrog sejanja, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1982.
- [21] SRPS B.B8.045: Ispitivanje prirodnog i drobljenog agregata mašinom Los Angeles, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1978.
- [22] SRPS B.B8.044: Ispitivanje postojanosti prema mrazu natrijum sulfatom, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1982.
- [23] SRPS U.E3.020: Tehnički uslovi za izradu cementnobetonskog kolovoza, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1987.
- [24] JUS U.M1.020: Određivanje čvrstoće pri pritisku betonskih tela izrađenih od svežeg betona, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1993
- [25] Grupa autora: Pravilnik za beton i armirani beton 87 - Tom 1 Priručnik, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1995.
- [26] SRPS ISO 4012:2000: Beton-Određivanje čvrstoće epruvete pri pritisku, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2000.
- [27] JUS U.M1.010: Ispitivanje čvrstoće betona na zatezanju pri savijanju prizmi, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1957
- [28] SRPS ISO 4013:2000: Beton-Određivanje čvrstoće epruvete pri savijanju, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2000.
- [29] SRPS B.B8.015: Ispitivanje otpornosti prema habanju brušenjem, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1984.
- [30] SRPS U.M1.015: Očvrslu beton-Određivanje prodiranje vode pod pritiskom, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1998.
- [31] SRPS U.M1.016: Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1992.
- [32] SRPS U.M1.055: Ispitivanje otpornosti površine betona na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 1984.

- [33] Yuan, D., Smith, K., Ansari, F., Gonzalez, C.: Acceptance Criteria of Airfield Concrete Pavement Using Seismic and Maturity Concepts: Appendices, Research Report Innovative Pavement Research Foundation (Skokie), 2006.
- [34] Sadati, S., Khayat, K.: Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 126 (2016), pp. 691-700.
- [35] Tia, M., Kumara, W.: Evaluation of Early Strength Requirement of Concrete for Slab Replacement Using APT, Final Report Department of Civil&Coastal Engineering, University of Florida, Gainesville, 2005.
- [36] Ghafoori, N., Smith, D.R.: Comparison of ASTM and Canadian Freeze-Thaw Durability Tests, *The Fifth International Conference on Concrete Block Paving*, Tel-Aviv, Israel, pp. 93-101, 1996.