

MOGUĆNOST PRIMENE BAKARNE ZGURE U ASFALTNIM MEŠAVINAMA

Jelena Đorđević, mast.inž.građ.

Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru, djordjevic.jelena030@gmail.com

Marko Orešković, mast.inž.građ.

Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, moreskovic@grf.bg.ac.rs

dr Goran Mladenović, dipl.inž.građ.

Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

DOI: 10.31075/PIS.64.04.04

Stručni rad

Rezime: Brz industrijski razvoj tokom poslednjih decenija doveo je do stvaranja raznovrsnog industrijskog otpada koji nameće ozbiljne ekološke probleme. U više navrata su vršeni pokušaji da se poveća ponovna upotreba otpadnih i alternativnih materijala za izgradnju građevinskih objekata. Jedan od tih materijala je i bakarna zgura koja nastaje topljenjem i preradom rude bakra. Cilj ovog rada je istraživanje mogućnosti primene bakarne zgure iz RTB-a Bor u asfaltnim mešavinama za habajuće slojeve kolovoznih konstrukcija. U tu svrhu izvršeno je ispitivanje dve grupe asfaltnih mešavina AB11s sa različitim procentom sadržaja bakarne zgure, kao delimične zamene prirodnog agregata. Procentualno učešće bakarne zgure u mešavinama je 25% i 50% frakcija 2/4, 4/8 i 8/11,2 mm. Dobijeni rezultati su upoređivani sa kontrolnom mešavinom. Pored fizičko – mehaničkih karakteristika zgure (zapreminske mase, upijanja vode, drobljivosti materijala, prionljivosti zrna za bitumen, oblika zrna), predmet ovog istraživanja je projektovanje asfaltnih mešavina po metodi Maršala i ispitivanje otpornosti mešavina na dejstvo vode, krutosti mešavina i otpornosti na trajnu deformaciju. Rezultati ovih ispitivanja pokazuju da asfaltne mešavine sa zgurom imaju veću otpornost na dejstvo vode, ali i smanjenu otpornost na trajnu deformaciju, manju krutost na niskim frekvencijama (visokim temperaturama) i veću krutost pri visokim frekvencijama (niskim temperaturama).

Ključne reči: bakarna šljaka, asfaltne mešavine, otpornost na dejstvo vode, krutost, orpornost na trajnu deformaciju

THE POSSIBILITY OF THE APPLICATION OF COPPER SLAG IN ASPHALT MIXTURES

Jelena Đorđević, M. Sc. CE

Institute of Mining and Metallurgy in Bor, djordjevic.jelena030@gmail.com

Marko Orešković, M. Sc. CE

University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, moreskovic@grf.bg.ac.rs

Goran Mladenović, Ph. D. CE

University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Professional paper

Abstract: Rapid industrial development over the last decades has led to the creation of a diversified industrial waste that poses serious environmental problems. On several occasions attempts have been made to increase the reuse of waste and alternative materials for the construction of civil engineering structures. One of these materials is the copper slag that is byproduct of melting and processing of copper ore. The objective of this paper is to investigate the possibility of using copper slag from RTB Bor in asphalt mixtures for wearing courses of pavement structures. For this purpose, the testing of two asphalt mixtures AB11s with different percentages of the content of copper slag, as a partial replacement of the natural aggregate, was carried out. The replacement percentage of copper slag was 25% and 50% of fractions 2/4, 4/8 and 8/11.2 mm. The obtained results were compared with the control mixture. In addition to the physico-mechanical characteristics of the slag (density, water absorption, toughness and abrasion characteristics, affinity between slag and bitumen, particle shape), the subject of this research is the design of asphalt mixtures according to the Marshall method and testing of the water resistance, stiffness and resistance to permanent deformation of asphalt mixtures with slag. The results of these tests show that asphalt mixtures with copper slag have better water resistance, but lower resistance to permanent deformation, lower stiffness at low frequencies (high temperatures) and higher stiffness at high temperatures (low frequencies).

Key words: copper slag, asphalt mixtures, water resistance, stiffness, rutting resistance

1.UVOD

Jedan od otpadnih materijala koji predstavlja veliki ekološki problem u našoj zemlji zbog velikih deponija ovog industrijskog nusprodukta je bakarna zgura Rudarsko topioničarskog basena (RTB) Bor.

Bakarna zgura se dobija metalurškom preradom koncentrata bakra. Ovaj materijal se odlikuje visokim sadržajem bakra i plemenitih metala.

Na osnovu podataka International Copper Study Group [1] proizvodnja bakra je 2016. godine dostigla 23.000.000 t, od čega je pirometalurškom preradom sulfidnih koncentrata proizvedeno oko 19.000.000 t.

Uzimajući u obzir da na svaku tonu proizvedenog bakra nastaje oko 2,2-3 t zgure u svetu [2], dolazi se do podatka da je u 2016. god. generisano oko 45.000.000 t zgure koja se tradicionalno odlaže kao otpadni materijal.



Slika 1. Deponija bakarne zgure u Boru

Mogućnost primene bakarne zgure, iz koje nije ekonomično ponovo izdvajati bakar, je veoma velika. Zgura se koristi kao dodatak u proizvodnji abrazivnih i reznih alata i abraziva, keramičkih pločica, stakla, cementa, maltera i betona, asfaltnih mešavina i dr. Ovim materijalom se mogu zatrpavati otkopni prostori u rudnicima, a najgora opcija je odlaganje zgure na deponiju. [3]

Primer upotrebe ove vrste materijala u građevinskoj industriji je rekonstrukcija oko 100 km puteva u Švedskoj. Naime, u Boliden's Ronnskar topionici (Švedska) dobija se granulirana zgura koja ima komercijalni naziv Iron Sand (FeSiO_2) i kao dobar termoizolacioni i drenažni materijal je naročito pogodna za izradu puteva i podzemnih konstrukcija u hladnim klimatskim uslovima, a može se koristiti i za peskarenje. [3]



Slika 2. Rekonstrukcija ulice korišćenjem granulirane zgure - Boliden Iron Sand u Švedskoj [3]

U RTB Bor svakodnevno nastaje od 700 do 1000t zgure, u zavisnosti od kapaciteta prerade. Procenjeno je da je na teritoriji opštine Bor deponovano više od 23 miliona tona zgure na deponijama koje se nalaze neposredno u blizini prerađivačkih kapaciteta. [3], [4]

Cilj istraživanja prikazanih u ovom radu je bio da se utvrdi mogućnost primene otpadne (deponovane) bakarne zgure iz RTB-a Bor u asfaltnim mešavinama za habajuće slojeve kolovoznih konstrukcija.

2. METODOLOGIJA I MATERIJALI

U okviru predmetnih istraživanja izvršena su ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika asfaltnih mešavina AB11s sa različitim procentom sadržaja bakarne zgure iz RTB-a Bor. Dobijeni rezultati su upoređeni sa karakteristikama kontrolne mešavine napravljene sa prirodnim agregatom.

Osim kontrolne mešavine, ispitane su još dve grupe mešavina sa sadržajem bakarne zgure, kao delimične zamene prirodnog agregata. U prvoj grupi, 25% prirodnog agregata frakcija 2/4 mm, 4/8 mm i 8/11.2 mm zamenjeno je odgovarajućim frakcijama bakarne zgure, dok je u drugoj grupi mešavina izvršena zamena od 50% identičnih frakcija, kao i u prvoj grupi.

Za spravljanje asfaltnih mešavina korišćen je putni bitumen 50/70 iz Rafinerije nafte Pančevo.

Nakon projektovanja asfaltnih mešavina po metodi Maršala, napravljeni su uzorci odgovarajućih dimenzija za sledeća ispitivanja:

- otpornost na dejstvo vode (prema SRPS EN 12697-12, metoda A)
- krutost (prema SRPS EN 12697-26, aneks C)
- otpornost na trajnu deformaciju (prema SRPS EN 12697-22, aneks B, mali uređaj).

Na osnovu dobijenih rezultata istraživanja, formirane su master krive radi detaljnije analize krutosti u odnosu na temperaturu i frekvenciju.

2.1 Komponentalni materijali

Laboratorijskim opitima izvršena su ispitivanja osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika komponentalnih materijala za potrebe projektovanja mešavina, a na osnovu rezultata su sagledani uticaji koje svaka od komponenata može imati na svojstva asfaltnih mešavina.

Ispitivanja kamenog agregata i bitumena rađena su u Laboratoriji TPA u Čačku [19], dok su ispitivanja bakarne zgure sprovedena u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

2.1.1 Agregat

U svim asfaltnim mešavinama korišćen je sledeći kameni agregat:

- kameni brašno – Gradac – TEKO Mining d.o.o. Beograd,
- frakcija 0/2 mm – „Koviloča“, Despotovac,
- frakcija 2/4 mm – „Metalfer“, Divčibare,
- frakcija 4/8 mm – „Metalfer“, Divčibare,
- frakcija 8/11 mm – „Metalfer“, Divčibare.

U tabeli 1 i na slici 3 prikazan je granulometrijski sastav kamenog brašna i frakcija kamenog agregata, a u tabelama 2 - 6 njihove fizičko – mehaničke karakteristike.

Tabela 1. Granulometrijski sastav kamenog brašna i frakcija kamenog agregata 0/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm i 8/11 mm

Otvor Sita (mm)	Kameno brašno	Frakcija			
		0/2 mm	2/4 mm	4/8 mm	8/11 mm
Prolaz na situ (%)					
dno	-	-	-	-	-
0.063	77.0	9.7	0.9	0.3	0.2
0.090	86.6	12	1	1	0
0.25	98.4	23			
0.71	100	50			
2.0		95	27	2	
4.0		100	90	18	1
8.0			100	92	16
11.2				100	94
16.0					100

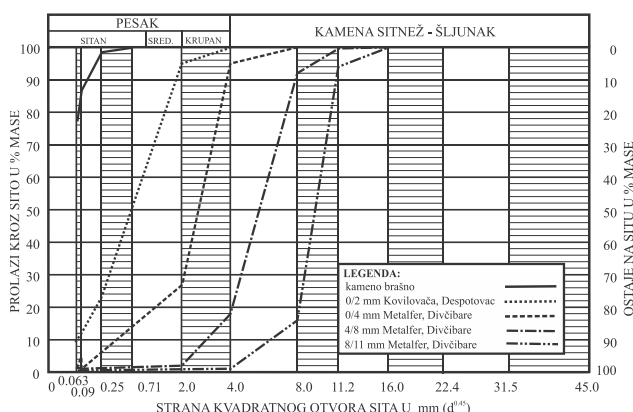

Slika 3. Granulometrijske krive kamenog brašna i frakcija kamenog agregata

Tabela 2. Fizičko-mehaničke karakteristike kamenog brašna

Karakteristika	Metoda ispitivanja	Jedinica mere	Vrednost
Gustina	SRPS EN 1097-7	kg/m ³	2832
Šupljine punila u suvosabijenom stanju po Rigdenu	SRPS EN 1097-4	%	32,7

Tabela 3. Fizičko-mehaničke karakteristike frakcija kamenog agregata

Metoda ispitivanja	Karakteristika		
	Gustina	Upijanje vode	Ekvivalent peska
Jedinica mere	SRPS EN 1097-6	SRPS EN 1097-6	SRPS EN 933-8
	kg/m ³	%	%
Frakcija			
0/2 mm	2721		70
2/4 mm	2811		
4/8 mm	2803	0.7	
8/11 mm	2801		

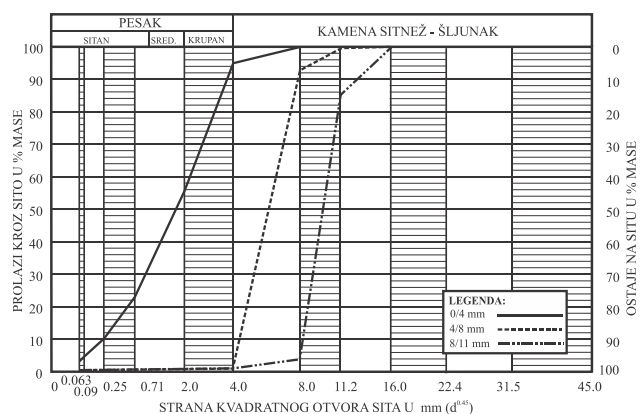
2.1.2 Bakarna zgura

Za potrebe ispitivanja karakteristika bakarne zгурe sa deponije RTB Bor uzeti su uzorci sa 3 lokacije i formiran je reprezentativni uzorak. Na odlagalištu se bakarna zgura javlja u vidu drobine različitih veličina zrna (0-60mm). Zrna su tamno sive boje, kubičastog oblika i oštih ivica. Uzorci zгурe koji su korišćeni za ispitivanje u ovom radu su drobljeni u laboratorijskoj drobilici i dobijen materijal je prosejan kroz sistem sita i podeljen na frakcije. Na uzorcima pripremljenim na ovaj način vršena su ispitivanja granulometrijskog sastava, zapreminske mase, upijanja vode, drobljivosti materijala (metoda Los Angeles - LA), prionljivosti bitumen za zrna i oblika zrna, u skladu sa važećim standardima.

Granulometrijski sastav dobijenih frakcija šljake je prikazan u tabeli 4, a grafički prikaz granulometrijskih krivih je dat na slici 4.

Tabela 4. Granulometrijski sastav bakarne šljake frakcija 0/4 mm, 4/8 mm i 8/11,2 mm

Otvor sita (mm)	Frakcija		
	0/4 mm	4/8 mm	8/11,2 mm
Prolaz na situ (%)			
Dno	-	-	-
0.063	3.20	0.10	0.10
0.090	4.60	0.10	0.10
0.25	10.10	0.20	0.20
0.71	22.80	0.20	0.20
2.0	55.90	0.20	0.30
4.0	94.90	0.40	0.40
8.0	100	92.60	3.90
11.2		99.90	85.20
16.0		100	100


Slika 4. Granulometrijske krive frakcija bakarne zгурe

Osnovni razlog za preradu zгурe u drobilici je njena velika upotrebna vrednost, jer je materijal u tom obliku posebno pogodan za primenu u asfaltnim mešavinama i izradu slojeva gornje podloge i zastora.

Fizičko-mehaničke karakteristike drobljene bakarne zgure prikazane su u tabeli 5.

Tabela 5. Fizičko-mehaničke karakteristike drobljene bakarne zgure

Karakteristike	Metoda ispitivanja	Jedinica mere	Vrednost
Zapreminska masa	SRPS EN 1097-6	kg/m ³	3220
Upijanje vode	SRPS EN 1097-6	%	1,1
Oblik zrna	SRPS EN 933-4	%	6,7
Obavijenost	SRPS U.M8.096	%	100/100
Koeficijent Los Angeles	SRPS EN 1097-2	%	9,8

Značajno je primetiti da je zapreminska masa zgure za oko 15% veća od zapremisne mase odgovarajućih frakcija kamenog agregata.

2.1.3 Bitumen

Fizičko-mehaničke karakteristike putnog bitumena B50/70 su prikazane u tabeli 6.

Tabela 6. Fizičko-mehaničke karakteristike bitumena 50/70

Karakteristika	Metoda ispitivanja	Jedinica mere	Vrednost
Penetracija iglom na 25°C	SRPS EN 1426	1/10 mm	55,9
Tačka razmekšanja	SRPS EN 1427	°C	48,9
Indeks penetracije	SRPS EN 12591	-	-1,1
Specifična težina na 25°C	SRPS EN 15326	kN/m ³	1.03

2.2 Projektovanje asfaltnih mešavina

2.2.1 Mineralna mešavina

Mineralnu mešavinu čine kameno brašno i kameni agregat. U okviru ovog rada, određen procenat pojedinih frakcija kamenog agregata je zamenjen bakarnom zgurinom.

Tabela 7. Učešće frakcija kamenog agregata i zgure u asfaltnim mešavinama

Frakcija	Kontrolna mešavina	Mešavine sa zgurinom	
		25% zgure	50% zgure
Učešće (% m/m)			
Kameno brašno	5,6	5,6	5,6
Pesak 0/2 Kovilovača	32,0	32,0	32,0
2/4 Metalfer	16,0	12,0	8,0
2/4 ZGURA		4,0	8,0
4/8 Metalfer	25,0	18,75	12,5
4/8 ZGURA		6,25	12,5
8/11 Metalfer	21,4	16,05	10,7
8/11 ZGURA		5,35	10,7

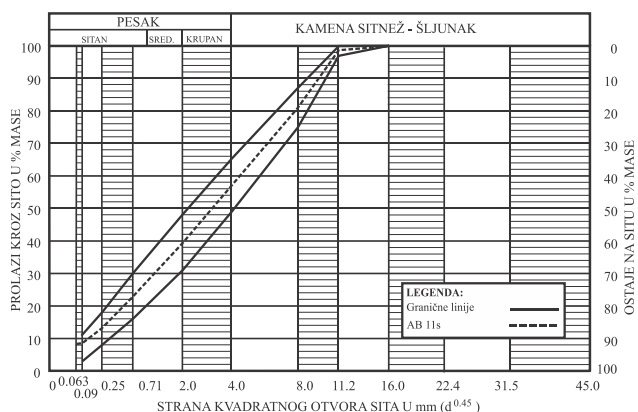
Procentualno učešće komponentalnih materijala u svim mešavinama je isto, jedina razlika je u zameni prirodnog agregata bakarnom zgurinom u jednoj mešavini 25%, a u drugoj 50% u odnosu na maseno učešće (tabela 7).

Sve ispitivane asfaltnje mešavine imaju identičnu granulometrijsku krivu, kako bi bilo omogućeno njihovo poređenje i analiza drugih karakteristika, tako da je na slici 5 prikazana samo granulometrijska kriva asfaltnje mešavine sa sadržajem zgure 25%.

Ispitivanje zapreminskih karakteristika i ispitivanje krutosti vršeno je na standardnim Maršalovim uzorcima, dok je ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju izvršeno na pločama dimenzija 26x32 cm koje su predviđene standardom.

2.2.1 Analiza zapreminske strukture i zapreminske mase

Parametri koji su analizirani prilikom ispitivanja zapreminske strukture asfaltnih mešavina su: zapreminska masa (Z_m) i maksimalna zapreminska masa (Z_{max}), procenat šupljina u asfaltnoj mešavini (V_s), procenat šupljina u mineralnoj mešavini ($V_{šmm}$), procenat šupljina ispunjenih bitumenom (V_b). Vrednosti parametara su prikazane u tabeli 8 za kontrolnu mešavinu i u tabeli 9 za mešavine sa zgurinom.



Slika 5. Granulometrijska kriva mineralne mešavine sa sadržajem zgure 25%

Tabela 8. Zapreminska struktura kontrolne asfaltnje mešavine

Vrsta uzoraka	Kontrolna mešavina		
	Z_{max}	Z_m	V_s
Maršalovi uzorci 2x50 udaraca	2533	2381	6,0
Maršalovi uzorci 2x35 udaraca	2533	2350	7,2
Ploče za kolotrage	2533	2398	5,3

Tabela 9. Zapreminska struktura asfaltnih mešavina sa sadržajem zgure

Vrsta uzoraka	Mešavine sa zgurom					
	25% zgure			50% zgure		
	Z _{max}	Z _m	V _s	Z _{max}	Z _m	V _s
Maršalovi uzorci 2x50 udaraca	2642	2464	6,7	2718	2526	7,1
Maršalovi uzorci 2x35 udaraca	2642	2431	8,0	2718	2501	8,0
Ploče za kolotrage	2642	2480	6,1	2718	2559	5,9

Iako se prilikom spravljanja i ugradnje asfaltnih mešavina različitim postupcima vodilo računa o usvojenim recepturama, izmerene vrednosti zapreminskih karakteristika na Maršalovim uzorcima i pločama za kolotrage nisu iste. Ovo je posledica pre svega različitih tehnika ugradnje (oblik uzoraka, način nanošenja opterećenja, temperatura zbijanja, itd.). Prosečne vrednosti zapreminskih karakteristika tri tipa uzoraka prikazane su u tabelama 8 i 9, gde se može uočiti da Maršalovi uzorci ugrađivani sa 2x50 udaraca imaju veću zapreminsku masu od Maršalovih uzoraka sa 2x35 udaraca kao posledica veće energije zbijanja, dok ploče za kolotrage imaju najveću zapreminsku masu. Ova odstupanja su se odrazila na sadržaj šupljina u asfaltnoj mešavini, koje su na Maršalovim uzorcima zbijenim sa 2x35 udaraca na granici dozvoljenih, a kod mešavina sa sadržajem zgure i prelaze tu granicu (dozvoljen procenat šupljina je 3,5-6,5% za habajuće asfaltno slojeve predviđene za teško saobraćajno opterećenje [20]).

Zapreminske mase mešavina sa bakarnom zgurom su očekivano veće zbog same komponente zgure koja ima veću zapreminsku masu od kamenog agregata.

2.2.2 Otpornost na dejstvo vode

Oštećenja asfaltnih slojeva kolovoznih konstrukcija usled dejstva vode posledica su narušavanja athezije između bitumena i agregata. Voda uzrokuje smanjenje athezije između bitumena i agregata, što dovodi do skidanja bitumena sa zrna agregata, i utiče na pojavu brojnih oštećenja fleksibilnih kolovoza, npr. pojave kolotruga i oštećenja usled zamora materijala. [9]

Otpornost asfaltnih mešavina na dejstvo vode ispitana je merenjem čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) suvih i vlažnih uzoraka u skladu sa standardom EN 12697-12, metoda A. Za potrebe ovog ispitivanja, napravljeno je po šest Maršalovih cilindara za sve tipove mešavina.

Predmetni uzorci su podeljeni na dve grupe sa po tri uzorka, tako da prosečne vrednosti zapreminskih masa u obe grupe budu što približnije. Jedna grupa je držana na suvom na sobnoj temperaturi od 20°C, dok je druga grupa prvo u trajanju od 30 min potopljena u vodu pod potpritiskom 6.7 kPa, a potom u trajanju od 72 h kondicionirana u vodi na temperaturi od 40°C. Nakon kondicioniranja, pre merenja čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS), uzorci su čuvani na temperaturi od 25°C u trajanju od 2 h. Ispitivanje ITS je sprovedeno prema standardu EN 12697-23, a čvrstoća na indirektno zatezanje je određena prema sledećoj formuli [15] :

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot d_s} \quad (1)$$

gde su:

P – sila loma (kN);

h – visina uzorka (mm);

d_s – prečnik uzorka (mm).

Kao mera otpornosti asfaltnih mešavina na dejstvo vode definiše se odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) vlažnih i suvih uzoraka:

$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100 \quad (2)$$

gde su:

ITS_{dry} – prosečne vrednosti čvrstoća na indirektno zatezanje suvih uzoraka i

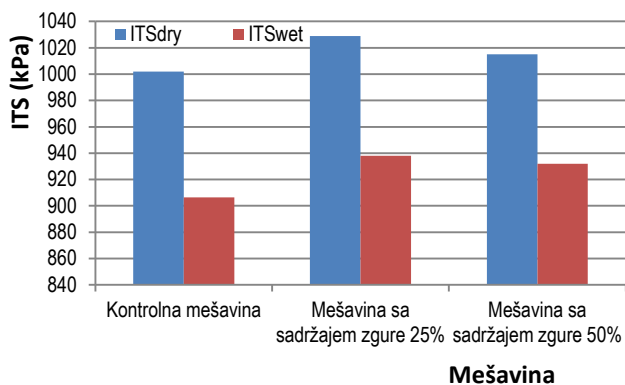
ITS_{wet} – prosečne vrednosti čvrstoća na indirektno zatezanje vlažnih uzoraka za svaku od ispitivanih mešavina.

Prosečne vrednosti čvrstoća na indirektno zatezanje, kao i njihov odnos (ITSR), prikazani su u tabeli 10, kao i na slikama 6 i 7.

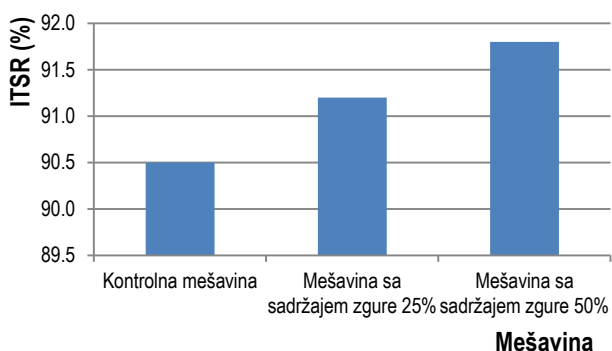
Tabela 10. Prosečne vrednosti ITS i vrednost ITSR

Mešavina	ITS _{dry} (kPa)	ITS _{wet} (kPa)	ITSR (%)
Kontrolna mešavina	1002	906,5	90,5
Mešavina sa sadržajem zgure 25%	1029	938	91,2
Mešavina sa sadržajem zgure 50%	1015	932	91,8

Otpornost mešavina na dejstvo vode, prikazana kao odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) se povećava sa sadržajem zgure, za mešavinu sa 25% zgure veća je za 0.7% od kontrolne mešavine, a za mešavinu sa 50% zgure veća je za 1.3%. Povećanje otpornosti na dejstvo vode je relativno malo i može biti posledica bolje uklještenosti zrna bakarne zgure usled njihovih oštrijih ivica.



Slika 6. Prosečne vrednosti čvrstoće pri zatezanju suvih i vlažnih uzoraka



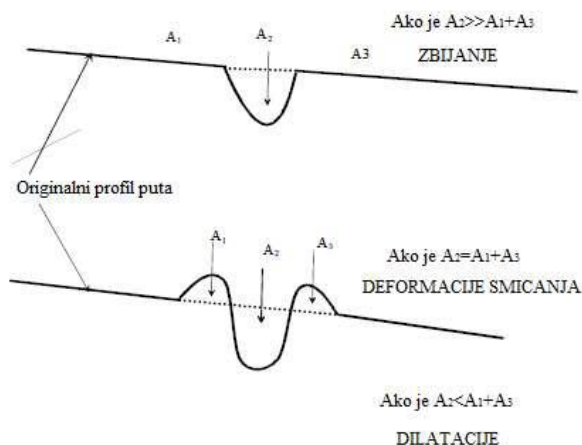
Slika 7. Odnos čvrstoća pri zatezanju suvih i vlažnih uzoraka

S obzirom da su izmerene vrednosti ITSR kod asfaltnih mešavina sa prisustvom bakarne zgre veće u odnosu na kontrolnu mešavinu, može se zaključiti da sa stanovišta otpornosti asfaltnih mešavina na dejstvo vode ne postoji nikakva prepreka za delimičnu zamenu prirodnog agregata bakarnom zgurom.

2.2.3 Otpornost na trajnu deformaciju

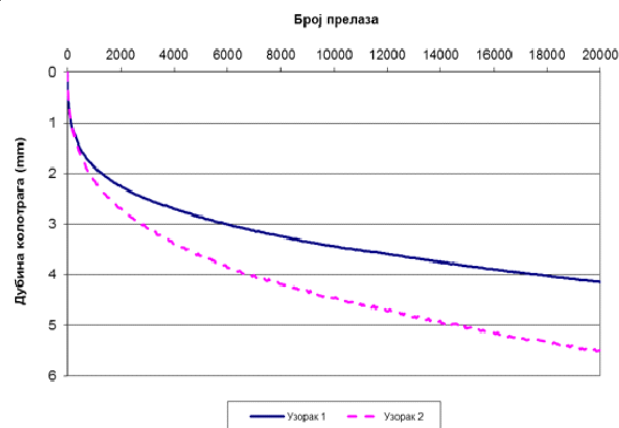
Trajna deformacija, tj. kolotrazi predstavljaju jedan od značajnijih tipova oštećenja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. Nastaju usled akumulacije trajnih deformacija u gornjim asfaltnim slojevima, usled trajne deformacije podloge ili posteljice konstrukcije, kao i usled habanja površinskog sloja. [9]

Kolotrazi se definišu kao nepovratna - trajna deformacija koja nastaje usled dejstva saobraćajnog opterećenja, uglavnom na visokim temperaturama i to u tragovima pneumatika (slika 8). Dva osnovna mehanizma koja dovode do pojave kolotruga su zbijanje (smanjenje zapremine) i deformacija smicanja (bez promene zapremine).



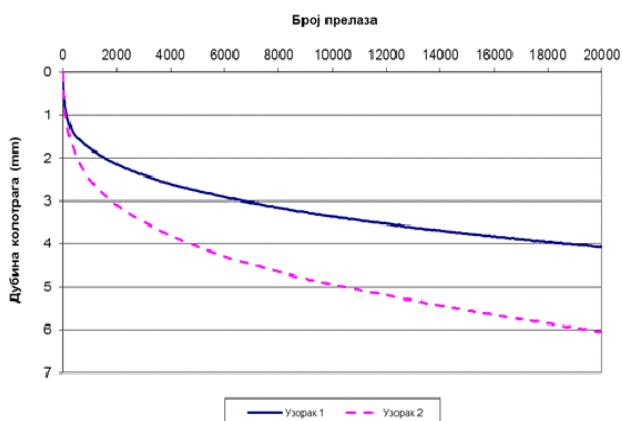
Slika 8. Ilustracija mehanizma pojave kolotruga

Ispitivanje trajne deformacije asfaltnih mešavina izvršeno je pomoću opita točkom, na vazduhu, pri temperaturi od 60°C, nakon 10.000 ciklusa (20.000 prelaza), u skladu sa standardom EN 12697-22, Aneks B, mali uređaj. U ovom opitu opterećenje točkom od 700N se prenosi preko kontaktne površine od 1900 mm² sa frekvencijom od 0,88 Hz. Prema ovoj metodi, otpornost asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju određuje se merenjem proporcionalne dubine kolotruga koji se formira nakon svakog ciklusa opterećenja točkom. [14]. Rezultati ispitivanja dubine kolotruga u funkciji broja prelaza točka za kontrolnu asfaltnu mešavinu, kao i za mešavine sa 25% i 50% bakarne zgre su prikazani na slikama 9, 10 i 11, respektivno.

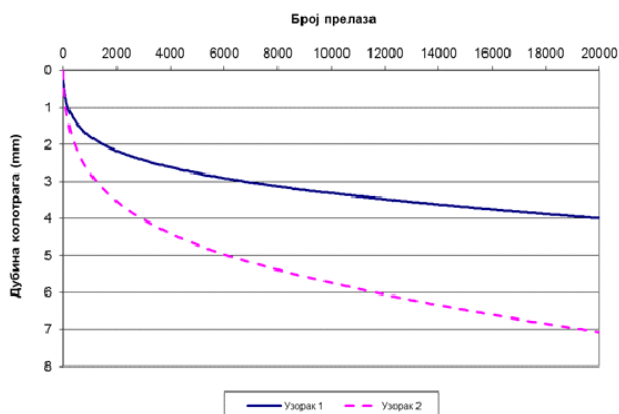


Slika 9. Trajna deformacija kontrolne asfaltne mešavine

U tabeli 11 prikazani su rezultati opita točkom koji podrazumevaju vrednosti dubine kolotruga i proporcionalne dubine kolotruga (u odnosu na stvarnu visinu asfaltne ploče) izmerene nakon 10.000 ciklusa opterećenja. Sa dijagrama trajne deformacije, za svaku ispitanu mešavinu, određen je nagib krive između 5.000 i 10.000 ciklusa opterećenja.



Slika 10. Trajna deformacija asfaltne mešavine sa sadržajem 25% bakarne zgure



Slika 11. Trajna deformacija asfaltne mešavine sa sadržajem 50% bakarne šljake

Kod asfaltnih mešavina koje sadrže bakarnu zguru, zabeležen je rast dubine kolotraga i nagiba krive sa povećanjem procentualnog učešća bakarne zgure. Vrednost proporcionalne dubine kolotraga kreće se u granicama od 9,2% do 10,7%, što su veće vrednosti od dozvoljenih 7%. Kod asfaltne mešavine sa sadržajem bakarne zgure od 25%, proporcionalna dubina kolotraga je veća za 6,5%, a brzina prirasta deformacije (nagib krive) za 5,9% u odnosu na kontrolnu mešavinu. Kod asfaltnih mešavina sa 50% bakarne proporcionalna dubina kolotraga koja je veća za 16,3% nego kod kontrolne mešavine, dok je nagib krive veći za 17,7%.

Tabela 14. Prikaz dubine kolotraga i nagiba krive

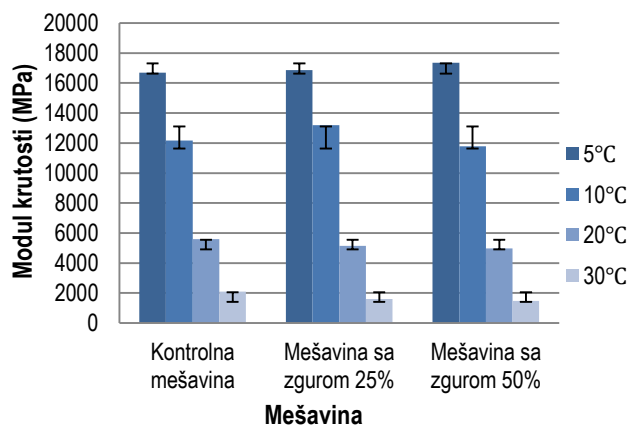
Mešavina	Dubina kolotraga (mm)	Proporcionalna dubina kolotraga (%)	Nagib krive
Kontrolna mešavina	4,82	9,2	0,17
Mešavina sa sadržajem zgure 25%	5,07	9,8	0,18
Mešavina sa sadržajem zgure 50%	5,53	10,7	0,20

Može se zaključiti da se sa povećanjem sadržaja zgure u asfaltnim mešavinama povećava trajna deformacija i brzina prirasta deformacije, kao i to da ni jedna od ispitanih asfaltnih mešavina, uključujući i kontrolnu mešavinu, ne zadovoljava propisane tehničke uslove sa aspekta trajnih deformacija.

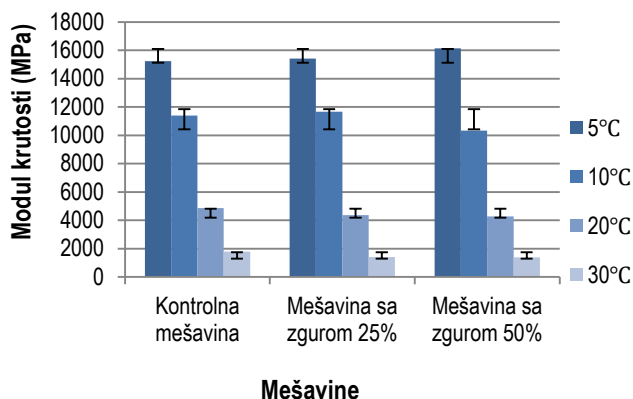
2.2.4 Krutost

Krutost asfaltne mešavine predstavlja osnovnu karakteristiku materijala potrebnu za određivanje naponskog i deformacijskog odgovora konstrukcije na saobraćajno opterećenje. Kako krutost definiše sposobnost asfaltnog sloja da rasporedi opterećenje na niže slojeve, tako za različite nivoe opterećenja definiše i nivo deformacija na kontaktu različitih slojeva kolovozne konstrukcije, pa na taj način indirektno utiče i na pojavu pukotina usled zamora. Takođe, veće vrednosti krutosti omogućavaju ugradnju tanjih asfaltnih slojeva, smanjujući troškove izgradnje. Ipak, treba imati u vidu i da izuzetno velika krutost, zbog smanjene fleksibilnosti asfaltnih slojeva, može dovesti do pojave termičkih pukotina. [9]

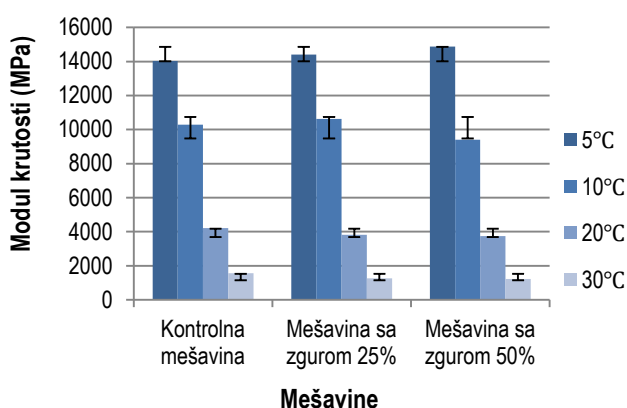
Ispitivanje modula krutosti vrši se prema standardu SRPS EN 12697-26 koji definiše kompleksni modul E^* kao odnos amplitude napona (u bilo kom trenutku vremena t i pri bilo kojoj frekvenciji ω) i amplitude dilatacije (u istom trenutku t i pri istoj frekvenciji ω). Kompleksni modul i fazni ugao asfaltnih mešavina ispitani su indirektnim zatezanjem cilindričnih uzoraka, u svemu prema EN 12697-26, aneks C. Oпит je vršen na temperaturama od 5°C, 10°C, 20°C i 30°C pri frekvencijama od 3.98 Hz, 2.51 Hz i 2 Hz. Opterećenje je nanošeno u vidu sinusne funkcije sa pozitivnim signalom, a trajanje opita je ograničeno na 100 ciklusa, da ne bi došlo do pojave trajne deformacije i remećenja naponskog stanja u uzorcima. Na slikama 12-14 prikazane su prosečne vrednosti modula krutosti kontrolne asfaltne mešavine, kao i mešavina sa 25% i 50% bakarne zgure. Na istim slikama je prikazano rasipanje rezultata ispitivanja od plus/minus jedne standardne devijacije.



Slika 12. Modul krutosti na sve četiri ispitivane temperature pri frekvenciji od 3.98 Hz



Slika 13. Modul krutosti na sve četiri ispitivane temperature pri frekvenciji od 2.51 Hz



Slika 14. Modul krutosti na sve četiri ispitivane temperature pri frekvenciji od 2 Hz

Posmatrajući samo prosečne vrednosti modula krutosti uočava se da asfaltna mešavina sa bakarnom zgurom na visokim temperaturama imaju manje, a na niskim temperaturama veće krutosti od kontrolne mešavine.

Da bi se opisalo linearno viskoelastično ponašanje asfaltnih mešavina i izvan dobijenog opsega temperatura ili frekvencija, potrebno je konstruisati karakterističnu krivu, tzv. "master krivu". Master krive se konstruišu po principu superpozicije vreme-temperatura i one za određeni materijal predstavljaju promenu kompleksnog modula u zavisnosti od frekvencije opterećenja pri konstantnoj temperaturi. Takav princip omogućava da se dobijeni podaci sakupljeni na različitim temperaturama ili frekvencijama horizontalno pomeraju do referentne temperature i tako omoguće formiranje jedne master krive od više različitih. [9]

Master kriva se može predstaviti nelinearnim sigmoidalnim modelom u sledećem obliku:

$$\log |E^*| = \log(E_{min}) + \frac{\log(E_{max}) - \log(E_{min})}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_y)}} \quad (3)$$

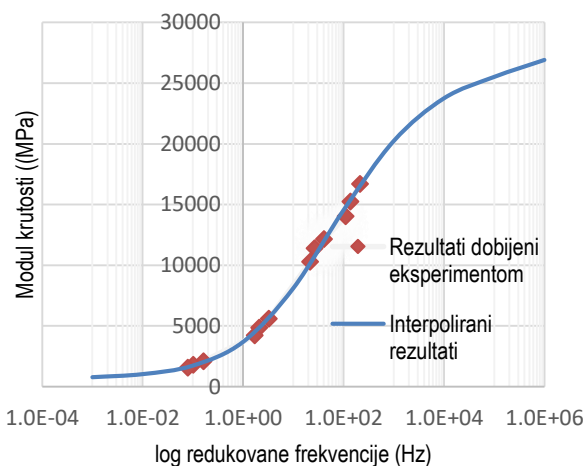
a redukovana frekvencija prema Arhenijusovoj jednačini:

$$\log f_y = \log f + \frac{\Delta E_a}{19,14714} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (4)$$

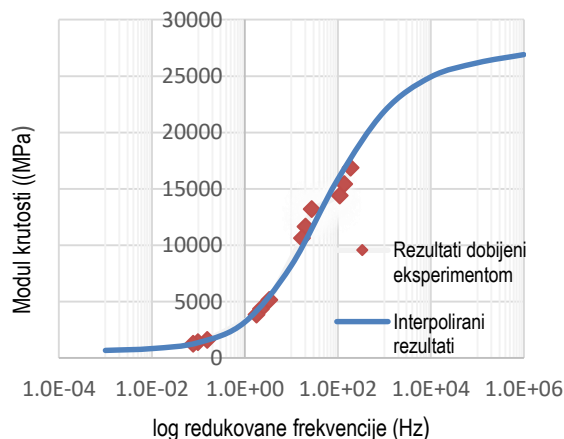
U prikazanim jednačinama korišćene su sledeće oznake:

- E^* - kompleksni modul (Pa);
- E_{min} - minimalna vrednost kompleksnog modula (Pa);
- E_{max} - maksimalna vrednost kompleksnog modula (Pa);
- β, γ - faktori pomeranja (-);
- f_r - redukovana frekvencija na referentnoj temperaturi (Hz);
- f - frekvencija opterećenja na temperaturi ispitivanja (Hz);
- ΔE_a - aktivaciona energija (J/mol);
- T - temperatura ispitivanja (K);
- T_r - referentna temperatura (K).

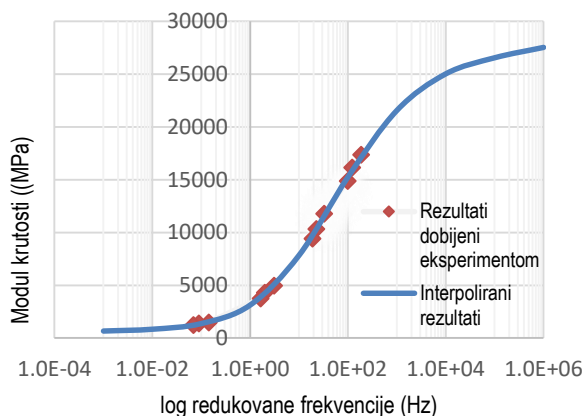
U okviru ovog rada formirane su master krive svih ispitivanih mešavina za referentnu temperaturu od 20°C (slike 15-17).



Slika 15. Master kriva kontrolne mešavine

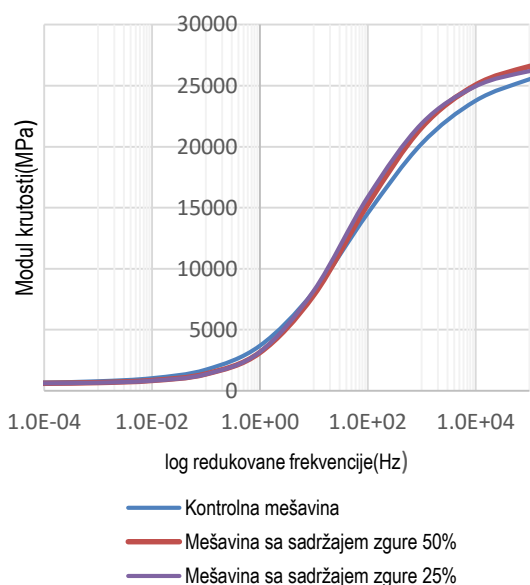


Slika 16. Master kriva asfaltna mešavina sa 25% bakarne zgure



Slika 17. Master kriva asfaltne mešavine sa 50% bakarne zgre

Sve tri master krive su prikazane na slici 18 radi upoređenja.



Slika 18. Dijagram poređenja master krivih

Na osnovu prikazanog dijagrama može se uočiti da asfaltne mešavine sa sadržajem bakarne zgre imaju veće module krutosti na velikim frekvencijama (niskim temperaturama) i nešto manje vrednosti modula krutosti malim frekvencijama (visokim temperaturama) u poređenju sa kontrolnom mešavinom, što može da objasni nešto veću trajnu defromaciju mešavina sa zgurom.

3. ZAKLJUČAK

Predmet ovog rada bilo je ispitivanje bakarne zgre kao potencijalnog alternativnog materijala za izradu asfaltnih mešavina i ispitivanje asfaltnih mešavina sa delimičnom zamenom prirodnog agregata bakarnom zgurom.

U prvom delu ovog rada sprovedena su ispitivanja bakarne zgre kao agregata za spravljenje asfaltnih mešavina. Izvršena je analiza fizičko - mehaničkih karakteristika. Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti sledeće:

- Droblijvost bakarne zgre je izuzetno mala.
- Upijanje vode je u dozvoljenim granicama za agregat koji je sastavni deo asfaltnih mešavina.
- Zapreminska masa je приметно veća od zapreminske mase standardnih kamenih agregata.
- Obavijenost zrna bakarne zgre ugljovodoničnim vezivom je 100%, što je veoma bitna karakteristika agregata koji se koristi za spravljanje asfaltnih mešavina.

U drugom delu rada izvršena su ispitivanja asfaltnih mešavina sa zamenom prirodnog kamenog agregata bakarnom zgurom u procentu od 25% i 50% i rezultati ispitivanja su upoređivani sa rezultatima kontrolne mešavine. Analizom sprovedenih rezultata ispitivanja, može se zaključiti sledeće:

- Otpornost asfaltnih mešavina na dejstvo vode ispitana je merenjem čvrstoće pri indirektnom zatezanju suvih i vlažnih uzoraka. U poređenju sa kontrolnom mešavinom, izmerene vrednosti ITSr asfaltnih mešavina sa dodatkom zgre su veće i iznose 0,7% i 1,3% za mešavine sa 25% i 50% zgre. Ova odstupanja su veoma mala i mogu biti posledica dobre uklještenosti zrna bakarne zgre usled oštih ivica.
- Ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju asfaltne mešavine izvršeno je pomoću opita točkom. Dodatak bakarne zgre u mešavinama povećava proporcionalnu dubinu kolotruga i brzinu prirasta deformacije (nagib krive).
- Nakon eksperimentalnog ispitivanja modula krutosti asfaltnih mešavina, može se primetiti da mešavine koje sadrže bakarnu zgre imaju veći modul krutosti na visokim frekvencijama (niskim temperaturama) i nešto manji na niskim frekvencijama (visokim temperaturama) što može biti nepovoljno sa aspekta nastanka termičkih pukotina i kolotruga.

Osnovni cilj daljih istraživanja mogućnosti primene bakarne zgre u habajućim slojevima fleksibilnih kolovoznih konstrukcija biće da se utvrde granične vrednosti učešća zgre u mešavinama, kao i da se istraži da li bi promenom zapremisne structure mešavina sa zgurom mogli da se minimiziraju negativni efekti u pogledu smanjenja otpornosti na trajnu deformaciju i krutosti na visokim temperaturama i povećanja krutosti na niskim temperaturama.

Zahvalnost

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru tehnoloških projekata TR 37001 "Uticaj rudarskog otpada iz RTB-a Bor na zagađenje vodotokova sa predlogom mera i postupaka za smanjenje štetnog dejstva na životnu sredinu" i TR 36017 "Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji".

Literatura

- [1] International Copper Study Group, <http://www.icsg.org> (pristupljeno dana: 15.07.2017.)
- [2] Dimitrijević, M.; Urošević, D.; Milić, S.; Urošević, T. (2014), Ekstrakcija bakra iz topioničke šljake prženjem sa piritom ili flotacijskom jalovinom i luženje vodom, Mining & metallurgy engineering, Bor, broj 4, str. 165-173, Mining and Metallurgy Institute Bor.
- [3] Urošević, D.M. (2016.), Ekstrakcija bakra iz topioničke šljake kombinovanim postupcima, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Boru Univerziteta u Beogradu.
- [4] Bogdanović, G.; Trumić Milan; Trumić Maja; Antić, D.V. (2011.), Upravljanje otpadom iz rudarstva-nastanak i mogućnost prerade, Reciklaža i održivi razvoj, 4, 37-43, Tehnički fakultet u Boru Univerziteta u Beogradu, Bor, Srbija.
- [5] Marinović, Lj. (1990.), Prilog proučavanju mogućnosti korišćenja zgure plamenih peći Topionice bakra Bor u kolovoznoj konstrukciji, Magistarski rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [6] Ziari, H. ¹; Moniri, A. ²; Ayazi, M.J. ³; Nakhaei, M. ⁴ (2016.), Investigation of Rutting Performance of WMA Mixtures Containing Copper Slag, International Journal of Transportation Engineering, Vol 3/ No. 3/ Winter 2016. Tarrahan Parseh Transportation Research Institute and Iranian Association of Transportation Engineering, Teheran, Iran.
- [7] Pundhir, N.K.S. ^{*}; Kamaraj, C.; Nanda, P.K. (2005.), Use of copper slag as construction material in bituminous pavements, Journal of Scientific & Industrial Research, Vol. 64, pp. 997-1002, National Institute of Science Communication And Information Resources, New Delhi.
- [8] Raposeiras, A.C. ^{a*}; Vargas-Cerón, A. ^a; Movilla-Quesada, D. ^a; Castro-Fresno, D. ^b (2016.), Effect of copper slag addition on mechanical behaviour of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement, Construction and Building Materials, vol. 119, pp. 268-276.
- [9] Aleksandar V. Radević (2017.), Karakteristike asfaltnih mešavina sa agregatom od recikliranog betona, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [10] Marko D. Orešković (2017.), Uticaj primene struganog asfaltnog materijala na krutost kolovoznih konstrukcija, Master rad, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- [11] T.O. Medani, M. Huurman and A. A. A. Molenaar (2017.), On the computation of master curves for bituminous mixes, Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Delft University of Technology, P. O. Box 5048, 2600 GA Delft, the Netherlands.
- [12] Meng Ling ^a, Xue Luo ^b, Fan Gu ^c, Robert L. Lytton ^d, (2017.), Time-temperature-aging-depth shift functions for dynamic modulus master curves of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, vol. 157, pp. 943-951.
- [13] SRPS EN 12697-12:2008, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12:Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.
- [14] SRPS EN 12697-22:2003, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22:Wheel tracking.
- [15] SRPS EN 12697-23:2003 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23:Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.
- [16] SRPS EN 12697-26:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26:Stiffness.
- [17] SRPS EN 12697-33:2007, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 33:Specimen prepared by roller compactor.
- [18] Garba, R. 2002. Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Doctoral thesis submitted to the Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- [19] Izveštaj o izradi prethodnog sastava asfaltno mešavine AB11s za izradu habajućeg sloja na auto putevima, putevima sa vrlo teškim I teškim saobraćajnim opterećenjem, br. izveštaja PSA- 048/17, TPA za obezbeđenje kvaliteta I inovacije d.o.o., Centralna laboratorija Čačak.
- [20] Subotić, P (2002.), Priručnik za asfalt, II izdanje, Institut za puteve a.d., Beograd.