

UTICAJ ELEKTROFILTERSKOG PEPELA NA KARAKTERISTIKE ASFALJNIH MJEŠAVINA

Katarina Mirković, dipl.građ.inž.

Univerzitet Crne Gore; Građevinski fakultet, katarinam@ac.me

prof. dr Goran Mladenović, dipl.građ.inž.

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

Stručni rad

Rezime: U radu su prikazani rezultati ispitivanja asfaltnih mješavina AB 11s spravljenih sa različitim procentima elektrofilterskog pepela, pri čemu je pepeo korišten kao djelimična ili potpuna zamjena za kameno brašno – filer. U radu su predstavljeni rezultati ispitivanja svojstava elektrofilterskih pepela kako bi se utvrdila njihova podobnost za primjenu u asfaltnim mješavinama. Eksperiment je izveden na asfaltnim uzorcima spravljenim sa pepelima iz tri različita izvora, a procenti u kojima je vršena zamjena kamenog brašna su 25%, 50%, 75% i 100%, dok je kontrolna mješavina spravljena sa 100% kamenog brašna. U radu je prikazana zapreminska struktura mješavina korištenih u eksperimentu. Izvedeni zaključci ukazuju da se dodavanjem elektrofilterskog pepela može postići zadovoljavajuća zapreminska struktura, pri čemu zapreminska masa i šupljine u mineralnoj i asfaltnoj mješavini generalno zavise od vrste pepela i njegovog sadržaja. Stabilnost i tečenje mješavina sa elektrofilterskim pepelom su poboljšani u odnosu na kontrolnu mješavinu. Sa povećanjem udjela elektrofilterskog pepela povećava se otpornost asfaltnih mješavina na trajnu deformaciju. Osjetljivost uzoraka na vodu je uglavnom manja kod mješavina sa pepelom u odnosu na kontrolnu mješavinu što zavisi od vrste i količine pepela.

Glavne riječi: asfaltna mješavina AB11s, elektrofilterski pepeo, zapreminska struktura, otpornost na dejstvo vode, otpornost na trajnu deformaciju

FLY ASH IMPACT ON CHARACTERISTICS OF ASPHALT MIXTURES

Katarina Mirković, B.Sc. CE

University of Montenegro; Faculty of Civil Engineering, katarinam@ac.me

Goran Mladenović, Ph. D. CE

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

Professional paper

Abstract: The paper presents the results of testing of asphalt mixtures AB11s made with various percentages of fly ash, where the ash was used as a partial or complete substitute for stone filler. The paper presents the results of the testing of fly ash properties to determine their suitability for use in asphalt mixtures. The experimental research was performed on asphalt samples containing fly ash from three different sources, with the degree of stone filler substitution amounting to 25%, 50%, 75%, and 100%. The control mixture was prepared with 100% of stone filler.

The paper also presents the volumetric structure of tested asphalt mixtures. The results of this study indicate that a satisfactory volumetric structure can be achieved through adding fly ash, while the bulk density and voids of the mineral and asphalt mixture generally depend on the type of ash and its content. The stability and flow of mixtures with fly ash are favorable compared to the control mixture. With the increase of the percentage of fly ash, the asphalt mixture's resistance to permanent deformation has also increased. The water sensitivity is generally lower in mixtures with ash compared to the control mixture, and depends on the type and percentage of ash in the mixture.

Key words: asphalt measure AB11s, fly ash, volume structure, water sensitivity, resistance to permanent deformation

1. UVOD

Elektrofilterski pepeo (EFP) nastaje kao nusproizvod pri proizvodnji električne energije u termoelektranama. Još sredinom prošlog vijeka započeto je sa istraživanjima mogućnosti njegove primjene u asfaltnim mješavinama, kao dijelom napora da se doprinese održivom razvoju u oblasti građevinarstva, sa ciljem da se dobiju mješavine zadovoljavajućih karakteristika, smanje štetni efekti deponovanja i očuvaju prirodni resursi. Od ranih radova Carpenter-a (1952) koji u svom radu zaključuje da pepeo klase F daje odlične rezultate u pogledu čvrstoće na pritisak uzoraka zasićenih vodom i Zimmer-a (1970) koji je proučavao uticaj različitih procenata pepela klase C, i takođe uočio prirast čvrstoće na pritisak vodom zasićenih uzoraka, pa do danas, još uvijek postoji veliko interesovanje za istraživanjima u ovoj oblasti. Različiti pepeli se odlikuju različitim osobinama, prvenstveno u zavisnosti od porijekla. Iz tog razloga za svaki pepeo potrebno je eksperimentalnim putem utvrditi optimalne procenat zastupljenosti u asfaltnoj mješavini, sa ciljem dobijanja najpovoljnijih fizičko-mehaničkih osobina asfaltnih mješavina.

Posljednjih par decenija intenzivirana su istraživanja u ovoj oblasti. Neka od njih se bave upotrebom EFP u bitumenskom malteru (Sharma i sar. 2010, Đureković i Mladenović 2015), kao zamjena za određenu količinu bitumena i kao način poboljšanja njegovih karakteristika. Druga grupa istraživanja se fokusira na upotrebu EFP kao potpune ili djelimične zamjene za kameno brašno, uglavnom u svrhu poboljšanja otpornosti na vlagu i povećanja krutosti (Ali i sar. 1996) ili povećanja stabilnosti i gustine mješavine (Mikoč i Marković 2010).

Sharma i sar. (2010) su upoređivali osobine asfaltnih mješavina spravljenih sa četiri vrste elektrofilterskih pepela koje karakterišu prisustvo velikog procenta SiO₂ (preko 50%) i značajno manji udio CaO (0,5 – 4,33%).

Mješavine su spravljane sa zamjenom kamenog brašna sa pepelom u procentima od: 4,0; 5,5; 7,0 i 8,5%. Autori su zaključili da se optimalna količina bitumena (OKB) povećava sa povećanjem procenta filera (pepela i kamenog brašna) u mješavini. Preostala stabilnost po Maršalu (RS) i odnos čvrstoća na indirektno zatezanje vodom zasićenih i suvih uzoraka (TSR) se smanjuju sa povećanjem procenta EFP u mješavini, ali su generalno veći kod mješavina sa pepelom nego kod mješavina sa kamenim brašnom. Uočljivo je da najveće vrijednosti RS i TSR ima pepeo sa najvećim procentom kalcijuma (4,33%) što ga čini filerom sa najboljom vezom agregata i bitumena (najvećom otpornošću na ljuštenje – stripping). Indirektna zatezna čvrstoća se povećava sa povećanjem udjela pepela do 7%, nezavisno od tipa filera. Za veće procente pepela dolazi do njenog pada. Čvrstoća mješavine raste sa porastom odnosa filera i bitumena (F/B).

Butul (2000) je u svom radu vršio djelimičnu zamjenu filera sa različitim procentima elektrofilterskog pepela (0, 10, 15, 20 i 25%) u mješavini sa optimalnim sadržajem bitumena od 6.5%. U eksperimentu su korištene dvije vrste pepela: elektrofilterski pepeo i pepeo koji predstavlja ostatak sagorijevanja drvenog otpada. U pogledu osobina mješavine bitumena i filera (mastiksa) autor je zaključio da se viskoznost značajno povećava (do 100%) srazmjerno procentima zamjene pepelom za obje vrste pepela; penetracija veziva se smanjuje sa dodatkom pepela srazmjerno povećanju procenta zamjene, tačka razmekšavanja se neznatno smanjuje za obje vrste pepela, dok se duktilitet vrlo značajno smanjuje sa dodavanjem pepela. U pogledu osobina asfaltne mješavine autor je zaključio da zapreminska masa mješavina sa pepelom (za obje vrste pepela) opada, a sadržaj šupljina raste sa sadržajem pepela. Zapreminska masa i procenat šupljina mješavine sa 20% pepela su najbliži kontrolnoj mješavini, ali ipak niži, dok se stabilnost i tečenje po Maršalu smanjuju sa dodavanjem pepela u nepravilnim intervalima u odnosu na povećanje procenta pepela. Mješavine sa većim procentom pepela imaju veću otpornost na trajnu deformaciju; indirektna zatezna čvrstoća se povećava sa procentom pepela, dok se deformacija smanjuje, što pokazuje veću otpornost mješavine na pojavu pukotina; čvrstoća na pritisak je najveća za 10% i 15% zamjene pepelom; modul elastičnosti je takođe najveći za 10% i 15% zamjene pepelom, dok se sa većim udjelom pepela ovi parametri smanjuju.

Sobolev i sar. (2013) su ispitivali primjenu dvije vrste pepela, klase F i klase C u asfaltnom mastksu i asfaltnoj mješavini, koristeći dvije vrste bitumena (PG 58-28 i PG 70-22M) koje su prethodno podvrgli testu kratkotrajnog starenja (RTFO – Rolling Thin Film Oven Test). Zamjena bitumena elektrofilterskim pepelom u asfaltnoj mješavini je iznosila 1% zapreminski i 10% od mase bitumena. Ispitivanja su obuhvatila obradivost mješavine sa dodatkom EFP, kao i module krutosti

mješavina. U mastksu je izvršena zamjena bitumena sa 5% i 60% kamenog brašna, težinski, a ispitivani su čvrstoća i relativna čvrstoća (odnos čvrstoće eksperimentalnog i kontrolnog uzorka). U pogledu osobina asfaltne mješavine, spravljajući eksperimentalnu mješavinu sa EFP klase C pomoću Superpave žiroskopskog nabijača, autori su uočili minimalna odstupanja u kompaktilnosti mješavine sa pepelom, što ovaj pepeo preporučuje za upotrebu u asfaltnom mješavinama u svrhu zamjene dijela bitumena bez bojazni da će se ugroziti struktura i zapremina šupljina. Modul krutosti mješavine sa 10% EFP klase C je za 10% veći nego za KM. Uzorci mastiksa su podvrgnuti opitu simuliranja starenja (RTFO metoda) i zatim ispitivani na dinamičkom smičućem reometru (DSR) kao i na gredicama (BBR) na niskim temperaturama. Autori su zaključili da krutost mastiksa (kompleksni modul G^*) ima značajno veće vrijednosti za oba bitumena (pogotovo za PG 58-28) kada se izvrši zamjena od 60% pepela, nezavisno od tipa pepela. Zamjenom od 60% relativna čvrstoća mastiksa (Sr) na niskim temperaturama se značajno povećava za oba tipa pepela, dok je sa zamjenom od 5 % uglavnom ispod vrijednosti za KM. Zbog velikog raspona u dobijenim rezultatima, naveli su potrebu za novim ispitivanjima u kojima bi se pokrio raspon između 5% i 60% zamjene sa kojima je sproveden eksperiment.

Ali i sar. (1996) su ispitivali osobine asfaltnih mješavina za habajući sloj sa dodatkom pepela klase F, kao zamjene za kameno brašno u procentima 0%, 2%, 4% i 6% u odnosu na agregat, pri OKB od 5%. Mehaničke karakteristike su ispitane na različitim temperaturama (0°C, 20°C i 40°C). Modul krutosti mješavine sa EFP na temperaturi 0°C se ne mijenja, dok na temperaturi 20 °C mješavina sa 6% pepela imala najveće vrijednosti modula krutosti, a na temperaturi 40°C mješavina sa 2% pepela. Dodatak pepela nije značajno uticao na modul puzanja, kao ni na zamor, ali je uticao na poboljšanje otpornosti na vlagu. Mješavina sa 2% pepela pokazala je najmanju otpornost na trajne deformacije pri temperaturi od 0°C, dok je mješavina sa 6% pepela pokazala najmanju otpornost na trajne deformacije pri temperaturi od 20°C.

Androjić i sar. (2013) su ispitivali podobnost dominantno silicijumskog pepela klase F (sa 45% - SiO_2) sa manjim udjelom kalcijum oksida (18% - CaO) kao potpune zamjene za kameno brašno u mješavini AC8 za habajući sloj. Pepeo je imao krupniju granulaciju od kamenog brašna. Upoređivane su dvije eksperimentalne mješavine sa po 3% i 6% pepela sa kontrolnom mješavinom spravljenom sa 3% kamenog brašna. Rezultati ispitivanja su pokazali da primjena pepela nije dala poboljšanje u pogledu gustine i udjela šupljina pri optimalnoj količini bitumena, kao i da se sa povećanjem udjela pepela povećava i optimalna količina bitumena.

Rongali i sar. (2013) su ispitili i uporedili osobine dvije vrste asfalt betona, AC A - sa EFP i AC B - sa kompozitom od EFP i agregata od usitnjenog plastičnog otpada krupnoće zrna 2-8 mm u skladu sa zahtjevima IRC SP:79:2008. Podaci o osobinama i količini pepela nisu dati. Mješavina AC A se odlikuje većim modulom krutosti od AC B, kao i manjom dubinom kolotraga, tj. većom otpornošću na trajne deformacije. Statički opit tečenja (puzanja) pokazao je da se mješavina AC A odlikuje manjom trajnom deformacijom. Zaključak je da mješavina EFP i plastičnog otpada unapređuje osobine asfaltnih mješavina.

Istraživanja sa zamjenom kamenog brašna pepelom u iznosima od 5, 6, 7 i 8% u odnosu na ukupnu težinu agregata mogu se vidjeti kod Čelika (2008) gdje je autor došao do zaključka da mješavine sa 5% pepela imaju najveću stabilnost i veću specifičnu težinu nego mješavine spravljene sa KB.

Mistry i Roj (2016) su vršili zamjenu filera od hidratisanog kreča sa pepelom klase F u iznosima od 2, 4, 6 i 8% u odnosu na masu agregata. Za standardni filer izabran je hidratisani kreč. Laboratorijske analize sprovedene na Maršalovim uzorcima su pokazale da se zamjenom standardnog filera sa 2% do 6% pepela stabilnost povećava do 21% u odnosu na kontrolnu mješavinu, dok sa udjelom od 8% stabilnost opada. OKB se smanjuje progresivno sa udjelom pepela od 2 do 6%, dok sa 8% raste, čak i u odnosu na kontrolnu mješavinu. Odnos stabilnosti i tečenja mješavine sa udjelom od 4% pepela ima najmanju vrijednost, ali veću od standardne mješavine, dok mješavine sa 6 i 8% imaju značajan prirast ovog parametra (u prikazanom poretku) i prevazilaze dozvoljenu granicu od 5 kN/mm. Generalno, mješavine sa pepelom klase F se odlikuju većom čvrstoćom i otpornošću na deformacije.

Al-Suheibani i Tons (1991) su došli do zaključka da je dodavanje do 40% pepela u odnosu na zapreminu bitumena, u suvim klimatskim uslovima, mješavini dalo bolju čvrstoću na zatezanje, bolju otpornost na kolotrage i duži vijek trajanja. U vlažnim klimatskim uslovima ovaj procenat ne bi trebao da pređe 30%. Ispitujući pepele sa tri vrste krupnoće, oni su takođe zaključili da je srednjezrni pepeo (1-44 μm) najpogodniji kao dodatak bitumenu u cilju povećanja krutosti mješavine.

U predstavljenoj literaturi može se uočiti saglasnost u odnosu na porast čvrstoće i modula mješavina sa pepelom, kao i porast otpornosti na vlagu. Zbog razlike u fizičko-mehaničkim i hemijskim osobinama pepela javljaju se izvjesna odstupanja se kada je riječ o optimalnom procentu pepela.

Cilj ovog rada je da se istraži uticaj konkretnih elektrofilterskih pepela na fizičko-mehaničke karakteristike asfaltnih mješavina i utvrdi mogućnost njegove primjene, kao i optimalnog procenta zamjene kamenog brašna pepelom.

2. MATERIJALI

U ovom eksperimentu su korišteni standardni materijali za spravljanje kontrolne mješavine, dok je za spravljanje eksperimentalnih mješavina korišten i alternativni materijal, elektrofilterski pepeo (EFP) kao zamjena za kameno brašno (KB) u procentima od 25%, 50%, 75% i 100%. Na ovaj način dobijeno je 12 različitih asfaltnih mješavina (tri pepela / četiri procenta), čije su osobine upoređivane sa osobinama kontrolne mješavine.

2.1 Elektrofilterski pepeo

Elektrofilterski pepeli su uzorkovani sa deponija tri termoelektrane u regionu: TE „Pljevlja“ - Pljevlja, Crna Gora; TE „Gacko“ - Gacko, Bosna i Hercegovina; TE „Kosovo B“ - Priština, Kosovo. U cilju određivanja osobina uzorkovanih pepela, i njihovog ocjenjivanja u smislu podobnosti njihove primjene u asfaltnim mješavinama, izvršene su opsežne analize. Za potrebe ovog rada u tabeli 1 je predstavljen kompletan obim izvršenih ispitivanja čiji su rezultati detaljno prikazani u radu Mirković i Mladenović (2017).

Tabela 1. Pregled sprovedenih ispitivanja uzoraka pepela

Mehanička svojstva / metoda	Zapreminska masa	Šupljine u suvom sabijenom pepelu	Povećanje tačke razmekšavanja po metodi PK	Bitumenski broj
	SRPS EN 1097-7:2008	SRPS EN 1097-4:2008	SRPS EN 13179-1:2008	SRPS EN 13179-2:2008
Prosječni hemijski sastav / metoda	Na ₂ O, MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , SO ₃ , K ₂ O, CaO, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Gd ₂ O ₃ , R			
	SEM metoda			
Ekološka podobnost / metoda	Prisustvo teških metala	Radioaktivnost	Opit izlučivanja	
	MEST EN 13656:2013; AMA-12; MEST EN 12457-4.	Gama-spektrometrijska analiza	MEST EN 12457-4:2013, EN 12506:2003, BS EN 13370:2003 EPA 2007.	
Sadržaj organskih materija / metoda	Gubitak pri žarenju (Loss on ignition - LOI)			
	SRPS EN 12879:2007			
Mineraloška karakterizacija / metoda	Određivanje sadržaja amorfne i kristalne faze			
Fizička karakterizacija	Boja, oblik i veličina čestice, površinska tekstura	Granulometrijski sastav		
	SEM metoda	SRPS EN 933 - 10		

U tabeli 2 je data klasifikacija ispitivanih pepela prema njihovom hemijskom sastavu, dok su u tabelama 3 i 4 dati rezultati ispitivanja fizičkih i

mehaničkih karakteristika pepela, relevantni za ocjenu podobnosti primjene elektrofilterskih pepela u asfaltnim mješavinama.

Tabela 2. Klasifikacija ispitanih pepela prema hemijskom sastavu

Elektrofilterski pepeo	Sadržaj (%)			Klasifikacija		
	SiO ₂	CaO	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	ASTM C 618	Rudarski Institut Bg	Ph klasifikacija
TE „Pljevlja“	42,83	21,08	69,78 ~ 70	F	silikatno-kalcijumski	alumosilikatni, pucolanski aktivan
TE „Gacko“	6,04	74,44	13,85 << 50	/	kalcijumski	bazični
TE „Kosovo B“	16,91	45,98	26,15 << 50	/	silikatno-kalcijumski	visoko sulfatni i visoko bazični, nema pucolanskih svojstva

Tabela 3. Fizičke karakteristike uzoraka elektrofilterskog pepela upređene sa karakteristikama kamenog brašna

Osobina pepela	Porijeklo pepela			Kameno brašno
	TE „Pljevlja“	TE „Gacko“	TE „Kosovo B“	
Boja	siva	blijeda mrkožuta	tamna mrkožuta	bijela
Oblik čestice	uglavnom sferičan	kombinovano sferičan i nepravilan	kombinovano sferičan i nepravilan	uglasta do prizmatična
Veličina čestice (μm)	2-30	1-20	1-20	1-30
Površinska tekstura	uglavnom glatka	uglavnom hrapava	uglavnom hrapava	uglavnom hrapava
Stvarna zapreminska masa (Mg/m ³)	2,272	2,966	2,821	2,711

Pepeo iz TE „Pljevlja“ je alumosilikatni pepeo F klase i pucolanski je aktivan, što ga preporučuje za upotrebu u cementnoj industriji. Značajan procenat kalcijum oksida (CaO – 21,08%) neuobičajen za ovu klasu pepela, čini ga, takođe pogodnim i za upotrebu u asfaltnim mješavinama. Glatka tekstura i sferični

oblik čestica ga čine pogodnim za umješavanje, ali silikatna komponenta mu daje osobinu hidrofilnosti, tj. slabijeg afiniteta prema bitumenu. Ovaj pepeo nezadovoljava u pogledu granulometrijskog sastava čak ni za blaži kriterijum, kriterijum II.

Visok udio kreča (CaO) u pepelu TE "Gacko" (74.44%) i nešto manji u pepelu TE "Kosovo B" (45.98%) treba da bude preporuka za korištenje ovih pepela u asfaltnim mješavinama zbog svoje osobine poboljšavanja athezije agregata i bitumenskog veziva, kao i pozitivnog uticaja na stabilnost mješavine. Ipak, pepeli TE "Gacko" i TE "Kosovo B" ne zadovoljavaju zahtijevane u standardu ASTM C 618-05 po pitanju minimalnog udjela $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ od 50%, pa se ne mogu svrstati u C klasu pepela. Pepeo TE "Gacko" je bazični pepeo sa visokim učešćem CaO, dok je pepeo TE "Kosovo B" visoko sulfatni i visoko bazični pepeo bez pucolanskih svojstava. U pogledu granulometrijskog sastava pepeo iz TE "Gacko" u potpunosti zadovoljava uslove zahtijevane u standardu SRPS EN 13043.

Treba napomenuti da je kalcijum oksid svakako povoljniji od silicijum dioksida u pogledu interakcije sa bitumenom u asfaltnim mješavinama, tako da se i na bazi hemijskog sastava može zaključiti da je pepeo iz TE "Gacko" povoljniji za primjenu u asfaltnim mješavinama u odnosu na druga dva

pepela. Takođe, fileri sa visokim udjelom poroznog krečnjaka, zbog svoje osobine da jako upijaju uljne komponente bitumena, mogu negativno uticati na svojstva bitumena i bitumenskih mješavina (Bedaković 1964), pa iz ovog razloga treba obratiti posebnu pažnju na procenat upotrebe pepela, kao što je pepeo iz TE "Gacko". Pepeli sa umjerenim sadržajem kreča (CaO) mogu se koristiti kao dodatak za poboljšanje adhezije agregata i bitumenskog veziva u asfaltnim mješavinama. Takođe pozitivno utiču i na stabilnost asfaltne mješavine (AASHTO M 17-07, 2007).

Sa aspekta ekološke podobnosti, sva tri pepela zadovoljavaju u pogledu sadržaja teških metala, aktivnosti radionukleida i izlučivanja.

Kako je ispitivanje pepela sprovedeno prvenstveno sa ciljem određivanja podobnosti za upotrebu u asfaltnim mješavinama, ispitivanjem su bili obuhvaćeni određivanje bitumenskog broja koji predstavlja prividnu viskoznost mješavine kamenog brašna/EFP i vode, kao i povećanje tačke razmekšavanja koja definiše stepen ukrućivanja mješavine kamenog brašna/EFP i bitumena.

Tabela 4. Mehaničke karakteristike uzoraka elektrofilterskog pepela

Ispitivanje	Metoda	Jedinica mjere	Porijeklo pepela		
			TE "Pljevlja"	TE "Gacko"	TE "Kosovo B"
Šupljine u suvo sabijenom kamenom brašnu/pepelu	SRPS EN 1097-4	%	46	59	55
Povećanje tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice	SRPS EN 13179-1	°C	16,95	28,8	38,6
Bitumenski broj	SRPS EN 13179-2	ml	45	27	46

Mineralni fileri imaju šupljine u suvosabijenom stanju (šupljine po Rigdenu) najčešće između 28% i 45%, dok se za krečnjačka kamena brašna one kreću najčešće između 30% i 34% (Grabowski i sar., 2009). Pepeo iz TE "Pljevlja", sa 46% šupljina se odlikuje najmanjim procentom šupljina u zbijenom uzorku i nešto je veći od uobičajenog sadržaja šupljina za krečnjačko kameno brašno, dok pepeli iz TE "Kosovo B" i TE "Gacko" imaju veći sadržaj šupljina (55% i 59%, respektivno), što znači da se nalaze u zoni gornje granice šupljina, odnosno nešto iznad, koje se srijeću kod različitih filera, što nije neuobičajeno za leteće pepele (Voskuilen i Molenaar, 1996). Povećani sadržaj šupljina po Rigdenu može imati značajnog uticaja na zahtijevanu količinu bitumena u asfaltnoj mješavini.

Ispitivanje povećanja tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice ukazuje na povećanje krutosti bitumena 70/100 u koji se dodaje 37.5 % (v/v) određenog filera. Mineralni fileri imaju povećanje tačke razmekšavanja između 8°C i 25°C, pri čemu je tipična vrijednost 15°C.

Povećanje tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice je najmanje za pepeo iz TE "Pljevlja" i nalazi se u zahtijevanom rasponu, što znači da mastiks sa tim pepelom iskazuje najmanje povećanje krutosti bitumena, u poređenju sa druga dva pepela, što je povoljno sa aspekta dugotrajnosti asfaltnih mješavina i njihove otpornosti na pucanje. Ova veličina za pepeo iz TE "Gacko" je nešto iznad gornje granične vrijednosti, dok je za pepeo iz TE "Kosovo B" značajno van zahtijevanog raspona.

Bitumenski broj ukazuje na količinu vode potrebnu da se doda pepelu kako bi se postigao prividni viskozitet adekvatan za proizvodnju asfaltnih mješavina. Ovo ispitivanje se posebno primjenjuje u Holandiji (gdje je poznato i kao određivanje Van der Baan-ovog broja) i rezultati su donekle analogni šupljinama po Rigdenu. Za mineralna kamena brašna, bitumenski broj se po pravilu kreće između 40 i 50. Pepeo iz TE "Gacko" ima najmanji bitumenski broj koji je niži u poređenju sa očekivanim vrijednostima za mineralna kamena brašna, dok druga dva pepela imaju bitumenski broj u očekivanim granicama.

2.2 Kameno brašno

Za spravljanje asfaltnih mješavina korišteno je kameno brašno proizvođača „Šišковић“ – Podgorica, Crna Gora. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 5.

Tabela 5. Karakteristike kamenog brašna – kriterijum: SRPS B.B3.045:1982

Ispitivanje		Metoda	Rezultati	Jedinica mjere	Kvalitet I	Kvalitet II
Granulometrijski sastav	0.063	SRPS EN 933-10	80.8	%	60 - 85	50 - 85
	0.09		90.2	%	80 - 95	65 - 90
	0.25		99.6	%	96 - 100	95 - 100
	0.71		100	%	100	100
Zapreminska masa		SRPS EN 1097-7	2711	Kg/m ³	/	
Šupljine punila u suvosabijenom stanju		SRPS EN 1097-4	31.5	%	/	

2.3 Mineralna mješavina

Za spravljanje asfaltne mješavine korišten je kameni materijal iz kamenoloma Okruglički krš, Štitarica,

Mojkovac, Crna Gora. Vrsta stijene je kvarc – latit. Granulometrijski sastav i fizičke karakteristike frakcija kamenog agregata su prikazani u tabelama 6 i 7, respektivno.

Tabela 6. Granulometrijski sastav frakcija kamenog agregata i kriterijumi prema SRPS U.E4.014

Otvor sita (mm)	Frakcija kamenog agregata (mm/mm)					
	0/4		4/8		8/11	
	Prolazi kroz sito u % (m/m) SRPS EN 933-1:2013					
	Rezultat	Kriterijum	Rezultat	Kriterijum	Rezultat	Kriterijum
0,063	9,5	-	0,3		0,4	
0,09	11	max 10	0	max 1	0	max 1
0,125	13					
0,25	19	12 – 25				
0,71	37	33 – 70				
1,0	45					
0,50	29					
2,0	70	65 – 100	3	max 5		
4,0	98	90 - 100	10	max 15	3	max 5
8,0	100	100	96	min 90	20	max 15
11,2			100	100	94	min 90
16,0					100	100
22,4						
31,5						

Tabela 7. Fizičke karakteristike frakcija kamenog agregata i kriterijumi prema SRPS U.E4.014

Ispitivanje	Metoda	Jedinica mjere	Frakcija kamenog agregata					
			0/4		4/8		8/11	
			Rezultat	Kriterijum	Rezultat	Kriterijum	Rezultat	Kriterijum
Sadržaj čestica manjih od 0,09 mm	SRPS EN 933-1	%	11	max 10	0	max 1	0	max 1
Gustina – pikn.met.	SRPS EN 1097-6, t.9	kg/m ³	2730	-	-	-	-	-
Gustina – hidr.korpa	SRPS EN 1097-6, t.8	kg/m ³	-	-	2724	-	2719	-
Ekvivalent pijeska	SRPS EN 933-8	%	65,4	min 60	-	-	-	-
Modul zrnivosti	SRPS U.E4.014		2,64	1,95 – 3,00	-	-	-	-
Upijanje vode	SRPS EN 1097-6, t.8	%	-	-	0,6	max 1,6	-	-

2.4 Bitumen

Za spravljanje асфалтне мјешавине кориштен је BIT 50/70 произвођача „Bosanski brod“. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 8.

Tabela 8. Karakteristike bitumena - kriterijum: SRPS EN 12591

Ispitivanje	Metoda	Jedinica mjere	Rezultati	Kriterijum
Penetracija na 25°C –	SRPS EN 1426	1/10mm	61	50 – 70
Tačka razmekšavanja po PK	SRPS EN 1427	°C	50,1	46 – 54
Indeks penetracije	SRPS EN 12591 - A		-0,1	-1.5 – 0.7
Relativna zapreminska masa	SRPS EN 15326	Mg/m ³	1.011	-
Duktilitet na 25°C	SRPS B.H8.615 *	cm	>100	-

*Za duktilitet nema evropskog standarda. Kriterijum za duktilitet je dat prema SRPS U.M3.010

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U eksperimentu je ispitano 13 мјешавина, jedna kontrolna (KM) i 12 eksperimentalnih мјешавина u kojima je izvršena zamjena kamenog brašna

pepelom u različitim procentima (25%, 50%, 75%, i 100%). Pepeli iz TE “Pljevlja”, TE “Gacko” i TE “Kosovo B” u ovom radu nose oznake grupa P, G i K, respektivno. Kodovi мјешавина spravljenih za potrebe ovog eksperimenta dati su u tabeli 9.

Tabela 9. Kodovi мјешавина u skladu sa procentom zamjene kamenog brašna

Grupe pepela	Kod мјешавине												
	KM	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₁₀₀	G ₂₅	G ₅₀	G ₇₅	G ₁₀₀	K ₂₅	K ₅₀	K ₇₅	K ₁₀₀
P grupa	0	25	50	75	100	0	0	0	0	0	0	0	0
G grupa	0	0	0	0	0	25	50	75	100	0	0	0	0
K grupa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	75	100

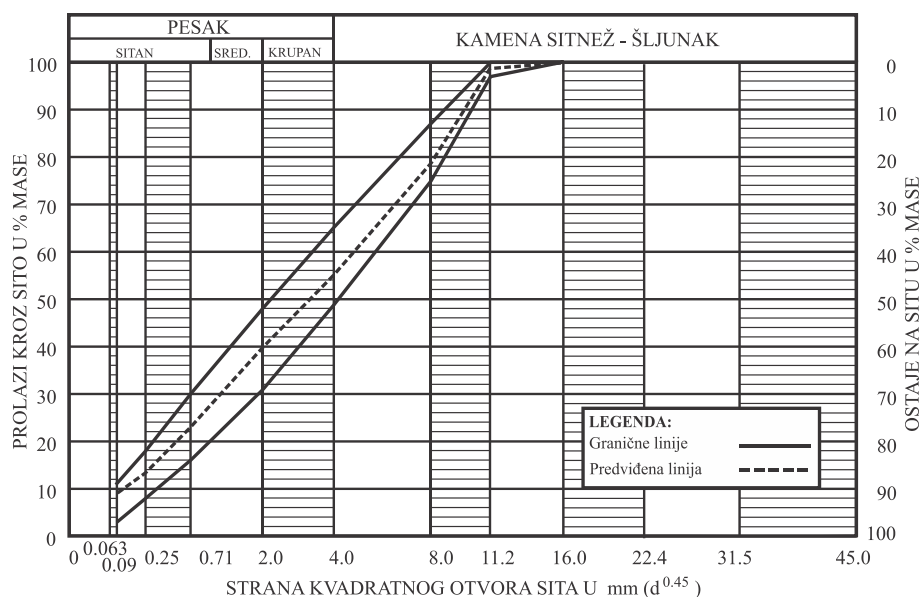
Optimalni sadržaj bitumena (OKB) za kontrolnu мјешавину AB 11s i zapreminska struktura su određeni Maršalovom metodom (SRPS EN 12697-34). OKB iznosi 5,6% i pri tom sadržaju stabilnost мјешавине je 10,2 kN i šupljine u асфалтном uzorku su 5%. U cilju ispitivanja eksperimentalnih мјешавина pod istim okolnostima kao i KM, optimalna količina

bitumena od 5,6% primijenjena je pri spravljanju svih мјешавина.

Učešće komponentalnih materijala u mineralnoj i асфалтној мјешавини prikazano u tabeli 10. dok je granulometrijski sastav kontrolne мјешавине prikazan je na slici 1.

Tabela 10. Sastav асфалтне мјешавине

Komponentalni materijali	Porijeklo materijala	Mineralna мјешавина (%)	Асфалтна мјешавина (%)
Kameno brašno	"Šišković" Podgorica	4	3.8
0/4	"Štitarica" Mojkovac	50	47.2
4/8	"Štitarica" Mojkovac	23	21.7
8/11	"Štitarica" Mojkovac	23	21.7
BIT 50/70	Rafinerija nafte „Bosanski Brod“	-	5.6
Ukupno		100	100


Slika 1. Granulometrijski sastav mineralne mješavine

Za sve spravljene mješavine određena je zapreminska struktura i fizičko-mehaničke karakteristike primenom metoda prikazanih u tabeli 11.

Tabela 11. Ispitivanja zapreminske strukture sa pripadajućim metodama

Ispitivanje	Metoda	Jedinica mjere
Zapreminska masa asfaltnog uzorka	SRPS EN 12697-6:2013 - procedura B	Mg/m ³
Zapreminska masa asfaltne mješavine	SRPS EN 12697-5:2011 - procedura A	Mg/m ³
Šupljine u asfaltnom uzorku	SRPS EN 12697-8:2011	%
Šupljine u mineralnoj mješavini	SRPS EN 12697-8:2011	%
Stabilnost	SRPS EN 12697-34:2013	kN
Deformacija (tečenje)	SRPS EN 12697-34:2013	mm

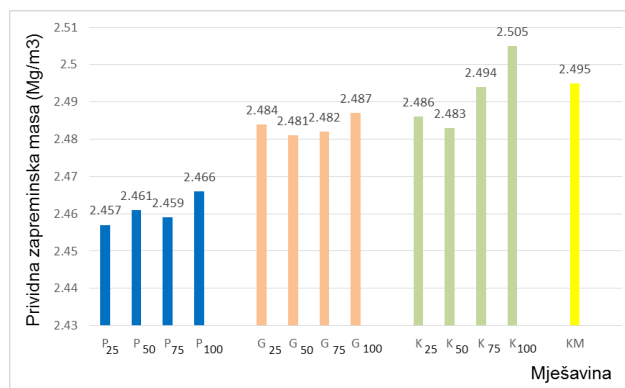
Otpornost na dejstvo vode ispitana je u skladu sa SRPS EN 12697-12:2008. Odnos čvrstoća na indirektno zatezanje Maršalovih uzoraka čuvanih u vodom zasićenom stanju i uzoraka u suvom stanju, predstavljen je veličinom ITS (Indirect tensile stability).

Ispitivanje otpornosti asfaltne mješavine AB 11s na trajnu deformaciju izvršeno je na malom uređaju, procedura B, na vazduhu, na temperaturi od 60°C, poslije 10 000 ciklusa (20000 prelaza) u skladu sa metodom SRPS EN 12697-22:2012. U cilju simuliranja uslova na terenu, prije sabijanja, asfaltne mješavine su kondicionirane na temperaturi od 135°C u trajanju od 4h. Za svih 13 mješavina spravljene su i ispitane po dvije ploče dimenzija 320 x 260 x 50 mm.

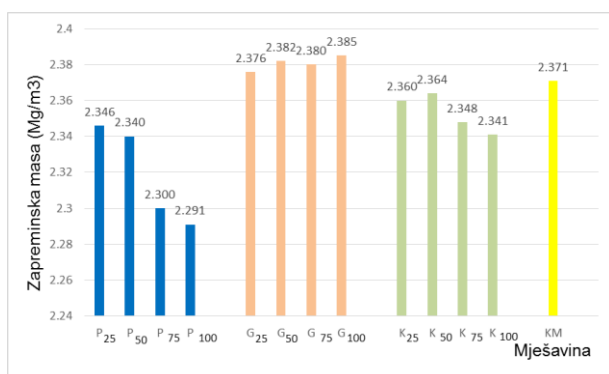
4. REZULTATI ISPITIVANJA

4.1 Zapreminska struktura mješavina

Pri optimalnoj količini bitumena 5,6% za KM, dobijena zapreminska struktura svih ispitanih mješavina predstavljena je na slikama 2 - 7.

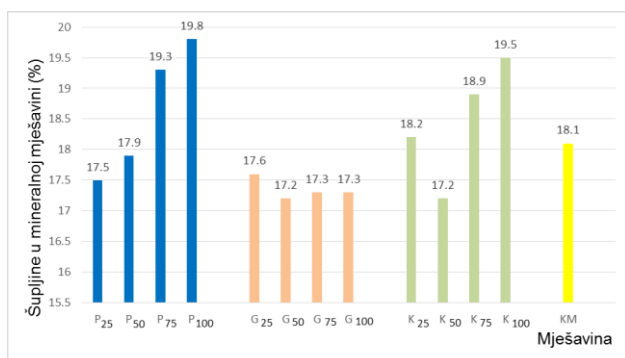

Slika 2. Prividna zapreminska masa

Prividna zapreminska masa svih mješavina P i G grupe, kao i mješavina K₂₅ i K₅₀ je manja od KM, dok mješavina K₇₅ ima skoro identičnu prividnu zapreminsku masu kao i KM, a kod mješavine K₁₀₀ je ona za 0,4 % veća u odnosu na KM). Mješavina P₂₅ ima najmanju maksimalnu zapreminsku masu, za 1,5% manju od KM.



Slika 3. Zapreminska masa

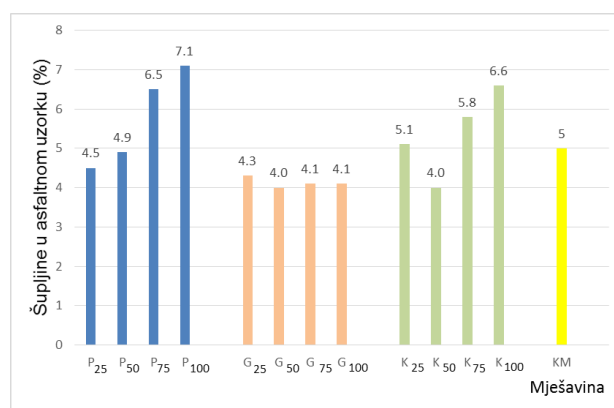
Zapreminska masa mješavina iz P i K grupe je manja od zapreminske mase KM, dok mješavine iz G grupe imaju vrijednosti veće od KM, pri čemu zapreminska masa mješavina G blago raste sa porastom sadržaja pepela. Zapreminska masa mješavina P grupe ima vidno opadajući trend sa porastom sadržaja pepela, dok mješavine grupe K imaju slabije izražen opadajući trend sa porastom procenta zamjene. Najmanju zapreminsku masu ima mješavina P₁₀₀ (za 3,4% manju od KM), dok najveću zapreminsku masu ima mješavina G₁₀₀ (za 0,6 % veću od KM).



Slika 4. Šupljine u mineralnoj mješavini

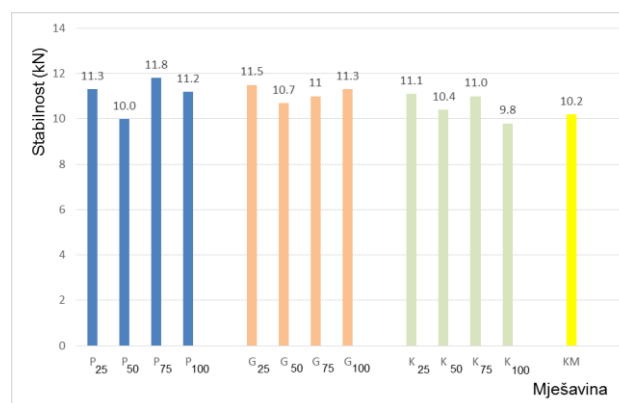
Šupljine u mineralnoj mješavini u svim mješavinama G grupe imaju uglavnom iste vrijednosti, i to manje od vrijednosti za KM. Kod mješavina iz P grupe uočljiv je konstantan prirast šupljina u mineralnoj mješavini sa porastom procenta zamjene. Do 50% zamjene, šupljine su manje nego kod KM, dok se sa povećanjem procenta zamjene šupljine značajno uvećavaju. U mješavinama K grupe uočava se značajan pad šupljina kod mješavine K₅₀, dok za ostale mješavine iz ove grupe šupljine u mineralnoj mješavini prevazilaze vrijednosti za KM.

Najnižu vrijednost šupljina u mineralnoj mješavini imaju mješavine G₅₀ i K₅₀, za 4,9% manju od KM, dok najveću vrijednost imaju mješavine iz P i K grupe sa 75% i 100% zamjene, pri čemu su šupljine u mineralnoj mješavini P₁₀₀ za 9,4% veće od KM.



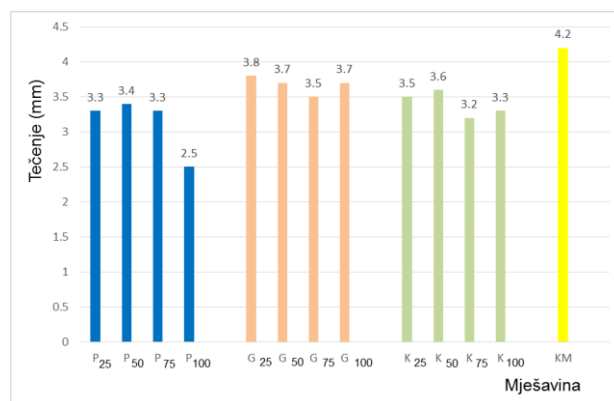
Slika 5. Šupljine u asfaltnom uzorku

Šupljine u asfaltnim mješavinama P, G i K grupe uglavnom imaju isti trend u okviru grupe kao i šupljine u mineralnoj mješavini. Mješavine G grupe i K₅₀ imaju u prosjeku za oko 16% manje šupljine od KM, dok se mješavina P₁₀₀ ističe sa najvećim procentom šupljina u asfaltnoj mješavini, za čak 42% većim u odnosu na KM. Ovu mješavinu prate P₇₅ i K₁₀₀ sa oko 31% većim šupljinama u odnosu na KM.



Slika 6. Stabilnost

Stabilnost svih mješavina sa pepelom je veća od stabilnosti KM, osim mješavine K₁₀₀ koja ima najmanju stabilnost od svih ispitanih mješavina (za 3,9% manju od KM), dok je P₅₀ izjednačena sa KM. Mješavina P₇₅ ima najveću stabilnost, za 15,7 % veću od KM.

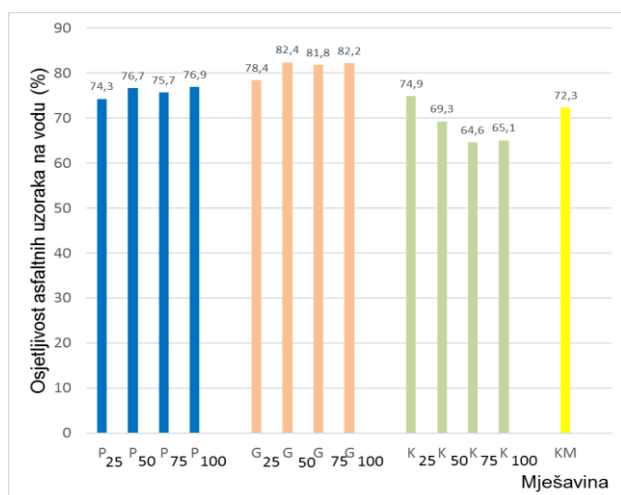


Slika 7. Tečenje

Tečenje (deformacija) svih mješavina sa pepelom je manja od KM, pri čemu P grupa generalno ima najmanje vrijednosti. Mješavina P₁₀₀ ima najmanju deformaciju, čak 40% manju od KM. Mješavine G i K grupe imaju uglavnom uravnotežene vrijednosti unutar grupe, u prosjeku za oko 16,7 % manje u odnosu na KM.

4.2 Otpornost na dejstvo vode

Otpornost asfaltnih uzoraka na vodu izražena je kao odnos čvrstoća na indirektno zatezanje uzoraka u vodom zasićenom stanju i uzoraka u suvom stanju, prikazana je na slici 8.

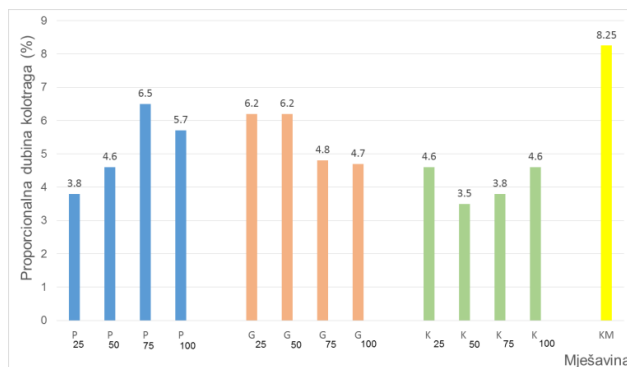


Slika 8. Otpornost asfaltnih uzoraka na vodu

Odnos čvrstoća na indirektno zatezanje uzoraka u vodom zasićenom stanju i uzoraka u suvom stanju trebao bi da se nađe u rasponu 70%-80%, dok minimalni zahtjev prema MORTH (2013) iznosi 75%. KM se nalazi u rasponu 70% – 80%, ali je ispod 75%. Sa dijagrama na slici 8 je uočljivo da mješavine K₅₀, K₇₅ i K₁₀₀ ne udovoljavaju čak ni blažem od ova dva kriterijuma. Mješavine grupe P su u zahtijevanom rasponu 70% - 80%, dok se mješavine grupe G odlikuju boljom otpornošću na dejstvo vode: mješavina G₅₀ ima odnos čvrstoća na indirektno zatezanje za 14% veći od KM.

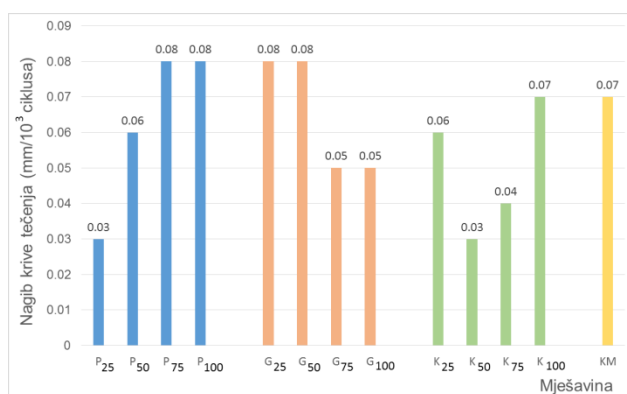
Otpornost na trajnu deformaciju

Na slici 9 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti mješavina na trajnu deformaciju izraženi preko proporcionalne dubine kolotruga u odnosu na debljinu uzorka. Na slici 10 prikazan je nagib krive tečenja.



Slika 9. Proporcionalna dubina kolotruga

Proporcionalna dubina kolotruga je najveća kod KM i sve mješavine sa dodatkom pepela imaju manju dubinu kolotruga od KM. U P grupi se vidi prirast kolotruga do 75% zamjene, poslije čega se kolotrazi smanjuju. U G grupi postoji izvjestan trend smanjenja kolotruga sa dodatkom pepela. Mješavine sa G₇₅ i G₁₀₀ u ovoj grupi imaju najmanje kolotrage. Kod K grupe najveći kolotrazi su kod mješavina K₂₅ i K₁₀₀, dok mješavina K₅₀ ima najmanje kolotrage od svih mješavina, za 57,6 % manje od KM.



Slika 10. Nagib krive tečenja

Nagib krive tečenja u rasponu 10 000 – 20 000 ciklusa generalno prati trendove koje ima proporcionalna dubina kolotruga. Kod mješavine grupe P povećanje dubine kolotruga se ubrzava sa povećanjem procenta pepela, dok je kod mješavina u grupi G evidentan opadajući trend, odnosno dodatak pepela utiče na smanjenje brzine prirasta deformacije. Kod mješavina grupe K nagib krive tečenja se smanjuje sa dodatkom pepela do 50%, a zatim, slično mješavinama u grupi P, povećava sa dodatkom veće količine pepela.

5. DISKUSIJA REZULTATA

Prividna zapreminska masa mješavina sa pepelom je tipično manja nego kod kontrolne mješavine. Jedino je kod mješavina K₇₅ i K₁₀₀ dobijena ista ili veća (respektivno) prividna zapreminska masa u odnosu na kontrolnu mješavinu.

Najmanja prividna zapreminska masa je dobijena za P mješavine, što je očekivano, imajući u vidu da ovaj pepeo ima najmanju zapreminsku masu (tabela 2). Prividna zapreminska masa mješavine iz G grupe je ujednačena, bez obzira na procenat dodatog pepela. Mješavine K₂₅ i K₅₀ imaju prividnu zapreminsku masu uporedivu sa mješavinama iz grupe G, a sa povećanjem sadržaja pepela u K grupi, prividna zapreminska masa se značajno povećava.

Za mješavine P i K grupe dobijen je generalno trend porasta prividne zapreminske mase sa porastom sadržaja pepela (izuzev mješavine K₅₀), dok je kod mješavine iz G grupe prividna zapreminska masa skoro konstantna, sa vrlo blagim rastućim trendom.

Zapreminska masa laboratorijskih uzoraka mješavina P grupe ima najmanje vrijednosti, što korespondira sa zapreminskom masom pljevalskog pepela. Mješavine G grupe imaju veće zapreminske mase od kontrolne mješavine, što takođe odgovara podatku o zapreminskoj težini gatačkog pepela, dok je za mješavine iz K grupe, za sve procenat zamjene kamenog brašna pepelom, zapreminska masa manja od zapreminske mase kontrolne mješavine. Ovaj podatak ne korelira sa podatkom o težini kosovskog pepela, koji ima veću zapreminsku masu od kamenog brašna.

Uočljivo je da zapreminske mase mješavina iz P i G grupe koreliraju sa zapreminskim masama pepela u odnosu na KM, dok zapreminske mase mješavina iz K grupe imaju nešto niže vrijednosti u odnosu na trend zapreminske težine kosovskog pepela u odnosu na ostale pepele. Očigledno je da karakteristike kosovskog pepela utiču na kompaktilnost mješavine zbog različite interakcije materijala u odnosu na ostale pepele.

Šupljine u mineralnoj mješavini i šupljine u asfaltnom uzorku kod mješavina P i K grupe imaju rastući trend (izuzev mješavine K₅₀), pri čemu za veće sadržaje pepela prevazilaze odgovarajuće šupljine u kontrolnoj mješavini. Obije kategorije šupljina za mješavine grupe G su skoro konstantne i manje od odgovarajućih šupljina u kontrolnoj mješavini.

Stabilnost svih mješavina izuzev P₅₀ i K₁₀₀ je veća od stabilnosti kontrolne mješavine, a i za te dvije mješavine je dobijena neznatno manja stabilnost od kontrolne mješavine. Tečenje svih mješavina je manje od tečenja kontrolne mješavine. Tečenje je najmanje kod P mješavina, a najveće kod G mješavina.

Otpornost na dejstvo vode kod svih mješavina P i G grupe je veća nego kod kontrolne mješavine i relativno malo zavisi od sadržaja pepela. Pri tome mješavine iz grupe P imaju nešto bolju otpornost na dejstvo vode. Mješavine iz grupe K imaju manju otpornost od kontrolne mješavine i otpornost se smanjuje sa povećanjem sadržaja pepela.

Dodatak bilo kog od tri pepela koji su korišćeni u eksperimentalnom istraživanju pozitivno utiče na otpornost mješavina na trajnu deformaciju, tako da sve tri grupe mješavina imaju manju proporcionalnu dubinu kolotruga u odnosu na kontrolnu mješavinu, i kreću se od 3.5% do 6.5% za sve mješavine, što je manje od kritičnih 7% koji se uzimaju kao granična deformacija za teško saobraćajno opterećenje. Međutim, brzina prirasta deformacije, odnosno nagib krive tečenja je veći od nagiba za kontrolnu mješavinu koji iznosi 0.07, za mješavine grupe P sa velikim sadržajem pepela (P₇₅ i P₁₀₀) i iz grupe G sa malim sadržajem pepela (G₂₅ i G₅₀). Za sve ostale mješavine nagib je jednak ili manji od nagiba kontrolne mješavine (Mirković, Mladenović 2017).

6. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati ispitivanja svojstava elektrofilterskog pepela kako bi se utvrdila njihove podobnost za primjenu u asfaltnim mješavinama. Takođe, prikazani su i rezultati ispitivanja zapreminske strukture, otpornosti na dejstvo vode i otpornosti na trajnu deformaciju 12 eksperimentalnih asfaltnih mješavina u kojima je kameno brašno u određenom procentu (25%, 50%, 75%, i 100%) zamijenjeno sa tri vrste elektrofilterskog pepela različitog porijekla (TE „Pljevlja“, TE „Gacko“ i TE „Kosovo B“).

Na osnovu utvrđenih osobina elektrofilterskih pepela, može se zaključiti da su ispitani pepeli pogodni za upotrebu u asfaltnim mješavinama kao djelimična ili potpuna zamjena za kameno brašno, bez rizika po ekološku bezbjednost.

Dodavanjem pepela može se postići zadovoljavajuća zapreminska struktura asfaltnih mješavina, pri čemu zapreminska masa i šupljine u mineralnoj i asfaltnoj mješavini generalno zavise od vrste pepela i njegovog sadržaja. Stabilnost i tečenje mješavina sa elektrofilterskim pepelom su bolje u odnosu na kontrolnu mješavinu.

Otpornost na dejstvo vode primarno zavisi od vrste pepela i za pepele iz grupa P i G je dobijena veća otpornost od kontrolne mješavine, dok za pepele iz grupe K ona zavisi od sadržaja pepela. Dodatak pepela iz sva tri izvora takođe doprinosi poboljšanju otpornosti na trajnu deformaciju mješavina u odnosu na kontrolnu mješavinu.

Na bazi svega iznijetog može se zaključiti da je moguće napraviti asfaltnu mješavinu AB 11s sa dodatkom pepela da se zadovolje svi zahtijevani parametri u pogledu zapreminske strukture, otpornosti na dejstvo vode i otpornosti na trajnu deformaciju. Dalja istraživanja biće fokusirana na istraživanje uticaja pepela na krutost asfaltnih mješavina.

Zahvalnost

Ispitivanja navedena u ovom radu izvršena su u sledećim institucijama: TPA za obezbeđenje kvaliteta i inovacije d.o.o., Čačak, Srbija; Laboratorija za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Srbija; Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija; Centar za ekotoksikološka ispitivanja d.o.o., Podgorica, Crna Gora. Autori se zahvaljuju na nesebičnoj podršci u izvođenju ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Ali, N., Chan, J.S., Simms, S., Bushman, R., Bergan, A.T. (1996). Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, ISSN 2028-9324 Vol.3 No. 4, pp.1101-1190, Innovative Space of Scientific Research Journals
- [2] Al-Suheibani, A.R. (1968). The Use of Fly Ash as an Asphalt Extender. PhD thesis, Univ. of Michigan, University of Microfilms International, Ann Arbor, MI.
- [3] Al-Suhaibani, A.R. & Tons, E.T. (1991) Properties of Fly Ash-extended asphalt concrete mixes. Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board, No. 1323:123-133, 1991
- [4] Androić, I., Kaluđer, G., Komljen, M. (2013). Usage of the Fly Ash in Hot Mix Asphalt Mixes. *XXVIII International Baltic Road Conference*, Vilnius, Lithuania
- [5] Bedaković, V. (1964) *Asfalt, Društvo građevinskih inženjera i tehničara*, Zagreb, 1 izdanje
- [6] Butul, B. (2000). Performance characteristics of coal fly ash and wood ash-modified asphalt mixtures, Master thesis, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida
- [7] Carpenter, C.A. (1952). A comparative study of fillers in asphaltic concrete; *Public Roads*, 27(5): 101-110.
- [8] Çelika, Ö. (2008). Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt. *Petroleum Science and Technology*; Volume 26, Issue 13
- [9] Đureković, A., Mladenović, G. (2015). The Performance of bitumen mastics with the addition of fly ash, *Bituminous Mixtures & Pavements VI – Nikolaidis (Ed.), Taylor and Francis Group*, London, ISBN 978-1-138-02866-1
- [10] Grabowski, W., Wilanowicz, J., Sobol, T. (2009) Structural and Functional Properties of Mineral Fillers Modified with Hydrated Lime. Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino.
- [11] Indian Roads Congress (2008). Tentative specifications for stone matrix asphalt, IRC: SP: 79 – 2008.
- [12] Kar, D., Panda, M. and Giri, J.P. (2014). Influence of Fly Ash as a Filler in Bituminous Mixes. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 9, No. 6, pp. 895-900.
- [13] Mikoč, M. and Marković, D. (2010) Influence of Slag, Fly Ash and Silica on the Mechanical and Physical Properties of Asphalt. *Tehnički vjesnik*, 17, 4 505-514
- [14] Mirković, K., Mladenović, G. (2017). Ispitivanje svojstava elektrofilterskog pepela u cilju primjene u asfaltnim mješavinama; Rad prihvaćen za izlaganje na naučno-stručnom skupu „Put i životna sredina“, Vršac, 28.-29.09.2017.
- [15] Mirković, K., Mladenović, G. (2017). Karakteristike asfaltnih mješavina AB 11s sa dodatkom elektrofilterskog pepela; Rad prihvaćen za izlaganje na naučno-stručnom skupu „Put i životna sredina“, Vršac, 28.-29.09.2017.
- [16] Mistry, R. and Roy, T.K. (2016). Effect of Fly Ash as Alternative Filler in Hot Mix Asphalt. *Perspectives in Science*, 8, 307-309
- [17] MORTH (2013). Specifications for Road and Bridge Works, 5th revised edition, *Indian Roads Congress (IRC)*, Ministry of Road Transport & Highways, India
- [18] Sharma, V.; Chandra, S.; Choudhary, R. (2010).
- [19] Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 22, No. 12, pp. 1209-1216
- [20] Rongali, U., Singh, G., Chourasiya, A., Jain, P.K. (2013). Laboratory investigation on use of fly ash plastic waste composite in bituminous concrete mixtures; *2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG)*; ScienceDirect; Procedia - Social and Behavioral Sciences 104, 89 – 98
- [21] Sobolev, K., Flores, I.V., Bohler J. D., Faheem, A., Covi Art. (2013). Application of Fly Ash in ASHphalt Concrete: from Challenges to Opportunities, *World of Coal Ash Conference*, April 22-25, 2013, Lexington, Kentucky
- [22] Sobolev, K., Flores, I.V., Saha, R. Wassiudin, N.M. (2014) The Effect of Fly Ash in the Rheological Properties of Bituminous Materials, *Fuel*, Volume 116, 15 January 2014, Pages 471-477
- [23] Voskuilen, J.L.M.; Molenaar, J.M.M. (1996) Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate, Proc.1st Eurasphalt and Eurobitume Congress, paper 4.078.
- [24] Zimmer, F. V. (1970). Fly ash as a bituminous filler, *U.S. Department of Interior, Bureau of Mines*, Washington, D.C.