

Primljen / Received: 27.8.2016.
 Ispravljen / Corrected: 14.10.2016.
 Pribvačen / Accepted: 28.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.11.2017.

Fizikalno-mehanička svojstva letećeg pepela primjenjivog pri građenju cesta

Autori:



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



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



¹Prof.dr.sc. **Milinko Vasić**, dipl.ing.geol.
vaske@uns.ac.rs



¹Prof.dr.sc. **Mitar Đogo**, dipl.ing.građ.
mitar@uns.ac.rs



²**Milovan Jotić**, dipl.ing.geol.
jotic@highway.rs

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

²Institut za puteve, Beograd

Prethodno priopćenje

Miloš Šešlija, Nebojša Radović, Milinko Vasić, Mitar Đogo, Milovan Jotić

Fizikalno-mehanička svojstva letećeg pepela primjenjivog pri građenju cesta

U radu je prikazano eksperimentalno istraživanje fizikalno-mehaničkih svojstava letećeg pepela i stabiliziranog pepela s dodatkom vapna i cementa primjenjivog za gradnju cesta. Vezivo je dodavano sa 2, 4 i 6 % u odnosu na ukupnu količinu letećeg pepela. Nakon izvršenih ispitivanja uočljivo je da uzorci pepela bez dodataka i s dodatkom veziva mogu koristiti za izradu temeljnog tla, nasipa i posteljice, dok za izradu nosivih slojeva nisu preporučljivi. Istraživanje se temelji na korištenju letećeg pepela za izgradnju cesta, odnosno kao zamjena prirodnim materijalima u građevinarstvu, pri čemu se štede prirodni resursi čije su rezerve ograničene.

Ključne riječi:

leteći pepeo, fizikalno-mehanička svojstva, cement, vapno

Preliminary note

Miloš Šešlija, Nebojša Radović, Milinko Vasić, Mitar Đogo, Milovan Jotić

Physicomechanical properties of fly ash applicable in road construction

An experimental research of physicomechanical properties of fly ash and ash stabilized with lime and cement, as used in road construction, is presented in the paper. The binder was added in the proportion of 2, 4 and 6 % of the total quantity of fly ash. The testing revealed that ash samples with and without binder can be used for improvement of foundation soil and for construction of embankments and subgrade layers, but are not recommended for construction of subbase and base courses. The research is based on the use of fly ash for road construction, i.e. as a substitute for natural materials in construction industry, as this use would save natural resources whose reserves are limited.

Key words:

fly ash, physicomechanical properties, cement, lime

Vorherige Mitteilung

Miloš Šešlija, Nebojša Radović, Milinko Vasić, Mitar Đogo, Milovan Jotić

Physikalisch-mechanische Eigenschaften von Flugasche, die beim Straßenbau eingesetzt wird

In der Arbeit wird eine experimentelle Untersuchung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Flugasche und der stabilisierten Asche mit Zugabe von Kalk und Zement im Straßenbau dargestellt. Der Anteil des Bindemittels betrug 2, 4 und 6 % der Gesamtmenge von Flugasche. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Ascheproben ohne und mit Zusatz von Bindemittel für die Herstellung des Baugrunds, der Dammschüttung und des Planums eignen, während sie für die Herstellung von tragenden Schichten nicht zu empfehlen sind. Die Untersuchung beruht auf der Verwendung von Flugasche im Straßenbau, bzw. als Ersatz für natürliche Rohstoffe im Bauwesen. Dabei wird eine schonende Verwendung der natürlichen Ressourcen ermöglicht, deren Bestände ohnehin begrenzt sind.

Schlüsselwörter:

Flugasche, physikalisch-mechanische Eigenschaften, Zement, Kalk

1. Uvod

Leteći pepeo predstavlja mineralni ostatak koji nastaje kao proizvod izgaranja ugljena u visokim pećima termoelektrana. Sastoji se od sitnih čestica pretežno silikatnog stakla, koje se uklanjaju u elektrostatskim filtrima iz plinovitih proizvoda izgaranja. Budući da nastaju i očvršćuju iz otpadnih plinova, čestice letećeg pepela su sferičnog oblika, dimenzije od 0,074 do 0,005 mm, male zapremine, lako su pokretljive i izazivaju niz problema u životnoj sredini.

Deponiji pepela znatno utječu na narušavanje okoliša, što se očituje onečišćenjem zraka, tla, površinskih i podzemnih voda, biljnog pokrivača, kao i remećenjem stabilnosti ekosustava, a sve to utječe na zdravlje ljudi. Svi navedeni negativni indikatori u okolišu koje izaziva leteći pepeo, mogu se otkloniti ili smanjiti ako se upotrijebi kao građevni materijal za građenje cesta i drugih kolničkih površina [1]. Upotreba letećeg pepela u Europi se najčešće koristi za proizvodnju cementa, betona, nasipa, zamjena tla, i dr [2]. Najveća primjena letećeg pepela je u proizvodnji cementa, budući da zbog svog kemijskog sastava ima pucolanska svojstva [3, 4].

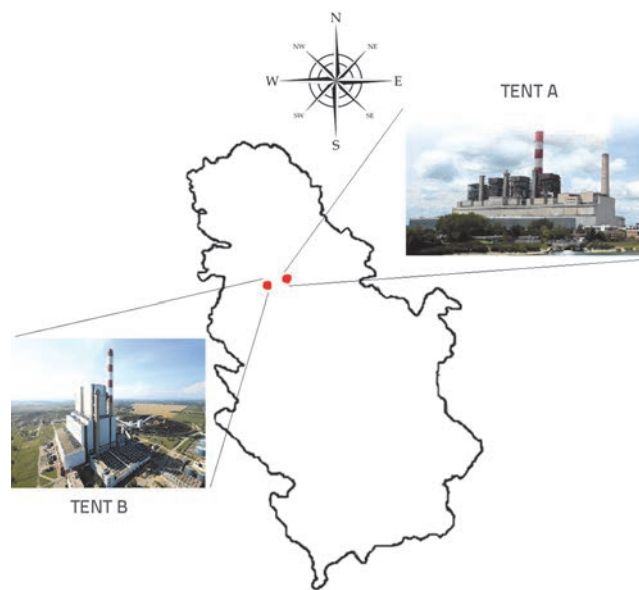
Većina istraživanja u svijetu i kod nas se temelje na uporabi letećeg pepela kao zamjene cementa pri proizvodnji betona [5-8]. Mohanty i Patra [9] su analizirali dinamički odgovor kosina nasipa izrađenih od letećeg pepela pri statičnim i cikličnim troosnim ispitivanjima. Neki od autora su istraživali utjecaj letećeg pepela na asfalt, te su došli do zaključka da dodatak letećeg pepela rezultira većom zateznom čvrstoćom i zapreminskom masom asfalta, te povećanjem otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanje i zamora materijala [10-12]. Suheibani [13] je istraživao leteći pepeo kao dodatak asfaltu te je zaključio da dodatak ovog punila omogućava poželjan vijek trajanja, otpornost na trenje i vlačnu čvrstoću. Temeljem vrijednosti indeksa obradivosti na različitim temperaturama, Cabrera i Zoorob [14] su zaključili da se leteći pepeo može miješati i zbijati na niskim temperaturama bez ikakvih štetnih učinaka, kao i na 110°C i 85°C. Baykal i ostali [15] su ispitivali leteći pepeo za izradu nasipa u hladnim klimatskim uvjetima. Nakon provedenih ispitivanja, autori dolaze do zaključka da se leteći pepeo može koristiti za izradu nasipa u hladnim krajevima. Autori radova [16, 17] koristili su leteći pepeo za stabilizaciju tla. Na osnovu prikazanih istraživanja, zaključeno je da leteći pepeo poboljšava svojstva tla. Tadić i ostali [18] su analizirali upotrebu letećeg pepela u izgradnji cesta. Nakon provedenih ispitivanja autori dolaze do zaključka da se obje mješavine mogu koristiti za izradu temeljnog tla, nasipa i posteljice. U radu [19] analizirani su leteći pepeo i zgura bez dodatka i s dodatkom vapna, kao i s dodatkom i bez dodatka agregata frakcije 0-63 mm. Nakon izvršenih ispitivanja autori zaključuju da se leteći pepeo i zgura u kombinaciji s vapnom i kamenim agregatom mogu koristiti u raznim slojevima cesta i platoa, počevši od temeljnog tla, zatim nasipa i posteljice, pa do donjih nosivih slojeva kolničke konstrukcije.

Predmet istraživanja u ovom radu su laboratorijska ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava letećeg pepela iz termoelektrane

Nikola Tesla A (TENT A) i Nikola Tesla B (TENT B). Fizikalno-mehanička svojstva (jednoosna tlačna čvrstoća, indirektna vlačna čvrstoća, modul elastičnosti, indeks otpornosti na utjecaj vode i indeks otpornosti na utjecaj mraza) omogućavaju njihovu primjenu kao građevnog materijala, pri čemu se smanjuje uporaba prirodnih resursa za izgradnju cesta. Cilj ovog rada se temelji na ispitivanju fizikalno-mehaničkih svojstava letećeg pepela bez dodatka i s dodatkom veziva (cementa i vapna) i uspostavljanje korelacije između fizikalnih i mehaničkih svojstava.

2. Priprema i ispitivanje uzoraka

Uzorci letećeg pepela uzorkovani su u TENT A i TENT B (slika 1.). Termoelektrane NT A i NT B koriste ugljen iz Kolubarskog basena. Kolubarski ugljeni basen je poznat kao jedan od najvećih i najznačajnijih lignitskih basena u Srbiji. Taj veliki basen ispunjen je neogenim i kvartarnim sedimentima koji transgresivno i diskordantno leže preko paleozojsko-mezozojske podloge koju u istočnom dijelu mjestimično probijaju dacito-andeziti i piroklastiti. Dosadašnja ispitivanja kvalitete provedena su pomoću brojnih analiza ugljena iz bušotina i s ugljenih etaža, a njihovi rezultati prikazani su u tablici 1. [20].



Slika 1. Prikaz ispitivanih lokacija

Na osnovi prikazanih rezultata, zapaža se da kvaliteta ugljena u ležištu ugljena s dubinom raste, od povlatnog prema podinskom ugljenom sloju. Dakle, Kolubarski ugljeni basen raspolaže veoma značajnim rezervama lignita koje predstavljaju bazu za daljnje planiranje i organiziranje na samo proizvodnje ugljena nego i ispitivanja ležišta [20].

Uzorkovanje pepela provedeno je neposredno u blizini elektrofiltra u fazi hlađenja, prije nego što je pepeo došao u kontakt s vodom. Potrebne količine uzoraka za laboratorijska

Tablica 1. Kvaliteta ugljena Kolubarskog bazena

Elementi ispitivanja	Povlatni sloj I [%]	Glavni sloj II [%]	Podinski sloj III [%]
Vlaga	57,10	46,00	42,15
Pepeo	15,04	15,33	19,42
Sumpor, ukupni	0,39	0,42	0,91
Sumpor u pepelu	0,15	0,20	0,20
Sumpor, izgoriv	0,24	0,22	0,71
C-fix	10,21	15,34	17,23
Isparljivo	17,65	22,83	21,20
Izgorivi	27,86	38,67	38,43
Gornja kalorična vrijednost [kJ/kg]	6,95	10,16	10,22
Donja kalorična vrijednost [kJ/kg]	5,27	8,61	8,82
Ugljik	15,10	25,62	19,72
Vodik	1,92	2,39	1,93
Sumpor izgoriv	0,21	0,22	0,40
Dušik+kisik	7,25	10,44	9,07

Tablica 2. Svojstva cementa, vapna i letećeg pepela

Svojstva	Sastojci			
	CEM II/B-M (V-L) 32,5 R	Hidratizirano vapno	Leteći pepeo	
			TENT A	TENT B
Gubitak žarenjem [%]	8,42	25,25	9,88	10,50
SO ₃ [%]	2,72	0,31	0,12	0,16
SiO ₂ [%]	18,25	0,08	51,06	52,12
Fe ₂ O ₃ [%]	2,25	0,02	6,14	6,30
Al ₂ O ₃ [%]	5,46	0,05	20,50	20,97
CaO [%]	60,37	71,38	7,27	5,51
MgO [%]	1,95	2,67	2,70	2,30
Cl [%]	0,006	-	0,006	0,003
Gustoća [g/cm ³]	3,02	2,26	2,10	2,12

ispitivanja pepela osigurane su u tri navrata. Uzorci su pripremljeni bez dodatka i s dodatkom veziva. Za vezivo je korišten cement i vapno. Osnovna svojstva cementa, vapna i letećeg pepela iz TENT A i TENT B prikazani su u tablici 2. Količina veziva u mješavini je iznosila 2, 4 i 6 % od ukupne mase letećeg pepela. Klasifikacija letećeg pepela prema normi EN 14227-4 [21] za obje termoelektre pripada klasi krečnjačkih pepela. Ova klasifikacija se temelji na udjelu kalcijevog oksida (CaO), a prema klasifikaciji ASTM C-618 [22] leteći pepeo za obje termoelektre pripada klasi F, tzv. kiselim pepelima. ASTM C-618 klasifikacija se temelji na osnovi udjela pojedinih oksida (silicijev dioksid (SiO₂), aluminijev oksid (Al₂O₃) i željezni trioksid (Fe₂O₃)) i dodatno obuhvaća udio kalcijevog oksida (CaO) koji znatno utječe na pucolanska svojstva letećeg pepela. Klasa F tzv. kiseli pepeli imaju nizak udio CaO (manje od 10 %) i najmanje 70 % udjela oksida, dok pepeli klase C imaju visok udio CaO (više od 10 %) i najmanje 50 % udjela oksida. Iako posjeduje pucolanska svojstva, staklasti

silicijev dioksid i aluminijev oksid unutar pepela klase F zahtijevaju neko sredstvo za poboljšavanje vezivnih karakteristika, kao što je portland cement ili vapno uz pristnost vode kako bi došlo do reakcije i dobivanja kalcijevog silikatnog hidrata. Granulometrijski sastavi letećeg pepela prikazani su u tablici 3. i dobiveni su kao srednje vrijednosti od tri ispitana uzoraka za obje termoelektre, a sastojci pripremljenih mješavina prikazani su u tablici 4. Nakon formiranih uzoraka izdvojene su potrebne količine materijala za sljedeća fizikalno-mehanička ispitivanja:

- jednoosna tlačna čvrstoća;
- indirektna vlačna čvrstoća;
- modul elastičnosti;
- indeks otpornosti na utjecaj vode;
- indeks otpornosti na utjecaj smrzavanja.

Za općenito razmatranje karakteristika pepela kao građevnog materijala i izračunavanje stabilnosti i nosivosti primjenjuju

Tablica 3. Granulometrijski sastav letećeg pepela

Sito [mm]	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,09	0,063
TENT A, prolaz [%]	100	100	99	97	91	73	60	57
TENT B, prolaz [%]	100	100	100	98	94	76	62	58

Tablica 4. Sastav mješavine letećeg pepela

Lokacija	Mješavine	Sastav	Leteći pLPeo [kg/m ³]	CEM II/B-M (S-L) 32,5 R [kg/m ³]	Hidratizirano vapno [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]
TENT A	LP		1023,9	-	-	512,4
	LP-2V		1008,7	-	20,2	500,3
	LP-4V		997,5	-	39,9	486,4
	LP-6V		989,3	-	59,4	470,9
	LP-2C		1009,1	20,2	-	500,5
	LP-4C		995,5	39,8	-	485,4
	LP-6C		982,3	58,9	-	467,6
TENT B	LP		1130,7	-	-	466,6
	LP-2V		1119,9	-	22,4	452,4
	LP-4V		1105,1	-	44,2	440,0
	LP-6V		1090,6	-	65,4	427,5
	LP-2C		1129,6	22,6	-	450,4
	LP-4C		1133,2	45,3	-	431,9
	LP-6C		1136,3	68,2	-	413,6

TENT A: termoelektrana Nikola Tesla A, TENT B: termoelektrana Nikola Tesla B, LP: leteći pepeo bez veziva, LP-2V: leteći pepeo sa 2 % vapna, LP-2C: leteći pepeo sa 2 % cementa

se i parametri dobiveni određivanjem čvrstoće pri jednoosnoj kompresiji i slobodnom bočnom širenju. Za ovo ispitivanje korišteni su uzorci valjkastog oblika promjera 100mm i visine 200mm, čime je zadovoljen uvjet da omjer visine i promjera iznosi 2:1 [23]. Uzorci su posebno pripremljeni u trodijelnom kalupu i zbijani po Proctorovom postupku u pet slojeva. Uzorci su ispitani nakon njege od 7 i 28 dana u vlažnoj komori. Ispitivanje modula elastičnosti predstavlja odnos između naprezanja i deformacija. Ispitivanje se sastoji od određivanja odnosa naprezanja pri 30 % maksimalne jednoosne tlačne čvrstoće i odgovarajuće relativne deformacije, i to u prvom ciklusu opterećenja. Ispitivanje modula elastičnosti je provedeno u skladu s normom EN 13286-43 [24]. Također su provedena i ispitivanja na materijalima izloženim djelovanju vode i smrzavanja. Utjecaj vode je ispitivan na potopljenim uzorcima, nakon 28 dana njege u vlažnoj komori i jednodnevnim potapanjem u vodi do 3/4 visine uzorka. Uspoređivanjem jednoosne tlačne čvrstoće na tako pripremljenim uzorcima i odgovarajućim uzorcima bez potapanja, definiran je i indeks otpornosti na djelovanje vode (R_p), pri čemu je vrijednost indeksa izražena u postocima (%). Upotrebom pepela u donjim nosivim slojevima, pri izgradnji kolničkih konstrukcija, može doći do smrzavanja koji po tehničkim uvjetima prodire do 0,8 m dubine [25], što je uvjetovano klimatskim područjem. Sva ispitivanja na utjecaj smrzavanja obavljena su na uzorcima koji su 10 dana njegovani u vlažnoj komori, a potom izloženi ukupnom broju od

14 ciklusa smrzavanja. Preostalo vrijeme do 28 dana njegovani su u vlažnoj komori prema normi SRPS U.B.1.50 [26].

Većinu zrnatih materijala nije moguće direktno izložiti vlačnim silama, pa je u tu svrhu razvijena standardna metoda indirektno vlačne čvrstoće. Indirektna vlačna čvrstoća (Brazilski test) primjenjuje se prije svega za stabilizirane nosive slojeve. Za ovo ispitivanje korišteni su uzorci valjkastog oblika promjera 102 mm i dužine 116 mm, posebno pripremljeni u standardnom kalupu po Proctorovom postupku u tri sloja [27]. Tako pripremljeni uzorci njegovani su u vlažnoj komori 28 dana.

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

Rezultati ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava nakon 7 i 28 dana prikazani su u tablici 5., a rezultati indeksa otpornosti na djelovanje vode i smrzavanja su prikazani na slici 5. Prikazane su srednje vrijednosti za sve ispitivane uzorke. Za svaku termoelektranu pojedinačno su izdvojena po tri uzorka, odnosno ukupno 6 uzoraka letećeg pepela.

Vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće kontrolne mješavine TENT A, odnosno uzorka izrađenog od letećeg pepela bez dodatka veziva pri starosti 7 dana iznosi 0,41 MPa, odnosno 0,53 MPa pri starosti 28 dana. Kontrolna mješavina letećeg pepela iz TENT B, njegovana u vlažnoj komori, postiže vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće 0,33 MPa, odnosno 0,64 MPa pri starosti 28 dana.

Tablica 5. Svojstva letećeg pepela s dodacima i bez dodataka veziva

Lokacija	Mješavina	Starost uzorka pri ispitivanju	Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]			Indirektna vlačna čvrstoća [MPa]			Modul elastičnosti [GPa]		
			sr. vrij.	StDev	COV	sr. vrij.	StDev	COV	sr. vrij.	StDev	COV
TENT A	LP	7	0,41	0,011	2,72				0,07	0,010	14,45
		28	0,53	0,008	1,52	0,04	0,004	10,07	0,16	0,006	4,07
	LP-2V	7	0,79	0,003	0,40				0,16	0,025	15,52
		28	1,09	0,044	4,07	0,08	0,047	58,26	0,23	0,025	10,89
	LP-4V	7	0,81	0,045	5,61				0,18	0,012	6,62
		28	1,80	0,069	3,83	0,29	0,031	10,77	0,31	0,041	13,08
	LP-6V	7	0,84	0,088	10,45				0,16	0,030	18,63
		28	2,36	0,036	1,54	0,35	0,068	19,11	0,43	0,028	6,69
	LP-2C	7	1,15	0,008	0,69				0,22	0,007	3,15
		28	1,31	0,081	6,15	0,08	0,002	2,25	0,26	0,049	18,63
	LP-4C	7	1,32	0,010	0,78				0,29	0,003	1,00
		28	1,64	0,029	1,75	0,11	0,003	3,20	0,29	0,002	0,70
LP-6C	7	1,23	0,019	1,59				0,27	0,011	4,02	
	28	1,68	0,023	1,37	0,19	0,024	13,08	0,33	0,014	4,35	
TENT B	LP	7	0,33	0,026	7,77				0,12	0,006	5,05
		28	0,64	0,035	5,57	0,06	0,013	20,04	0,16	0,011	6,69
	LP-2V	7	0,61	0,018	2,90				0,18	0,008	4,37
		28	1,29	0,050	3,88	0,13	0,016	12,63	0,19	0,029	14,97
	LP-4V	7	0,81	0,024	3,00				0,19	0,006	3,37
		28	2,00	0,246	12,34	0,32	0,012	3,76	0,33	0,056	17,19
	LP-6V	7	1,09	0,085	7,81				0,24	0,007	2,78
		28	3,37	0,071	2,12	0,37	0,022	5,78	0,29	0,009	3,06
	LP-2C	7	0,62	0,070	11,26				0,20	0,007	3,77
		28	0,80	0,013	1,62	0,09	0,003	3,45	0,23	0,007	3,31
	LP-4C	7	0,99	0,118	11,92				0,26	0,005	1,74
		28	1,59	0,069	4,32	0,13	0,027	20,68	0,42	0,021	5,09
LP-6C	7	1,47	0,037	2,51				0,32	0,026	8,26	
	28	2,15	0,120	5,58	0,19	0,007	3,71	0,41	0,017	4,17	

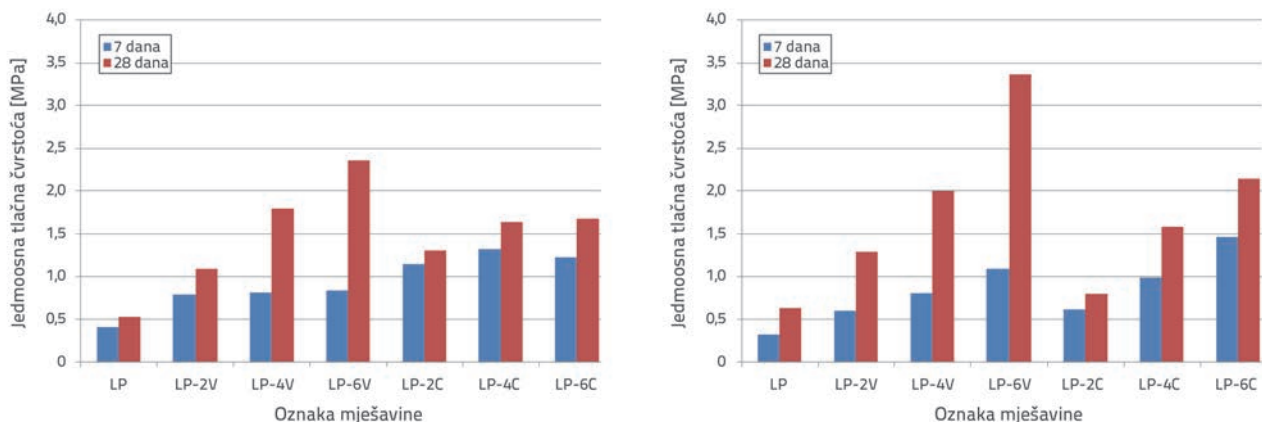
TENT A: termoelektrana Nikola Tesla A, TENT B: termoelektrana Nikola Tesla B, LP: leteći pepeo bez veziva, LP-2V: leteći pepeo sa 2 % vapna, LP-2C: leteći pepeo sa 2 % cementa, StDev: standardna devijacija, COV: koeficijent varijacije [%]

Smanjenje vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće kontrolne mješavine TENT A iznosi oko 17,2 % u odnosu na jednoosnu tlačnu čvrstoću kontrolne mješavine za TENT B pri starosti 28 dana. Očito je da promjena kemijskog sastava letećeg pepela ima značajan utjecaj na rezultate ispitivanja [15-19].

Na slici 2. lijevo vidljivo je da rana jednoosna tlačna čvrstoća letećeg pepela s dodatkom veziva (cementa i vapna) ima veću vrijednost pri starosti 7 dana u odnosu na tlačnu čvrstoću kontrolnog uzorka letećeg pepela. Međutim, značajni porast jednoosne tlačne čvrstoće bilježi se pri starosti 28 dana.

Jednoosna tlačna čvrstoća ispitivanih uzoraka povećava se uslijed procesa povećavanja količine veziva (cementa i vapna). Uzorci koji sadrže vapno kao vezivo imaju znatno bolja svojstva u odnosu na uzorke s cementom, ali tek iznad 4 % udjela veziva u mješavini. Povećanje za uzorak LP-6V iznosi oko 40,47 % u odnosu na uzorak LP-6C pri starosti 28 dana. Dobiveni rezultati su približno isti rezultatima koje su objavili Tadić i ostali, Imamović i ostali [18, 19].

Slika 2. desno pokazuje rezultate ispitivanja na uzorcima letećeg pepela iz TENT B pri starosti 7 i 28 dana. Rezultati ispitivanja su



Slika 2. Jednoosna tlačna čvrstoća letječeg pepela iz TENT A (lijevo) i TENT B (desno)

slični rezultatima ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka iz TENT A. Međutim, jednoosna tlačna čvrstoća kod uzoraka koji sadrže vapno kao vezivo pri starosti 28 dana je znatno veća od vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće iz TENT A. Dodavanjem veće količine vapna, dolazi do povećavanja jednoosne tlačne čvrstoće. Za razliku od uzoraka iz TENT A s dodatkom vapna, jednoosna tlačna čvrstoća iz TENT B s dodatkom vapna 2, 4 i 6 % je veća u odnosu na kontrolni uzorak i to za 2, 3 i 5 puta. Dodatci, cement i vapno se s prirodnim materijalima (pijesak i šljunak) ponašaju kao klasična hidraulična veziva, dok ista veziva kada se dodaju letječem pepelu imaju ulogu aktivatora pucolanskih svojstva, što za posljedicu ima drugačiji tijek hidratacije. Tijek hidratacije direktno utječe na vrijednost i brzinu dostizanja konačne čvrstoće, što je uočeno na slici 2., gdje se pepeo s dodatkom cementa drukčije ponaša u odnosu na isti pepeo s dodatkom vapna. Stupanj hidratacije uzoraka praćen je prirastom jednoosne tlačne čvrstoće i faznim promjenama mineralnog sastava metodom rendgenske difraktometrijske analize od dijelova prethodno slomljenih uzoraka. Navedena zapažanja pokazuju da je aktivacija ispitivanih pepela s ovako malom količinom dodatka u periodu do 28 dana tek počela i da bi trebalo tijekom duljeg razdoblja proces nastaviti, što bi dalo bolje i jasnije rezultate ispitivanja mineralnog sastava. U

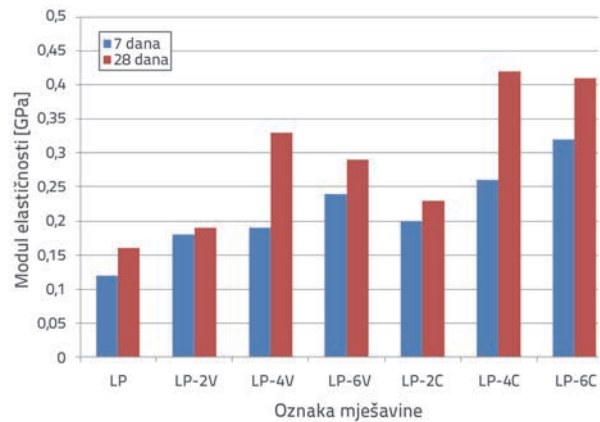
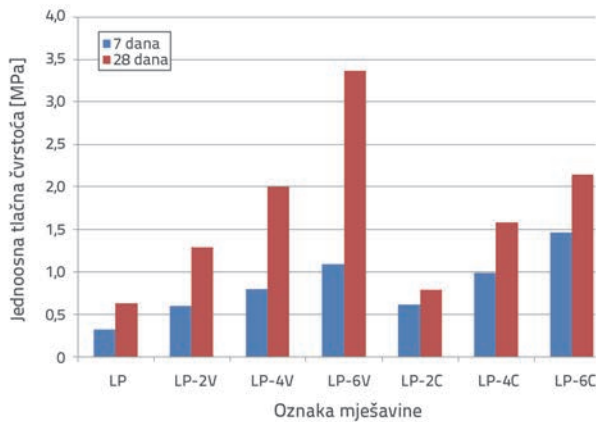
ispitivanim uzorcima kalcit je jedini mineral u kristalnom obliku koji je identificiran kao proizvod reakcije u sistemu pepeo, vezivo i voda i, osim toga, njegova količina je relativno mala i varira ovisno o više faktora. Neki od faktora su priroda pepela, vrste dodataka (vapno ili cement), procjena sudjelovanja dodataka i vrijeme njege. Uočeno je da udio kalcita uglavnom raste s povećavanjem sudjelovanja dodataka. Uzorci bez dodatka ne sadrže kalcit ili je on prisutan u tragovima. Također uzorci s cementom uobičajeno imaju manju količinu kalcita u odnosu na odgovarajuće smjese s vapnom.

Prema normi SRPS U.E9.024 [28] uzorci koji su pripremljeni s dodatkom cementa ne mogu se upotrebljavati za izradu gornjih i donjih nosivih slojeva kolničke konstrukcije. Svi uzorci ne ispunjavaju određene minimalne vrijednosti koje su propisane normom [28] i prikazane u tablici 6.

Uzorci pripremljeni s vapna i ispitivani nakon 7 dana mogu se koristiti za izradu temeljnog tla, nasipa i posteljice, dok za izradu nosivog sloja uvjet prema normi SRPS U.E9.026 [29] ispunjava samo uzorak iz TENT B LP-6V. Uzorci nakon 28 dana s dodatkom vapna mogu se koristiti za izradu svih slojeva cesta, osim uzoraka iz obje termoelektrane s dodatkom 2 % vapna, jer ne ispunjavaju uvjet minimalnih vrijednosti za nosive slojeve (tablica 6.).

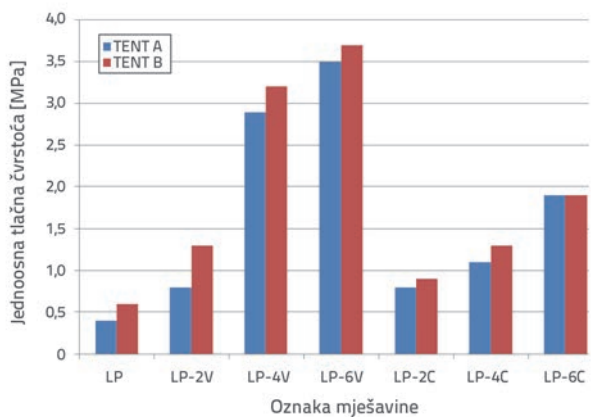
Tablica 6. Svojstva letječeg pepela s dodatkom i bez dodataka veziva

Sloj	Jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka (stabiliziranih s dodatkom cementa) [MPa] [28]		Jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka (stabiliziranih s dodatkom vapna) [MPa] [29]	
	nakon 7 dana	nakon 28 dana	nakon 7 dana	nakon 28 dana
Temeljno tlo	-	-	0,2	0,3
Nasip	-	-	0,3	0,4
Posteljica	-	-	0,4	0,5
Nosivi sloj	-	-	1,0	1,4
Gornji nosivi slojevi kolničke konstrukcije i slojevi za ojačavanje i donji nosivi slojevi kolničke konstrukcije autocesta, cesta I. i II. razreda	2 - 5,5	3 - 6,5	-	-
Donji nosivi slojevi kolničke konstrukcije cesta III. i IV. razreda	1,5 - 4,5	2,5 - 6	-	-



Slika 3. Modul elastičnosti letećeg pepela iz TENT A (lijevo) i TENT B (desno)

Ispitane su i vrijednosti modula elastičnosti pri starosti 7 i 28 dana (slika 3.) i indirektna vlačna čvrstoće pri starosti 28 dana (slika 4.). Može se uočiti da su trendovi modula elastičnosti i indirektna vlačna čvrstoće mješavina letećeg pepela bez dodatka i s dodacima veziva (cementa i vapna) slični trendovima dobivenim za tlačnu čvrstoću.



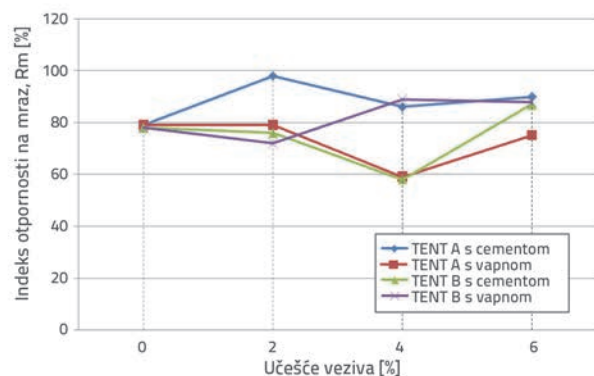
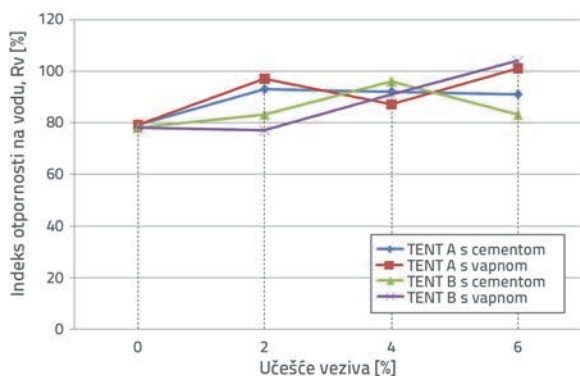
Slika 4. Indirektna vlačna čvrstoća letećeg pepela iz TENT A i TENT B nakon 28 dana

Maksimalne vrijednosti modula elastičnosti nakon 7 dana kod TENT A je postignut s udjelom 4 % cementa, a kod TENT B je

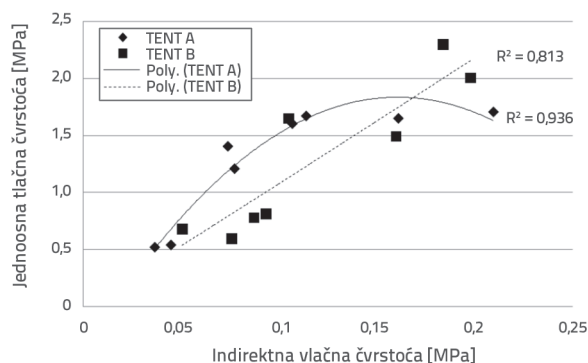
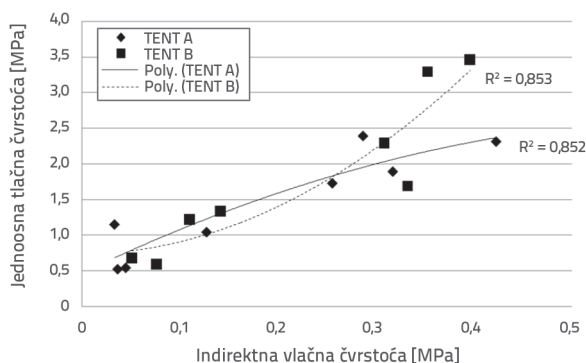
sa 6 % cementa. Nakon 28 dana, maksimalna vrijednost modula elastičnosti u TENT A je postignuta s udjelom 6 % vapna, dok kod TENT B je postignuta s 4 % cementa.

Indirektna vlačna čvrstoća je ispitana samo nakon 28 dana, pri čemu su maksimalne vrijednosti dobivene s udjelom 6 % vapna za obje termoelektre. Baykal i suradnici [15] su analizirali pepeo bez dodatka veziva, gdje je dobivena indirektna vlačna čvrstoća približna maksimalno ispitivanoj vrijednosti.

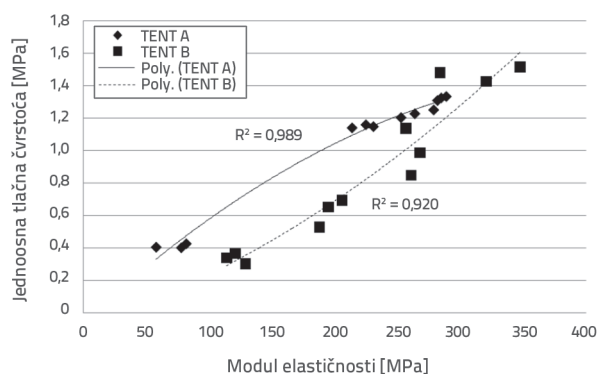
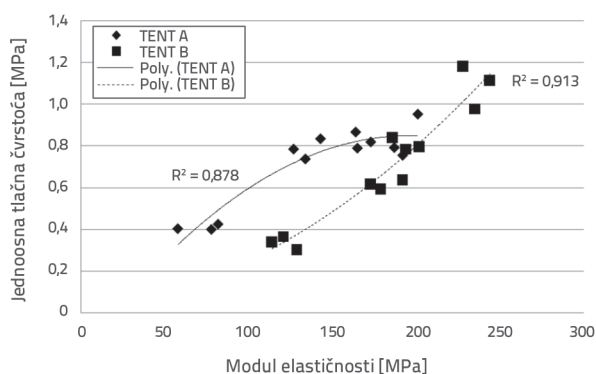
Na slici 5. lijevo prikazani su rezultati indeksa otpornosti na utjecaj vode (R_p), pri čemu je vidljivo veliko odstupanje rezultata. Primjetno je da samo uzorak koji je pripremljen iz TENT B sa 2 % vapna ima pad čvrstoće manji od 20 %, dok ostali uzorci nemaju veći pad čvrstoće što dovodi do zaključka da su ispitivani uzorci otporni na utjecaj vode. Povećavanjem količine vapna za obje termoelektre, vrijednosti se povećavaju, a s povećavanjem količine cementa vrijednosti se smanjuju. Slika 5. desno prikazuje rezultate indeksa otpornosti na utjecaj smrzavanja. Faktori koji mogu utjecati na deformaciju tla i kolničke konstrukcije uslijed djelovanja smrzavanja jesu granulometrijski sastav, razina podzemne vode, vrijeme trajanja smrzavanja i temperatura. Stabilizirani pepeo pokazuje očekivano veću osjetljivost na utjecaj smrzavanja u odnosu na utjecaj vode. Sa slike 5 desno se može zaključiti da oko 40 % od ukupno ispitivanih uzoraka, ima mali pad čvrstoće, odnosno ne veći od 20 % početne vrijednosti. Uzorci letećeg pepela bez dodatka ili s dodatkom



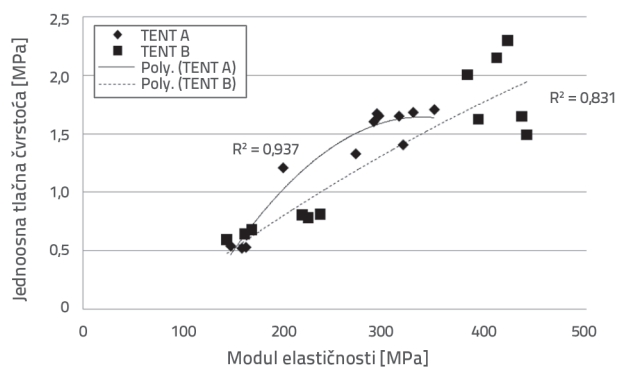
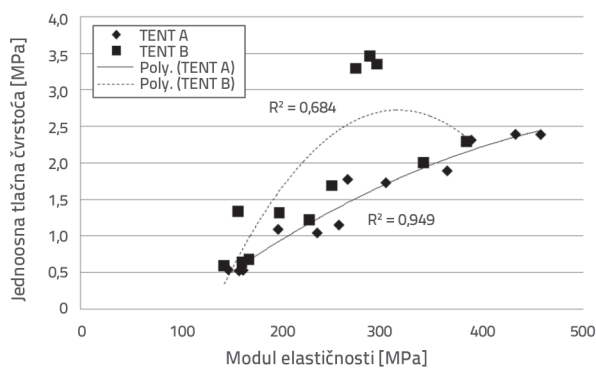
Slika 5. Indeks otpornosti na utjecaj vode (lijevo) i mraza (desno)



Slika 6. Odnos između jednoosne tlačne čvrstoće i indirektno vlačne čvrstoće sa vapnom (lijevo) i cementom (desno) nakon 28 dana



Slika 7. Odnos između jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti s vapnom (lijevo) i cementom (desno) nakon 7 dana



Slika 8. Odnos između jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti s vapnom (lijevo) i cementom (desno) nakon 28 dana

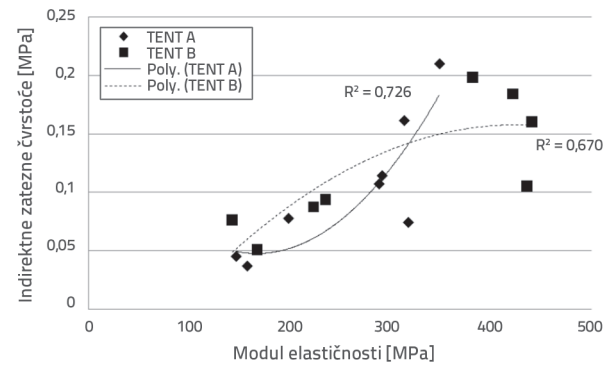
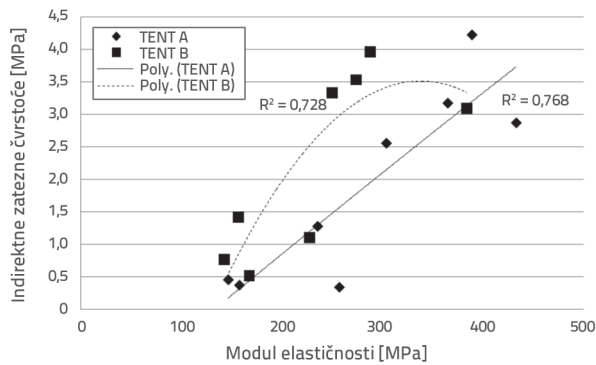
veziva (cementa ili vapna) koji imaju pad čvrstoće najviše do 20 %, predstavljaju uzorke otporne na djelovanje smrzavanja [26, 29]. Ispitivanja koja su provedena i prikazana u radovima [18, 19] pokazuju da su svi ispitivani uzorci otporni na djelovanje smrzavanja, odnosno da nemaju pad čvrstoće veći od 20 %.

3.1. Odnos između fizikalnih i mehaničkih svojstava

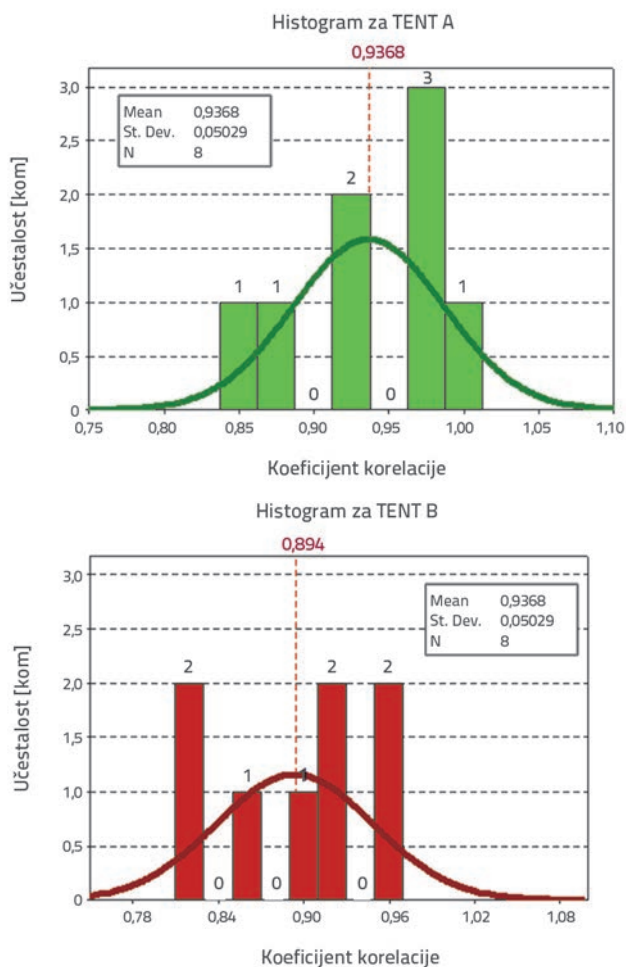
U radu su analizirani odnosi između fizikalnih i mehaničkih svojstava, nakon čega su određeni koeficijenti korelacije, koji su kasnije uspoređeni između dvije termoelektrane. Odnosi za sve analizirane uzorke određeni su pomoću polinomne funkcije, jer ta funkcija daje najbolje rezultate korelacije. Na osnovi analiziranih rezultata određeno je ukupno 16 korelacija

(8 za TENT A i 8 za TENT B). Odnos između jednoosne tlačne čvrstoće i indirektno vlačne čvrstoće nakon 28 dana, prikazan je na slici 6. Dobiveni odnosi pokazuju dobru korelaciju između jednoosne tlačne čvrstoće i indirektno vlačne čvrstoće. Rezultati ispitivanja pokazuju da čvrstoće rastu s povećavanjem količine veziva za obje termoelektrane, pri čemu uzorci s vapnom imaju veće vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće i indirektno vlačne čvrstoće.

Odnosi između jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti nakon 7 i 28 dana, prikazani su na slikama 7. i 8. Sa slika je vidljivo da cement ima bolja svojstva nakon 7 dana, a vapno ima bolja svojstva kao vezivo nakon 28 dana. Dobiveni odnos pokazuje dobru korelaciju između jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti.



Slika 9. Odnos između indirektno vlačne čvrstoće i modula elastičnosti s vapnom (lijevo) i cementom (desno) nakon 28 dana



Slika 10. Histogram za leteći pepeo iz TENT A i TENT B (Mean-srednja vrijednost; StDev-standardna devijacija; N-broj uzoraka)

Odnos između indirektno vlačne čvrstoće i modula elastičnosti (slika 9.) pokazuje dobru korelaciju za obje termoelektre prilikom korištenja vapna kao veziva, dok kod cementa i TENT B, dobivene vrijednosti značajno odstupaju u odnosu na ostale koeficijente korelacije. Sa slika 8. i 9. primjetno je

da s povećavanjem modula elastičnosti dolazi do smanjenja jednoosne tlačne čvrstoće, odnosno do smanjenja indirektno vlačne čvrstoće kod TENT B.

Rezultati istraživanja, uspoređeni su međusobno i prikazani su na histogramu (slika 10.). Na histogramu je vidljiva učestalost koeficijenta korelacije, srednja vrijednost analiziranih rezultata, standardna devijacija i broj ispitivanih uzoraka.

Na histogramu je vidljiva približno ista učestalost kod svih koeficijenata korelacije za TENT B, dok za TENT A velika učestalost se javlja kod koeficijenta korelacije 0,97 koja predstavlja vrlo jaku korelaciju. Temeljem analiziranih korelacija i prikazanih rezultata koeficijenta korelacije može se zaključiti da leteći pepeo iz TENT A ima znatno bolje vrijednosti između postignutih korelacija fizikalno-mehaničkih svojstava u odnosu na leteći pepeo iz TENT B.

4. Zaključak

Iz cjelokupnog rada, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- fizikalno-mehaničke karakteristike pepela i pepela stabiliziranog s dodatkom cementa i vapna iz TENT A i TENT B nalaze se u velikom rasponu, i to oko 50 %, kojim se potvrđuje da je ovaj materijal povoljan za izgradnju temeljnog tla, nasipa i posteljice, a ne preporučuje se za izradu nosivih slojeva jer ne ispunjava propisane uvjete.
- Leteći pepeo treba ugrađivati u trup ceste u segmentima izoliranih od utjecaja smrzavanja, površinskih i podzemnih voda, jer se time, u uvjetima uporabe cesta, sprječava ispiranje kemijskih štetnih sastojaka iz pepela i njihovo unošenje u vodne sustave.
- Odnosi između fizikalnih i mehaničkih svojstava pokazuju dobru korelaciju za sve ispitivane uzorce letećeg pepela za TENT A i TENT B, pri čemu uzorci iz TENT A daju bolje vrijednosti koeficijenta korelacija u odnosu na TENT B.

Osnovni zaključak istraživanja se temelji na korištenju letećeg pepela kao zamjene prirodnih materijala u građevinarstvu, pri čemu se štede prirodni resursi čije su rezerve ograničene i doprinosi održivom razvoju.

LITERATURA

- [1] Miletić, S., Ilić, M.: Korišćenje elektrofilterskog pepela u građenju i građevnim materijalima, Prvo izdanje, Savez građevnih inženjera i tehničara Srbije, 2007.
- [2] Kouloumbi, N., Batis, G.: Chloride corrosion of steel rebars in mortars with fly ash admixture, *Cement and Concrete Composites*, 14 (1992) 3, pp. 199-207.
- [3] Kouloumbi, N., Batis, G.: The anticorrosive effect of fly ash, slag and a Greek pozzolan in reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 16 (1994) 4, pp. 253-260.
- [4] An, J., Kim, J., Golestani, B., Tasneem, K., Al Muhit, B., Huyan Nam, B., Behzadan, A.: Evaluating the Use of Waste-to-Energy Bottom Ash as Road Construction Materials, Draft Final Report, University of Central Florida, 2014.
- [5] Skazlić, M., Rosković, R., Banjad Pečur, I.: Svojstva samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela, *GRAĐEVINAR*, 60 (2008) 11, pp. 945-952.
- [6] Chousidis, N., Rakanta, E., Ioannou, I., Batis, G.: Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 101 (2015), pp. 810-817, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.127>
- [7] Soriano, L., Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Tashima, M.M.: High strength mortars using ordinary Portland cement-fly ash-fluid catalytic cracking catalyst residue ternary system (OPC/FA/FCC), *Construction and Building Materials*, 106 (2016), pp. 228-235, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.111>
- [8] Dragaš, J., Marinković, S., Ignjatović, I., Tošić, N.: Properties of high-volume fly ash concrete and its role in sustainable development, 40th International conference Contemporary achievements in civil engineering, Subotica, pp. 849-858.
- [9] Monhanty, S., Patra, N.R.: Dynamic response analysis of Talcher pond ash embankment in India, *SOIL Dynamics and Earthquake Engineering*, 84 (2016), pp. 238-250, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.021>
- [10] Sankaran, K.S., Rao, D.R.: The influence of the quality of filter in asphaltic paving mixtures, *Indian Roads Congress*, 1973.
- [11] Henning, N.E.: Evaluation of lignite fly ash as a mineral filler in asphaltic concrete, Report No. Item 2 (73), Twin City Testing and Engineering Laboratory, St. Paul, Minnesota, 1974.
- [12] Tapkin, S.: Improved asphalt aggregate mix properties by portland cement modification, *Transport Research Board*, pp. 606-614, 2000., <http://worldcat.org/isbn/9080288438>
- [13] Suheibani, A.R.S.: The use of fly ash as an asphalt extender, PhD Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1986.
- [14] Cabrera, J.G., Zoorob, S.: Design of low energy hot rolled asphalt, The Civil Engineering Materials Unit, Department of Civil, University of Leeds, 1994.
- [15] Baykal, G., Edinçiler, A., Saygili, A.: Highway embankment construction using fly ash in cold regions, *Resources, Conservation And Recycling*, 42 (2004), pp. 209-222, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.002>
- [16] Vestin, J., Arm, M., Nordmark, D., Lagerkvist, A., Hallgern, P., Lind, B.: Fly ash as a road construction material, *Conference on WASCON 2012*, Linköping, pp. 1-8.
- [17] Vukičević, M., Pujević, V., Marjanović, M., Jocković, S., Maraš-Dragojević, S.: Stabilizacija sitnozrnatog tla letećim pepelom, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 8, pp. 761-770, <https://doi.org/10.14256/JCE.1281.2014>
- [18] Tadić, G., Gligorić, M., Došić, A., Grujić, R.: Upotreba elektrofilterskog pepela u izgradnji saobraćajnica, *Journal of Engineering & Processing Management*, 7 (2015) 1, pp. 125-139.
- [19] Imamović, A., Osmanović, H., Ljaljić, M.: Laboratorijska i eksperimentalna istraživanja primjene elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji saobraćajnica, *Savjetovanje o primjeni elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji putne infrastrukture*, Tuzla, pp. 20-29, 2003.
- [20] Pavlović, V., Matko, Z.: Rekultivacija degradiranog prostora reik Kolubara, *Geološko istraživanja u privrednom i prostornom razvoju Beograda*, Beograd, pp. 564-584, 1984.
- [21] EN 14227-4: Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 4: Fly ash for hydraulically bound mixtures, 2001.
- [22] ASTM C-618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as material admixture in concrete, *American society for testing and materials*, West Conshohocken, PA, USE, ASTM International, 2003.
- [23] EN 13286-41: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures, 2003.
- [24] EN 13286-43: Unbound and hydraulically bound mixture – Part 43: Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures, 2002
- [25] SRPS U.B9.012: Procena osetljivosti kolovone konstrukcije na dejstvo mraza i tehničke mere za sprečavanje oštećenja, *Institut za standardizaciju Srbije*, Beograd, 1981.
- [26] SRPS U.B1.50: Geomehanička ispitivanja: Ispitivanje otpornosti cementom stabilizovanog tla prema mrazu, *Institut za standardizaciju Srbije*, Beograd, 1970.
- [27] EN 13286-42: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures, 2003.
- [28] SRPS U.E9.024: Izrada nosećih slojeva kolovoznih konstrukcija puteva od materijala stabilizovanih cementom i sličnim hidrauličnim vezivima, *Institut za standardizaciju Srbije*, Beograd, 1980.
- [29] SRPS U.E9.026: Izrada stabilizovanog tla krečom i izrada nosećih slojeva za puteve od materijala stabilizovanih krečom, *Institut za standardizaciju Srbije*, Beograd, 1982.