

Primljen / Received: 25.2.2015.

Ispravljen / Corrected: 30.4.2015.

Prihvaćen / Accepted: 31.5.2015.

Dostupno online / Available online: 10.9.2015.

Stabilizacija sitnozrnatog tla letećim pepelom

Autori:



Prof. dr. sc. **Mirjana Vukičević**, dipl.ing. građ.
mirav@grf.bg.ac.rs



Veljko Pujević, dipl.ing. građ.
vpujevic@grf.bg.ac.rs



Miloš Marjanović, dipl.ing. građ.
mimarjanovic@grf.bg.ac.rs



Sanja Jocković, dipl.ing. građ.
borovina@grf.bg.ac.rs



Doc. dr. sc. **Snežana Maraš-Dragojević**, dipl.ing. građ.
snezamd@grf.bg.ac.rs

Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Mirjana Vukičević, Veljko Pujević, Miloš Marjanović, Sanja Jocković, Snežana Maraš-Dragojević

Stabilizacija sitnozrnatog tla letećim pepelom

U radu su prikazani rezultati laboratorijskog ispitivanja stabilizacije tla letećim pepelom bez primjene aktivatora. Ispitivane su dvije vrste sitnozrnatog tla: glina niske do srednje plastičnosti te vrlo ekspanzivna glina srednje do visoke plastičnosti. Mješavine tla i letećeg pepela su pripremljene s optimalnom količinom pepela (15 i 20 %). Ispitivan je utjecaj letećeg pepela na plastičnost tla, odnos vlage i gustoće, jednoosnu tlačnu čvrstoću, vrijednosti parametara posmične čvrstoće, vrijednosti CBR-a (California Bearing Ratio-CBR), deformacije i potencijal bujanja. Dobiveni rezultati pokazuju da primjena letećeg pepela može značajno poboljšati svojstva tla.

Ključne riječi:

stabilizacija tla, leteći pepeo, sitnozrnato tlo, posmična čvrstoća, CBR

Preliminary report

Mirjana Vukičević, Veljko Pujević, Miloš Marjanović, Sanja Jocković, Snežana Maraš-Dragojević

Stabilization of fine-grained soils with fly ash

Results of laboratory research focusing on soil stabilization, using fly ash without activators, are presented in the paper. Two types of fine-grained soils were tested: low to medium plasticity clay and very expansive, medium to high plasticity clay. Soil-fly ash mixtures were prepared at optimum fly ash contents (15 and 20 %). The effects of fly ash on the soil plasticity, moisture-density relationship, unconfined compressive strength, shear strength parameters, CBR (California Bearing Ratio) values, deformation parameters, and swell potential, were evaluated. Results obtained show that the use of fly ash can significantly contribute to the improvement of soil properties.

Key words:

soil stabilization, fly ash, fine-grained soil, shear strength, CBR

Vorherige Mitteilung

Mirjana Vukičević, Veljko Pujević, Miloš Marjanović, Sanja Jocković, Snežana Maraš-Dragojević

Stabilisierung feinkörniger Böden mittels Flugasche

In dieser Arbeit sind Resultate von Laborversuchen zur Bodenstabilisierung mittels Flugasche ohne Anwendung von Aktivatoren dargestellt. Zwei Typen feinkörnigen Bodens wurden getestet: Ton niedriger bis mittlerer Plastizität und sehr expansiver Ton mittlerer bis hoher Plastizität. Bodenmischungen mit einem optimalen Anteil an Flugasche (15 und 20%) wurden vorbereitet. Der Einfluss von Flugasche auf die Plastizität des Bodens, das Verhältnis von Feuchte und Dichte, die einachsige Druckfestigkeit, die Schubfestigkeitsparameter, die Werte des CBR (California Bearing Ratio-CBR), die Verformung und das Schwellungspotenzial wurden erforscht. Die Resultate zeigen, dass Flugasche die Bodeneigenschaften bedeutend verbessern kann.

Schlüsselwörter:

Bodenstabilisierung, Flugasche, feinkörniger Boden, Scherfestigkeit, CBR

1. Uvod

Leteći pepeo se dobiva procesom spaljivanja usitnjenog ugljena iz elektrofiltra ili mehaničkih uređaja za skupljanje pepela (ciklona) u termoelektranama na ugljen. Posljednjih je nekoliko desetljeća leteći pepeo široko primjenjivan u građevinskoj industriji, a najčešće se koristi za proizvodnju betona, betonskih proizvoda (približno 46 %), ispuna i nasipa (22 %) te stabilizaciju tla (10 %). Prema literaturi [1], godine 2011. se u SAD-u iskoristilo 43,5 % od ukupno proizvedenih 130 milijuna tona letećeg pepela, a u Europi se 2008. iskoristilo čak 90 % proizvedenog letećeg pepela (17,7 milijuna tona) [2].

U Srbiji se svake godine proizvede približno 7 tona letećeg pepela i zgre, od čega se tek 3 % koristi u proizvodnji cementa. Ostatak se (približno 300 milijuna tona do sada proizvedenog letećeg pepela) odlaze na odlagališta, koja se protežu na površini od približno 1600 ha [3, 4]. Leteći pepeo iz srpskih termoelektrana na ugljen ima pucolanska svojstva, ali zbog niske koncentracije kalcijevih spojeva (manje od 10 % CaO) nema samovezujuće karakteristike. U ispitivanju je primijenjen leteći pepeo razreda F, prema standardu ASTM C 168 [4], a prema europskim normama EN 197-1 pepeo je silikatnog podrijetla (tip 5).

Do danas je provedeno mnogo istraživanja o utjecaju letećeg pepela na stabilizaciju tla. Rezultati istraživanja pokazuju da je samovezujući leteći pepeo učinkovit i ekonomičan stabilizacijski materijal za različite primjene u građevinarstvu [5-13]. Prednosti primjene samovezujućeg cementa uključuju: sušenje tla, smanjenje potencijala skupljanja/bujanja te povećanje čvrstoće i nosivosti tla [5, 9, 11]. Iako bi se nesamovezujući leteći pepeo mogao upotrijebiti za stabiliziranje tla uz dodatak vezujućeg dodatka, poput vapna, vapnene prašine, cementa i cementne prašine [14], rezultati nekih istraživanja su potvrdili da leteći pepeo može poboljšati svojstva tla bez dodatnih aktivatora [15-19].

Cilj ovog istraživanja je ispitivanje učinkovitosti stabilizacije sitnozrnatog tla nesamovezujućim letećim pepelom bez dodavanja aktivatora. Ovaj rad stoga predstavlja rezultate laboratorijskog ispitivanja stabilizacije tla letećim pepelom koje je provedeno tijekom 2012. do 2014. u Laboratoriju za Mehaniku tla na Građevinskom fakultetu u Beogradu, kao dio istraživačkog projekta koji je financirala Elektroprivreda Srbije. Primijenjeni materijali su leteći pepeo iz termoelektrane *Kolubara* (KOL-FA) i *Kostolac* (KOS-FA) te glina iz projekta centra za gospodarenje otpadom *Kalenić* te glina iz projekta vjetroparka *Košava* (tlo B).

2. Ispitivani materijali

2.1. Leteći pepeo

Uzorci letećeg pepela su prikupljeni iz elektrofiltra u termoelektranama. Kemijska svojstva letećeg pepela su određena na Kemijskom fakultetu u Beogradu (tablica 1.). Kemijski sastav je u skladu s rezultatima iz literature [20]. Budući da je udio $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ iznad 70 % a udio sumpornog trioksida je manji od 5 % (KOS-FA) ili približno 5 % (KOL-FA), prema standardu ASTM C618 takav leteći pepeo je razreda F.

2.2. Tlo

Tla ispitivana u ovom istraživanju su sitnozrnata, pretežno glinovita. Uzorak tla A je prikupljen u građevnoj jami blizu mjesta budućeg centra za gospodarenje otpadom "Kalenić", u neposrednoj blizini elektrane "Kolubara". Mineralni sastav tla se sastoji od kvarca, muskovita i laganog minerala montmorilonita (ispitivanje provedeno na Kemijskom fakultetu u Beogradu). Prema USCS standardu, ta vrsta tla, poznatija kao alevrit, jest glina srednje do visoke plastičnosti, s potencijalom bujanja.

Uzorak tla B je prikupljen na području budućeg gradilišta vjetroparka Košava u blizini Vršca u Vojvodini. Teren na gradilištu se sastoji od kvartarnih naslaga lesa, koje su istog mineralnog sastava kao les, ali imaju drugačiju strukturu - nemaju potencijal kolapsibilnosti. Prema USCS standardu, ova vrsta tla je glina niske do srednje plastičnosti (CL/CI).

3. Metode ispitivanja

Razina poboljšanja tla letećim pepelom ovisi o svojstvima tla, udjelu letećeg pepela u tlu, vremenu odgode i udjelu vlage u trenutku zbijanja [14]. Za uspješnu stabilizaciju tla potrebno je koristiti optimalni postotak letećeg pepela da bi se ostvarili uvjeti nužni za kemijske reakcije i promjenu mikrostrukture tla. Objavljena istraživanja su pokazala da optimalni udio pepela iznosi 10 do 30 %, ovisno o vrsti tla i pepelu.

Ispitivani uzorci su pripremljeni u istim uvjetima, s optimalnim udjelom vlage te su zbijani u standardnom Proctorovom testu. Energija zbijanja je iznosila 600 kNm/m³. Postupak za pripremanje uzoraka tla bio je sljedeći: određena količina suhog tla i letećeg pepela se dobro promiješa da bi se dobila

Tablica 1. Kemijski sastav letećeg pepela [%]

Leteći pepeo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Reaktivni CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
KOL-FA	50,21	23,83	9,89	4,79	3,12	0,44	0,35	0,54	5,24	0,06
KOS-FA	56,38	17,57	10,39	7,46	2,13	0,57	0,38	0,52	0,95	0,025

Napomena: Vrijednosti možda ne odgovaraju u potpunosti ispitivanom materijalu, jer se u međuvremenu kemijski sastav ugljena iz termoelektrane mogao promijeniti

homogena mješavina tla i letećeg pepela. Nakon toga je dodana tražena količina vode, a nakon miješanja uzorak je zbijan bez perioda odgode. Uzorci mješavina su omotani plastičnom folijom. Prije ispitivanja uzorci su njegovani u eksikatorima pri temperaturi od 25 °C. Prema [6, 21], zbijanje treba početi odmah nakon miješanja smjese i treba trajati najviše dva sata. Kasno zbijanje može negativno utjecati na učinak stabilizacije tla - tijekom procesa hidratacije leteći pepeo veže čestice u mješavini te je stoga potrebna veća energija za uspješno zbijanje. Manja ostvarena čvrstoća, a ponekad i gubitak čvrstoće nakon kasnog zbijanja objašnjava se gubitkom vlage u uzorku i pucanjem veza između čestica pepela [6]. Uzorci su ispitivani dva sata nakon zbijanja ($t = 0$), te nakon 7 i 28 dana njegovanja uzoraka. Sva ispitivanja su provedena na 2 ili 3 uzorka tla. Laboratorijske metode, koje su u skladu s propisima SRPS (bivši JUS) primijenjene su za određivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava tla, pepela i mješavina.

Granulometrijski sastav je proveden za leteći pepeo i tlo prema propisima SRPS U.B1.018 (2005.). Attebergove granice su određene za tlo i mješavine prema SRPS U.B1.020 (1980.). Specifična težina letećeg pepela i tla je određena u skladu sa SRPS U.B1.014 (1988.). Ispitivanje zbijanjem je provedeno za tlo, pepeo i mješavine prema SRPS U.B1.038 (1997.). Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće je provedeno u skladu s propisima SRPS U.B1.029 (1996.) na uzorcima promjera 38 mm, visine 76 mm. Jednodimenzionalni konsolidacijski test je proveden prema propisima SRPS U.B1.032 (1969.) na uzorcima promjera 70 mm, visine 20 mm. Uzorci su zasićeni 24 sata prije zbijanja, a potom izloženi najvećem vertikalnom naprezanju od 400 kPa. Ispitivanja izravnim smicanjem su provedena prema propisima SRPS U.B1.028 (1996.) na uzorcima kvadratne baze dimenzija 60 x 60 mm, visine 30 mm. Prije ispitivanja na smicanje, zasićeni uzorci su konsolidirani na vertikalna naprezanja od 100, 200 i 400 kPa. Vrsta ispitivanja izravnog posmika je ispitivanje s kontroliranom deformacijom. Ispitivanje CBR-a (eng. *California bearing ratio - CBR*) provedeno je prema propisima SRPS U.B1.042 (1997.) na potpuno zasićenim uzorcima.

4. Rezultati ispitivanja i rasprava

4.1. Optimalni udio letećeg pepela

Povećanje čvrstoće tla je glavni pokazatelj uspješnosti stabilizacije tla. U prethodnim istraživanjima [5, 6, 8, 10, 13] porast čvrstoće je određen ispitivanjem jednoosne tlačne čvrstoće ili CBR pokusom. Kako bi se dobio optimalni udio letećeg pepela, provedeno je ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće na mješavinama tla i letećeg pepela s različitim omjerima pepela i tla 10/15/20/25 %. Najveće vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće su postignute za udio letećeg pepela prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Optimalni udio letećeg pepela u mješavinama

Leteći pepeo	Tlo A	Tlo B
KOL-FA	15 %	15 %
KOS-FA	20 %	15 %

Optimalni udio letećeg pepela, prikazan u tablici 2. korišten je za ispitivanja izravnog smicanja, CBR-a i ispitivanja tlačne čvrstoće.

4.2. Specifična težina

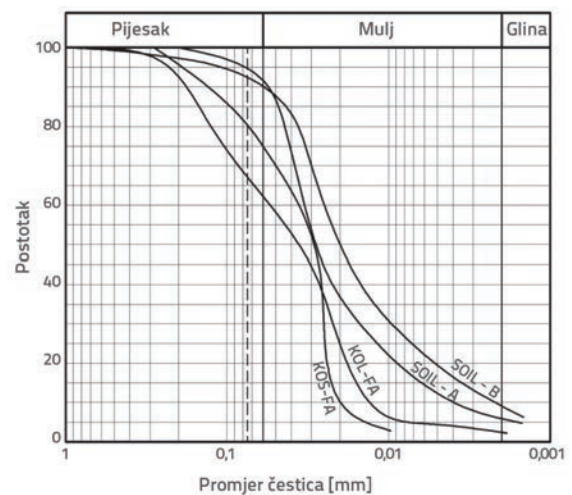
Vrijednosti specifične težine letećeg pepela i tla su prikazane u tablici 3. Mali raspon u specifičnoj težini letećeg pepela (2.11-2.22) može se pripisati sličnim udjelima željeznih i silikatnih oksida.

Tablica 3. Specifična težina tla i letećeg pepela

Materijal	KOL-FA	KOS-FA	Tlo A	Tlo B
Spec. težina				
G_s	2,11	2,22	2,67	2,74

4.3. Granulometrijski sastav

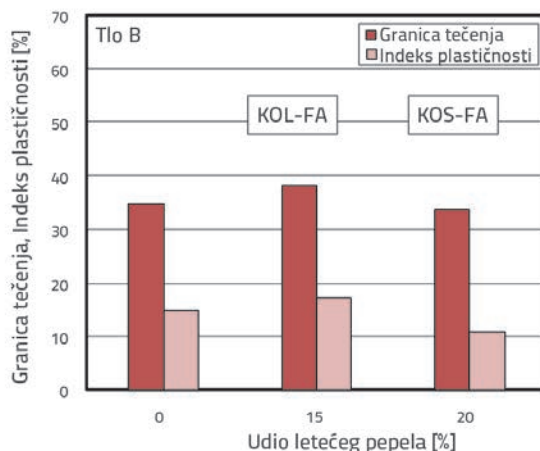
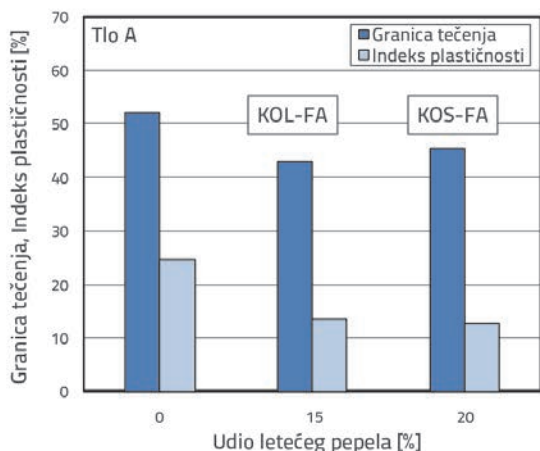
Slika 1. prikazuje raspodjelu veličine čestica letećeg pepela i tla. Čestice letećeg pepela pripadaju mulju, a čestice tla, prema USCS standardu, pripadaju glini.



Slika 1. Krivulje granulometrijskog sastava

4.4. Plastičnost tla

Čestice letećeg pepela obično su veće od čestica gline. U većini slučajeva stabilizacije visokoplastične gline, leteći pepeo smanjuje plastičnost tla. Mnoga istraživanja su pokazala da

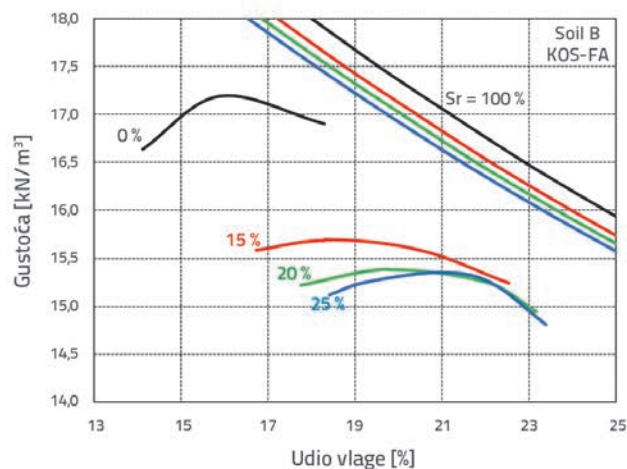
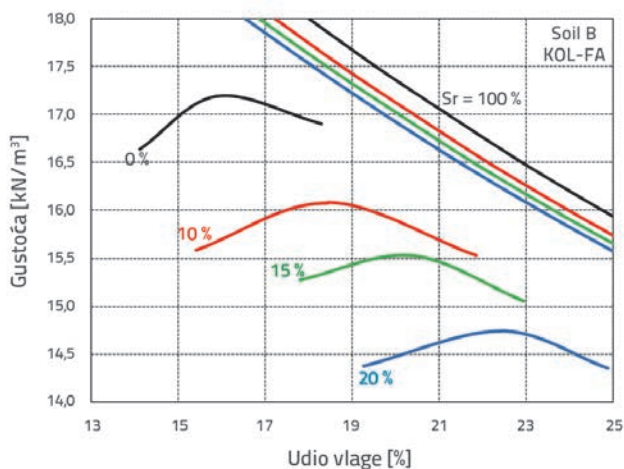
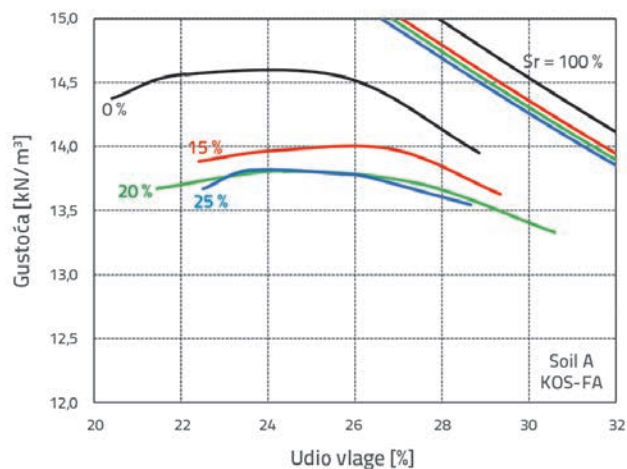
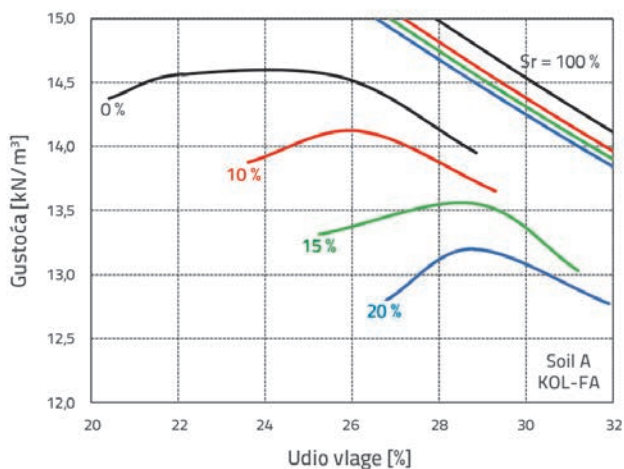


Slika 2. Razlike u Atterbergovim granicama za mješavine pri t = 0 (za optimalni udio letećeg pepela)

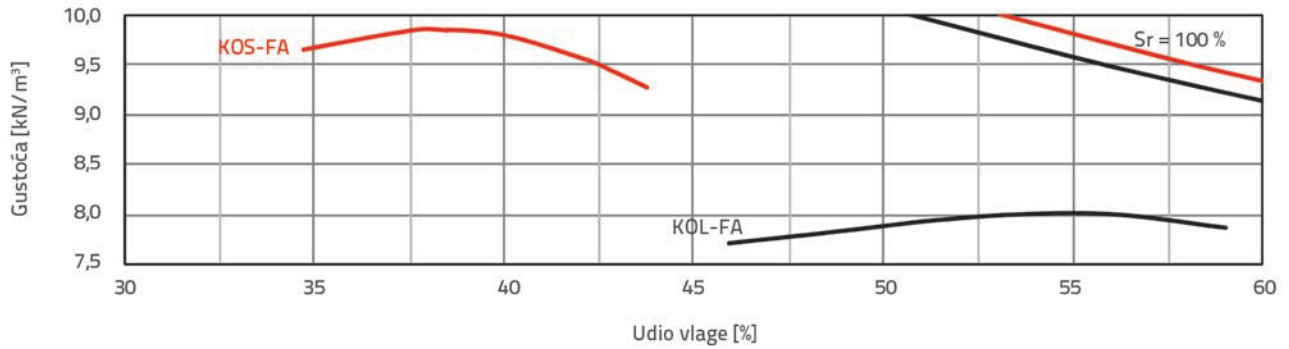
se plastičnost stabiliziranog tla smanjuje s povećanjem udjela letećeg pepela [5, 7, 11, 16]. Za tlo srednje do visoke plastičnosti (tlo A) zaključeno je da dodavanje letećeg pepela smanjuje granicu tečenja i indeks plastičnosti, što nije slučaj kod tla niske plastičnosti (tlo B), kao što je prikazano na slici 2.

4.5. Zbijanje

Rezultati Proctorova pokusa (slika 3.) pokazuju da se najveća gustoća suhog tla smanjuje, a optimalni udio vlage raste s porastom udjela letećeg pepela (za obje vrste tla i pepela).



Slika 3. Odnos vlage i gustoće mješavine letećeg pepela i tla



Slika 4. Odnos vlage i gustoće letećeg pepela

Smanjenje najveće gustoće suhog tla je povezano s činjenicom da primijenjeni leteći pepeo ima manju specifičnu težinu nego tlo. Proctorove krivulje zbijanja letećeg pepela su prikazane na slici 4.

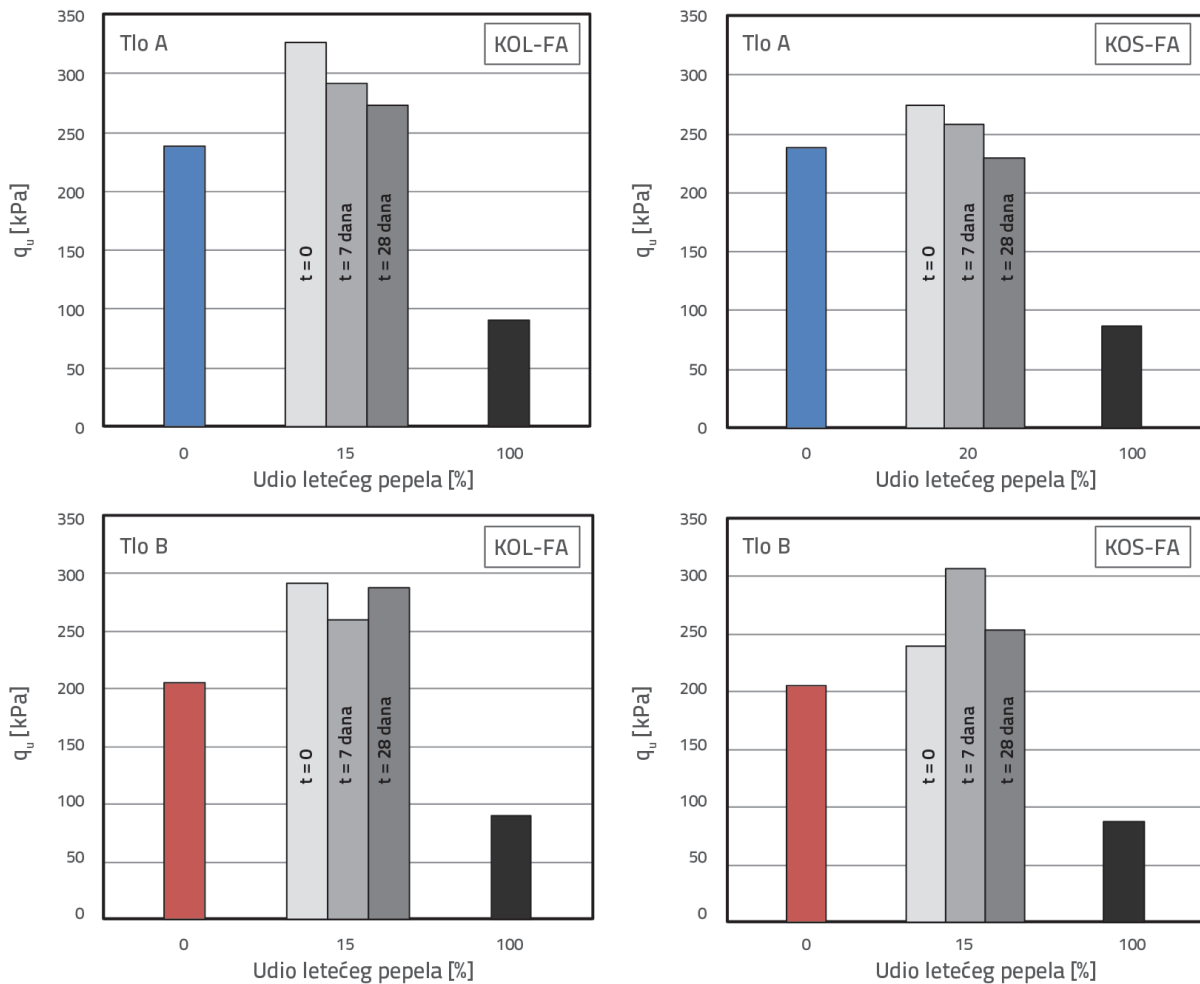
(do 90 kPa). Vrijednost čvrstoće je porasla za 20 % u uzorku tla A, odnosno 50 % u uzorku tla B, ovisno o vremenu njegovanja. Porast čvrstoće nije značajan, jer je jednoosna tlačna čvrstoća letećeg pepela vrlo niska.

4.6. Jednoosna tlačna čvrstoća

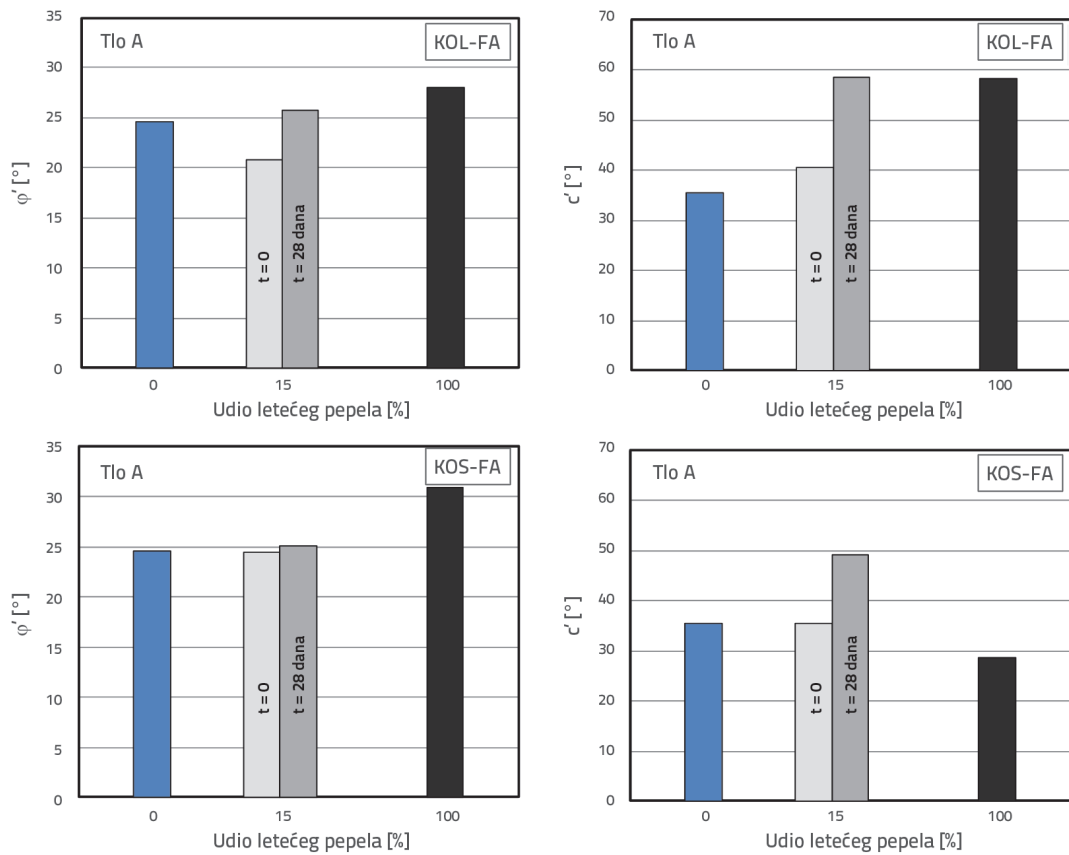
Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće prikazani su na slici 5. Leteći pepeo ima vrlo malu jednoosnu tlačnu čvrstoću

4.7. Posmični parametri čvrstoće

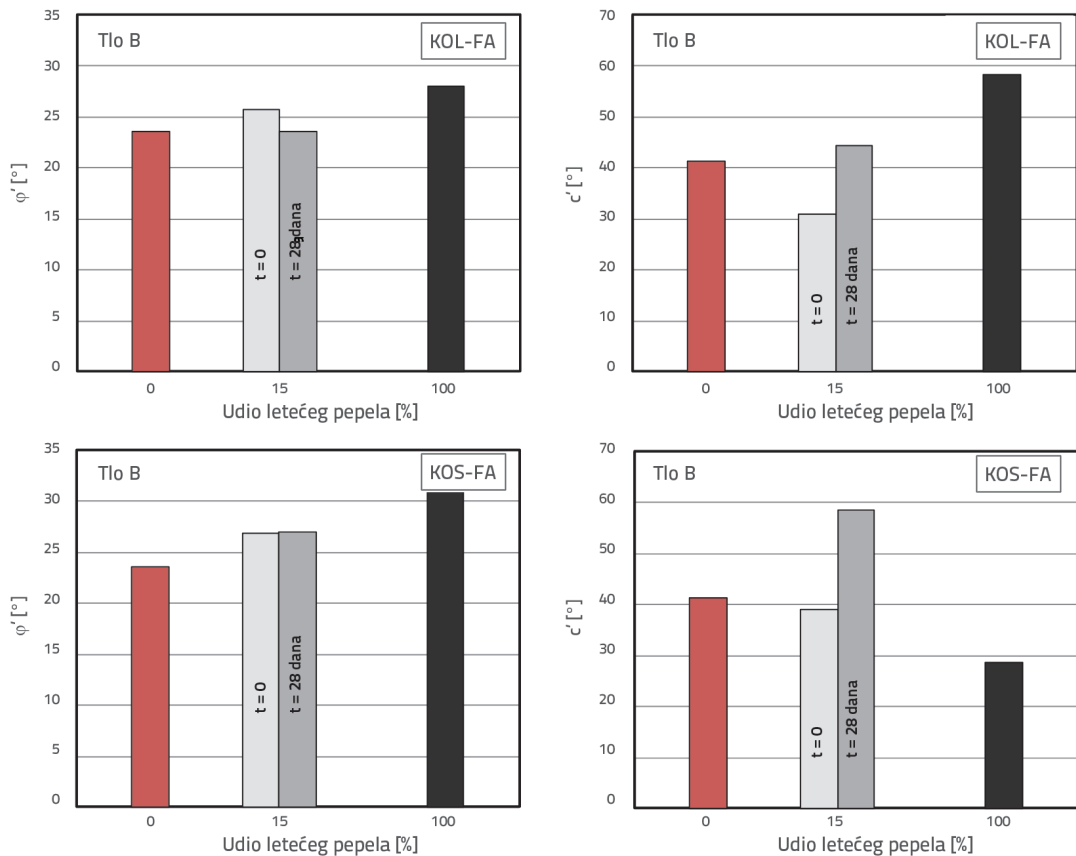
Posmični parametri čvrstoće, u dreniranim uvjetima, određeni su ispitivanjem uzoraka u pokusu izravnog



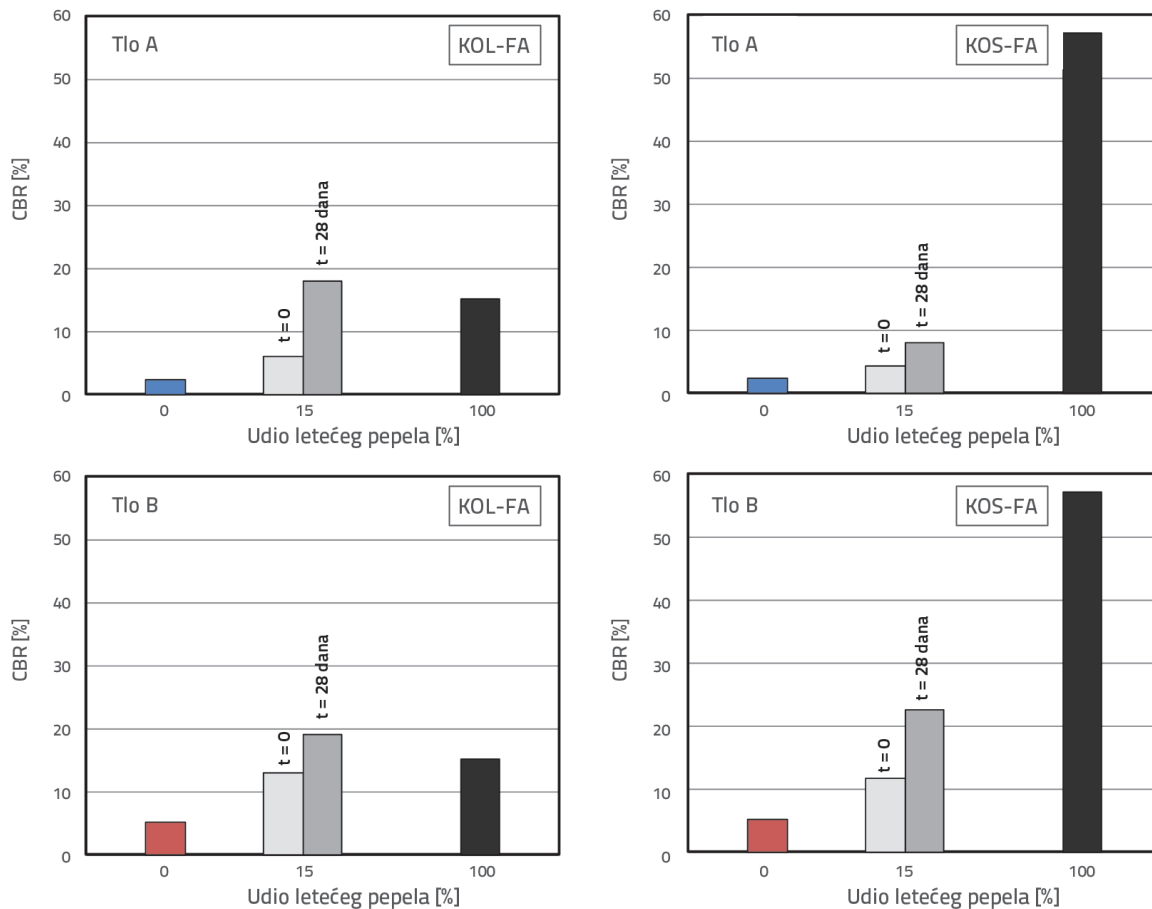
Slika 5. Jednoosna tlačna čvrstoća mješavine letećeg pepela i tla pri optimalnom udjelu letećeg pepela u mješavini



Slika 6. Razlike u parametrima posmične čvrstoće za tlo A



Slika 7. Razlike u parametrima posmične čvrstoće za tlo B



Slika 8. CBR vrijednosti za tlo A i tlo B

smicanja. Dobiveni rezultati (slika 6. i slika 7.) pokazuju da se kut trenja nakon 28 dana ne mijenja u uzorku s dodatkom letećeg pepela, bez obzira na vrstu tla i pepela. S druge strane, kohezija se povećava tijekom vremena za sve ispitivane mješavine, što upućuje na činjenicu da je, radi prisutnosti reaktivnog CaO, došlo do spore pucolanske reakcije.

4.8. CBR pokus

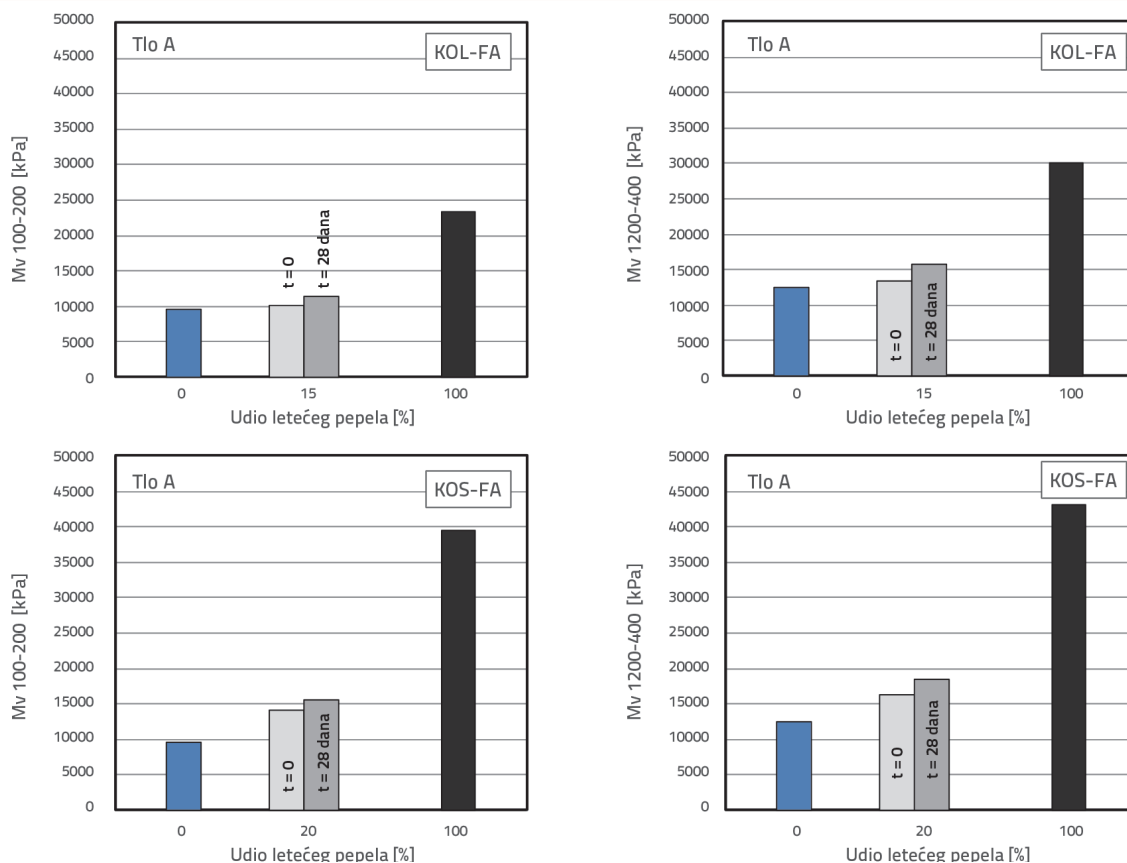
Poznato je da glina ima niske vrijednosti CBR-a, zbog čega nije prikladna za izgradnju posteljice ceste. CBR pokus je proveden na mješavinama s optimalnim udjelom letećeg pepela koji je prikazan u tablici 2. Za razliku od vrijednosti koje su dobivene za tla A i B, dobiveni rezultati iz CBR pokusa pokazuju značajno povećanje vrijednosti. U slučaju tla A, CBR vrijednosti su se povećale 300 do 800 %, te 360 do 420 % za tlo B (ovisno o proteklom vremenu). To je vrlo važno za tlo A, jer to znači da je pogodan materijal za gradnju cesta (CBR vrijednost se povećala sa 2 na 18). Ovo je također i glavni faktor stabilizacije tla B. CBR vrijednosti su prikazane na slici 8. i u skladu su s rezultatima u literaturi [8, 9, 12, 13, 22].

4.9. Parametri deformabilnosti

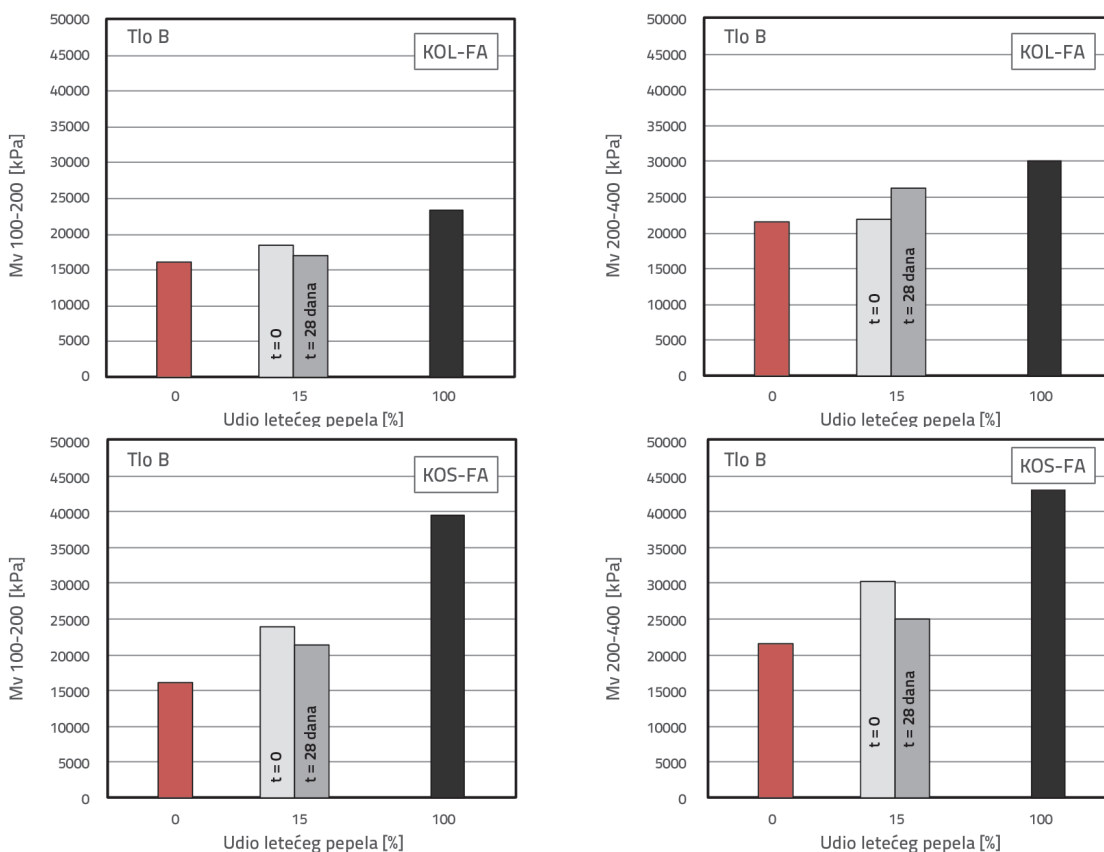
Modul stižljivosti u obje vrste tla se povećao dodavanjem letećeg pepela (slika 9. i slika 10.). Modul stižljivosti povećao se približno 15-35 % za KOL-FA i 30-50 % za KOS-FA. Utjecaj vremena u ovom slučaju nije promatran, a male promjene modula stižljivosti su rezultat činjenice što zbijeni uzorci tla nisu bili potpuno identični. Te promjene su u domeni raspršenih rezultata.

4.10. Potencijal bujanja

Iako se parametri čvrstoće i deformabilnosti tla A mogu smatrati prikladnim, takvo tlo pokazuje značajan potencijal bujanja, zbog čega nije prikladno za većinu inženjerskih zahvata. Potencijal bujanja tla A se uglavnom povezuje s ekspanzivnim mineralom montmorilonitom, unatoč relativno niskim Atterbergovim granicama za ekspanzivna tla [23]. Dodavanje letećeg pepela može smanjiti bujanje tretiranog uzorka tla, a taj utjecaj raste s porastom udjela letećeg pepela u mješavini [5, 7, 11, 16, 24, 25]. Prema [5], leteći pepeo se ponaša kao mehanički stabilizator tako što zamjenjuje dio volumena umjesto čestica gline.



Slika 9. Modul stišljivosti za tlo A



Slika 10. Modul stišljivosti za tlo B

U ovom istraživanju, za tlo A s dodatkom optimalnog udjela letećeg pepela (15 % KOL-FA, 20 % KOS-FA), dobiveno je značajno smanjenje deformacije uslijed bujanja: sa $\epsilon = 8,6\%$ na $\epsilon = 0$ do 1,8 %. Tlo B nije ekspanzivno tlo.

5. Zaključak

Iako je nesamovezujući leteći pepeo s dodatkom vapna ili cementa široko primjenjivan za stabilizaciju tla, laboratorijska su ispitivanja provedena u ovom istraživanju pokazala da je leteći pepeo prikupljen s termoelektrana Kolubara i Kostolac učinkovit materijal za stabilizaciju tla bez dodatka aktivatora. Mješavina tla i pepela je pripremljena za optimalni udio pepela (15 i 20 %), a uzorci su s optimalnim udjelom vode podvrgnuti zbijanju. Dodavanje letećeg pepela KOL-FA i KOS-FA je smanjilo plastičnost srednje do visoko plastične gline. Nije bilo značajnijeg utjecaja na kut trenja, dok je kohezija porasla. Vrijednosti CBR testa su značajno porasle za obje vrste tla. To je posebno važno za srednje plastičnu do visoko plastičnu glinu (tlo A), jer se može koristiti za gradnju cestovne infrastrukture. Također, to je glavni

faktor za stabilizaciju nisko plastične do srednje plastične gline (tlo B). Modul stižljivosti nije značajnije promijenjen. Potencijal bujanja vrlo ekspanzivnog tla A je uspješno smanjen dodatkom 15 do 20 % letećeg pepela. Unatoč nabrojanim pozitivnim učincima, univerzalni princip stabilizacije tla letećim pepelom ne može se jednostavno obrazložiti. Potrebno je provesti detaljnije laboratorijsko istraživanje s određenim vrstama pepela i tla, a to je jedini mogući način da se precizno odredi optimalni udio letećeg pepela u mješavini, porast čvrstoće i definiraju tehnološki postupci.

Ovo istraživanje je vrlo važno za Srbiju zbog činjenice da se prosječna godišnja proizvodnja letećeg pepela od približno 7 milijuna tona odlaže na odlagalištima.

Zahvala

Autori zahvaljuju Elektroprivredi Srbije na financijskoj potpori istraživačkog projekta: "Primjena letećeg pepela iz termoelektrana za stabilizaciju tla, samozbijajućeg i valjanog betona s naglaskom na trajnost morta i sitnozrnati beton".

LITERATURA

- [1] ACAA 2011 CCP Survey Results and Production & Use Charts APS- The street level power supply, www.aaa-usa.org, 25.01.2015.
- [2] Feuerborn, H.-J.: CCPs in Europe – production, quality and use today and tomorrow, EUROCOALASH 2010, Copenhagen, Denmark, 2010.
- [3] Cmiljanić, S., Jotić, S., Tošović, S.: Prethodni rezultati istraživačko-razvojnog programa - primena elektrofilterskog pepela u putogradnji, *Institut za puteve*, 37, pp. 41-49, 2008.
- [4] Cmiljanić, S., Vujanić, V., Rosić, B., Vuksanović, B., Tošović, S., Jotić, S.: Physical-mechanical properties of fly-ash originating from thermo-electric power plants of Serbia, *14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering: From Research to Design in European Practice*, Bratislava, 2010.
- [5] Ferguson, G.: Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36, pp. 1-14, 1993.
- [6] Ferguson, G., Levenson, S. M.: *Soil and pavement base stabilization with self-cementing coal fly ash*, American Coal Ash Association, 1999.
- [7] Çokça, E.: Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, pp. 568-573, 2001., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568))
- [8] Acosta, H.A., Edil, T.B., Benson, C.H.: Soil stabilization and drying using fly ash, *Geo Engineering Report No. 03-03*, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, 2003.
- [9] Mackiewicz, S.M., Ferguson, E.G.: Stabilization of soil with self-cementing coal ashes, *2005 World of Coal Ash (WOCA)*, Lexington, 2005.
- [10] Parsons, R.L.: Subgrade improvement through fly ash stabilization, *Miscellaneous Report*, Kansas University Transportation Center, University of Kansas, 2002.
- [11] Parsons, R. L., Kneebone, E.: Field performance of fly ash stabilized subgrades, *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, 9 (1), pp. 33-38, 2005., <http://dx.doi.org/10.1680/grim.2005.9.1.33>
- [12] White, D.J., Harrington, D., Thomas, Z.: Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils, Volume I: Engineering properties and construction guidelines, *Report No. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4*, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2005.
- [13] Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique, M.S., Acosta, H.A., Benson, C.H.: Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes, *Resources, Conservation and Recycling*, 46 (4), pp. 365-376, 2006., <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.005>
- [14] American Coal Ash Association: Fly ash facts for highway engineers, *Technical Report No. FHWA-IF-03-019*, FHWA, 2003.
- [15] Pandian, N.S., Krishna, K.C., Leelavathamma, B.: Effect of fly ash on the CBR behaviour of soils, *Indian Geotechnical Conference*, Allahabad, 2002.
- [16] Ramadas, T.L., Kumar, N.D., Yesuratnam, G.: A study on strength and swelling characteristics of three expansive soils treated with fly ash, *International Symposium on Ground Improvement (IS-GI Brussels 2012) - Recent Research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works*, Brussels, 2012.
- [17] Kolay, P.K., Sii, H.Y., Taib, S.N.L.: Tropical peat soil stabilization using class F pond ash from coal fired power plant, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 3 (2), pp. 79-83, 2011.

- [18] Prasanna Kumar, S.M.: Cementitious compounds formation using pozzolans and their effect on stabilization of soils of varying engineering properties, *2011 International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE*, Singapore, 2011.
- [19] Vukićević, M., Maraš-Dragojević, S., Jocković, S., Marjanović, M., Pujević, V.: Research results of fine-grained soil stabilization using fly ash from Serbian electric power plants, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Challenges and Innovations in Geotechnics"*, Paris, France, pp. 3267-3270, 2013.
- [20] Baščarević, Z., Komljenović, M., Petrašinović, Lj.: Ispitivanje svojstava elektro-filterskog pepela termoelektrana u cilju njegove upotrebe kao sekundarne sirovine za proizvodnju portland cementnog klinkera, *Chemical Industry*, 60, pp. 245-252, 2006.
- [21] Terrel, R.L., Epps, J.A., Barenberg, E.J., Mitchell, J.K., Thompson, M.R.: *Soil stabilization in pavement structures: A user's manual, FHWA-IP-80-2, Vol. 2*, FHWA, 1979.
- [22] Edil, T. B., Acosta, H. A., Benson, C. H.: Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering – Special Issue: Stabilization of geomedias using cementitious materials*, 18, pp. 283-294, 2006.
- [23] Nalbantoglu, Z.: Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer, *Construction and Building Materials*, 18, pp. 377-381, 2008., <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.011>
- [24] Zia, N., Fox, P.J.: Engineering properties of loess-fly ash mixtures for road bases, *Transportation Research Record*, 1717, pp. 49-56, 2000., <http://dx.doi.org/10.3141/17174-07>
- [25] Nalbantoglu, Z., Gucbilmez, E.: Utilization of an industrial waste in calcareous expansive clay stabilization, *Geotechnical Testing Journal*, 25 (1), pp. 78-84, 2002., <http://dx.doi.org/10.1520/GTJ11082J>