

Primljen / Received: 9.7.2021.

Ispravljen / Corrected: 25.8.2021.

Prihvaćen / Accepted: 9.9.2021.

Dostupno online / Available online: 10.10.2021.

# Zagrebačka glina poboljšana različitim vezivima

## Autori:

Mr.sc. **Željko Lebo**, dipl.ing.građ.

Tehničko veleučilište u Zagrebu

Građitejski odjel

[zeljko.lebo@tvz.hr](mailto:zeljko.lebo@tvz.hr)

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Mario Bačić**, mag.ing.aedif

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku

[mario.bacic@grad.unizg.hr](mailto:mario.bacic@grad.unizg.hr)Prof.dr.sc. **Danijela Jurić-Kačunić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku

[danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr](mailto:danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr)Prof.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku

[meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr](mailto:meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr)

Prethodno priopćenje

**Željko Lebo, Mario Bačić, Danijela Jurić Kačunić, Meho Saša Kovačević**

## Zagrebačka glina poboljšana različitim vezivima

U radu su prikazani rezultati laboratorijskog ispitivanja uzoraka gline s dva lokaliteta u gradu Zagrebu, pomiješane s letećim pepelom, zgurom i cementom. U laboratorijskim uvjetima su pripremljeni kompozitni uzorci mješavina gline s vezivima koji su u omjerima od 5 %, 10 % i 20 % dodani glini, te ispitani u različitim vremenskim intervalima sazrijevanja od 7, 14 i 28 dana. Ispitan je i analiziran utjecaj različitog tipa i udjela veziva te starosti kompozitnog uzorka na vlažnost i na jednoosnu tlačnu čvrstoću. Dobiveni rezultati pokazuju da se primjenom cementa, letećeg pepela i zgure mogu poboljšati fizikalna i mehanička svojstva zagrebačke gline, u ovisnosti o količini veziva i vremenu sazrijevanja kompozita.

### Ključne riječi:

zagrebačka glina, leteći pepeo, zgura, cement, poboljšanje tla, vlažnost, jednoosna tlačna čvrstoća

Research Paper

**Željko Lebo, Mario Bačić, Danijela Jurić Kačunić, Meho Saša Kovačević**

## Zagreb clay improved with various binders

The paper presents the results of laboratory testing of clay samples from two localities in the city of Zagreb, mixed with fly ash, slag and cement. Under laboratory conditions, composite samples of clay mixtures with binders were prepared, where the binders are added to the clay in ratios of 5 %, 10 % and 20 %, and tested at different maturation time intervals of 7, 14 and 28 days. The influence of different type and amount of binder and age of the composite sample on moisture and uniaxial compressive strength was examined and analysed. The obtained results show that the utilization of cement, fly ash and slag can improve the physical and mechanical properties of Zagreb clay, depending on the amount of binder and the maturation time of the composite.

### Key words:

Zagreb clay, fly ash, slag, cement, soil improvement, moisture, uniaxial compressive strength

## 1. Uvod

Za potrebe poboljšanja sitnozrnih tala u geotehničkoj praksi još uvijek se pretežno koriste cement ili vapno kao tradicionalna veziva, sve sa svrhom da se poboljšaju mehanička svojstva kao što su čvrstoća i krutost tla, smanjenja plastičnosti tla, vlažnosti tla ili potencijala skupljanja / bujanja tla, povećanja zapremnske težine tla, itd. [1-3]. Međutim, sve je izraženiji potencijal primjene industrijskih otpadnih materijala, kao što su leteći pepeo i zgura, u održivom poboljšanju tla, naročito u metodama dubinskog miješanja tla, gdje se pomoću mehaničkih strojeva razbija struktura tla i vezivno sredstvo se umiješava u tlo [4] te u plitkoj stabilizaciji tla ispod prometnica. Naime, uslijed proizvodnje standardnih vezivnih materijala, cementa i vapna, troše se velike količine prirodnih sirovina i fosilnih goriva. Zbog kemizma, tj. dekarbonatizacije  $\text{CaCO}_3$ , oslobađa se velika količina  $\text{CO}_2$  u atmosferu. Maseni udio cementa i vapna kod postupka poboljšanja tla uobičajeno iznosi 2-5 %. Svako smanjenje potrošnje cementa i vapna pridonijet će smanjenju potrošnje prirodne sirovine i fosilnih goriva a time i smanjenju emisiju  $\text{CO}_2$ . Primjerice, za poboljšanje jedne tone mase tla potrebna je minimalna količina cementa od 20 kg te potrošnja 30 kg prirodne sirovine i 96 MJ fosilnih goriva. Pri tome se u atmosferu emitira 18 kg  $\text{CO}_2$  [5]. Korištenjem otpadnih materijala iz drugih industrijskih procesa moguće je smanjiti udjel cementa i vapna kao veziva [6, 7]. Već je dulje vrijeme izražen trend ponovne upotrebe industrijskog otpada kao sekundarne sirovine u poboljšanju tla. Razlog tome je dvojak - zbog brze potrošnje prirodnih resursa oni poskupljuju, a s druge strane odlagališta industrijskog otpadnog materijala postaju sve veća te je sve izraženija nužnost njihovog recikliranja [8].

Do danas je proveden velik broj istraživanja o poboljšanju fizikalno-mehaničkih svojstava različitih vrsta glina širom svijeta primjenom letećeg pepela [9-24] i zgure [25-33]. Rezultati ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava poboljšanih glina su uglavnom konzistentni, ali istovremeno pokazuju da različite vrste glina, poboljšane istom vrstom veziva u istim uvjetima, mogu rezultirati različitim utjecajem na mehaničke karakteristike. Primjerice, čvrstoća i krutost poboljšane gline ne ovise samo o tipu i količini veziva, već o nizu drugih faktora kao što su vlažnost, stupanj saturacije, stanje naprezanja i uvjeti dreniranja u tlu. Stoga su, uzimajući u obzir njihove specifičnosti, istraživanja većinom usmjerena upravo na analizu utjecaja veziva na fizikalno-mehaničke karakteristike gline određenih mikrolokacija. Tako su Ahnberg i dr. [34] istraživali učinke poboljšanja nekih švedskih glina različitim vezivima, dok su Ahnberg i Johansson [35] istraživali su vremensko povećanje čvrstoće švedskih glina poboljšanih različitim vezivima ovisno o vrsti i količini veziva. Poboljšanje mehaničkih karakteristika nekih indijskih glina dodatkom zgure prikazali su Gupta i dr. [36], a dodatkom zgure i letećeg pepela Yadu i dr. [37]. U literaturi se mogu naći i istraživanja utjecaja industrijskih nusproizvoda u poboljšanju nekih egipatskih [32], iračkih [38], talijanskih [39], irskih [40], engleskih [41], njemačkih [42], turskih [43], kanadskih [44], kineskih [45] glina, itd.

U ovom radu su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja čvrstoće i vlažnosti zagrebačke gline poboljšane različitim vezivima. Istraživanja su provedena u geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, te tvrtkama Institut IGH d.d. i Geoekspert d.o.o. iz Zagreba. Korišteni osnovni materijal je zagrebačka glina preuzeta sa lokaliteta groblja Krematorij i tržnice Dolac u Zagrebu. Cilj ovog istraživanja je prikupiti informacije za bolje razumijevanje mehaničkog ponašanja zagrebačke gline poboljšane cementom, letećim pepelom i zgurom kao vezivima, u različitim omjerima i uvjetima sazrijevanja mješavine. Na temelju rezultata ispitivanja može se uspostaviti veza između prirasta i veličine jedoosne tlačne čvrstoće te količine korištenog veziva i starosti ispitivanog uzorka, kao i veza između redukcije i veličine prirodne vlažnosti te količine korištenog veziva i starosti ispitivanog uzorka. Novostečene spoznaje omogućuju određivanje mehaničkih parametara potrebnih za projektiranje održivog poboljšanja zagrebačke gline na temelju rezultata standardnih laboratorijskih pokusa u tlu. Osim toga, važnost je ovog istraživanja i u mogućnosti redukcije značajnih količina industrijskih nusproizvoda u Hrvatskoj i regiji [8], primjerice letećeg pepela u Bosni i Hercegovini i Srbiji te zgure u Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i Srbiji, njihovom primjenom za potrebe poboljšanja sitnozrnih tala.

## 2. Ispitivani materijal

### 2.1. Zagrebačka glina

Područje grada Zagreba smješteno je općenito na dvije osnovne geološke jedinice, područje planine Medvednica smještene sjeverno i područje savske potoline južno od grada. Ove dvije strukture dijeli reverzni rasjed koji se pruža u smjeru sjeveroistok-jugozapad i koji prolazi središtem grada. Geološku jedinicu južno od rasjeda, u njenom površinskom dijelu, izgrađuju aluvijalne naslage kvartara prve i druge savske terase koje se sastoje od šljunaka i pijesaka do dubine od desetak metara pokrivenih tanjim slojem pjeskovitih i prahovitih glina. U podlozi se nalaze podslojevi prekonsolidirane krute gline, sa sličnim mehaničkim svojstvima, koje sežu do većih dubina [46]. Prema Osnovnoj geološkoj karti, list Zagreb i Ivanić Grad, podsljemenska zona grada Zagreba izgrađena je od različitih vrsta tala među kojima prevladava glina neogenske i kvartarne starosti, pa se ista može nazvati zagrebačkom glinom. Karakteristike zagrebačke gline ogledaju se u karakterističnoj strukturi pločaste morfologije te velike specifične površine, pa minerali zagrebačke gline imaju vrlo velik utjecaj na fizikalna, a time i mehanička svojstva tla u široj okolici grada Zagreba.

U ovim istraživanjima upotrebljena je zagrebačka glina i to s dva lokaliteta. Jedan lokalitet je područje podsljemenske zone uz gradsko groblje, odnosno Krematorij, a drugi lokalitet je gradska tržnica Dolac u središtu grada Zagreba. Mineralni sastav navedenih glina se sastoji od kvarca, muskovita i laganog minerala montmorilonita. Prema USCS standardu, materijal s navedenih lokaliteta je glina niske (CL) do visoke (CH) plastičnosti, s karakterističnim blagim potencijalom bujanja.



Slika 1. Lokacije uzorkovanja – gradska tržnica Dolac i Krematorij

## 2.2. Cement

Prema kemijskom sastavu cement dijelimo na silikatni i aluminatni. Silikatni cementi dobivaju se pečenjem lapora i vapnenca. Najznačajniji iz skupine silikatnih cementa je portland cement, koji služi i kao baza za proizvodnju metalurških, pucolanskih i supersulfatnih cementa. Jedna od vrsta portland cementa je i bijeli portland cement koji se dobiva pečenjem kaolina i vapnenca. Aluminatni cementi dobivaju se pečenjem boksita i vapnenca, a upotrebljavaju se pri izradi vatrostalnih betona, kao i pri betoniranju na vrlo niskim temperaturama.

Za potrebe ovog istraživanja upotrebljen je silikatni cement tvrtke HOLCIM d.o.o., koji se proizvodi u tvornici

Koromačno pod nazivom Holcim Expert cement. Karakterizira ga umjerena potreba za vodom, mali gubitak početne konzistencije, optimalno vrijeme vezanja cementa, prilagođeno za mnoge konstrukcije, srednji razvoj čvrstoće, vrlo umjeren razvoj topline hidratacije te dobra otpornost na umjereno agresivne utjecaje. Pri tome svakako treba istaknuti da to nije 'čisti' cement već se sastoji od 65-79 % portlandskog cementnog klinkera, 21-35 % miješanog dodatka (granulirana zgura visoke peći i silicijski leteći pepeo) te do 5 % filtarske prašine. Razlog zašto je takav cement izabran u ovom istraživanju jest taj što se radi o komercijalnom cementu koji se upotrebljava u svakodnevnoj graditeljskoj praksi. U tablici 1. prikazana su osnovna fizikalno-kemijska svojstva korištenog cementa.

Tablica 1. Fizikalna i kemijska svojstva upotrijebljenog cementa i usporedba s relevantnim normama [47]

Fizikalna (F) / kemijska (K) svojstva	Holcim Expert cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N	Uvjet normi HRN EN 197-1; BAS EN 197:1
F: Postojanost volumena (Le Chatelier)	0 mm	≤ 10 mm
F: Početak vezivanja	180 min	≥ 60 min
F: Tlačna čvrstoća na 2 dana	23,0 MPa	≥ 10 MPa
F: Tlačna čvrstoća na 28 dana	50,0 MPa	≥ 42,5 ≤ 62,5 MPa
K: SO <sub>3</sub>	2,5 %	≤ 3,5 %
K: Cl	0,02 %	≤ 0,1 %



Tablica 2. Kemijske karakteristike uzorka zgure

Udio	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	Na <sub>2</sub> O	LOI
[%]	37,83	12,63	3,09	42,96	7,00	0,61	0,125	0,52	0,33

Tablica 3. Kemijske karakteristike uzorka letećeg pepela

Udio	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	R45
[%]	55,88	16,07	5,39	4,5	1,67	0,54	0,01	1,65	1,71	3,85	9,19

### 2.3. Zgura

Zgura (troska, drozga, šljaka) dobiva se kao ostatak, odnosno nusproizvod u procesu proizvodnje željeza u visokim pećima. Procjenjuje se da je moguće na teritoriju Republike Hrvatske pronaći oko 1,8 milijuna tona lako dostupne zgure iz željezara u Sisku i Splitu [8]. Pri proizvodnji jedne tone čelika pojavljuje se oko 150-200 kg zgure. Naglim hlađenjem tekuće zgure koja pliva na rastaljenom željezu ona se granulira u zrna klinkerskog oblika. Postoje dva oblika zgure; bazična i kisela. Bazična zgura sadrži najmanje 50 % bazičnih oksida CaO i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a ostatak je najvećim dijelom SiO<sub>2</sub>. Kisela zgura sadrži znatno manje od 50 % bazičnih oksida CaO i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a prevladava SiO<sub>2</sub>. Kao vezivo upotrebljava se samo bazična zgura. Sama po sebi zgura sama nema vezivna svojstva, ali svojstva dobije nakon dodavanja katalizatora (cement, vapno, gips). Glavni mineral bazične zgure je belit koji ima proizvode hidratacije gotovo identične kao i hidrati belita iz cementnog klinkera. Drugim riječima, proces hidratacije zgure i proces hidratacije portland cementnog klinkera su istog osnovnog tipa.

Za potrebe ovog istraživanja upotrijebljena je zgura tvrtke HOLCIM d.o.o. iz Hrvatske, koja potječe iz tvornice čelika ILVA u Tarantu u Italiji (Gruppo Rive). Zgura je u laboratorij dopremljena u metalnoj posudi u zrnatom obliku prosječne veličine zrna oko 2.0 mm koja se prije miješanja usitnjavala mljevenjem, te prosijavanjem kalibrirala do zrna veličine 0,425 mm. Kemijska svojstva uzorka zgure su određena u laboratoriju tvrtke Holcim d.o.o. (tablica 2.). Prosječna specifična gustoća uzorka zgure iznosi 2,90 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.4. Leteći pepeo

Leteći pepeo je nusproizvod, tj. sekundarni proizvod, nastao izgaranjem ugljena u termoelektranama. U Republici Hrvatskoj jedina termoelektrana koja koristi ugljen kao vrstu goriva je termoelektrana Plomin smještena na istočnoj obali Istarskog poluotoka. Dok je u Hrvatskoj i Sloveniji odnos potražnje i potrošnje dobro izbalansiran, većim udjelom i zbog manje proizvodnje letećeg pepela, u Bosni i Hercegovini postoje značajne količine odloženog letećeg pepela koji bi se mogao iskoristiti za poboljšanje tla. U Srbiji se svake godine proizvede približno 7 tona letećeg pepela i zgure, od čega se samo 3 % koristi u proizvodnji cementa. Ostatak se odlaze na deponij od približno 300 milijuna tona proizvedenog letećeg pepela,

što zauzima površinu od približno 1600 ha [8]. Leteći pepeo iz srpskih termoelektrana na ugljen ima pucolanska svojstva, ali zbog niske koncentracije kalcijevih spojeva (manje od 10 % CaO) nema samovezujuće karakteristike.

Prema normi ASTM C618 leteći pepeo se svrstava u dvije glavne kategorije: leteći pepeo klase F i leteći pepeo klase C. Podjela se obavlja na temelju kemijskog sastava. Leteći pepeo klase C nastaje kao proizvod izgaranja mlađih lignitnih ili subbitumeniziranih ugljena, koji osim svojih pucolanskih svojstava ima i samovezujuće karakteristike. S obzirom na samovezujuće karakteristike, nije mu potreban aktivator. Sadrži više od 20 % vapna. Uz prisutnost vode, leteći pepeo klase C će očvrnuti i doći će do povećanja čvrstoće tijekom vremena. Alkalne i sulfatne primjese su veće nego kod letećeg pepela klase F. Leteći pepeo razreda F uglavnom nastaje kao proizvod izgaranja tvrdih, starijih antricitnih i bitumeniziranih ugljena. On ima pucolanska svojstva i sadrži manje od 15 % vapna. Silikati i aluminijevi silikati letećeg pepela klase F zahtijevaju cementni agent (npr. portland cement, vapno ili hidratizirano vapno) da bi uz prisutnost vode reagirali i proizveli cementni spoj. Dodavanje kemijskog aktivatora letećem pepelu klase F vodi ka formiranju tzv. geopolimera.

Za potrebe istraživanja uzorak letećeg pepela je dopremljen iz tvrtke HOLCIM (Hrvatska) d.o.o. koja u svom proizvodnom procesu koristi leteći pepeo iz termoelektrane Plomin u Hrvatskoj. Kemijska svojstva letećeg pepela su određena u laboratoriju tvrtke HOLCIM (tablica 3.). Budući da je udio SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iznad 70 %, a udio sumpornog trioksida (SO<sub>3</sub>) manji od 5 %, tada prema normi ASTM C618-94a takav leteći pepeo se svrstava u klasu F. Prosječna specifična gustoća uzorka iznosi 2,11 g/cm<sup>3</sup>.

## 3. Eksperimentalna ispitivanja

### 3.1. Priprema uzoraka za ispitivanje u laboratoriju

Na svim uzorcima gline koji su korišteni za spravljanje mješavine, odnosno kompozitnog uzorka, prethodno je utvrđena prirodna vlažnost. Uzorci mješavine gline i veziva nazvani su kompozitnim uzorcima. Glineni materijal je prethodno osušen na 105 °C, zatim drobljen i mljeven kako bi se prosijao kroz sito od 0,425 mm. Tako obrađen glineni materijal se miješao s vodom do prirodne vlažnosti kojemu je tijekom miješanja dodavano vezivo. Spravljenom mješavini gline dodavana su veziva: cement, leteći



Slika 2. Čuvanje kompozitnih uzoraka u desikatoru i priprema za ispitivanje

pepeo i zgura, sve pojedinačno u masenom omjeru od 5 %, 10 %, 20 % od mase gline. Tako spravljena mješavina oblikovana je i spremljena u valjkasti kalup prosječnog promjera od 36 mm i prosječne visine od 80 mm. Izrađeni kompozitni uzorci su čuvani u desikatoru od gubitka vlage, te nakon sazrijevanja od 7, 14 i 28 dana su ispitivani. Glina korištena za eksperimentalni dio uzeta je s dva lokaliteta u Zagrebu, odnosno sa lokaliteta Krematorij i lokaliteta tržnice Dolac. Za svaku od navedenih gline napravljen je program miješanja i spravljanja kompozitnog uzorka. Slika 2. prikazuje miješanje gline i veziva te formiranje kompozitnog uzorka.

Kompozitni uzorci za koje je korištena glina s lokaliteta Krematorij označeni su početnom oznakom 'Kr' i rednim brojem kompozita i broja dana odležavanja, a uzorci u kojima je kao osnovni materijal korištena glina s lokaliteta Dolac označeni su početnom oznakom 'Do'. Pri tome su za svaku lokaciju ispitana ukupno 24 uzorka iz svake skupine kompozita gline i određenog postotka veziva (5, 10 i 20 %), čime su, uzimajući u obzir vrijeme odležavanja od 7, 14 i 28 dana, za svaku lokaciju

ispitana ukupno 72 uzorka kompozita s letećim pepelom, 72 uzorka kompozita sa zgurom i 72 uzorka kompozita s cementom. Sumarno, za potrebe istraživanja spravljena su 432 uzorka kompozita koji su ispitivani odvojeno u dva ciklusa, posebno za lokalitet Krematorij (216 uzoraka) i posebno za lokalitet Dolac (216 uzoraka).

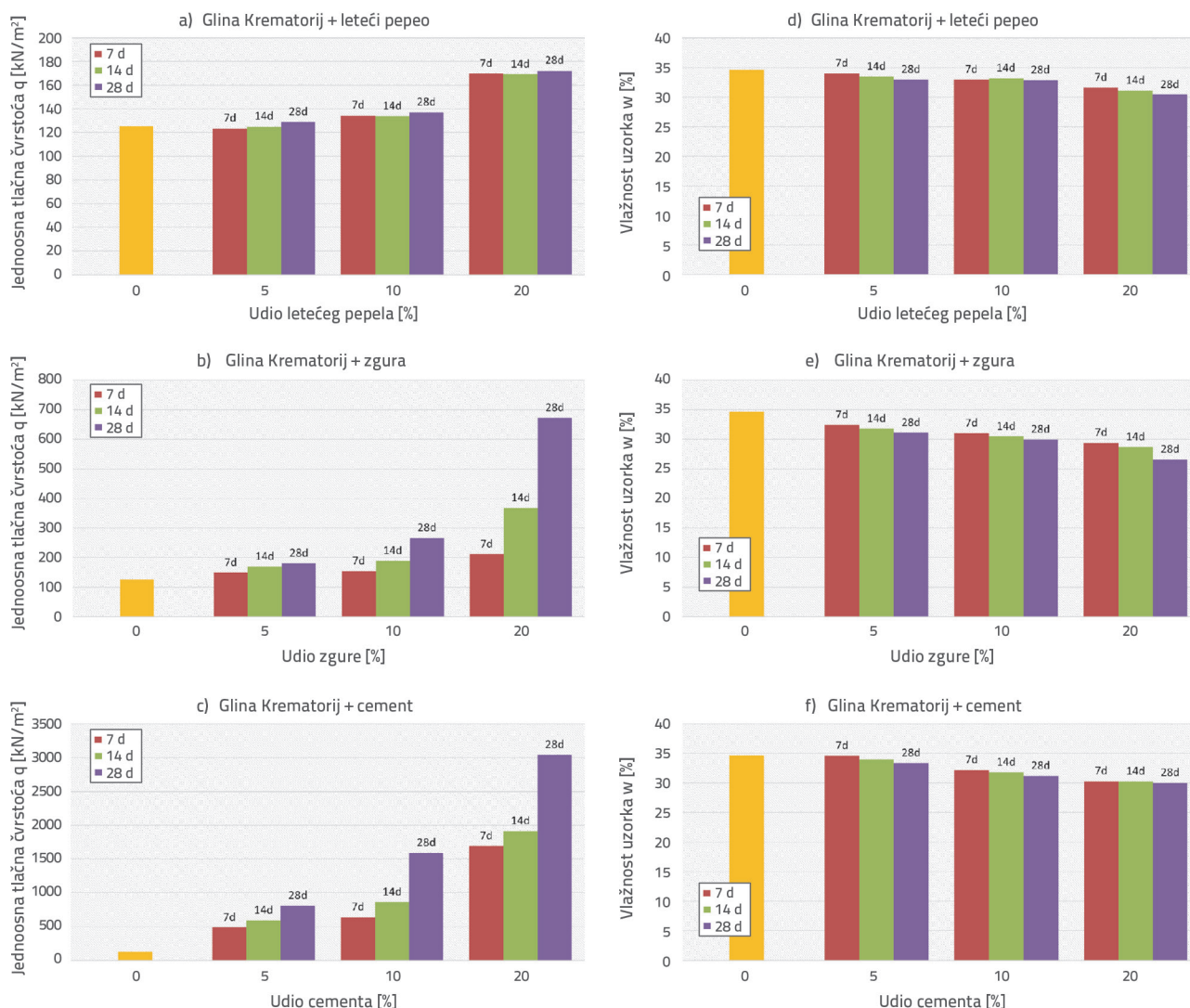
### 3.2. Ispitivanje uzoraka u laboratoriju

Za potrebe ispitivanja spravljani su kompozitni uzorci na bazi gline i veziva cementa, zgure i letećeg pepela u masenim omjerima 5 %, 10 % i 20 % uz odležavanje u desikatoru 7, 14 i 28 dana. Svaki uzorak podvrgnut je ispitivanju jednoosne tlačne čvrstoće do sloma uzorka u preši, a nakon ispitivanja određena je vlažnost uzorka pri slomu. Na slici 3. prikazan je uzorak tijekom ispitivanja i nakon sloma. Rezultati ispitivanja su grupirani prema masenom udjelu pojedinog kompozita, a vrijednosti su uzimane kao srednja vrijednost svih uzoraka pripadajuće grupe.



Slika 3. Ispitivanje tlačne čvrstoće kompozita u laboratoriju Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu





Slika 4. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka gline s lokaliteta groblja Krematorij s dodatkom: a) letećeg pepela; b) zgre; c) cementa; te ispitivanje prirodne vlažnosti uzoraka s dodatkom: d) letećeg pepela; e) zgre; f) cementa

### 3.3. Rezultati ispitivanja kompozita

Rezultati ispitivanja su grupirani prema masenom udjelu pojedinog kompozita, a vrijednost su uzimane kao srednja vrijednost svih uzoraka pripadajuće grupe. Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće pojedinog kompozita gline s lokaliteta Krematorij, kao i vlažnosti uzoraka nakon provedenih ispitivanja prikazani su na slici 4.

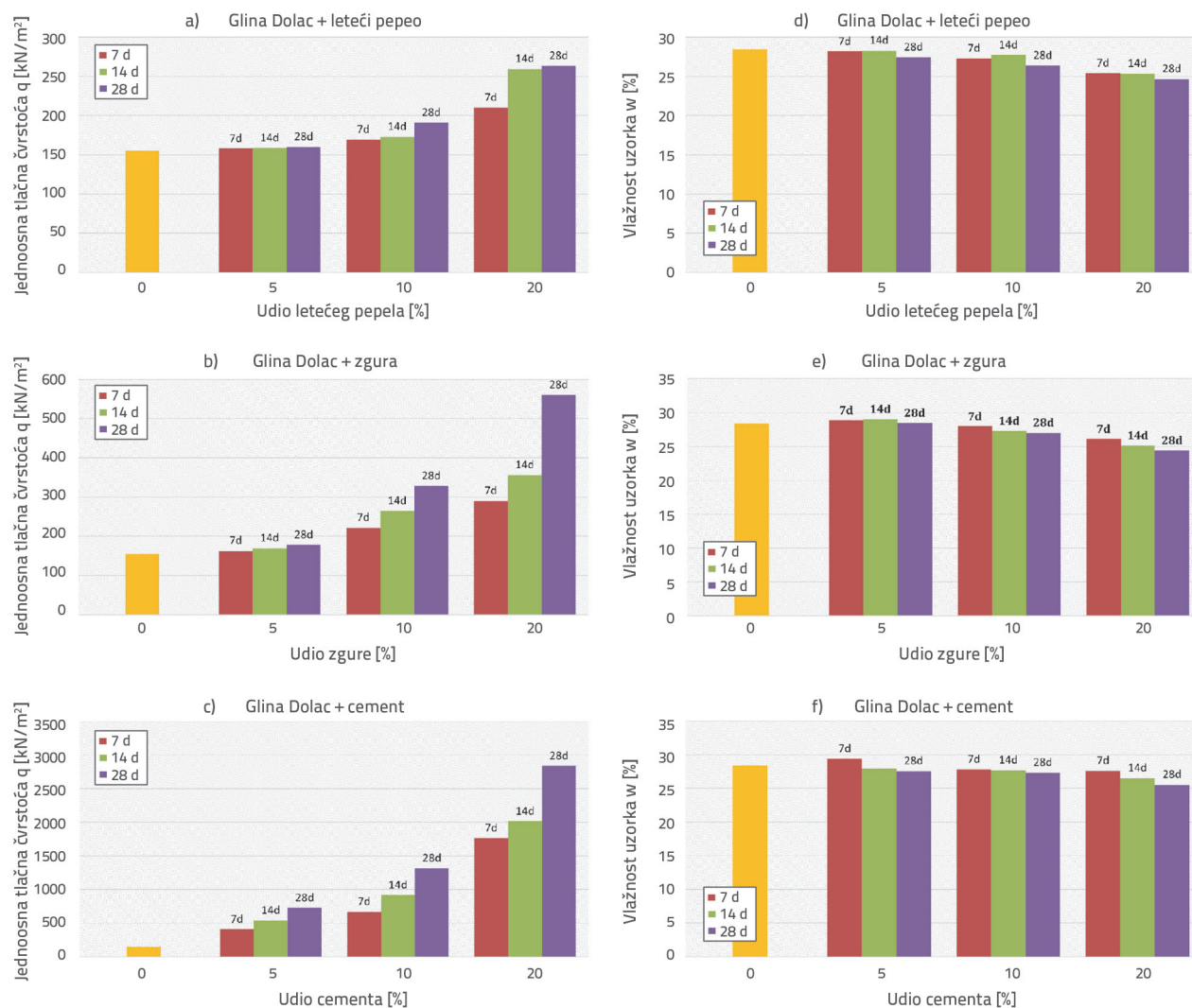
Rezultati ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće pojedinog kompozita gline s lokaliteta Dolac, kao i vlažnosti uzoraka nakon provedenih ispitivanja, prikazani su na slici 5.

## 4. Analiza rezultata i rasprava

Laboratorijski određena jednoosna tlačna čvrstoća gline ( $q_0$ ), bez veziva, iznosi 125 kPa za lokaciju Krematorija, odnosno

155 kPa za lokaciju Dolca. Za obje lokacije je najveći porast jednoosne tlačne čvrstoće vidljiv kod kompozita s cementom kao vezivom, zatim kod kompozita sa zgurum kao vezivom, a najmanji porast zabilježen je kod kompozita s letećim pepelom kao vezivom. Očekivano, veći postotak veziva, bilo da se radi o letećem pepelu, zguri ili cementu, rezultira i većim jednoosnim tlačnim čvrstoćama.

Kako bi se stekao bolji uvid o utjecaju količine pojedinog tipa veziva na jednoosnu tlačnu čvrstoću i vlažnost poboljšane gline, rezultati su prikazani u obliku normaliziranih dijagrama. Slika 6. prikazuje odnos normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće ( $q$ ) u odnosu na jednoosnu tlačnu čvrstoću uzorka bez veziva ( $q_0$ ) naspram udjela (postotka) primijenjenog pojedinog veziva. Slika 7. prikazuje odnos normalizirane vrijednosti vlažnosti kompozitnog uzorka ( $w$ ) u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka gline ( $w_0$ ) naspram udjela (postotka) primijenjenog pojedinog veziva.



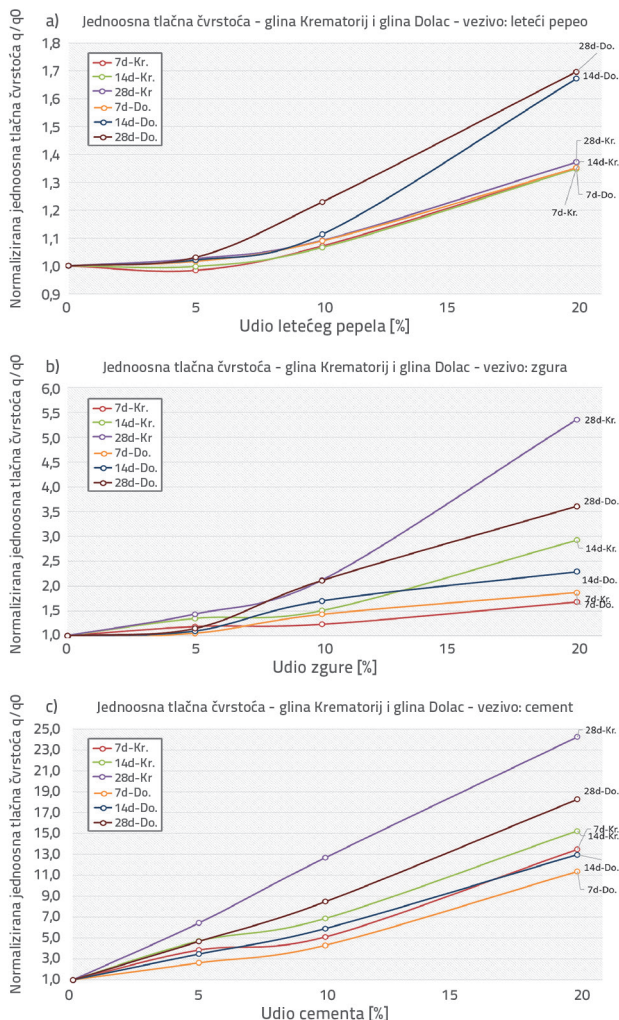
Slika 5. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće uzoraka gline s lokaliteta tržnice Dolac s dodatkom: a) letećeg pepela; b) zgre; c) cementa; te ispitivanje prirodne vlažnosti uzoraka s dodatkom: d) letećeg pepela; e) zgre; f) cementa

Kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, poboljšani s 5 % letećeg pepela (slika 6.a), ne pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva, bez obzira na starost uzorka. Pri dodavanju 10 % letećeg pepela, jednoosna tlačna čvrstoća se uvećala za približno 7-10 % u odnosu na uzorke bez letećeg pepela, a za lokaciju Dolca nakon 28 dana jednoosna se tlačna čvrstoća uvećala za 23 %. Pri dodavanju 20 % letećeg pepela u mješavinu, uzorci gline Krematorija su dostigli povećanu čvrstoću za približno 35 % gdje starost uzorka nije imala utjecaj na povećanje vrijednosti čvrstoće. S druge strane, uzorci gline Dolca 7-dnevne starosti su za mješavine s 20 % letećeg pepela postigli vrijednost za približno 35 %, dok su uzorci 14-dnevne starosti postigli vrijednost za približno 67 %, a 28-dnevne starosti vrijednost za 70 % veću od uzorka bez dodatka letećeg pepela.

Kompoziti gline Krematorija i gline Dolca, poboljšane s 5 % zgre (slika 6b), za razliku od uzorka s istim postotkom letećeg

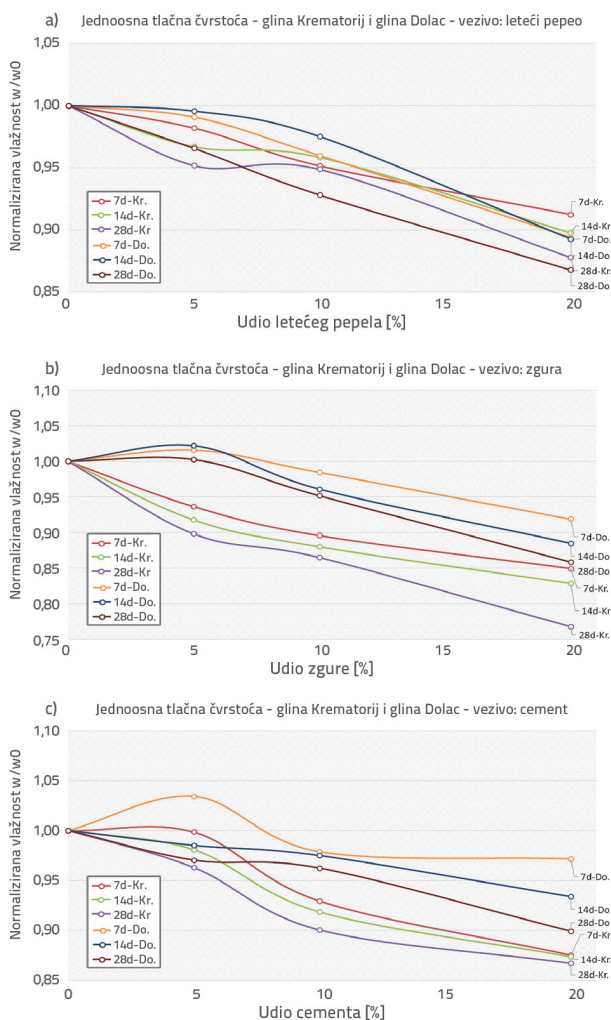
pepela, pokazuju povećanje jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na uzorke bez veziva. Pri tome je povećanje evidentno s većom starosti uzorka, gdje uzorci gline Krematorija imaju veću jednoosnu tlačnu čvrstoću za 18 % (7 dana), 35 % (14 dana) te 44 % (28 dana), dok uzorci gline Dolca pokazuju nešto manji porast jednoosne tlačne čvrstoće od 5 % (7 dana), 9 % (14 dana) te 15 % (28 dana), sve u odnosu na jednoosnu tlačnu čvrstoću uzorka bez veziva. Pri dodavanju 10 % zgre, uzorci gline Krematorija imaju veću jednoosnu tlačnu čvrstoću za 23 % (7 dana), 51 % (14 dana) te 112 % (28 dana), dok uzorci gline Dolca imaju veću jednoosnu tlačnu čvrstoću za 43 % (7 dana), 70 % (14 dana) te 111 % (28 dana), sve u odnosu na jednoosnu tlačnu čvrstoću uzorka bez veziva. Jednako kao i kod poboljšanja letećim pepelom, uzorci s najvećim postotkom zgre (20 %) pokazuju i najveći porast jednoosne tlačne čvrstoće - 68 % (7 dana), 193 % (14 dana) te 436 % (28 dana) za uzorke gline Krematorija, odnosno 87 % (7 dana), 129 % (14 dana) te 261 % (28 dana) za uzorke gline Dolca.





Slika 6. Normalizirane vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće kompozita u odnosu na udio veziva s: a) letećim pepelom; b) zgurom; c) cementom

Pri poboljšanju uzoraka gline cementom (slika 6c), primjećuje se značajan porast jednoosne tlačne čvrstoće u odnosu na nepoboljšani uzorak, veći pri manjim količinama dodanog cementa, a porast je evidentan i s većom starosti uzorka. Tako za uzorke kompozita Krematorija povećanje jednoosne tlačne čvrstoće iznosi 3.87 puta (7 dana), 4.72 puta (14 dana) te 6.44 puta (28 dana) za uzorke s 5 % cementa, nadalje 5.1 puta (7 dana), 6.86 puta (14 dana) te čak 12.67 puta (28 dana) za uzorke s 10 % cementa, te naposljetku 13.48 puta (7 dana), 15.24 puta (14 dana) te čak 24.23 puta (28 dana) za uzorke s 20 % cementa. Za uzorke kompozita Dolca povećanje jednoosne tlačne čvrstoće iznosi 2.63 puta (7 dana), 3.47 puta (14 dana) te 4.68 puta (28 dana) za uzorke s 5 % cementa, nadalje 4.31 puta (7 dana), 5.91 puta (14 dana) te 8.47 puta (28 dana) za uzorke s 10 % cementa, te naposljetku 11.36 puta (7 dana), 11.97 puta (14 dana) te 18.27 puta (28 dana) za uzorke s 20 % cementa.



Slika 7. Vlažnost uzoraka kompozita u odnosu na udio veziva s: a) letećim pepelom; b) zgurom; c) cementom

Očito je da uzorci s cementom imaju najveći prirast jednoosne tlačne čvrstoće s vremenom sazrijevanja uzorka, u usporedbi s uzorcima s dodatkom letećeg pepela i s dodatkom zgurom. Slika 7. prikazuje redukciju vlažnosti ispitanih uzoraka u odnosu na prirodnu vlažnost uzorka, uslijed miješenja gline s letećim pepelom (slika 7.a), zgurom (slika 7.b) te cementom (slika 7.c). Iz slike je očito da se najveća redukcija vlažnosti pojavljuje kod uzoraka kompozita sa zgurom, dok je kod uzoraka s letećim pepelom i cementom ta redukcija podjednaka. Kod svih kompozita, neovisno o vrsti veziva, konzistentno je smanjenje vlažnosti s većim postotkom veziva, kao i smanjenje vlažnosti s povećanjem vremena sazrijevanja uzorka. Uzorci s lokacije Dolca pomiješani sa zgurom pokazuju čak i povećanje vlažnosti kompozita s manjim udjelom veziva (5 %), a primjenom većeg udjela veziva (10 % i 20 %) dolazi do smanjenja vlažnosti.



## 5. Zaključak

U radu se daje prikaz rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka zagrebačke gline, uzete s lokaliteta groblja Krematorij i tržnice Dolac, poboljšane s različitim vezivima:

- cementom kao tradicionalnim vezivom korištenim za poboljšanje tla
- letećim pepelom
- zgurom kao industrijskim nusproizvodima čija je primjena u istraživanjima poboljšanja tla na svjetskoj razini u uzlaznom trendu.

Ukupno su, za obje lokacije, ispitana 432 uzorka kompozita gline s navedenim vezivima, pri čemu su ispitani uzorci starosti 7, 14 odnosno 28 dana. Analizirani su i u radu razmotreni rezultati utjecaja tipa i količine pojedinog veziva, kao i starosti uzorka, na mehaničko svojstvo jednoosne tlačne čvrstoće kompozita te na fizikalno svojstvo vlažnosti uzorka. Iz rezultata je vidljivo da kompoziti gline i cementa imaju najveći prirast jednoosne tlačne čvrstoće s povećanjem udjela cementa, nakon čega slijede kompoziti gline i zgure, a najmanji je prirast jednoosne tlačne čvrstoće u slučaju miješanja gline s letećim pepelom. Također kod kompozita s cementom zamjetan je i najveći utjecaj starosti

uzorka na porast jednoosne tlačne čvrstoće, dok je kod uzoraka s letećim pepelom ona najmanja. Iako se moglo očekivati da su prosječne normalizirane čvrstoće uzoraka geopolimera s Dolca veće nego kod uzoraka s Krematorija, s obzirom na nešto veću vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće gline Dolca (bez dodatka veziva), pokazalo se da je to slučaj samo kada se kao vezivo koristi leteći pepeo. U slučaju kada se koriste zgura ili cement kao vezivo, normalizirane čvrstoće uzoraka geopolimera su veće kod uzoraka gline Krematorija. Razlog za navedeno može biti u činjenici da su uzorci gline Dolca uglavnom visokoplastični (CH), a uzorci gline Krematorija niskoplastični (CL). Vlažnosti ispitanih uzoraka se konzistentno smanjuju s većim postotkom veziva, kao i s povećanjem vremena sazrijevanja uzorka. Prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja daju preliminarni uvid u ponašanje osnovnih fizikalno-mehaničkih parametara kompozita gline i različitih veziva. Daljnja istraživanja će se usmjeriti na određivanje krutosnih karakteristika kompozita gline poboljšane različitim vezivima, čime će se steći sveobuhvatniji uvid u parametre potrebne za projektiranje održivog poboljšanja zagrebačke gline. Važnost ispitivanja je i u analizi utjecaja veziva od industrijskih nusprodukata na poboljšanje zagrebačke gline, čime se potencijalno mogu reducirati značajne količine industrijskih nusproizvoda u Hrvatskoj i regiji.

## LITERATURA

- [1] Das, B.M.: Principles of foundation engineering. Cengage learning, Boston, USA, 2015.
- [2] Mollamahmutoglu, M., Avci, E.: Cement Type Effect on Improvement of Clayey Soil Properties, *Acta Materialia Journal*, 115 (2018), 6, pp. 855 – 866, <http://doi.org/10.14359/51702347>
- [3] Baldovino, J.A., Moreira, E.B., Teixeira, W., Izzo, R.L.S., Rose, J.L.: Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10 (2018) 1, pp. 188–194, <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.001>
- [4] Kovačević, M.S., Marčić, D., Bačić, M.: Current and future trends in geotechnical engineering in Croatia, *Proceedings of the Scientific Symposium: Future Trends in Civil Engineering*, Zagreb, Croatia, pp. 13-34, 2014.
- [5] Kovačević, M.S., Simović, R., Bjegović, D., Rosković, R., Peček, N.: Soil improvement with nano waste particles, *Proceedings of the International Symposium: Non-Traditional Cement & Concrete III*, Brno, Czech Republic, pp. 362-371, 2008.
- [6] Sreevidya, V., Anuradha, R., Venkatasubramani, R.: Study on Fly Ash Geopolymer Concrete to Reduce Global Warming Gases, *Nature - Environment and Pollution Technology*, 9 (2010), pp. 383-387
- [7] Habert, G., Lacaillerie, J.B., Roussela, N.: An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends, *Journal of Cleaner Production*, 19 (2011), pp. 1229-1238.
- [8] Bačić, M., Marčić, D., Peršun, T.: Application of industrial waste materials in sustainable ground improvement, *3<sup>rd</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2014*, Conference Proceedings (ed. Lakusic, S.), Split, Croatia, pp. 609 - 615, 2014.
- [9] Ferguson, G.: Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36 (1993), pp. 1-14
- [10] Ferguson, G., Levenson, S.M.: Soil and pavement base stabilization with self-cementing coal fly ash, *American Coal Ash Association*, 1999.
- [11] Çokça, E.: Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (2001), pp. 568-573, 2001., [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568))
- [12] 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.
- [13] Mackiewicz, S.M., Ferguson, E.G.: Stabilization of soil with self-cementing coal ashes, *2005 World of Coal Ash (WOCA)*, Lexington, 2005.
- [14] Parsons, R.L.: Subgrade improvement through fly ash stabilization, *Miscellaneous Report*, Kansas University Transportation Center, University of Kansas, 2002.
- [15] 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.
- [16] Ohishi, K.: Application of coal fly ash for improving soils prior to excavation, *Proc. International Conf. on Engineering Materials*, vol. 2, Ottawa, Canada, pp. 531-541, 1997.
- [17] 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 (2006), 4, pp. 365-376, 2006., <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.005>

- [18] Vukičević, M., Pujević, V., Marjanović, M., Jocković, S., Maroš-Dragojević, S.: Stabilizacija sitnozrnatog tla letječim pepelom, *GRAĐEVINAR*, 67 (2015) 8, pp. 761-770, <http://doi.org/10.14256/JCE.1281.2014>
- [19] Andavan, S., Pagadala, V.K.: A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime, *Materials Today: Proceedings*, 22 (2020), 3, pp. 1125 - 1129, <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.323>
- [20] Hansson, N.: Deep soil stabilization with fly ash, MSc thesis, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden, 2008.
- [21] Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske, M.L., Karrech, A.: Systematic Approach to Assessing the Applicability of Fly-ash Based Geopolymer for Clay Stabilization, *Canadian Geotechnical Journal*, 57 (2020) 9, pp. 1356 - 1368, <http://doi.org/10.1139/cgj-2019-0215>
- [22] Xiao, H., Wang, W., Goh, S.H. Effectiveness study for fly ash cement improved marine clay, *Construction and Building Materials*, 157 (2017), pp. 1053-1064. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.070>
- [23] Lang, L., Li, F., Chen, B.: Small-strain dynamic properties of silty clay stabilized by cement and fly ash, *Construction and Building Materials*, 237 (2020), 117646, <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117646>
- [24] Šešljija, M., Radović, N., Vasić, M., Đogo, M., Jotić, M.: Fizikalno-mehanička svojstva letječeg pepela primjenjivog pri građenju cesta, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 10, pp. 923-932, <http://doi.org/10.14256/JCE.1860.2016>
- [25] Develioglu, I., Pulat, H.: Geotechnical properties and bearing capacity of blast furnace slag, *GRAĐEVINAR*, 70 (2018) 7, pp. 571-579, <http://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.2080.2017>
- [26] Androjić, I., Dimter, S.: Tlačna čvrstoća stabilizacijskih mješavina od zgure iz čeličana, *GRAĐEVINAR* 64 (2012) 1, pp.15-21.
- [27] Salimi, M., Ghorbani, A.: Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers, *Applied Clay Science*, 184 (2020), 105390, <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105390>
- [28] Cikmit, A.A., Tsuchida, T., Hashimoto, R., Honda, H., Kang, G., Sogawa, K.: Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay, *Construction and Building Materials*, 227 (2019), 116799, <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116799>
- [29] Yong-Feng, D., Tong-Wei, Z., Yu, Z., Qian-Wen, L., Qiong, W.: Mechanical behaviour and microstructure of steel slag-based composite and its application for soft clay stabilisation, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2017), pp. 1-16, <http://doi.org/10.1080/19648189.2017.1357787>
- [30] Hughes, P., Glendinning, S.: Deep dry mix ground improvement of a soft peaty clay using blast furnace slag and red gypsum, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37 (2004) 3, pp. 205-216, <http://doi.org/10.1144/1470-9236/04-003>
- [31] He, J., Wang, X., Su, Y., Li, Z., Shi, X.: Shear Strength of Stabilized Clay Treated with Soda Residue and Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (2019) 3, 06018029, [http://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002629](http://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002629)
- [32] Ouf, M.: Stabilisation of clay subgrade soils using ground granulated blastfurnace slag, PhD thesis, University of Leeds, 2001.
- [33] Shalabi, F.I., Asi, I.M., Qasrawi, H. Y.: Effect of by-product steel slag on the engineering properties of clay soils, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29 (2017) 4, pp. 394-399, <http://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.07.004>
- [34] Ahnberg H., Johansson S.E., Pihl H., Carlsson T.: Stabilising effects of different binders in some Swedish soils, *Ground Improvement*, 7 (2003) 1, pp. 9-23.
- [35] Ahnberg, H., Johansson, S.E.: Increase in strength with time in soils stabilised with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products, *Proceedings International Conference on Deep Mixing*, Stockholm, Sweden, pp. 195-202., 2005.
- [36] Gupta, R.C., Thomas, B.S., Gupta, P., Rajan, L., Thagriya, D.: An Experimental Study of Clayey Soil Stabilized by Copper Slag, *Int. J. Struct. & Civil Engg. Res.*, 1 (2012) 1, pp.111-119.
- [37] Yadu, L.K., Tripathi, R.K., Singh, D.V.: Comparison of Fly Ash and Rice Husk Ash Stabilized Black Cotton Soil, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4 (2011) 6, SPL, pp. 42-45
- [38] Al-Dahlaki, M.H.: Effect of Fly Ash on the Engineering Properties of Swelling Soils, *Journal of Engineering and Development*, 11 (2007) 3, pp. 1-11.
- [39] Cortellazzo, G., Cola, S.: Geotechnical Characteristics of Two Italian Peats Stabilized with Binders, *Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm: Balkema, pp. 93-100, 1999.
- [40] Hebib, S., Farrell, E.R.: Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils, *Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Stockholm: Balkema, pp. 81-84, 1999.
- [41] Sherwood, P.: Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review, London: Transport Research Laboratory, HMSO, 1993.
- [42] Stocker, M., Seidel, A.: Twenty-seven Years of Soil Mixing in German: The Bauer Mixed-in-Place-Technique. *Proceeding of the International Conference on Deep Mixing-Best Practice and Recent Advances*, Stockholm, Sweden 2005.
- [43] Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H.R., Ramyar, K.: Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay, *Building and Environment*, 41 (2006) 2, pp. 150-155, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.009>
- [44] Luis, A., Deng, L.: Development of mechanical properties of Edmonton stiff clay treated with cement and fly ash, *International Journal of Geotechnical Engineering*, (2018), pp. 1-11, <http://doi.org/10.1080/19386362.2018.1454387>
- [45] Wang, D., Wang, R., Benzerzour, M., Wang, H., Abriak, N.-E. Comparison between reactive MgO- and Na2SO4-activated low-calcium fly ash-solidified soils dredged from East Lake, China, *Marine Georesources & Geotechnology*, (2019), pp. 1-10, <http://doi.org/10.1080/1064119x.2019.1648616>
- [46] Milaković, D.: Trenutna i konsolidacijska slijeganja tla izazvana bušenjem tunela u krutim glinama, *Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, 2012.
- [47] HOLCIM Cement: Tehničke specifikacije proizvoda i usluga, Brošura 2, URL: <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/cement/cement-u-vrecama>