

Primljen / Received: 22.4.2024.

Ispravljen / Corrected: 24.6.2024.

Prihvaćen / Accepted: 25.6.2024.

Dostupno online / Available online: 10.7.2024.

Utjecaj tradicionalnih i alternativnih dodataka na fizičko-mehaničke karakteristike glinovitog tla

Autori:



¹Mr.sc. **Nemanja Marinković**
nemanja.marinkovic@gaf.ni.ac.rs

Autor za korespondenciju



¹Izv.prof.dr.sc. **Elefterija Zlatanović**
elefterija.zlatanovic@gaf.ni.ac.rs



¹Prof. **Zoran Bonić**, dipl.ing.građ.
zoran.bonic@gaf.ni.ac.rs



²Prof. **Dragan Djordjević**, dipl.ing.građ.
dragan.djordjevic1@pmf.edu.rs



¹Mr.sc. **Nikola Romić**, dipl.ing.građ.
nikola.romic@gaf.ni.ac.rs

¹ Sveučilište u Nišu, Srbija
Građevinsko - arhitektonski fakultet

² Sveučilište u Nišu, Srbija
Prirodno - matematički fakultet

Prethodno priopćenje

Nemanja Marinković, Elefterija Zlatanović, Zoran Bonić, Dragan Djordjević, Nikola Romić

Utjecaj tradicionalnih i alternativnih dodataka na fizičko-mehaničke karakteristike glinovitog tla

U radu su razmatrani utjecaji različitih dodataka na promjene fizičko - mehaničkih karakteristika glinovitog tla primjenom tehnike kemijske stabilizacije. U laboratorijskim uvjetima su pripremljeni uzorci mješavine glinovitog tla s izabranim dodacima s postotkom udjela od 3 %, 5 % i 7 %, koji su potom ispitani u različitim vremenskim intervalima, 3, 7 i 28 dana nakon tretmana. Za tako pripremljene uzorke provedena je analiza utjecaja svakog od razmatranih dodataka na promjenu jednoosne tlačne čvrstoće, Atterbergovih granica i pH-vrijednosti. Na osnovi dobivenih rezultata određena je optimalna količina svakog dodatka za tretirano tlo. S optimalnim udjelom dodatka urađene su dodatne serije ispitivanja promjene modula stišljivosti i koeficijenta pora tretiranog tla nakon 3, 7 i 28 dana, odnosno promjene kalifornijskog indeksa nosivosti i vrijednosti bubrenja nakon 7 i 28 dana. Dobiveni rezultati pokazuju da se u zavisnosti od količine dodatka u mješavini i vremenskog intervala ispitivanja fizička i mehanička svojstva tretiranog glinovitog tla mogu poboljšati u znatnoj mjeri.

Ključne riječi:

glinovito tlo, kemijska stabilizacija, dodaci, fizičko-mehanička svojstva, pH-vrijednost

Research Paper

Nemanja Marinković, Elefterija Zlatanović, Zoran Bonić, Dragan Djordjević, Nikola Romić

Influence of traditional and alternative additives on the physical and mechanical properties of clayey soil

This study considered the effects of different types of additives on the physical and mechanical characteristics of clayey soil using a chemical stabilisation technique. Under laboratory conditions, samples of the clayey soil mixture with selected additives at percentages of 3 %, 5 %, and 7 % were prepared and tested at time intervals of 3, 7, and 28 d after the treatment. For the prepared samples, the influence of each additive on the change in the uniaxial compressive strength, Atterberg limits, and pH values was analysed. Based on the obtained results, the optimal amount of each additive for the treated soil was determined. Using the optimal additive contents, an additional series of tests to investigate the changes in the modulus of compressibility and void ratio of the treated soil were performed after 3, 7, and 28 d, as well as changes in the California bearing ratio and swelling value after 7 and 28 d. The obtained results reveal that, depending on the amounts of additives in the mixture and the time interval of the test, the physical and mechanical properties of the treated clayey soil could be considerably improved.

Key words:

clayey soil, chemical stabilization, additives, physical and mechanical properties, pH value

1. Uvod

U praksi se u građevinarstvu uspješno primjenjuju različite metode za poboljšanje geotehničkih svojstava tla. To se u najvećoj mjeri odnosi na materijale koji svojim karakteristikama ne zadovoljavaju unaprijed definirane kriterije u pogledu nosivosti i stabilnosti. Tehnike stabilizacije (poboljšanja karakteristika) tla razvijale su se usporedno s tehnološkim napretkom, a pronalazak novih materijala pridonio je sve većoj učinkovitosti ovih metoda. Brojni inženjeri tehniku kemijske stabilizacije ističu kao najbolju metodu stabilizacije tla u pogledu isplativosti, učinkovitosti, ali i njene prihvatljivosti s ekološkog aspekta [1].

Tijekom procesa kemijske stabilizacije poboljšanje se karakteristika tla postiže kroz dva osnovna procesa: kationske izmjene i pucolanske reakcije. Detalji osnovnih mehanizama pri kemijskoj stabilizaciji mogu se pronaći u relevantnoj literaturi [2, 3], mada je potrebno ispitati potencijal svakog tla zasebno. Naime, pokazalo se da kada je riječ o glinovitom tlu, mineraloški sastav gline uvelike određuje fizičko-mehanička svojstva tla [4]. Kao tradicionalni kemijski stabilizatori koriste se vapno i cement [5, 6]. Krajem dvadesetog stoljeća naširoko se počeo upotrebljavati elektrofilterski pepeo [7], jer se taj nusproizvod može smatrati korisnim otpadom [8, 9]. U praksi se gotovo 80 % slučajeva koristi jedan od tri spomenuta stabilizatora [10]. Međutim, iako upotreba cementa rezultira poboljšanjem inženjerskih svojstava tla, njegova primjena je sve manje zastupljena zbog rastuće cijene proizvoda i zabrinutosti za životnu sredinu pri njegovoj proizvodnji [11-13]. Ovo saznanje je navelo istraživače da traže alternativne materijale, koji trebaju biti odgovarajući kako s ekonomskog, tako i ekološkog aspekta [14]. Uobičajeni problemi pri korištenju komercijalnih stabilizatora su vrijeme očvršćivanja i krto ponašanje tla tretiranog pucolanima koje može izazvati pukotine kada je tlo izloženo dinamičkom opterećenju [15]. S obzirom na to da alternativni reagensi nalaze uspješnu primjenu u drugim granama građevinarstva [16], očigledna je potreba za korištenjem i u domeni geotehnike [17-25].

Cilj je ovog rada ispitivanje utjecaja različitih kemijskih stabilizatora na poboljšanje fizičko-mehaničkih karakteristika glinovitog tla primjenom tehnike kemijske stabilizacije. Kao stabilizatori razmatrani su vapno ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kao tradicionalni reagens, ali i alternativni stabilizatori poput magnezijeva karbonata (MgCO_3), natrijeva silikata (Na_2SiO_3) i kalijeva hidroksida (KOH). Za potrebe laboratorijskih ispitivanja, u skladu s nacionalnim normama koje su usklađene s europskim EN normama, uzorci tla su tretirani s različitim postotnim udjelom stabilizatora u mješavini s glinom, kako bi se odredio njegov optimalan udio. U dosadašnjim istraživanjima došlo se do zaključka da je za smanjenje plastičnosti

dovoljan postotni dodatak vapna od 1 % do 3 % [5], a da se s dodatkom od 2 % do 8 % postiže trajna stabilizacija, odnosno cementacija [26]. Modifikacija tla je najprije procijenjena praćenjem promjena Atterbergovih granica i jednoosne tlačne čvrstoće (UCS). Osim promjene u fizičko-mehaničkim karakteristikama, na svim uzorcima tretiranog tla praćena je i kemijska modifikacija. Izvršeno je mjerenje pH-vrijednosti tretiranog tla s dodatkom svakog od razmatranih stabilizatora. Pri dodavanju stabilizatora, uz prisustvo dovoljne količine vode, očekuje se povećanje pH-vrijednosti tla koje na taj način potakne pucolanske reakcije i trajne promjene strukture tla [27]. Na osnovi ovih ispitivanja za svaki od korištenih stabilizatora je određen optimalan udio, a zatim su urađena naknadna ispitivanja. Kroz različite vremenske intervale praćena je promjena modula stižljivosti (Mv) i koeficijenta pora (e), odnosno vrijednosti CBR-a i bubrenja.

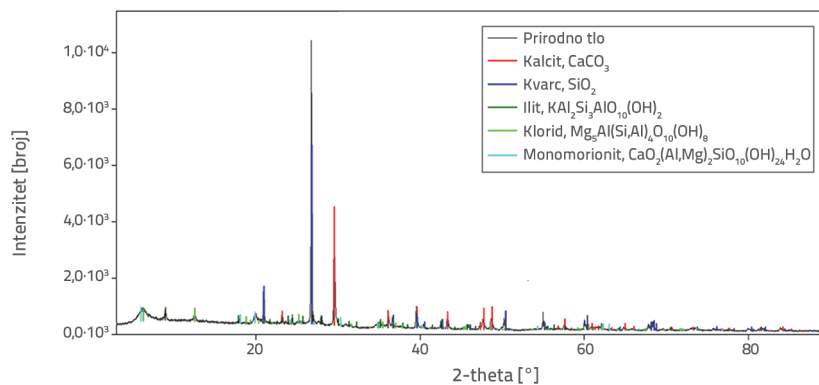
2. Materijali i metode

2.1. Karakteristike tla

Za ispitivanja je korišteno glinovito tlo duž trase autoceste E-80 Niš-Dimitrovgrad, kod mjesta Crvena Reka, u jugoistočnom dijelu Republike Srbije. Prilikom izgradnje autoceste na ovoj lokaciji aktiviralo se klizište. Uzorci tla uzeti su iz dubine na kojoj je registrirana klizna ploha. Rezultati ovog eksperimentalnog istraživanja trebaju upozoriti na mogućnost poboljšanja geomehničkih svojstava tla nakon miješanja s kemijskim stabilizatorom. Ispitivanja su provedena prema važećim nacionalnim normama u Laboratoriju za geotehniku na Građevinsko-arhitektonskom fakultetu Sveučilišta u Nišu.

Na slici 1. prikazan je mineraloški sastav prirodnog glinovitog tla korištenog u istraživanju, koji je, utvrđen X-ray Diffraction (XRD) analizom. Kao što se sa XRD spektra može vidjeti, ispitana glina u prirodnom stanju se sastoji od različitih minerala, među kojima dominiraju kalcit i kvarc. Osim njih prisutni su i minerali gline - ilit, montmorionit i klorit. Kaolinit nije identificiran u ispitanom glinovitom tlu.

Geomehnička svojstva prirodnoga glinovitog tla koje je korišteno u ekperimentalnom istraživanju prikazana su u tablici 1.



Slika 1. Mineraloški sastav prirodnoga glinovitog tla određen XRD analizom

Tablica 1. Svojstva glinovitog tla korištenog u eksperimentalnom istraživanju

Svojstvo tla	Simbol [mjerna jedinica]	Vrijednost
Specifična težina	Gs [-]	2,705
Granulometrijski sastav	Šljunak [%]	1,2
	Pijesak [%]	4,9
	Prah [%]	40,6
	Glina [%]	53,3
Koeficijent uniformnosti	Cu [-]	8,0
Koeficijent zakrivljenosti	Cc [-]	2,0
Klasifikacija tla prema USCS	Simbol [-]	CL
Maksimalna suha gustoća	MDD [g/cm ³]	1,903
Optimalni udio vode	OMC [%]	18,5
Jednoosna tlačna čvrstoća	UCS [kPa]	205
Granica tečenja	LL [%]	49
Granica plastičnosti	PL [%]	23
Indeks plastičnosti	PI [%]	26
pH-vrijednost	pH (-)	9,5
Modul stišljivosti	Mv [MPa]	12,945
Koeficijent pora	e [-]	0,554
Kalifornijski indeks nosivosti	CBR [%]	2,71
Bubrenje	s [%]	2,91

Tablica 2. Svojstva dodataka korištenih u istraživanju

Svojstvo [mjerna jedinica]		Dodatak			
		Vapno Ca(OH) ₂	Magnezijev karbonat MgCO ₃	Vodeno staklo Na ₂ SiO ₃	Kalijev hidroksid KOH
Spoj [%]	CaO	71,01	-	-	-
	MgO	-	47,0	-	-
	SiO ₂	-	-	28,00	-
	Na ₂ O	-	-	8,00-9,00	-
	K ₂ O	-	-	-	84,00
Specifična masa [g/cm ³]		2,21	2,96	1,37	2,04
pH-vrijednost [-]		12,60	10,00	10,80	13,50

2.2. Dodaci

Vapno (Ca(OH)₂) se ističe kao svestrano i ekonomično rješenje pri kemijskoj stabilizaciji tla, prije svega zbog svoje sposobnosti da neutralizira kiselost, povećavajući pH-vrijednost tla i poboljšavajući njegova inženjerska svojstva. Upotreba vapna u stabilizaciji uspješno pronalazi primenu kod gotovo svih vrsta tala. Posebno pogodna za stabilizaciju vapnom smatraju se tla kod kojih je PI > 15 % [5]. Dodavanje optimalne količine vapna znatno povećava čvrstoću, poboljšava stabilnost i nosivost tla, dok s druge strane smanjuje plastičnost, vodopropusnost i bubrenje [28-

30]. Za potrebe ispitivanja u radu je korišteno komercijalno hidratizirano vapno CL-90-S. Osim brojnih prednosti, tradicionalni dodaci imaju i određene nedostatke, pa stoga mnogi istraživači kao alternativne dodatke predlažu spojeve na bazi magnezija [31-33], vodenog stakla [34, 35] i kalija [36]. Pokazalo se da alternativni dodaci doprinose znatnom poboljšanju karakteristika u slučaju bujajućih i pjeskovitih glina [37-39]. Stoga je u radu provedeno ispitivanje utjecaja dodavanja tradicionalnog i alternativnih dodataka na glinovito tlo uzeto s područja klizišta. Osnovne karakteristike korištenih dodataka, zajedno s prikazom glavnog spoja za svaki dodatak, dane su u tablici 2.

2.3. Eksperimentalne metode ispitivanja

S ciljem utvrđivanja utjecaja kemijske stabilizacije glinovitog tla razmatrajući različite vrste dodataka, praćene su promjene jednoosne tlačne čvrstoće (UCS), kao i promjene Atterbergovih granica (granice tečenja (LL) i granice plastičnosti (PL)) na osnovi koje je izračunana vrijednost indeksa plastičnosti (PI). Svaki od dodataka dodavan je prirodnom materijalu s udjelom od 3 %, 5 % i 7 % u odnosu na suhu težinu uzorka tla. Uzorci za ispitivanje UCS pripremani su u laboratorijskim uvjetima [40], s optimalnom vlažnošću i zbijani standardnim Proctorovim pokusom na energiju zbijanja od 600 kNm/m³. Atterbergove granice su također određene prema odgovarajućoj normi [41]. Uzorci su čuvani u plastičnoj foliji do ispitivanja, i to 3, 7 i 28 dana tretmana, a sve s ciljem utvrđivanja trajnosti utjecaja kemijske stabilnosti na tretirano glinovito tlo.

Na osnovi rezultata navedenih ispitivanja došlo se do zaključka o optimalnom udjelu dodatka u mješavini s glinom, pa su provedena dodatna ispitivanja na uzorcima s optimalnim udjelom dodatka s aspekta promjene modula stižljivosti i koeficijenta pora, odnosno promjene vrijednosti kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) i bubrenja tretiranog tla. U edometru je ispitana promjena modula stižljivosti i koeficijenta pora [42], na uzorku visine 20 mm i promjera 70 mm, pri čemu je najveće opterećenje iznosilo 400 kPa. Svi uzorci su 24 sata prije ispitivanja bili zasićeni. Osim toga, provedeno je ispitivanje promjene vrijednosti CBR-a [43]. Uzorci su zbijani pri optimalnoj vlažnosti dobivenoj iz Proctorova pokusa. Prije samog ispitivanja uzorci su njegovani pod vodom 96 sati, i pritom je očitana vrijednost bubrenja tla. Dodatna ispitivanja u edometru provedena su poslije 3, 7 i 28 dana, dok je CBR pokus proveden 7 i 28 dana poslije dodavanja dodatka, rezultat za period 3 dana (72 sati) nakon tretmana nije mogao biti prikazan, jer kako je već prethodno objašnjeno, standardna procedura ispitivanja obuhvaća njegovanje uzoraka pod vodom u trajanju od 4 dana (96 sati). Pri samoj kemijskoj stabilizaciji tla posebnu pozornost treba obratiti na kemijske promjene koje nastaju u tlu tijekom

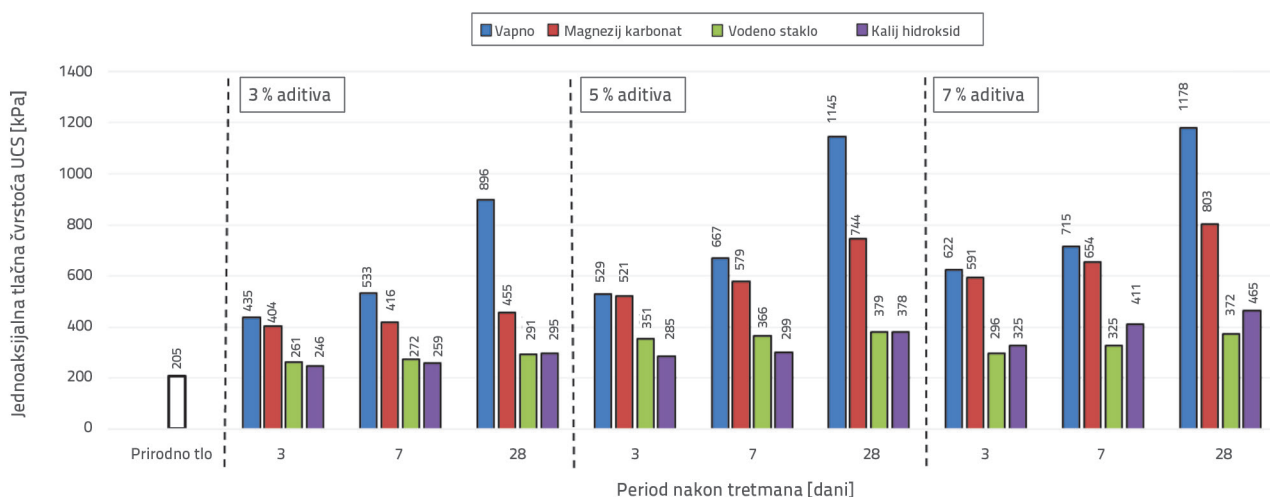
stabilizacije s dodacima. Stoga je u radu osim promjena fizičko-mehaničkih karakteristika tla, praćena i promjena svojstava tla s kemijskog aspekta. S tim u vezi, u radu je dan prikaz promjena pH-vrijednosti s dodavanjem dodatka. Pregledom literature, utvrđeno je da se promjena pH-vrijednosti može uočiti odmah nakon miješanja tla i dodatka i da se tijekom vremena ne mijenja u značajnijoj mjeri [44]. Na osnovi zaključaka spomenutog istraživanja, za utvrđivanje promjene pH-vrijednosti izabrana su tri reprezentativna perioda ispitivanja, 1, 3 i 28 dana nakon tretmana. Određivanje ovih svojstava tla provedeno je u vodenoj otopini (tlo : voda = 1 : 2.5). Tijekom pokusa 10 g tla u suhom stanju dodano je u 25 mL destilirane vode i miješano 10 min. Poslije približno 30 min, kada je otopina bila bistra, elektrode su uronjene u otopinu i na taj način su određene pH-vrijednosti.

3. Rezultati i analize

3.1. Jednoosna tlačna čvrstoća

Na slici 2. prikazani su rezultati jednoosne tlačne čvrstoće (UCS). Rezultati predstavljaju srednju vrijednost pri slomu tri uzorka tretiranog tla. Može se uočiti da je svaki od primijenjenih dodataka pridonio povećanju vrijednosti UCS, među kojima su se vapno i magnezijev karbonat pokazali najučinkovitijima.

Dodavanjem vapna postignute su najveće vrijednosti UCS nakon kemijskog tretmana. Bez obzira na količinu dodatka, uočeno je značajno poboljšanje svojstva tla tijekom vremena. Tako, s dodatkom 3 % vapna, nakon 3 dana od tretmana, vrijednost UCS se povećala dva puta (od vrijednosti 205 kPa u prirodnom stanju tla na 435 kPa). Poslije 7 dana, vrijednost UCS se povećala na 533 kPa, a nakon 28 dana povećanje vrijednosti UCS je iznosilo četiri puta (896 kPa). Sličan trend povećanja vrijednosti UCS s vremenom je zabilježen i na uzorcima sa 5 % i 7 % dodanog vapna. Također, posebno značajno poboljšanje ovog svojstva tla uočeno je kada je udio vapna u mješavini s glinom povećan sa 3 % na 5 %,



Slika 2. Promjena vrijednosti UCS za razmatrane dodatke s povećanjem postotnog udjela dodatka i tijekom vremena

dok povećanje na 7 % nije doprinjelo značajnijoj razlici u usporedbi s rezultatima za slučaj 5 % dodatka vapna. Tako, nakon 28 dana, vrijednost UCS s dodatkom 3 % vapna povećana je oko četiri puta (896 kPa), sa dodatkom 5 % povećanje je iznosilo 5,5 puta (1145 kPa), dok je vrijednost UCS s dodatkom od 7 % bila 5,75 puta veća od početne vrijednosti za prirodno tlo (1178 kPa). Ovaj rezultat pokazuje da se optimalnim udjelom vapna može smatrati 5 %.

Dodatak magnezijeva karbonata u početnom periodu (3 dana nakon tretmana) rezultirao je sličnim UCS vrijednostima kao i u slučaju dodatka vapna za sve razmatrane udjele od 3 %, 5 % i 7 % dodatka. Međutim, poboljšanje svojstva tla tijekom vremena nije bilo toliko izraženo kao što je to bilo u slučaju dodatka vapna. Tako, s dodatkom 3 % magnezijeva karbonata, nakon 3 dana od tretmana, vrijednost UCS se povećala na 404 kPa. Poslije 7 dana, vrijednost UCS se povećala na 416 kPa, a poslije 28 dana na 455 kPa (približno 50 % niže vrijednosti UCS u usporedbi s dodatkom vapna). Za uzorke s 5 % i 7 % dodatka primjetan je nešto veći trend povećanja vrijednosti UCS tijekom vremena (35 % i 30 % niže vrijednosti UCS u usporedbi s dodatkom vapna, respektivno). Također, kao i kod uzoraka s dodanim vapnom, veći porast vrijednosti UCS je primjećen kada je udio magnezijeva karbonata povećan s 3 % na 5 %, u usporedbi sa povećanjem udjela s 5 % na 7 %. Tako, na primjer, nakon 28 dana, vrijednost UCS s dodatkom 3 % magnezijeva karbonata povećana je dva puta (455 kPa), s dodatkom 5 % povećanje je iznosilo 3,5 puta (744 kPa), dok je vrijednost UCS s dodatkom od 7 % bila četiri puta veća od početne vrijednosti za tlo u prirodnom stanju (803 kPa). Dakle, optimalnim udjelom tog dodatka s aspekta ovog svojstva tla može se smatrati 5 %.

Izmjerene vrijednosti UCS uz dodatak vodenog stakla, odnosno kalijeva hidroksida, bile su značajno niže od vrijednosti dobivenih dodatkom vapna i magnezijeva karbonata, međutim, njihova primjena je svakako rezultirala povećanjem čvrstoće tla. Najveća vrijednost UCS za slučaj vodenog stakla zabilježena je s dodatkom 5 % poslije 28 dana (379 kPa). Rezultati su također pokazali da se dodatkom 5 % vodenog stakla dobivaju nešto

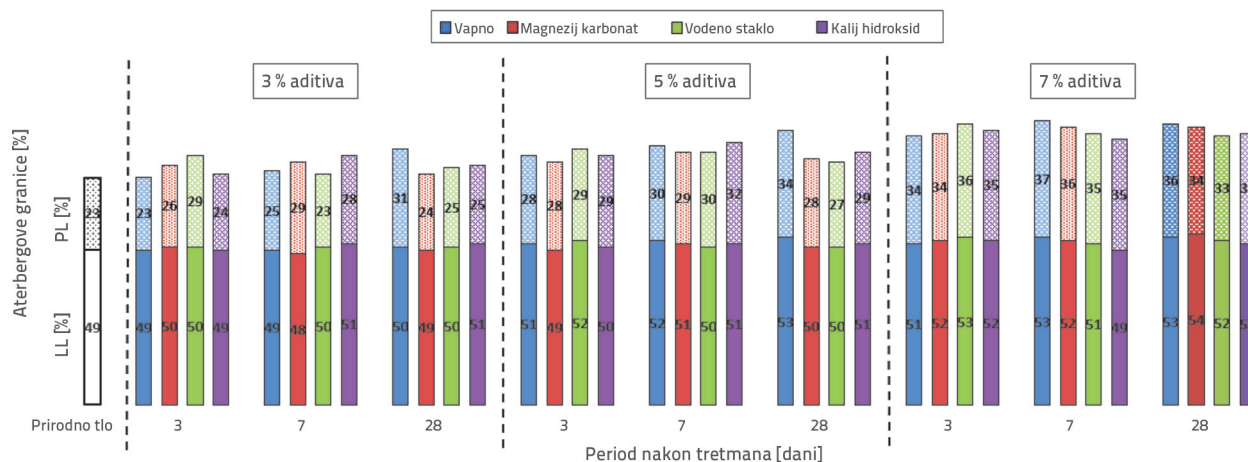
veće vrijednosti UCS nego sa dodatkom 7 % u odgovarajućim vremenskim intervalima. Ovakav rezultat pokazuje da optimalan udio vodenog stakla s ovog aspekta iznosi 5 %.

Uzorci tretirani kalijevim hidroksidom dali su najveću vrijednost UCS pri udjelu 7 % poslije 28 dana (465 kPa). Za razliku od tri prethodno navedena dodatka, za sve razmatrane vremenske intervale uočen je trend gotovo konstantnog porasta vrijednosti UCS sa povećanjem udjela kalijeva hidroksida. Prema tome, za potrebe ovih istraživanja, optimalni udio ovog dodatka iznosi 7 %, iako je, s obzirom na približno konstantan porast vrijednosti UCS s povećanjem udjela kalijeva hidroksida, s ciljem određivanja optimalnog udjela dodatka u mješavini gline, potrebno provesti daljnja istraživanja razmatranje veće postotne udjele ovog dodatka u mješavini.

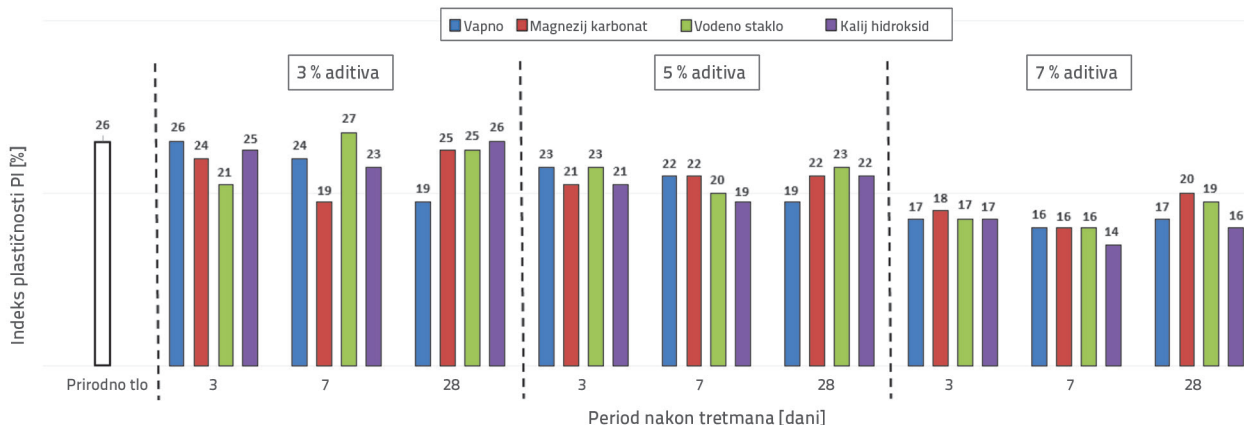
3.2. Atterbergove granice

Tijekom ispitivanja Atterbergovih granica zabilježena je promjena granice tečenja (LL) i granice plastičnosti (PL) i na osnovi njih izračunana vrijednost indeksa plastičnosti (PI) ($PI = LL - PL$). Rezultati su prikazani na slikama 3. i 4.

Slika 3. ilustrira promjenu vrijednosti LL i PL tla za razmatrane dodatke s povećanjem udjela dodatka i tijekom vremena. Na slici, donji dio stupaca (puna boja) prikazuje izmjerene vrijednosti LL, dok gornji dio stupaca (točkasto) prikazuje izmjerene vrijednosti PL. Može se uočiti da nema velikih oscilacija u promjeni vrijednosti LL, bez obzira na vrstu primijenjenog stabilizatora, kao ni na vremenski interval ispitivanja tla nakon tretmana. Najveće povećanje vrijednosti LL zabilježeno je s dodatkom 7 % magnezijeva karbonata poslije 28 dana (LL = 54 %). S druge strane, evidentna je promjena vrijednosti PL kod svih ispitanih uzoraka. Imajući u vidu da su vrijednosti LL ostale nepromijenjene, trend povećanja vrijednosti PL ima pozitivan utjecaj zato što uz veću prisutnost vode, tlo zadržava polučvrsto stanje konzistencije. Također se može uočiti da je za svaki od razmatranih dodataka najveće povećanje vrijednosti PL ostvareno pri 7 % dodatka.



Slika 3. Promjena vrijednosti LL (granice tečenja) i PL (granice plastičnosti) za razmatrane dodatke s povećanjem postotnog udjela dodatka i tijekom vremena



Slika 4. Promjena vrijednosti PI (indeksa plastičnosti) za razmatrane dodatke s povećanjem postotnog udjela dodatka tijekom vremena

Na slici 4. može se uočiti da dodavanje 7 % dodatka na vrijednosti *PI* više utječe postotak dodatka, nego vrijeme vezivanja. S druge strane, pri manjem postotnom udjelu dodatka u mješavini (3 %), oscilacije rezultata kroz vrijeme su znatno izraženije. S obzirom na to da je vrijednost *PI* računska vrijednost i da zavisi od dva parametra (LL i PL), rezultati koji su dobiveni za vrijednosti *PI* uključuju promjene obje veličine koje se mijenjaju nezavisno jedna od druge. Ovakav oscilatorni trend promjene vrijednosti *PI* upravo pokazuje da se samo na osnovi ovog parametra ne može jednoznačno izvesti zaključak o utjecaju dodatka stabilizatora na stanje konzistencije gline. Ipak, glavni zaključak u vezi s tim parametrom jest evidentan utjecaj dodavanja svakog od razmatranih dodataka na opadanje vrijednosti *PI* glinovitog tla za sve razmatrane vremenske intervale s porastom postotnog udjela dodatka u mješavini s tlom.

Kao što je već rečeno, provjera uspješnosti primjene dodataka prije svega se ogleda kroz povećanje vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće i smanjenje indeksa plastičnosti. Na osnovi ovih

rezultata, kao i rezultata pH-vrijednosti prije i poslije kemijskog tretmana tla, određene su optimalne vrijednosti svakog od razmatranih dodataka za potrebe daljnjih ispitivanja.

3.3. pH-vrijednost

Poznato je da visoke pH-vrijednosti tla potiču pucolanske reakcije između dodatka i tla, u kojima se formiraju novi spojevi što pridonose vezivanju i stabilizaciji tla. Na primjer, dodavanjem vapna glinovitom tlu formiraju se kalcijevi silikatni hidrati (CSH) i kalcijevi aluminatni hidrati (CAH) kao materijali nalik gelu s jakim vezivnim svojstvima.

Promjena pH-vrijednosti ispitivanog glinovitog tla s povećanjem postotnog udjela dodatka i tijekom vremena prikazana je u tablici 3. Rezultati upućuju na to da su svi dodaci korišteni u ovom radu pridonijeli povećanju vrijednosti pH glinovitog tla. Povećanje pH-vrijednosti zabilježeno je u početnom periodu (24 h) poslije miješanja sa stabilizatorom, nakon čega su pH-vrijednosti

Tablica 3. Promjena pH-vrijednosti tla za razmatrane dodatke s povećanjem postotnog udjela dodatka i tijekom vremena

Tlo		pH-vrijednost			
		Nakon 1 dana	Nakon 3 dana	Nakon 28 dana	
Prirodno tlo		9,5	9,5	9,5	
Tlo tretirano postupkom kemijske stabilizacije	Vapno (Ca(OH) ₂)	3 %	12,1	12,0	12,0
		5 %	12,5	12,5	12,4
		7 %	12,8	12,8	12,7
	Magnezijev karbonat (MgCO ₃)	3 %	10,9	10,7	10,7
		5 %	12,1	12,1	12,0
		7 %	12,7	12,7	12,6
	Vodeno staklo (Na ₂ SiO ₃)	3 %	11,7	11,7	11,7
		5 %	12,0	12,0	12,0
		7 %	12,1	12,1	12,0
	Kalijev hidroksid (KOH)	3 %	12,0	11,8	11,8
		5 %	12,2	12,2	12,1
		7 %	12,5	12,4	12,3

ostale konstantne ili su se neznatno smanjile, što potvrđuje i prethodno spomenute zaključke relevantnih istraživanja [44]. Rezultati tretiranog tla jasno pokazuju potencijal alternativnih dodataka za trajnu promjenu svojstva tla u kemijskom pogledu. Optimalni udio dodatka je onaj postotak dodatka u mješavini s tlom s kojim bi se postiglo najveće poboljšanje i stabilizacija tla. Najbolji učinak dodatka se postiže pri pH-vrijednosti tla od 12.4, dok je za pH-vrijednosti iznad 12.4 dolazi do narušavanja stabilnosti kristalne rešetke gline [45-47].

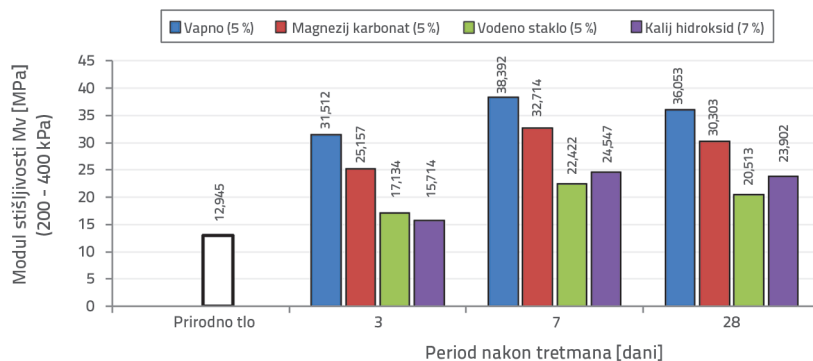
Na osnovi dobivenih rezultata, imajući u vidu i UCS vrijednosti (slika 2.) i pH-vrijednosti tla (tablica 3.), može se zaključiti da je optimalni udio kalijeva hidroksida kao dodatka 7 %, dok za ostale razmatrane dodatke optimalni udio iznosi 5 %. Utvrđene vrijednosti optimalnog udjela dodatka korištene su za potrebe provođenja dodatnih ispitivanja, čiji su rezultati prikazani u idućim poglavljima.

3.4. Modul stišljivosti i koeficijent pora

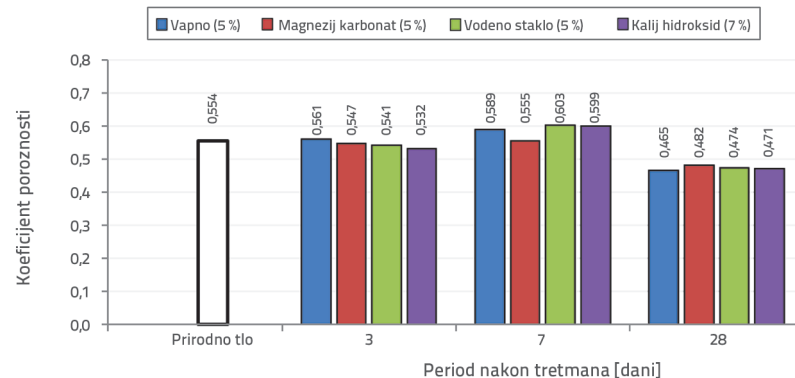
Modul stišljivosti (Mv) određen je u edometarskom pokusu za četiri razine opterećenja (0–50 kPa, 50–100 kPa, 100–200 kPa i 200–400 kPa). Zabilježene vrijednosti *Mv* pri najvećem opterećenju (200–400 kPa) prikazane su na slici 5. Uzorci su ispitani u vremenskim intervalima od 3, 7 i 28 dana nakon tretmana s odgovarajućim optimalnim udjelom dodatka, za sve razmatrane dodatke. Na osnovi prikazanih rezultata može se zaključiti da je svaki od razmatranih stabilizatora pridonio povećanju vrijednosti *Mv*, pri čemu su najveće vrijednosti *Mv* postignute 7 dana nakon tretmana. Za ovaj vremenski interval, najveće povećanje vrijednosti *Mv* postiže se dodavanjem tradicionalnog dodatka - vapna (38,392 kPa), kada je vrijednost povećana za oko 3 puta u usporedbi sa prirodnim tlom. Od alternativnih dodataka najveće vrijednosti su dobivene dodatkom magnezij karbonata (2,5 puta veće vrijednosti *Mv* u usporedbi sa prirodnim tlom), dok su sa dodatkom vodenog stakla i kalij hidroksida početne vrijednosti modula su bile gotovo udvostručene. Poslije 28 dana, za svaki od razmatranih dodataka vrijednost *Mv* bila je manja za 3–9 % u odnosu na vrijednosti postignute 7 dana nakon tretmana. Dakle, u slučaju svakog od odabranih dodataka trend povećanja vrijednosti modula stišljivosti je najizraženiji u periodu do 7 dana nakon tretmana, a zatim je do 28. dana primjetno neznatno smanjenje vrijednosti za koje treba očekivati da će se ustaliti tijekom vremena. Ovakav

trend blagog opadanja vrijednosti nije neuobičajen i potvrđen je i istraživanjima drugih autora [8]. U konačnici, može se konstatirati evidentan utjecaj svakog od razmatranih dodataka u pogledu značajnog povećanja vrijednosti *Mv* u odnosu na početnu vrijednost, koje je ujedno i trajnog karaktera (odnosno, potvrđena je dugorajnost utjecaja stabilizacije).

Na osnovi rezultata pokusa u edometru izračunane su vrijednosti koeficijenta pora tla (*e*) koje su prikazane na slici 6. Za svaki od razmatranih dodataka, vrijednosti koeficijenta pora u prvih 7 dana bilježe blagi rast u odnosu na prirodno stanje, a zatim do 28 dana vrijednosti koeficijenta značajno opadaju. To se objašnjava time što spojevi, koji nastaju kao nusproizvod reakcije tla i dodatka, imaju manji volumen nego čestice tla u svom prirodnom stanju. Novonastali spojevi, osim toga što se odlikuju vrlo velikom čvrstoćom, smatraju se poroznim materijalom koji pridonosi povećanju ukupne poroznosti u početnim danima odvijanja procesa kemijske stabilizacije. Na ovu pojavu ukazali su u svom radu Eyo i dr. [48], u čijim ispitivanjima se, nakon 7 dana očvršćavanja, javljaju fizički vidljive promjene poroznosti stabiliziranih uzoraka, praćene razvojem pora relativno velikog promjera u rasponu između 4 μm i 40 μm . Ovaj trend je naknadno smanjen vjerojatno zbog formiranja veza između čestica tla u pucolanskim reakcijama.



Slika 5. Promjena vrijednosti modula stišljivosti tijekom vremena za optimalni udio razmatranih dodataka

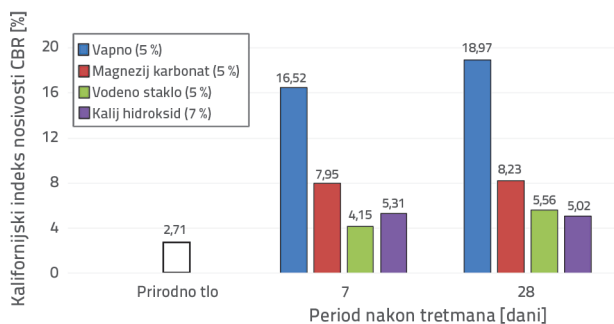


Slika 6. Promjena koeficijenta poroznosti tla tijekom vremena za optimalni udio razmatranih dodataka

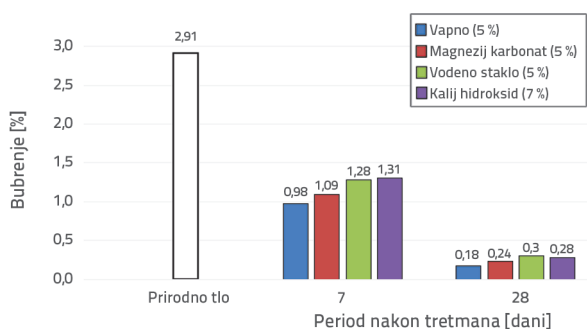
3.5. Kalifornijski indeks nosivosti i bubrenja

Poznato je da se glinovita tla odlikuju niskom vrijednošću kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR), pa je niska vrijednost CBR jedan od uobičajenih kriterija za zamjenu materijala ili poboljšanje svojstava prirodnog tla u građevinske svrhe. Rezultati ovog istraživanja pokazuju da je svaki od razmatranih dodataka, kako tradicionalni, tako i alternativni, pridonio poboljšanju CBR vrijednosti tla nakon 7 i 28 dana. Vrijednosti CBR tla s dodatkom optimalne količine svakog od korištenih dodataka prikazani su na slici 7. U usporedbi sa tlom u prirodnom stanju, najveće poboljšanje primijećeno je s dodatkom vapna (povećanje CBR vrijednosti čak do sedam puta), a značajno poboljšanje se postiglo i dodatkom magnezijeva karbonata (CBR vrijednost povećana tri puta). Najmanje poboljšanje je postignuto dodatkom vodenog stakla nakon 7 dana (povećanje CBR vrijednosti 1,5 puta), odnosno kalijeva hidroksida nakon 28 dana (povećanje CBR vrijednosti do dva puta). Kako se u građevinskoj praksi najčešće zahtijeva da CBR vrijednost bude veća od 5 %, dobiveni rezultati upućuju na to da svaki od razmatranih dodataka prema ovom kriteriju može naći svoju primenu u svrhu stabilizacije glinovitog tla.

Kao što je normom propisano u pokusu bubrenja (s), uzorci se prije ispitivanja u laboratorijskim uvjetima potapaju i njeguju u vodi 96 h, nakon čega se registrira bubrenje tla. Na slici 8. može se uočiti da je svaki od korištenih dodataka pridonio značajnom smanjenju bubrenja tla. Posebno je primjetno smanjenje bubrenja 28 dana nakon tretmana za svaki od razmatranih dodataka, i to oko 10 puta.



Slika 7. Promjena vrijednosti CBR tla tijekom vremena za optimalni udio razmatranih dodataka



Slika 8. Promjena vrijednosti bubrenja tla tijekom vremena za optimalni udio korištenih dodataka

4. Zaključak

U radu su istraživani utjecaji različitih dodataka na promjene fizičko - mehaničkih karakteristika glinovitog tla primjenom tehnike kemijske stabilizacije. Razmatrana su četiri različita dodatka: vapno kao tradicionalni dodatak, i magnezijev karbonat, natrijev silikat i kalijev hidroksid kao alternativni dodaci. U laboratorijskim uvjetima pripremljeni su uzorci mješavine glinovitog tla sa svakim od razmatranih dodataka s tri različita postotka udjela, s ciljem određivanja optimalne količine dodatka u mješavini s tlom. Takođe su praćene promjene svojstava ispitivanih uzoraka kroz različite vremenske intervale nakon tretmana tla, kako bi se utvrdila trajnost utjecaja provedene kemijske stabilizacije tla. Najznačajniji zaključci izvedeni na osnovi provedenih istraživanja su sljedeći:

- Iz aspekta povećanja jednoosne tlačne čvrstoće, može se zaključiti da su najučinkovitiji dodaci vapno i magnezijev karbonat, a vodeno staklo i kalijev hidroksid imaju manji utjecaj na poboljšanje ovog svojstva prirodne gline.
- U pogledu vrijednosti LL (granice tečenja), značajnije poboljšanje se ne postiže ni s jednim od razmatranih dodataka, bez obzira na postotni udio dodatka u mješavini, kao i na vrijeme proteklo od tretmana tla. S druge strane, svaki od razmatranih dodataka pridonosi povećanju vrijednosti PL (granice plastičnosti), što u konačnom rezultira smanjenjem vrijednosti PL (granice plastičnosti), naročito tijekom vremena, a što za posljedicu ima svojstvo tretirane gline da ostane u polučvrstom stanju konzistencije čak i pri većem udjelu vode, što se povoljno odražava na njeno korištenje u praktične svrhe u građevinarstvu.
- Svaki od korištenih dodataka pridonosi povećanju pH-vrijednosti tla, i to već u početnom periodu nakon tretmana, čime se smanjuje kiselost tla i omogućava razvoj pucolanskih reakcija. Na osnovi rezultata jednoosne tlačne čvrstoće, kao i s aspekta pH-vrijednosti, došlo se do zaključka da je optimalna količina dodatka za tretirano tlo 5 % u slučaju primjene vapna, magnezijeva karbonata i vodenog stakla, odnosno 7 % u slučaju upotrebe kalijeva hidroksida.
- Slično trendu zabilježenom s aspekta tlačne čvrstoće, najbolji rezultati u smislu povećanja vrijednosti modula stišljivosti postižu se dodatkom vapna i magnezijeva karbonata, premda su i ostali razmatrani dodaci pridonijeli smanjenju stišljivosti tretiranog tla u odnosu na prirodni materijal, doduše u nešto manjoj mjeri.
- Za sve korištene dodatke, koeficijent pora tla u početnom periodu nakon tretmana ostaje nepromijenjen ili se neznatno povećava, što se može objasniti kao posljedica formiranja spojeva koji su sami po sebi porozni. Tijekom vremena, međutim, koeficijent pora se smanjuje, bez obzira na vrstu dodatka koji je korišten.
- Svaki od razmatranih dodataka pridonosi povećanju vrijednosti CBR na 5 % i više, što je u građevinskoj praksi jedan od najčešćih zahtjeva koje tlo mora zadovoljiti.

Najveće poboljšanje može se uočiti u slučaju stabilizacije vapnom, značajno poboljšanje može se postići i dodatkom magnezijeva karbonata, dok se dodatkom vodenog stakla, odnosno kalijeva hidroksida, postižu najniže vrijednosti CBR.

- Svaki od razmatranih dodataka značajno pridonosi smanjenju bubrenja tla, i to oko deset puta.

Dobiveni rezultati prikazani u ovom radu potvrdili su da se poboljšanje svojstava glinovitog tla može uspješno postići primjenom tradicionalnih dodataka (vapna), ali i novih, alternativnih dodataka, posebno magnezijeva karbonata. Razmatrani dodaci prirodnom glinovitom materijalu omogućili su njegovu primjenu u različite praktične svrhe u domeni građevinarstva.

Treba napomenuti da se rezultati predstavljeni u ovom radu odnose na lokalni materijal. Zbog toga postoji potreba za sveobuhvatnijim daljnjim istraživanjima, koja će analizirati uzorke tla sa širega područja, jer će veći broj ispitivanja na većoj raznovrsnosti glinovitih tala dati pouzdanije zaključke.

Zahvala

Autori rada zahvaljuju na podršci Fonda za nauku Republike Srbije u okviru znanstveno – istraživačkog projekta "A New Concept in Improvement of Geotechnical Properties of Ground – Chemical Electrokinetic Treatment of Soils (ElectroSoil)", Grant No. 7742530.

LITERATURA

- [1] Saeid, A., Amin, C., Hamid N.: A review on the lime and fly ash application in soil stabilization, *International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences (IJBEES)*, 1 (2012) 3, pp. 124-126.
- [2] Diamond, S., Kinter, E.B.: Mechanisms of soil-lime stabilization, *Highway research record*, 92 (1965) 303, pp. 83-102.
- [3] Leroueil, S., Vaughan, P.R.: The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks, *Géotechnique*, 40 (1990) 3, pp. 467-488.
- [4] Karakan, E.: Influence of clay mineralogy on undrained shear strength using Fall cone test, *Građevinar*, 75 (2023) 7, pp. 642-652, <https://doi.org/10.14256/JCE.3558.2022>
- [5] Bell, F.: Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geol.*, 42 (1996) 4, pp. 223-237.
- [6] Sherwood, P.: Soil stabilization with cement and lime, *State of the Art Review*, Transport Research Laboratory, London, HMSO, 1993, <http://worldcat.org/isbn/9780115511714>
- [7] Ferguson, G.: Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36, pp. 1-14, 1993.
- [8] Vukićević, M., Pujević, V., Marjanović, M., Jocković, S., Maroš-Dragojević, S.: Stabilizacija sitnozrnatog tla letećim pepelom, *Građevinar*, 67 (2015) 8, pp. 761-770, <https://doi.org/10.14256/JCE.1281.2014>
- [9] Zafirovski, Z., Markovski, M., Ognjenovic, S., Gacevski, V., Nedevska, I., Ristov, R.: Subbase stabilization with fly ash. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, (2023), online first, <https://doi.org/10.2298/FUACE230630033Z>
- [10] Onyelowe, K.C., Okafor, F.O.: A comparative review of soil modification methods, *ARPN Journal of Earth Sciences*, 1 (2012) 2, pp. 36-42.
- [11] Al-Swaidani, A., Hammoud, I., Meziab, A.: Effect of Adding Natural Pozzolana on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Clayey Soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (2016) 5, pp. 14-25, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>
- [12] Thomas, A., Tripathi, R.K., Yadu, L.K.: A laboratory investigation of soil stabilization using enzyme and alkali-activated ground granulated blast-furnace slag, *Arabian Journal Sciences Engineering*, 43 (2018) 10, pp. 5193-5202, <https://doi.org/10.1007/s13369-017-3033-x>.
- [13] Lebo, Ž., Bačić, M., Jurić Kačunić, D., Kovačević, M.S.: Zagreb clay improved with various binders, *Građevinar*, 73 (2021) 9, pp.871-880, <https://doi.org/10.14256/JCE.3300.2021>
- [14] Afrasiabian, A., Salimi, M. Movahedrad, M., Vakili, A.H.: Assessing the impact of GBFS on mechanical behaviour and microstructure of soft clay, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (2019) 3, pp 327-337, <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1565393>.
- [15] Zahri, A.M., Zainorabidin, A.: An overview of traditional and non traditional stabilizer for soft soil, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 527 (2019) 012015.
- [16] Liska, M., Al-Tabbaa, A.: Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 162 (2009) 4, pp.185-196, <https://doi.org/10.1680/warm.2009.162.4.185>.
- [17] Pourakbar, S., Huat, B.K.: A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11 (2016) 2, pp.206-216, <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>
- [18] Santoni, R., Tingle, J., Webster, S.: Stabilization of Silty Sand with Nontraditional Additives, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1787 (2002) 1, pp. 61-70, <https://doi.org/10.3141/1787-07>
- [19] Shon, C.S., Saylak, D., Mishra, S.K.: Combined Use of Calcium Chloride and Fly Ash in Road Base Stabilization, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2186 (2010) 1, pp. 120-129, <https://doi.org/10.3141/2186-13>
- [20] Marto, A., Latifi, N., Eisazadeh, A.: Effect of non-traditional additives on engineering and microstructural characteristics of laterite soil, *Arabian Journal Sciences Engineering*, 39 (2014) 10, pp. 6949-6958, <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1286-1>
- [21] Moayedi, H., Huat, B.B., Kazemian, S., Daneshmand, S.: Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout, *International Journal of Physical Sciences*, 7 (2012) 9, pp. 1395-1402, <https://doi.org/10.5897/ijps11.1509>
- [22] James, J., Kasinatha, P.: Effect of phosphogypsum on strength of lime stabilized expansive soil, *Građevinar*, 66 (2015) 12, pp. 1109-1116, <https://doi.org/10.14256/JCE.1097.2014>

- [23] Latifi, N., Marto, A., Eisazadeh, A.: Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilized with non-traditional additive, *Acta Geotechnica*, 11 (2016) 2, pp. 433-443, <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0370-3>
- [24] Mousavi, S.E., Karamvand, A.: Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4 (2017) 4, pp. 412-421, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.02.002>
- [25] Jeremiah, J.J., Abbey, S. J.: Booth, C.A., Kashyap, A.: Geopolymers as Alternative Sustainable Binders for Stabilisation of Clays – A Review, *Geotechnics*, 1 (2021) 2, pp. 439-459. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1020021>
- [26] Basma, A., Tuncer, E.R.: Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. *Transportation Research Record*, 1295 (1991), pp.52-61.
- [27] Kavak, A., Akyarli, A.: A field application for lime stabilization, *Environmental Geology*, 51 (2007) 6, pp. 987-997, <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0368-0>.
- [28] Babu, N., Poulouse, E.: Effect of lime on soil properties: A review, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5 (2018) 5, pp. 606-610.
- [29] Das, B.M.: Principles of foundation engineering, Cengage learning, Boston, USA, 2015.
- [30] Han, J.: Principles and practice of ground improvement, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2015.
- [31] Taha Jawad, I., Raihan Taha, M., Hameed Majeed, Z.A., Khan, T.: Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8 (2014) 4, pp. 510-520, <https://doi.org/10.19026/rjaset.8.1000>
- [32] Seco, A., Miqueleiz, L., Prieto, E., Marcelino, S., García, B., Urmeneta, P.: Sulfate soils stabilization with magnesium-based binders, *Applied Clay Science*, 135 (2016), pp. 457-464, <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.033>
- [33] Gu, K., Jin, F., Al-Tabbaa, A., Shi, B., Liu, J.: Mechanical and hydration properties of ground granulated blastfurnace slag pastes activated with MgO–CaO mixtures, *Construction and Building Materials*, 69 (2014), pp. 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07>
- [34] Hurley, C.H., Thornburn T.H.: Sodium silicate stabilization of soils: A review of the literature, *Compaction and stabilization*, University of Illinois, pp. 46-79, 1972, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1972/381/381-007.pdf>
- [35] Maaaitah, O.N.: Soil stabilization by chemical agent, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (2012), pp. 1345-1356, <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9549-7>
- [36] Elkhebu, A.G., Zainorabidin, A., Bujang, H.B., Bakar, I.H., Abdeljouad, L.A., Dheyab, W.: Alkaline activation of clayey soil using potassium hydroxide & fly ash, *International Journal of Integrated Engineering*, 10 (2018) 9, pp. 84-89, <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.09.016>
- [37] Yi, Y., Liska, M., Unluer, C., Al-Tabbaa, A.: Carbonating magnesia for soil stabilization, *Canadian Geotechnical Journal*, 50 (2013) 8, pp. 899-905, <http://doi.org/10.1139/cgj-2012-0364>
- [38] Vakili, M.V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., Keramatikerman, M.: Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag, *Applied Clay Science*, 124 (2016), pp. 243-251, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- [39] Pourebrahim, F., Sayyed Y.Z.: Stabilizers effects comprehensive assessment on the physical and chemical properties of soft clays, *Shock and Vibration* 2022 (2022), 5991132, <https://doi.org/10.1155/2022/5991132>
- [40] ISS - Institute for Standardization of Serbia, SRPS EN 13286-41:2022 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures, 2022.
- [41] ISS - Institute for Standardization of Serbia, SRPS EN ISO 14688-2:2018 Geotechnical investigation and testing - Identification and classification of soil - Part 2: Principles for a classification, 2018.
- [42] ISS - Institute for Standardization of Serbia, SRPS EN ISO 17892-5:2017 Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 5: Incremental loading oedometer test, 2017.
- [43] ISS - Institute for Standardization of Serbia, SRPS EN 13286-47:2022 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling, 2022.
- [44] Tanzadeh, R., Vafaeian, M., Fard, M.Y.: The influence of lime powder on the behaviour of clay soil, *Građevinar*, 73 (2021) 9, pp. 907-915, <https://doi.org/10.14256/JCE.1871.2016>
- [45] Eades, J.L., Grim, R.E.: A quick test to determine lime requirements for lime stabilization, *Behavior Characteristics of Lime-soil Mixtures*, Highway Research Board, pp. 61-72, 1966, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1966/139/139-005.pdf>
- [46] Khattab, S.A.A., Al-Mukhtar, M., Fleureau, J.M.: Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007) 4, pp. 358-366, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:4\(358\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:4(358))
- [47] Firoozi, A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A., Baghini, M.S.: Fundamentals of soil stabilization, *International Journal of Geo-Engineering*, 8 (2017) 1, pp. 1-16, <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- [48] Eyo, E.U., Ng'ambi, S., Abbey, S.J.: An overview of soil-water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 34 (2020) 1, pp. 31-45, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.013>