

Primljen / Received: 13.9.2016.

Ispravljen / Corrected: 19.11.2016.

Prihvaćen / Accepted: 11.1.2017.

Dostupno online / Available online: 10.10.2021.

# Utjecaj vapnene prašine na ponašanje glinovitog tla

## Autori:

**Reza Tanzadeh**, dipl.ing.građ.

Islamsko sveučilište Azad, Isfahan, Iran

Odjel za građevinarstvo

[rezapaper1983@gmail.com](mailto:rezapaper1983@gmail.com)

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Mahmood Vafaeian**, dipl.ing.građ.

Sveučilište za tehničke znanosti Isfahan, Iran

Građevinski fakultet

[mahmood@cc.iut.ac.ir](mailto:mahmood@cc.iut.ac.ir)Doc.dr.sc. **Mikael Yusefzadeh Fard**, dipl.ing.građ.

Islamsko sveučilište Azady, Tabriz, Iran

Odjel za građevinarstvo

[mikael@ymail.com](mailto:mikael@ymail.com)

Prethodno priopćenje

**Reza Tanzadeh, Mahmood Vafaeian, Mikael Yusefzadeh Fard**

## Utjecaj vapnene prašine na ponašanje glinovitog tla

Visoka cijena zemljišta i značenje graditeljstva u modernom svijetu uvjetovali su potrebu za ojačanjem glinovitog tla slabe nosivosti. Stabilizacija takvog tla provodi se dodavanjem raznih aditiva. Zbog svoje niske cijene, dostupnosti i pozitivnog utjecaja na čvrstoću, vapno se tradicionalno koristi za stabilizaciju slabo nosivih i osjetljivih vrsta tla. U ovom se radu vapnena prašina u udjelu od 0, 2, 4, 8 i 16 % od težine suhog tla miješa s kaolinitnim glinovitim tлом te se istražuju razni inženjerski parametri u razdoblju njege tijekom 90 dana. U tom razdoblju njege, za razne postotke vapnene prašine istražuje se promjena pH-vrijednosti, Atterbergove granice, optimalan udio vode i maksimalna suha jedinična težina modificirane gline. U okviru određivanja optimalnog udjela vapnene prašine, provode se ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće (UCS) te kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR). Youngov modul određuje se na temelju pokusa UCS i definicije krivulje naprezanja i deformacija. Rezultati pokazuju znatan porast efektivne učinkovitosti vapna dodanog u tlo te znatan porast maksimalne tlačne čvrstoće ( $q_u$ ), kohezije i Youngovog modula.

### Ključne riječi:

glinovito tlo, vapnena prašina, optimalni postotak, vrijeme njege, parametri čvrstoće tla

Research Paper

**Reza Tanzadeh, Mahmood Vafaeian, Mikael Yusefzadeh Fard**

## The influence of lime powder on the behaviour of clay soil

High price of land and importance of modern construction has imposed the need to strengthen weak clay soils. The stabilization of these soils has been conducted using various additives. Due to its low cost, availability, and positive impact on resistance, lime has traditionally been applied for stabilisation of poor and sensitive types of soils. In this research, lime powder, added in the percentages of 0, 2, 4, 8 and 16 of the dry soil weight, was mixed with kaolinite clay soil and its various engineering parameters were investigated during the curing time of 90 days. PH change, Atterberg Limits, optimum water content, and the modified clay maximum dry unit weight, were determined at different percentages of lime during the curing time. In the scope of determination of an optimum lime powder content, the Unconfined Compressive Strength tests (UCS) and CBR tests were conducted. The Young's modulus was determined based on UCS testing and definition of stress-strain curve. The results showed a significant increase in the effective, responsive performance of lime in the soil and a remarkable increase in the maximum compressive strength ( $q_u$ ), cohesion, and Young's modulus.

### Key words:

clay soil, lime powder, optimum percentage, curing time, soil strength parameters

## 1. Uvod

U inženjerstvu se tlo definira kao nepovezana mješavina mineralnih i raspadnutih organskih materijala, a u prostoru između zrna tla nalazi se voda i zrak. Kao građevini materijal tlo se u građevinarstvu koristi na brojnim projektima a isto tako i za temeljenje većine građevina.

Iz tog razloga građevinski inženjeri trebaju analizirati svojstva tla kao što su porijeklo tla, granulometrija, mogućnost dreniranja, posmična čvrstoća i ostali faktori poput slijeganja, nosivosti itd. Sitnozrnato glinovito tlo je ekspanzivno tlo u kojem dolazi do znatnih promjena u obujmu pod utjecajem vlažnosti. To se tlo sastoji od minerala kaolinita, montmorilonita i illita. Do sada su učinjeni značajni naponi kako bi se svladala negativna svojstva takvih tala. Neki od postupaka koji se u tom smislu analiziraju i provode su zamjena s neosjetljivim tлом kako bi se održala vlažnost, zatim zbijenost, stabilizacija pomoću raznih dodataka itd. Stabilizacija tla provodi se dodavanjem raznih dodataka kao što su cement, leteći pepeo, vapno, bagasa, rižine ljuske, kokosova vlakna, polipropilenska vlakna, vlakna od recikliranog tekstila i razni otpadni materijali. Stabilizacija vapnom primjer je kemijske metode za modifikaciju fizikalnih i kemijskih svojstava tla. Stabilizacija relativno sitnozrnatih vrsta tla vapnom ovisna je o reakciji između vapna i gline. S makroskopskog stajališta, stabilizacijom tla pomoću vapna:

- poboljšavaju se karakteristike u pogledu učinkovitosti zbijanja
- smanjuje se stišljivost i osjetljivost na promjenu količine vode
- povećava se čvrstoća i krutost tla.

U ovom se istraživanju kaolinitnom glinovitom tlu dodaje 2, 4, 8 i 16 % vapnene prašine. Pri ravnomjernoj raspodjeli vapna u tlu provedena su ispitivanja vrijednosti pH i Atterbergovih granica i to u vremenu njege počevši od prvog pa do devedeset dana. Optimalan postotak vapna definiran je na osnovi granice plastičnosti. Na uzorcima s optimalnim udjelom vapnene prašine proveden je pokus CBR i pokus jednoosne tlačne čvrstoće nakon čega je registriran pozitivan utjecaj vapna u pogledu povećanja maksimalne jednoosne tlačne čvrstoće ( $q_u$ ) i kohezije glinovitog tla.

## 2. Prethodna istraživanja stabiliziranja tla pomoću vapna

Bell [1] je ustanovio da se količina vode u tlu bitno smanjuje kada se u tlo doda vapno. Smanjenje sadržaja vode izraženije je ako se u tlo umjesto hidratiziranog vapna dodaje živo vapno. Pri samom miješanju vapna s tлом te u sljedeća 24 sata, u mješavini se odvijaju dvije fizikalno-kemijske reakcije:

- živo vapno pretvara se u hidratizirano vapno zbog apsorpcije vode u tlu,
- voda isparava iz tla u sklopu egzotermne reakcije.

Rogers i dr. [2] pokazali su da nakon smanjenja količine vode dolazi do smanjenja plastičnosti tla modificiranog vapnom zbog mijenjanja fizikalnih karakteristika prirodnog tla, i to tri do četiri dana nakon dodavanja vapna. U usporedbi s prirodnim tлом, tlo modificirano vapnom manje je osjetljivo na bujanje i skupljanje. Boardman i dr. [3] i Parsons i dr. [4] istraživali su razvoj stabilizacije i skrućivanja mješavina vapna i gline. Do te pojave vjerojatno dolazi zbog smanjenja debljine sloja vode apsorbirane u glinovito tlo. Stabilizacija tla vapnom odvija se kroz određeno vrijeme, tj. tu se ne radi o trenutačnoj pojavi. Još uvijek ne postoji potpuno razumjevanje prirode i vremena razvoja ovih efekata, pa su u tom smislu potrebna dodatna istraživanja.

U mnogim studijama o utjecaju stabilizacije vapnom naglasak se stavlja na dugoročnu posmičnu čvrstoću sitnozrnatog tla. Beverley i dr. [5] smatraju da cement ili vapno umanjuju mobilnost metal – tlo kroz procjeđivanje, adsorpciju, pucolanske reakcije i cementiranje.

Marshall Thompson [6] analizirao je utjecaj stabilizacije vapnom na posmičnu čvrstoću i elastičnost za tri vrste ilitnog tla i jednu vrstu montmorilonitnog tla. Uz to, on je proveo i niz troosnih ispitivanja pri malim tlakovima tla stabiliziranog vapnom koje je dodavano u raznim postocima za vrijeme njege do šest dana. On je ustanovio značajan porast posmične čvrstoće tla zbog porasta kohezije tla. Poboľšanja posmične čvrstoće i krutosti registrirana su nekoliko tjedana nakon dodavanja vapna, pa se stoga vrijeme smatra značajnim parametrom u analizi vapnom stabiliziranog tla.

Postupak stabilizacije vapnom često se primjenjuje zato što omogućuje poboljšanje fizikalnih i mehaničkih svojstava tla, ali se ipak prije svega koristi za poboljšanje karakteristika sitnozrnatog tla. Stabilizacijom tla na bazi vapna postižu se znatna poboljšanja svih parametara čvrstoće, a utvrđeno je da se ti utjecaji povećavaju s povećanjem vremena njege [7-10].

Blood i dr. [11] istraživali su postupak propadanja uslijed smrzavanja i odmrzavanja i u tu su svrhu proveli dva postupka ispitivanja (otvoreni sustav s uzimanjem vode tijekom odmrzavanja te zatvoreni sustav u kojem se koristi samo početna količina vode) kako bi ispitali čvrstoću, plinopropusnost, mineraloška i mikro-strukturna svojstva tla s gipsom koje je tretirano vapnom. Dobiveni rezultati pokazali su da ispitane karakteristike uzoraka tla bitno ovise o vodi dostupnoj tijekom postupka smrzavanja i odmrzavanja te o količini gipsa. Količina vode u uzorcima tla ključan je parametar za postizanje stabilnosti zemljanih građevina u uvjetima smrzavanja-odmrzavanja.

Utjecaj stabilizacije tla vapnom u velikoj mjeri ovisi o indeksu plastičnosti i reaktivnosti tla. Vrsta i količina glinenih čestica utječu na stabilnost prirodnog tla i na dodavanje vapna. Određivanjem Atterbergovih granica dobivaju se potrebne informacije o količini vode (vlažnosti) u glinovitoj i prašinstom tlu. Međutim, u tlu stabiliziranom vapnom, bez obzira na povećanje ili smanjenje granice tečenja, uvijek dolazi do bitnog smanjenja indeksa plastičnosti (PI). U prvim satima nakon što se u tlo doda vapno, uočavaju se značajne promjene u raspodjeli veličine zrna a ta se tendencija bilježi sve do flokulacije [12-15].

Liu i dr. [13] proveli su dinamička troosna ispitivanja na tlu modificiranom cementom i vapnom pri čemu su korišteni različiti udjeli pojedinih komponenata u mješavini. Dobiveni su rezultati pokazali da se nakon ponovljenih ciklusa smrzavanja i odmrzavanja modificirana tla bolje ponašaju nego prije modifikacije, pri čemu su za glinu modificiranu cementom zabilježeni bolji rezultati u odnosu na glinu modificiranu vapnom, a utvrđeno je i vidljivo poboljšanje svih mehaničkih svojstava tla. Osim toga, definirani su i optimalni omjeri u mješavini. Uveden je i koeficijent smanjenja kritičnog devijatorskog naprezanja,  $\eta_f$ , kako bi se odredio optimalan postupak modifikacije te definirali odgovarajući omjeri u mješavini pogodni za uvjete izloženosti smrzavanju i odmrzavanju.

Vrlo je vidljiv utjecaj vremena njege na granulometrijski sastav. Nakon reakcije, dodavanje vapna dovelo je do brzog smanjenja čestica gline. Postupak je zaustavljen kroz duže razdoblje te je kao rezultat tlo postalo heterogenije. Parametri gustoće mijenjali su se zbog stabilizacije tla vapnom. Za zadani udio vode, suha jedinična težina tla modificiranog vapnom uvijek je bila niža u odnosu na prirodno tlo. Istovremeno, maksimalna suha jedinična težina tla modificiranog vapnom potrebna je kako bi se povećao udio vode za zbijenost. Međutim, opći oblik njihove krivulje zbijanja bio je gotovo identičan [15].

Bozbi i dr. [16] ispitivali su utjecaj različitih udjela vapna u glinovitom tlu u razdoblju njege od sedam do pedeset i šest dana. U svrhu stabilizacije vapno je dodavano u udjelima od četiri, šest i devet posto u odnosu na suho tlo. Pozitivniji utjecaji na jednoosnu tlačnu čvrstoću i početni modul elastičnosti zabilježeni su kod sitnozrnatog tla modificiranog vapnom kada su uspoređeni s rezultatima za krupnozrnato tlo.

Consoli i dr. [17] pokušali su kvantificirati utjecaj vremena njege, udio vapna, suhe jedinične težine i udio vode na čvrstoću vapnom tretirane pjeskovite gline, te ocijeniti mogućnost primjene odnosa poroznosti / vapna u ocjenjivanju jednoosne tlačne čvrstoće. Rezultati su pokazali da tlačna čvrstoća raste s porastom udjela vapna, sa smanjenjem poroznosti te s povećanjem vremena njege.

Garzon i dr. [18] prikazali su novi napredak u proučavanju inženjerskih svojstava i primjeni filita kao materijala. Oni su istražili mogućnosti stabilizacije i poboljšanja inženjerskih svojstava španjolskog filita pri težinskim udjelima vapna od 3, 5 i 7 %.

Ciancio i dr. [19] prikazali eksperimentalne rezultate ilustrirajući postojanje optimalnog udjela vapna pri kojem se maksimalno povećava jednoosna tlačna čvrstoća i krutost zbijanog tla stabiliziranog vapnom, kao i primijenjene eksperimentalne postupke.

Khemissa i dr. [20] uputili su na podudarnost geotehničkih parametara i potvrdili poboljšanje nosivosti prirodne gline koja se očitovala kroz znatno povećanje čvrstoće i trajnosti tla. Međutim, najbolji rezultati dobiveni su kod mješovitog poboljšanja s 8 % cementa i 4 % vapna.

### 3. Plan laboratorijskog ispitivanja

#### 3.1. Metodologija istraživanja

Ovo je istraživanje provedeno kako bi se ocijenio utjecaj vapnene prašine na ponašanje i otpornost glinovitog tla, tj. vrste kaolinitne gline kojoj su dodavani različiti postoci stabiliziranog vapna. Prvi izazov u određivanju mješavine bilo je precizno miješanje i pravilno raspoređivanje tih aditiva u tlu. Neodgovarajuća raspodjela tih dodataka proizlazi iz akumuliranja i nedjelotvornosti dodataka. Prema provedenim istraživanjima, za raspršivanje vapna u tlu primjenjuje se metoda kugličnog mlina. Taj je mlin obično cilindričnog oblika a u njega se stavljaju čelične ili keramičke kuglice zadane veličine. Prema toj metodi, suha mješavina tla i vapna unosi se u mlin i u njemu ostaje pola sata. Kao materijal za drobljenje koristi se 65 keramičkih kuglica prosječnog promjera 1,5 cm. Kako je vrijeme reakcije tla s vapnom pojava ovisna o vremenu, na uzorcima se provodi ispitivanje čvrstoće u različitim intervalima tijekom ispitivanja.

#### 3.2. Potrošni materijal

##### 3.2.1. Glinovito tlo

U ovom je istraživanju kao glinoviti materijal korišten komercijalno proizvedeni kaolinit. Ova je glina sušena u sušioniku 24 sata na temperaturi od 100 °C sve do potpunog sušenja. Kako bi se eliminirale grudice koje nastaju zbog izlaganja vlazi, glina je raspoređena na ravnom stolu te su zatim grudice usitnjene pomoću teškog čeličnog valjka. Dobivena glina prosijana je kroz sito standardne veličine 200. Kemijska i fizikalna svojstva glinovitog tla korištenog u ovom istraživanju prikazana su u tablici 1a i 1b.

Tablica 1a. Fizikalno-kemijske karakteristike kaolinita korištenog u ovom istraživanju

Kaolinit	
Kemijski spojevi	
SiO <sub>2</sub>	47 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,3 %
Alkali (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)	0,8 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 %
TiO <sub>2</sub>	-
CaO	-
MgO	-
Hlapljive tvari	13,4 %
pH	5,1
Ekvivalentna transmisija iona vodika u mg na 100 g suhog tla (Meq/100 g)	2-16

Tablica 1b. Fizikalno-kemijske karakteristike kaolinita korištenog u ovom istraživanju

Fizikalni sastav	
0,002-0,06 mm (veličina čestica)	6 %
< 0,002 mm (veličina čestica)	94 %
$G_s$	2,57
Granica tečenja	75
Granica plastičnosti	42
Indeks plastičnosti	33
Aktivnost	0,35
Jednoosna tlačna čvrstoća [kPa], optimalni udio vode	350
Modul elastičnosti [kg/cm <sup>2</sup> ]	35
Optimalni udio vode [%]	29,5
Maksimalna suha jedinična težina [g/cm <sup>3</sup> ]	1,40
CBR	1

### 3.2.2. Vapnena prašina

Vapno nije prikladno kao sredstvo za stabilizaciju tla koje sadrži više od dva posto organskih tvari te više od pola posto sulfata topivih u vodi. Vapno koje se koristi u ovom istraživanju ima jediničnu težinu od 2,2 grama po kubnom centimetru. Veličina čestice vapna varira od 0,002 do 0,2 mm, a vapno se topi na temperaturi od 2650°C. Kemijska analiza hidratiziranog vapnenog praška prikazana je na slikama 1. i 2.



Slika 1. Hidratizirani vapneni prašak

## 3.3. Provedeni eksperimenti

### 3.3.1. pH-vrijednost

Vrijednost pH označava kiselost ili alkalnost. Ta vrijednost predstavlja odgovor na pitanje je li tlo kiselo, ili alkalno, ili neutralno. Vrijednost pH tla jedna je od vrlo značajnih fizioloških karakteristika tla koja znatno utječe na njegova fizikalna,

Tablica 2. Kemijska analiza hidratiziranog vapnenog praška

Kemijska analiza	Hidratizirani vapneni prašak [%]
Kalcijev oksid	74,80
Magnezijev oksid	0,45
Borov oksid	0,55
Silicijev dioksid	0,30
Sumporni trioksid	0,25
Gubitak žarenjem	23,4

kemijska i biološka svojstva. Vrijednost pH varira u rasponu od 0 do 14. Tako vrijednost pH koja iznosi 7 označava neutralnost, viša vrijednost pH označava alkalnost, a niža vrijednost pH označava kiselost. Kako bi se izmjerila pH-vrijednost tla potrebno je poduzeti sljedeće korake:

- izvažite 20 grama uzorka tla u laboratorijskoj čaši od 100 ml,
- dodajte 50 ml destilirane vode,
- miješajte lagano i naizmjenično 30 minuta (u intervalima od 10 minuta),
- mjeracem kiselosti (pH metrom) izmjerite vrijednost pH tla.

### 3.3.2. Atterbegove granice

Ovo ispitivanje bazirano na normi ASTM D4318 provodi se na uzorcima tla od kaolinolite gline te na uzorcima koji su modificirani dodavanjem različitih postotaka vapna. Ispitivanja granice tečenja i granice plastičnosti provode se za glinu s visokom granicom tečenja (CH) s vapnom i bez njega. Uzorci se izrađuju tako da se osušena glina (sušena u sušioniku 24 sata) najprije špatulom pomiješa s određenom količinom vapna (2, 4, 8 i 16 posto vapnene prašine). Dobivena mješavina stavlja se u kuglični mlin. Ovisno o postotku vapna miješanje traje od pola sata do sat vremena. Mješavini se dodaje nešto destilirane vode prema normi ASTM D4318 kako bi se odredila granica tečenja i granica plastičnosti. Ovisno o vremenu reakcije između vapna i tla, uzorci za ispitivanje nakon 3, 7, 28 i 90 dana pohranjuju se u zabrtvljenu plastičnu posudu te se čuvaju u vlažnoj komori pri temperaturi od 23 do 25°C.

### 3.3.3. Ispitivanje zbijenosti

Zbijanjem se smanjuje obujam tla prisilnim istiskivanjem zraka. U ovom slučaju, trenje između čestica i njihova težina raste, a ta (povećana) težina ustvari označava zbijenost tla. U ovom istraživanju, zbijenost je ispitana prema normi ASTM D 698-78 kako bi se odredio optimalni udio vode te maksimalna suha jedinična težina tla modificiranog dodavanjem različitih postotaka vapna. Pripremni pokusi zbijenosti, kao što su Atterbergove granice, provedeni su s većim dimenzijama.

### 3.3.4. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće (UCS)

Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće provodi se kako bi se brzo odredila približna nedrenirana tlačna čvrstoća koherentnog tla koje ima dovoljno kohezije za provođenje jednoosnog ispitivanja. U pokusu UCS opterećenje se nanosi po jedinici površine, pri čemu do popuštanja valjkastog uzorka dolazi u tlaku. Posmična čvrstoća jednaka je polovici vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće. Ovaj pokus može se nazvati troosnim pokusom, pri čemu je bočni pritisak jednak nuli, a provodi se prema normi ASTM D2166.

Ustvari, posmična čvrstoća koherentnog tla uvjetovana je s dvije vrste otpora, a to su otpor trenja i otpor od kohezije. U ovom je istraživanju provedeno ispitivanje s kontroliranim prirastom deformacije jer je jednostavnije od ispitivanja s kontroliranim prirastom naprezanja. U ovom ispitivanju deformacije su iznosile 0.5 do 2 posto u minuti. Uzorci korišteni u ovom ispitivanju pripremljeni su od prirodne gline i od gline modificirane vapnom. Kako bi se postigla maksimalna čvrstoća, pri pripremanju uzoraka u obzir je uzet izračunani optimalni udio vode iz pokusa zbijanja. Dakle, proračuni su bazirani na osnovi deformaciji i naprezanju, a maksimalna vrijednost naprezanja dobivena je iz krivulje naprezanja i deformacije.

### 3.3.5. CBR

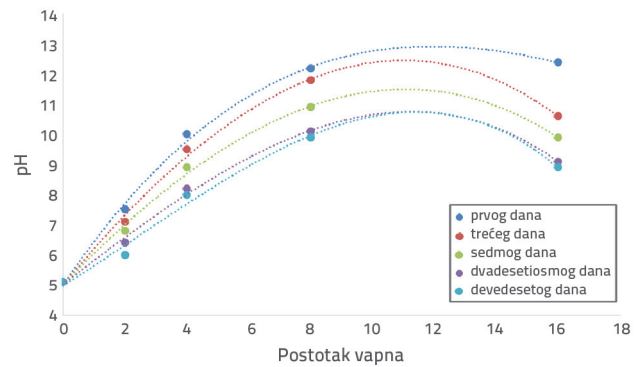
Ovo je ispitivanje najčešća metoda za određivanje relativne otpornosti tla u cestogradnji. Pomoću ovog pokusa može se odrediti nosivost tla i svih kolničkih slojeva, kao što je temeljno tlo i posteljica, a na temelju dobivenih rezultata može se odrediti i debljina tih slojeva. Ispitivanje se provodi prema normi ASTM D1883-87 za glinovito tlo modificirano vapnom. U ovom se ispitivanju uzorci tretiraju na sljedeći način:

- glinovito tlo i vapno suše se u sušioniku 24 sata
- glinovito tlo i vapno miješaju se u raznim omjerima
- mješavini se dodaje destilirana voda
- kako bi se odredilo dugoročno djelovanje vapna na tlo, uzorci se spremaju u zabrtvljene plastične posude u kojima se čuvaju pri okolnoj temperaturi
- u odgovarajućim intervalima provodi se ispitivanje zbijenosti kako bi se odredio optimalan udio vode
- odgovarajuće mješavine tla i vapna miješaju se s vodom, a pritom se određuje optimalan udio vode za pokus zbijenosti prema pokusu CBR.

## 4. Rezultati i rasprava

### 4.1. Određivanje pH-vrijednosti

Vrijednost pH tla raste usporedo s dodavanjem vapna. Ova alkalna okolina pospješuje topivost silicijskih i aluminijskih komponenata koje se formiraju kao odziv na kalcij, kalcijev silikat i aluminat. Ti rezultirajući spojevi vrlo su slični spojevima koje nalazimo u betonu s portlandskim cementom.

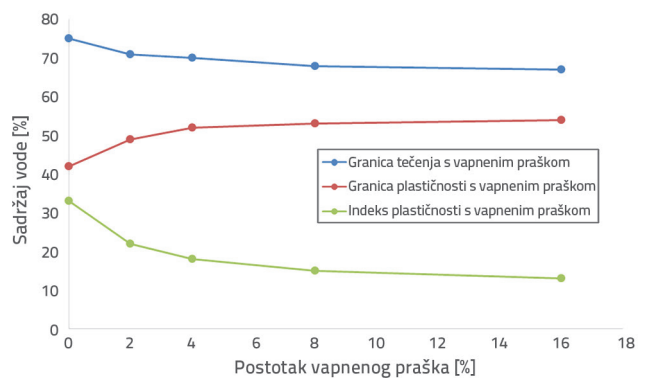


Slika 2. Promjene vrijednosti pH u vremenu njege gline s raznim postocima vapnenog praška

Kao što se može vidjeti na slici 2., dodavanjem vapna brzo se povećava vrijednost pH tla. Te su promjene povećale maksimum na 12,4. Nakon nekoliko dana, vrijednost Ph tla se poboljšala s manje promjena, a tome je razlog oblikovanje stabilnih spojeva nakon završetka reakcije vapna u tlu.

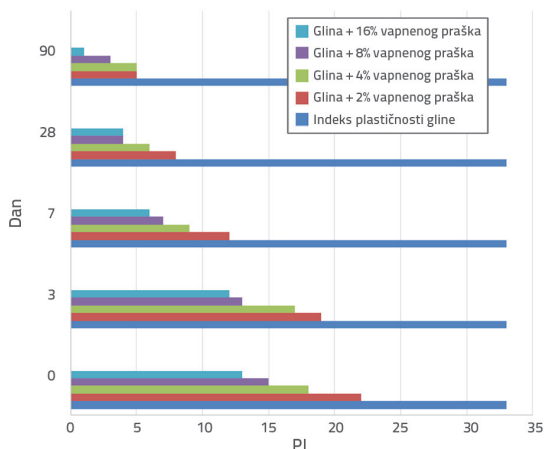
### 4.2. Ispitivanje Atterbergovih granica

Utjecaj stabilizacije tla vapnom u velikoj mjeri ovisi o indeksu plastičnosti i reaktivnosti tla. Atterbergovim granicama dobivaju se potrebne informacije o granicama koje su povezane s udjelom vode (vlagom) u glini i prahu. U ovom se istraživanju proučava utjecaj različitih postotaka vapna bazirano na ispitivanju granice tečenja i granice plastičnosti kaolinitnog glinovitog tla. Promjene Atterbergovih granica prikazane su na slici 3.



Slika 3. Atterbergove granice definirane prvog dana za glinu s različitim postocima vapna

Granica tečenja smanjuje se usporedno s dodavanjem vapna tlu. Međutim, bez obzira na takvo povećanje ili smanjenje granice tečenja, ipak dolazi do bitnog smanjenja indeksa plastičnosti (PI). Dodavanjem vapna tlu naglo se smanjuje indeks plastičnosti tla. U tom slučaju, granica plastičnosti (PL) raste usporedno s količinom dodanog vapna. Taj se trend nastavlja sve to dopuštene granice dodavanja vapna. Nakon toga, dodavanje dodatnih količina vapna bitno ne utječe na povećanje granice plastičnosti a, osim toga, to ne bi bilo ni ekonomično.



Slika 4. Promjena indeksa plastičnosti gline u razdoblju njege za različite postotke vapnenog praška

Taj granični iznos je točka fiksiranja vapna (LFP). Promjene indeksa plastičnosti (PI) zabilježene tijekom vremena njege

prikazane su na slici 4. Nakon prestanka reakcije između vapna i glinovitog tla, te nakon stabilizacije tla, može se uočiti smanjenje indeksa plastičnosti.

### 4.3. Pokus zbijanja

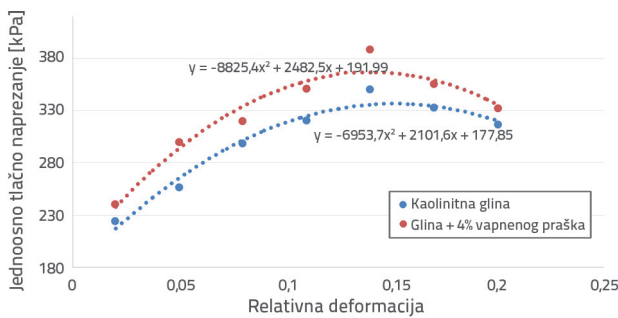
Parametri zbijenosti mijenjaju se uslijed stabilizacije vapnom. Za određenu količinu vode, maksimalna suha jedinična težina tla modificiranog vapnom niža je od odgovarajuće težine prirodnog tla. Istodobno, prema tablici 3., za maksimalnu suhu jediničnu težinu tla modificiranog vapnom potrebna je veća količina vode za postizanje zbijenosti. U ovom istraživanju, ispitivanje zbijenosti provedeno je na svim modificiranim uzorcima. Činjenica je da vapno dodano tlu ne mijena standardni oblik krivulje zbijenosti sitnozrnatog tla. Ustvari, optimalna količina vode tla stabiliziranog vapnom uvijek je veća od takve količina prvobitnog tla. Mijenjanjem veličine čestica gline kako bi se dobile otpornije veće čestice dolazi do porasta maksimalne suhe jedinične težine modificiranog tla nakon nekoliko dana njege vapna i tla.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja zbijenosti glinovitog tla modificiranog s različitim postocima vapnenog praška

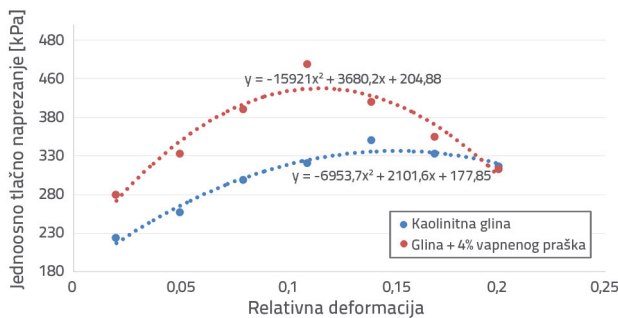
Dan	Opis uzorka	Naziv	$\omega_{opt}$	$\gamma_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
0	Kaolinitna glina	K0	29,5	1,40
	Glina + 2 % vapnenog praška	KP02	32,4	1,30
	Glina + 4 % vapnenog praška	KP04	32,8	1,27
	Glina + 8 % vapnenog praška	KP08	33	1,23
	Glina + 16 % vapnenog praška	KP016	33,7	1,17
3	Kaolinitna glina	K3	29,5	1,40
	Glina + 2 % vapnenog praška	KP32	27,4	1,51
	Glina + 4 % vapnenog praška	KP34	27,3	1,53
	Glina + 8 % vapnenog praška	KP38	26,9	1,56
	Glina + 16 % vapnenog praška	KP316	26,5	1,60
7	Kaolinitna glina	K7	29,5	1,40
	Glina + 2 % vapnenog praška	KP72	27,1	1,55
	Glina + 4 % vapnenog praška	KP74	27	1,56
	Glina + 8 % vapnenog praška	KP78	26,9	1,60
	Glina + 16 % vapnenog praška	KP716	26,5	1,62
28	Kaolinitna glina	K28	29,5	1,40
	Glina + 2 % vapnenog praška	KP282	26,9	1,60
	Glina + 4 % vapnenog praška	KP284	26,9	1,63
	Glina + 8 % vapnenog praška	KP288	26,7	1,65
	Glina + 16 % vapnenog praška	KP2816	26,3	1,67
90	Kaolinitna glina	K90	29,5	1,40
	Glina + 2 % vapnenog praška	KP902	26,4	1,65
	Glina + 4 % vapnenog praška	KP904	26,2	1,66
	Glina + 8 % vapnenog praška	KP908	26	1,68
	Glina + 16 % vapnenog praška	KP9016	25,9	1,68

### 4.4. Ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće (UCS)

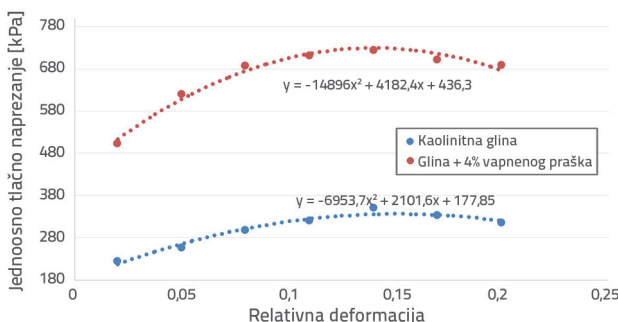
Iako se stabilizacija vapnom često provodi kako bi se poboljšala fizikalna i mehanička svojstva raznih vrsta tla, treba napomenuti da se taj postupak naročito koristi kako bi se poboljšala svojstva sitnozrnatih tipova tla. Poboljšanje posmične čvrstoće i krutosti registrirano je nekoliko tjedana nakon dodavanja vapna, pa se stoga vapno smatra značajnim parametrom u analizi tla stabiliziranog vapnom. Ispitivanja jednoosne tlačne čvrstoće provedena su na uzorcima glinovitog tla za LFP (prema dijagramima granice plastičnosti). Odgovarajući rezultati prikazani su na slikama od 5 do 9. Dodavanjem vapna, povećana je maksimalna jednoosna tlačna čvrstoća modificiranog tla, a taj je trend nastavljen još naglašenije s povećanjem vremena njege.



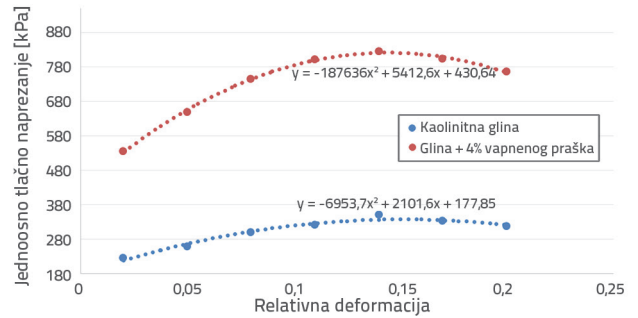
Slika 5. Krivulja napreznja i deformacija modificiranog tla za LFP, prvi dan



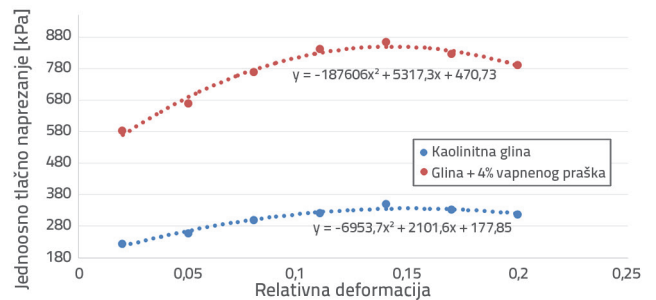
Slika 6. Krivulja napreznja i deformacija modificiranog tla za LFP, treći dan



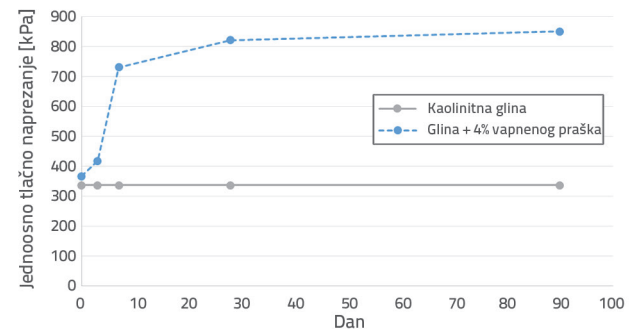
Slika 7. Krivulja napreznja i deformacija modificiranog tla za LFP, sedmi dan



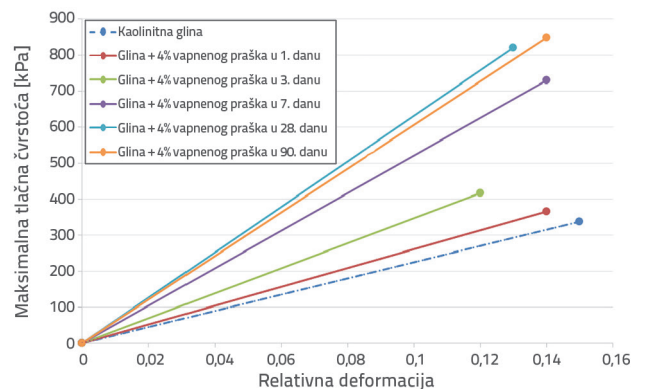
Slika 8. Krivulja napreznja i deformacija modificiranog tla za LFP, dvadeset i osmi dan



Slika 9. Krivulja napreznja i deformacija modificiranog tla za LFP, devedeseti dan



Slika 10. Promjena maksimalnog jednoosnog tlačnog napreznja ( $q_u$ ) tijekom njege tla modificiranog vapnom

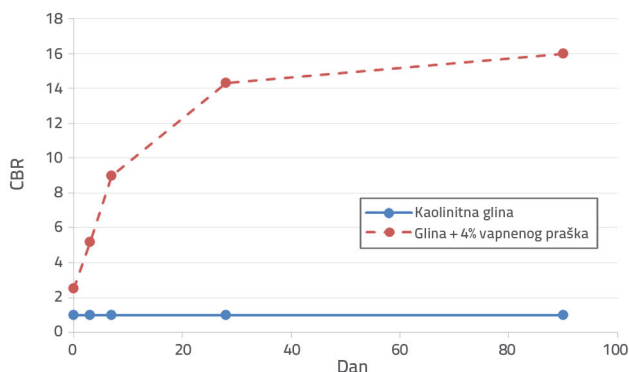


Slika 11. Maksimalna promjena modula tla modificiranog vapnom u točki maksimalne jednoosne tlačne čvrstoće u razdoblju njege

Kao što se može vidjeti na slikama 10. i 11., tijekom perioda njege se bilježi promjena maksimalnog jednoosnog tlačnog naprezanja ( $q_u$ ). Promjena maksimalnog modula tla modificiranog vapnom analizirana je u odgovarajućim točkama provođenjem pokusa za određivanje maksimalne jednoosne tlačne čvrstoće. Modul uzorka istovremeno raste s porastom vremena njege, a ovaj se trend nastavlja do 28-og dana, nakon čega nema znatnijih promjena. Čvrstoća modificiranih uzoraka raste s porastom reakcije vapna u tlu.

#### 4.5. Ispitivanja CBR

Analizirana je promjena čvrstoće tla modificiranog vapnom u razdoblju njege. Dodavanje vapna dovelo je do znatnog povećanja vrijednosti CBR za tlo. Prema rezultatima ispitivanja, nakon 28 dana vrijednost CBR za tlo iznosila je više od 14, a ta je vrijednost i dalje nešto sporije rasla sve do devedesetog dana, kao što se to vidi na slici 12.



Slika 12. Promjena vrijednosti CBR za uzorke tla modificiranih vapnom, s optimalnim postotkom vapna u razdoblju njege

## LITERATURA

- [1] Bell, F.G.: Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42 (1996), pp. 223-237.
- [2] Rogers, C.D.F., Glendinning, S.: Improvement of clay soils in situ using lime piles in the UK, *Engineering Geology*, 1997.
- [3] Boardman, D.I., Glendinning, S., Rogers, C.D.F.: Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes, *Geotechnique*, 50 (2001) 6, pp. 533-543.
- [4] Parsons, R.L., Johnson, C.P., Cross, S.A.: Evaluation of field mixing and construction procedures for lime modified subgrade, 80th Annual Meeting Transportation Research Board, Paper No. 01-0311, 2001.
- [5] Hale, B., Evans, L., Lambert, R.: Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils, *Journal of Hazardous Materials*, 199-200 (2012) 5, pp. 119-127.
- [6] Thompson, M.R.: Shear Strength and Elastic Properties of Lime Soil Mixtures, *Highway Research Record*, pp. 1-14, 1975.
- [7] Ormsby, W.C., Kinter, E.B.: Strength development and reaction products in lime montmorillonite, water systems, *Public Roads*, 37 (1973) 4, pp. 136-148.
- [8] Sabry, M.M.A., Parker, J.V.: Engineering properties of soil-lime mix, *Proc. ASCE J. Trans. Eng. Div.*, 197 (1979), pp. 25-35.
- [9] Locat, J., André, B.M., Choquette, M.: Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development, *Canadian Geotechnical Journal*, 27 (1990), pp. 294-304.
- [10] Lund, O.L., Ramsey, W.J.: Experimental lime stabilization in Nebraska. *Highway Research Board Bulletin*, 231 (1959), pp. 24-59.
- [11] Aldaood, A., Bouasker, M., Al-Mukhtar, M.: Effect of water during freeze-thaw cycles on the performance and durability of lime-treated gypseous soil, *Cold Regions Science and Technology*, 123 (2016), pp. 155-163.
- [12] Dang, L., Fatahi, B., Khabbaz, H.: Behaviour of Expansive Soils Stabilized with Hydrated Lime and Bagasse Fibres, *Procedia Engineering*, 2016.

## 5. Zaključak

Slabo nosiva glinovita tla mogu se stabilizirati dodavanjem raznih aditiva. Zbog svoje niske cijene, dostupnosti i pozitivnog utjecaja na čvrstoću, vapno se tradicionalno koristi za stabilizaciju slabo nosivih vrsta tla. U radu se analizira utjecaj dodavanja vapna kaolinitnom glinovitom tlu u omjeru od 2, 4 i 8 %, i to u vremenu njege od prvog do devedesetog dana. Provedene su sljedeće laboratorijske analize: pH, Atterbergove granice, jedinična težina, jednoosna tlačna čvrstoća (UCS) i CBR. Prema dobivenim rezultatima, vrijednost pH modificiranog tla smanjila se u vremenu njege. To je fiziološka karakteristika otopine tla. Niža pH-vrijednost bila bi znak strukturiranog tla. Prema ispitivanju Atterbergovih granica, indeks plastičnosti tla stabiliziranog vapnenim praškom smanjio se, a optimalni i ekonomičan postotak vapna dobio je do točke fiksiranja vapna (LFP). U ispitivanju zbijenosti, optimalni udio vode tla stabiliziranog vapnom u početku je veći od vrijednosti netretiranog tla. Tijekom razdoblja njege, veličina čestica gline povećala se, te je porasla maksimalna suha jedinična težina modificiranog tla. Za tlo modificirano vapnom bilježi se porast maksimalne jednoosne tlačne čvrstoće, a taj se trend sve izraženije iskazuje u razdoblju njege. Zabilježen je porast Youngovog modula uzoraka modificiranih vapnenim praškom. Isto tako, u pokusu CBR utvrđen je porast za više od 14 jedinica.



- [13] Liu, J., Wang, T., Tian, Y.: Experimental study of the dynamic properties of cement- and lime-modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 61 (2010) 1, pp. 29–33.
- [14] Bhattacharja, S., Bhatta, J.I., Todres, H.A.: Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime, A Critical Review of Literature. PCA R&D Serial No.2066, Portland Cement Association, Skokie, Illinois (USA), 2003.
- [15] Barker, J.E., Rogers, C.D.F., Boardman, D.I.: Physio-Chemical Changes in Clay Caused by Ion Migration from Lime Piles. ASCE, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2006) 2, pp. 182–189.
- [16] Bozbey, I., Demir, B., Komut, M., Saglik, A., Gomez, S., Mert, A.: Importance of Soil Pulverization Level in Lime Stabilized Soil Performance, *Procedia Engineering*, 143 (2016), pp. 642–649.
- [17] Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., da Silva Lopes, L., Winter, D.: Control factors for the long-term compressive strength of lime treated sandy clay soil, *Transportation Geotechnics*, 1 (2014) 3, pp. 129–136.
- [18] Garzón, E., Cano, M., O'Kelly, B.C., Sánchez-Soto, P.J.: Effect of lime on stabilization of phyllite clays, *Applied Clay Science*, 123 (2016), pp. 329–334.
- [19] Ciancio, D., Beckett, C.T.S., Carraro, J.A.H.: Optimum lime content identification for the lime-stabilised rammed earth, *Construction, and Building Materials*, 53 (2014), pp. 59–65.
- [20] Khemissa, M., Mahamedi, A.: Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay, *Applied Clay Science*, 95 (2014), pp. 104–110.