



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ
У НИШУ



Немања М. Маринковић

**ПРИЛОГ РАЗВОЈУ МЕТОДЕ ПОБОЉШАЊА
ГЕОТЕХНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ТЛА
ПРИМЕНОМ ХЕМИЈСКОГ
ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКОГ ТРЕТМАНА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
(„Сл. гласник РС“, бр. 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење,
97/2008, 44/2010, 93/2012, 89/2013 и 99/2014).

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, „Сл. гласник РС“, бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012).

Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе, осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације

Ниш, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND
ARCHITECTURE OF NIŠ



Nemanja M. Marinković

**CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT
OF THE METHOD FOR IMPROVING THE
GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SOILS BY
APPLICATION OF CHEMICAL
ELECTROKINETIC TREATMENT**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	др Елефтерија Златановић, ванредни професор Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу
Наслов:	Прилог развоју методе побољшања геотехничких карактеристика тла применом хемијског електрокинетичког третмана
	<p>Техника хемијске стабилизације тла, чији су ефекти трајног карактера, има успешну примену искључиво у површинским слојевима. Са друге стране, електрокинетички третман тла се, захваљујући дејству једносмерне струје, може користити и на већим дубинама, али ефекти његове примене нису трајног карактера. Комбинација ових двеју техника има за циљ развој методологије стабилизације тла, која омогућава трајно побољшање геомеханичких карактеристика на већим дубинама и у условима где конвенционалне технике стабилизације дају ограничене резултате. У оквиру дисертације, најпре је испитана ефикасност десет различитих стабилизатора применом технике хемијске стабилизације, као и промена минералних компоненти глиновитих тла под утицајем електричног поља ниског напона. Коришћени стабилизатори класификовани су у три категорије: традиционални, алтернативни и стабилизатори на бази индустријског отпада. Из сваке од наведених група изабран је стабилизатор којим су постигнути најбољи резултати и са њим је у наредној фази истраживања вршен третман глиновитог тла у комбинацији са електрокинетичким третманом. Током друге фазе истраживања спроведена су опсежна лабораторијска испитивања физичко - механичких својстава тла пре и након третмана предложеном техником, као и праћење брзине и количине преноса катјона. У последњој фази спроведен је низ истраживања на експерименталним моделима применом најефикаснијег стабилизатора из претходне фазе истраживања у комбинацији са електрокинетичким третманом, сагледавајући ефекте различите влажности тла, електричних напона и размака електрода (аноде и катоде), са циљем оптимизације предложене технике за будућа истраживања на теренским моделима. Током трајања експерименталног програма, сви третирану узорци тла испитани су у различитим временским интервалима током и након третмана, како би се сагледала трајност ефеката побољшања својстава тла. Добијени резултати указују на значајне потенцијале комбинованог хемијско - електрокинетичког приступа у стабилизацији тла недовољно добрих карактеристика у природном стању, посебно у условима ограничене приступачности, дубоких клизишта и густо насељених урбаних зона. Предложена техника би могла наћи примену у пројектовању инфраструктурних објеката, стабилизацији косина и санацији тла испод постојећих објеката.</p>
Научна област:	Грађевинско инжењерство (грађевинска геотехника)
Научна дисциплина:	Методе побољшања геотехничких карактеристика тла
Кључне речи:	хемијска електрокинетичка стабилизација тла, глиновито тло, физичко - механичке карактеристике, хемијске карактеристике, трајно побољшање
УДК:	624.13(043.3) 624.138:537.36(043.3)
CERIF класификација:	T 220
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Elefterija Zlatanović, Associate Professor University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture of Niš
Title:	Contribution to the development of the method for improving the geotechnical properties of soils by application of chemical electrokinetic treatment
Abstract:	<p>The chemical soil stabilization technique, whose effects are of a permanent nature, has been successfully applied exclusively in surface layers. On the other hand, the electrokinetic soil treatment, owing to the action of direct current, can be used at greater depths, but the effects of its application are not permanent. The combination of these two techniques aims to develop a soil stabilization methodology that allows for permanent improvement of soil geomechanical properties at greater depths and in conditions where conventional stabilization techniques provide limited results. Within the framework of the dissertation, the efficiency of ten different stabilizers was first examined using the chemical stabilization technique, as well as the change in the mineralogical composition of clayey soils under the influence of a low-voltage electric field. The stabilizers used were classified into three categories: traditional, alternative and stabilizers based on industrial waste. From each of the aforementioned groups, the stabilizer that achieved the best results was selected and in the next stage of the research, clayey soil was treated with it in combination with the electrokinetic treatment. During the second stage of the research, extensive laboratory tests of the physical and mechanical properties of the soil were carried out before and after the soil treatment with the proposed technique, as well as monitoring the rate and amount of cation transfer. In the last stage, a series of studies were conducted on experimental models using the most effective stabilizer from the previous stage of the research in combination with the electrokinetic treatment, examining the effects of different soil moisture contents, electrical voltages and electrode spacing (distance between anode and cathode), with the aim of optimizing the proposed technique for future research on field models. During the whole experimental program, all treated soil samples were tested at different time intervals during and after the treatment, in order to observe the durability of the effects of improving soil properties. The results obtained indicate significant potential of the combined chemical–electrokinetic approach in the stabilization of soils of insufficiently good characteristics in their natural state, particularly in conditions of limited accessibility, deep landslides and densely populated urban areas. The proposed technique may find application in the design of infrastructure facilities, slope stabilization and soil remediation under existing facilities.</p>
Scientific Field:	Civil Engineering (Civil Engineering Geotechnics)
Scientific Discipline:	Methods for improving geotechnical soil properties
Key words:	chemical–electrokinetic soil stabilization technique, clayey soil, physico–mechanical properties, chemical characteristics, permanent improvement
UDC:	624.13(043.3) 624.138:537.36(043.3)
CERIF Classification:	T 220
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

ЗАХВАЛНОСТ АУТОРА

Овом приликом, желео бих да изразим захвалност онима који су дали огроман допринос изради ове дисертације.

Својој менторки, проф. др Елефтерији Златановић, желим да изразим захвалност на пожртвованом раду, труду, огромном стрпљењу и усмеравању током израде дисертације. Њен утицај кроз овај рад надмашује његов формални академски домен, и представља одраз истинског и посвећеног менторства. Незмерно сам захвалан на великој помоћи, конструктивним сугестијама и корисним саветима које менторка свакодневно и несебично преноси.

Једнаку захвалност дугујем и проф. др Зорану Бонићу, по чијој је идеји и настала тема ове дисертације. Континуирана подршка, пружена знања, неисцрпни оптимизам и посвећеност како при осмишљавању, тако и при реализацији свих сегмената овог истраживања, у великој мери допринели су да ова дисертација буде квалитетнија.

Дубоку захвалност изражавам проф. др Небојши Давидовићу на дугогодишњој сарадњи и корисним саветима, а посебно на пренешеном знању и вештинама у области лабораторијског рада.

Колегама и великим пријатељима из Лабораторије за грађевинску геотехнику, Бранимиру Станковићу и Николи Ромићу, желим да се посебно захвалим на њиховој укључености и неизмерној помоћи приликом припреме и спровођења експерименталних истраживања, а понајвише на стеченом професионалном искуству током заједничке сарадње.

Проф. др Снежани Ђорић-Вељковић, од срца се захваљујем на изузетном доприносу овој дисертацији у области примењене физике, као и на труду и залагању током реализације великог броја експеримената који су саставни део овог рада. Захвалност дугујем и проф. др Драгану Ђорђевићу, на стручним саветима и помоћи у разумевању и савладавању теоријских основа из области хемије, неопходних за спровођење овог истраживања, што је омогућило да ова дисертација има мултидисциплинарни карактер.

Изражавам велику захвалност проф. др Милораду Јовановском, на корисним сугестијама, пруженим саветима и пренешеном знању током докторских студија.

Проф. др Милици Николић захваљујем се за помоћ око испитивања узорака на Природно-математичком факултету. Владимиру Јовановићу захваљујем се на организацији узорковања и транспорта материјала са градилишта у лабораторију, као и фирми *"Пут инжењеринг"* из Ниша на техничкој помоћи у току трајања експерименталних испитивања.

Овом приликом захваљујем се Фонду за науку Републике Србије у оквиру чијег научно-истраживачког пројекта *„Нови концепт у побољшању геотехничких својстава тла – хемијски електрокинетички третман тла – ElectroSoil (број 7742530)“* је урађено ово истраживање.

У животу је успех леп онда када има са ким да се подели, зато овим путем изражавам огромну захвалност својим пријатељима и породици, пре свих родитељима и сестри, за безрезервну подршку и разумевање које ми пружају.

Највећу захвалност дугујем својој супрузи Милици и сину Огњену, који ме свакодневно мотивишу, пружају неизмерну љубав и подстрек за нове успехе. Овај рад је посвећен њима.

Немања Маринковић

САДРЖАЈ

Списак слика	I
Списак табела	VI
Списак симбола и ознака	VIII
Списак скраћеница	X
1. УВОД	- 1 -
1.1. Предмет истраживања	- 4 -
1.2. Циљеви истраживања	- 5 -
1.3. Полазне хипотезе	- 6 -
1.4. Примењене методе истраживања	- 6 -
2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ГЛИНОВИТИХ ТЛА	- 9 -
2.1. Структура глиновитих тла	- 10 -
2.2. Физичко - механичке карактеристике глиновитих тла	- 18 -
2.2.1. Одређивање гранулометријског састава тла (просејавање и ареометрисање)	- 19 -
2.2.2. Одређивање пластичности (Атербергове границе конзистенције)	- 22 -
2.2.3. Одређивање оптималне влажности и највеће суве густине (Прокторов опит)	- 24 -
2.2.4. Одређивање Калифорнијског индекса носивости и бубрења тла (CBR опит)	- 25 -
2.2.5. Одређивање коефицијента водопрпусности	- 26 -
2.2.6. Одређивање стишљивости и порозности (Опит стишљивости у едометру)	- 27 -
2.2.7. Одређивање параметара чврстоће тла (Опит директног смицања, триаксијални опит)	- 29 -
2.2.8. Одређивање једноаксијалне чврстоће при притиску	- 32 -
2.3. Хемијске карактеристике глиновитог тла	- 33 -
2.3.1. Наелектрисање на слојевима	- 33 -
2.3.2. Капацитет катјонске измене	- 34 -
2.3.3. Апсорпција и адсорпција	- 36 -
2.3.4. Фуријеове трансформациона инфрацрвена спектроскопија (FTIC)	- 37 -
2.3.5. Рендгенска флуоресцентне спектрометрија (XRF) и рендгенска дифрактометрија (XRF)	- 39 -
2.3.6. Скенирајућа електронска микроскопија (SEM)	- 41 -
2.3.7. рН вредност и електропроводљивост тла	- 41 -
3. ТЕХНИКЕ СТАБИЛИЗАЦИЈЕ ТЛА	- 43 -
3.1. Хемијска стабилизација тла	- 46 -
3.1.1. Развој технике хемијске стабилизације тла	- 46 -

3.1.2.	Основни принципи и механизми хемијске стабилизације тла	- 50 -
3.1.3.	Предности и недостаци технике хемијске стабилизације	- 53 -
3.2.	Електрокинетички третман тла	- 55 -
3.2.1.	Развој технике електрокинетичког третмана тла	- 55 -
3.2.2.	Основни принципи и механизми електрокинетичког третмана тла	- 57 -
3.2.3.	Предности и недостаци електрокинетичког третмана тла	- 62 -
4.	ПРЕДЛОГ НОВЕ ТЕХНИКЕ ХЕМИЈСКЕ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ СТАБИЛИЗАЦИЈА ТЛА	- 65 -
5.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА СТАБИЛИЗАЦИЈЕ ГЛИНОВИТОГ ТЛА ОДВОЈЕНИМ ХЕМИЈСКИМ И ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКИМ ТРЕТМАНИМА	- 74 -
5.1.	Испитивања карактеристика глиновитог тла у природном стању	- 76 -
5.2.	Експериментална истраживања хемијске стабилизације глиновитог тла	- 77 -
5.2.1.	Основна својства коришћених адитива у фази хемијске стабилизације	- 77 -
5.2.2.	Резултати спроведених експерименталних истраживања стабилизације глиновитог тла хемијским третманом	- 89 -
5.2.3.	Анализа резултата хемијске стабилизације тла	- 115 -
5.3.	Електрокинетички третман тла	- 118 -
5.3.1.	Утицај влажности тла на успешност електрокинетичког третмана	- 118 -
5.3.2.	Утицај растојања и дубине уграђивања електрода у тло на успешност електрокинетичког третмана	- 120 -
5.3.3.	Утицај корозије електрода на ефикасност електрокинетичког третмана	- 121 -
6.	ХЕМИЈСКИ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКИ ТРЕТМАН ТЛА	- 124 -
6.1.	Испитивања током реализације експеримента	- 127 -
6.1.1.	Опит крилном сондом	- 127 -
6.1.2.	Испитивање промена хемијске структуре тла - XRF и XRD анализа	- 129 -
6.1.3.	Електронска микроскопија - SEM	- 134 -
6.2.	Испитивања након спроведеног експеримента хемијског електрокинетичког третмана тла	- 137 -
6.2.1.	Опит триаксијалне компресије	- 137 -
6.2.2.	Одређивање коефицијента водопропусности тла	- 149 -
6.3.	Анализа резултата	- 150 -
7.	ОПТИМИЗАЦИЈА ПРИМЕНЕ ТЕХНИКЕ ХЕМИЈСКЕ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ СТАБИЛИЗАЦИЈЕ ТЛА	- 153 -
7.1.	Опис експерименталних модела	- 154 -
7.1.1.	Испитни сандуци С1, С2 и С3	- 154 -
7.1.2.	Испитни сандуци С4 и С5	- 156 -
7.1.3.	Испитни сандуци С6 и С7	- 157 -

7.1.4.	Збирни преглед експерименталних модела	- 158 -
7.2.	Испитивања током реализације експеримената	- 159 -
7.2.1.	Резултати испитивања на сандуцима С1, С2 и С3	- 159 -
7.2.2.	Резултати испитивања на сандуцима С4 и С5	- 162 -
7.2.3.	Резултати испитивања на сандуцима С6 и С7	- 164 -
7.3.	Испитивања након спроведених експеримената хемијског електрокинетичког третмана тла	- 166 -
7.3.1.	Промена параметара чврстоће у зони аноде	- 169 -
7.3.2.	Промена параметара чврстоће у зони између аноде и катоде	- 170 -
7.3.3.	Промена параметара чврстоће у зони катоде	- 171 -
7.4.	Анализа резултата експерименталних истраживања са аспекта оптимизације предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла	- 172 -
8.	ЗАКЉУЧЦИ НА ОСНОВУ СПРОВЕДЕНИХ ИСТРАЖИВАЊА	- 174 -
8.1.	Рекапитулација резултата експерименталних истраживања	- 175 -
8.2.	Препоруке за будућа истраживања	- 177 -
	Литература	- 179 -

Списак слика

- Слика 2.1 Основне јединице грађе минерала глине (Mitchell, 1993)
- Слика 2.2 Структура основних минерала глине: а) каолинит; б) илит; в) монтморилонит (према Mitchell, 1993)
- Слика 2.3 Модели слојевите структуре 1:1 и 2:1 (Randelović, 2012)
- Слика 2.4 Грађа каолинита (модификовано према Mitchell and Soga, 2005)
- Слика 2.5 Грађа тростројних глина (www.soilsurvey.org)
- Слика 2.6 Грађа смектита (Milošević, 2016)
- Слика 2.7 Грађа илита (модификовано према Mitchell and Soga, 2005)
- Слика 2.8 Грађа монтморилонита (модификовано према Mitchell and Soga, 2005)
- Слика 2.9 Модел тла са учешћем појединих фаза
- Слика 2.10 Комплет сита за методу сејања и интерпретација резултата путем гранулометријске криве
- Слика 2.11 Поступак ареометисања
- Слика 2.12 Поступак одређивање Атербергових граница: а) метода са падајућим конусом; б) метода ваљања ваљчића
- Слика 2.13 Прокторов опит: а) Збијање у слојевима; б) Дијаграм „ $w - \gamma_d$ “
- Слика 2.14 СБР опит: а) опрема за лабораторијско испитивање; б) дијаграм “Дубина утискивања клипа – Отпор тла при утискивању клипа” (www.matest.com.)
- Слика 2.15 Шема апарата за одређивање коефицијента водопропусности ситнозрног тла
- Слика 2.16 Опит стишљивости у едометру: а) апарат за испитивање стишљивости – едометар; б) дијаграм „ $\sigma - \epsilon$ “ (www.matest.com)
- Слика 2.17 Опит директног смицања: а) апарат за директно смицање; б) дијаграми за одређивање параметара чврстоће c и ϕ (www.matest.com)
- Слика 2.18 Опит триаксијалне компресије: а) апарат за триаксијалну компресију; б) дијаграми за одређивање параметара чврстоће c и ϕ
- Слика 2.19 Опит једноаксијалне компресије: а) апарат за одређивање једноаксијалне чврстоће при притиску; б) дијаграм за одређивање једноаксијалне чврстоће
- Слика 2.20 Величина елемената и способност размене (Shon et al., 2010)
- Слика 2.21 Пример замене елемената унутар слојева у глини. (Shon et al., 2010)
- Слика 2.22 Принцип рада FTIC методе
- Слика 2.23 Енергетски нивои електрона K, L и M у атому (Guthrie and Ferguson, 2012)
- Слика 3.1 Измена катјона из стабилизатора и катјона на површини глинених честица (Shon et al., 2010)
- Слика 3.2 Електрокинетички третман тла (Lamont-Black et al., 2015)
- Слика 3.3 Шематски приказ електроосмозе са додатком калцијум-хлорида

- Слика 4.1 Шематски приказ експерименталних модела за примену комбиноване хемијске и електрокинетичке стабилизације тла: а) модел кружног облика (Ou et al., 2009); б) модел са електродама у облику плоча (Abdullah and Al-Abadi, 2010)
- Слика 5.1 Локација узорковања материјала
- Слика 5.2 Ископ материјала за потребе уградње шипова у циљу санације клизишта
- Слика 5.3 Узорковање материјала на терену
- Слика 5.4 Припрема материјала допремљеног у лабораторију: а) мешање материјала; б) сушење материјала у сушници
- Слика 5.5 XRD спектар глиновитог тла у природном стању
- Слика 5.6 Механизам хемијске стабилизације тла
- Слика 5.7 Опрема и узорци за испитивање једноаксијалне чврстоће при притиску
- Слика 5.8 Вредности једноаксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла традиционалним стабилизаторима
- Слика 5.9 Вредности једноаксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла стабилизаторима из индустријског отпада
- Слика 5.10 Вредности једноаксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла алтернативним стабилизаторима
- Слика 5.11 Вредности једноаксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла алтернативним стабилизаторима на бази хлорида
- Слика 5.12 Поређење тренда промене вредности q_u током времена након хемијске стабилизације глиновитог тла одговарајућим оптималним садржајем за сваки од анализираних стабилизатора
- Слика 5.13 Различити облици лома узорака са разматраним стабилизаторима при испитивању једноаксијалне чврстоће тла при притиску
- Слика 5.14 Припрема и испитивање граница конзистенција
- Слика 5.15 Промена вредности модула стишљивости после 3, 7 и 28 дана од третирања глиновитог тла оптималним садржајем сваког од коришћених стабилизатора
- Слика 5.16 Промена вредности CBR после 7 и 28 дана од третирања глиновитог тла оптималним садржајем сваког од коришћених стабилизатора
- Слика 5.17 Промена вредности бубрења после 7 и 28 дана од третирања глиновитог тла оптималним садржајем сваког од коришћених стабилизатора
- Слика 5.18 Дијаграм зависности смичућег напона и деформације на узорку тла у природном стању
- Слика 5.19 Дијаграм зависности смичућег напона и деформације на узорку тла са додатком оптималног садржаја стабилизатора: а) креч; б) цементно везиво; в) електрофилтерски пепео; г) камено брашно; д) гвожђе (III) хлорид; ђ) калцијум (II) хлорид; е) калијум-хлорид; ж) магнезијум-карбонат; з) натријум-силикат; и) калијум-хидроксид

- Слика 5.20 Промена вредности кохезије третираног глиновитог тла после 3, 14 и 28 дана од третмана
- Слика 5.21 Промена вредности угла унутрашњег трења третираног глиновитог тла после 3, 14 и 28 дана од третмана
- Слика 5.22 Припрема узорака за испитивање
- Слика 5.23 FTIR спектри: а) глиновито тло у природном стању; б) тло са оптималном количином креча; в) тло са оптималном количином цементног везива; г) тло са оптималном количином електрофилтерског пепела; д) тло са оптималном количином каменог брашна; њ) тло са оптималном количином гвожђе (III) хлорида; е) тло са оптималном количином калцијум (II) хлорида; ж) тло са оптималном количином калијум хлорида; з) тло са оптималном количином магнезијум карбоната; и) тло са оптималном количином натријум-силиката; ј) тло са оптималном количином калијум хидроксида
- Слика 5.24 SEM анализа: а) глиновито тло у природном стању; б) тло са оптималном количином креча; в) тло са оптималном количином цементног везива; г) тло са оптималном количином електрофилтерског пепела; д) тло са оптималном количином каменог брашна; њ) тло са оптималном количином гвожђе (III) хлорида; е) тло са оптималном количином калцијум хлорида; ж) тло са оптималном количином калијум хлорида; з) тло са оптималном количином магнезијум карбоната; и) тло са оптималном количином натријум-силиката; ј) тло са оптималном количином калијум хидроксида
- Слика.5.25 Припрема земљаног материјала са различитим влажностима:
а) $w=15\%$; б) $w=20\%$; в) $w=25\%$; г) $w=30\%$
- Слика 5.26 Промена јачине електричне струје (I) при различитим вредностима напона (U) и различитим влажностима (w) третираног тла
- Слика 5.27 Промена јачине струје у зависности од растојања електрода: а) размак електрода 22,5 cm; б) размак електрода 45 cm
- Слика 5.28 Промена јачине струје у зависности од дубине уграђивања електроде у тло: а) поставка експеримента; б) резултат експеримента
- Слика 5.29 Електрокинетички третман глиновитог тла: а) сакупљање воде у зони катоде; б) електроде пре и после коришћења
- Слика 5.30 Промена јачине електричне струје при а) различитим влажностима тла и различитим напонима б) коришћењем старих (кородираних) и нових (некоришћених) електрода
- Слика 6.1 Хомогенизовање природног глиновитог материјала: а) апарат за мешање; б) механичко мешање тла у сандуку
- Слика 6.2 Шематски приказ испитних сандука: а) приказ у основи; б) подужни пресек

- Слика 6.3 Шематски приказ поставке експеримента за хемијски електрокинетички третман глиновитог тла у лабораторијским условима
- Слика 6.4 Експериментална истраживања технике хемијског електрокинетичког третмана глиновитог тла: а) поставка експеримента у лабораторији (три испитна сандука са три разматрана стабилизатора - креч, електрофилтерски пепео и магнезијум карбонат (слева на десно)); б) прикупљање воде испод катода
- Слика 6.5 XRF ручни анализатор и узорци тла за утврђивање промена хемијских елемената у тлу након хемијског електрокинетичког третмана
- Слика 6.6 XRD спектрометри: а) зона аноде у C1*; б) зона катоде у C1*; в) зона аноде у C2*; г) зона катоде у C2*; д) зона аноде у C3*; њ) зона катоде у C3*
- Слика 6.7 SEM фотографије (лево), микротопографије површине (средина) и приказ хрпавости и текстуре за карактеристични пресек (десно): а) тло у природном стању; б) узорак тла из сандука C1*; в) узорак тла из сандука C2*; г) узорак тла из сандука C3*
- Слика 6.8 Апарат и снимљене фотографије фотоапаратом и дигиталним микроскопом: а) дигитални микроскоп; б) површина електроде снимана фотоапаратом; в) површина тла у зони катоде снимана дигиталним микроскопом
- Слика 6.9 Влажност тла у испитним сандуцима након хемијског електрокинетичког третмана: сандук 1 - креч; сандук 2 - електрофилтерски пепео, сандук 3 - магнезијум карбонат
- Слика 6.10 Опит триаксијалне компресије: а) траиксијални апарат; б) илустрација резултата испитивања
- Слика 6.11 Узорковање третираног тла из испитног сандука C1* за испитивање у опиту триаксијалне компресије: а) шематски приказ; б) на експерименталном моделу
- Слика 6.12 Зависност параметара смичуће чврстоће од влажности тла у природном стању
- Слика 6.13 Промена чврстоће глиновитог тла при смицању након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима: а) сандук 1 - креч; б) сандук 2 - електрофилтерски пепео; в) сандук 3 - магнезијум-карбонат
- Слика 7.1 Припрема опреме и материјала за испитивање: а) мешање тла; б) бушење електроде (перфорирање цеви)
- Слика 7.2 Експериментална истраживања у сандуцима C1 и C2: а) током третмана; б) за време испитивања
- Слика 7.3 Дренажање тла током третмана: а) прикупљена вода у зони катоде; б) уклањање прикупљене воде

- Слика 7.4 Експериментална истраживања у сандуцима С4 и С5: а) током третмана; б) за време испитивања
- Слика 7.5 Експериментална истраживања у сандуцима С6 и С7: са пумпом (лево) и без пумпе (десно)
- Слика 7.6 Приказ позиција испитних места током третмана: а) шематски приказ у основи; б) шематски приказ у подужном пресеку; в) током опита крилном сондом
- Слика 7.7 Узимање узорака тла после третмана: а) позиција узорковања; б) обележавање и нега узорака; в) узорци пре испитивања; г) узорци после испитивања

Списак табела

- Табела 2.1 Коефицијент водопропусности за различите врсте тла
- Табела 2.2 Капацитет катјонске измене код минерала из групе глина (Grim, 1953)
- Табела 3.1 Вредности коефицијента електроосмотске проводљивости (k_e) за различите врсте тла (Asadi et al., 2013)
- Табела 5.1 Основне карактеристике глиновитог тла у природном стању
- Табела 5.2 Промена границе течења (w_L [%]) са додатком хемијских стабилизатора у различитим временским интервалима
- Табела 5.3 Промена границе пластичности (w_P [%]) са додатком хемијских стабилизатора у различитим временским интервалима
- Табела 5.4 Промена индекса пластичности (I_P [%]) са додатком хемијских стабилизатора у различитим временским интервалима
- Табела 5.5 Промена рН вредности и електропроводљивости тла током времена
- Табела 5.6 Регистроване вредности смичућег напона при лому (τ) за примењене вредности нормалног напона (σ) у опиту директног смицања
- Табела 6.1 Резултати опита крилном сондом у различитим временским интервалима током експеримента
- Табела 6.2 Резултати мерења садржаја репрезентативних елемената у тлу током третмана техником хемијске електрокинетичке стабилизације
- Табела 6.3 Резултати квалитативне XRD анализе третираног тла
- Табела 6.4 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w) у зони аноде
- Табела 6.5 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w) у средњој зони
- Табела 6.6 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w) у зони катоде
- Табела 6.7 Вредности коефицијента водопропусности (k) на третираним узорцима
- Табела 7.1 Табеларни приказ поставке модела за експериментална истраживања у процесу оптимизације технике хемијске електрокинетичке технике стабилизације тла
- Табела 7.2 Резултати опита крилном сондом, одређивања влажности тла и промене садржаја калцијума (Ca) током третмана тла у испитним сандуцима C1, C2 и C3

- Табела 7.3 Резултати опита крилном сондом, одређивања влажности тла и промене садржаја калцијума (Ca) током третмана тла у испитним сандуцима C4 и C5
- Табела 7.4 Резултати опита крилном сондом, одређивања влажности тла и промене садржаја калцијума (Ca) током третмана тла у испитним сандуцима C6 и C7
- Табела 7.5 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w)

Списак симбола и ознака

<i>A</i>	колоидална активност глине [-]
<i>Ca</i>	калцијум
<i>Cl</i>	хлор
<i>c</i>	кохезија [kPa]
<i>c_f</i>	кохезија при лому [kPa]
<i>c_u</i>	недренирана кохезија [kPa]
<i>C_i</i>	коэффициент једноличности [-]
<i>C_c</i>	коэффициент закривљености [-]
<i>CBR</i>	калифорнијског индекса носивости [%]
<i>CF</i>	процентуално учешће зрна глине у узорку [%]
<i>d</i>	дубина пенетрације конуса [mm]
<i>d</i>	растојање између електрода (аноде и катоде) [cm]
<i>Fe</i>	гвожђе
<i>G_s</i>	специфична тежина [-]
<i>H</i>	водоник
<i>K</i>	калијум
<i>Mg</i>	магнезијум
<i>m</i>	маса [g]
<i>I</i>	јачине електричне струје [mA]
<i>I_p</i>	индекс пластичности [%]
<i>k</i>	коэффициент водопрпусности [m/s]
<i>M_v</i>	модул стишљивости [mPa]
<i>M_{t,max}</i>	максимална вредност торзионог момента [kNm]
<i>Na</i>	натријум
<i>O</i>	кисеоник
<i>Si</i>	силицијум
<i>s</i>	бубређе [%]
<i>t</i>	временски интервал [s]
<i>w</i>	влажност [%]
<i>w_{opt} (%)</i>	оптимална влажност [%]

wL (%)	граница течења [%]
wP (%)	граница пластичности [%]
wz	влажност при засићењу [%]
U	напон [V]
q_u	једнооксијална чврстоћа тла при притиску [kN/m ²]
δ	смичућа деформација [mm]
ρ_d	густина тла у сувом стању [kN/m ³]
$\rho_{d,max}$	максимална густина у сувом стању [kN/m ³]
ρ_w	густина воде [kN/m ³]
τ	смичући напон [kN/m ²]
τ_f	смичући напон при лому [kN/m ²]
φ	угао унутрашњег трења [°]
φ_f	угао унутрашњег трења при лому [°]
σ	нормални напон [kN/m ²]
σ_f	нормални напон при лому [kN/m ²]
$C1^*$	Сандук 1 – експериментална поставка модела са додатком креча као стабилизатора
$C2^*$	Сандук 2 – експериментална поставка модела са додатком електрофилтерског пепела као стабилизатора
$C3^*$	Сандук 3 – експериментална поставка модела са додатком магнезијум-карбоната као стабилизатора
$C1- C7$	Сандуци - експерименталне поставке модела са различитим параметрима у фази оптимизације предложене технике

Списак скраћеница

$Ca(OH)_2$	калцијум хидроксид (креч)
$CaCl_2$	калцијум хлорид
CAH	калцијум-алуминат-хидрати
CSH	калцијум-силикат-хидрати
CEC	капацитет катјонске измене
$FeCl_3$	гвожђе (III) хлорид
$FTIC$	Фоуријеова трансформациона инфрацрвена спектроскопија
UCS	опит једноаксијалне компресије
KCl	калијум-хлорид
KOH	калијум хидроксид
$MgCO_3$	магнезијум-карбонат
$Mg(OH)_2$	магнезијум-хидроксид
Na_2SiO_3	натријум-силикат (водено стакло)
SEM	скенирајућа електронска микроскопија
XRD	рендгенска дифрактометрија
XRF	рендгенска флуоресцентна спектрометрија

1. УВОД

Посматрано са геотехничког и грађевинског аспекта, тло у природном стању нема увек захтевана својства потребна за изградњу грађевинских објеката. У том смислу, код тла која својим карактеристикама не могу задовољити минималне захтеве у погледу квалитета, неопходно је спровести поступак стабилизације тла, односно побољшања одређених физичко - механичких својстава тла. Да би се изабрала адекватна техника стабилизације, неопходно је најпре правилно сагледати проблем и утврдити узрок његовог настанка. Метода стабилизације која ће дати најбоље резултате зависи од врсте тла, локације и намене објекта који ће се градити.

Технике стабилизације тла могу бити са привременим или трајним ефектима. У случају првопоменутих, ефекти побољшања својстава тла трају релативно кратко (најчешће само у фази изградње објеката, попут снижавања нивоа подземне воде или замрзавања тла), док се у случају другопоменутих ефекти одржавају дужи временски период (нпр. инјектирање, армирање, динамичко збијање тла и др.).

Појам стабилизације тла обухвата технике које се спроводе ради побољшања физичких и механичких својстава тла и које омогућују безбедну изградњу објеката различитих намена. Побољшање и стабилизација тла обухвата око 30 различитих метода третирања тла, укључујући замену материјала, хемијске промене, ојачање арматуром или геосинтетиком, дренарање, збијање вибрацијама, консолидацију, употребу електроосмозе, и друго (Phear and Harris, 2008). Међутим, опште је прихваћена ужа подела, по којој се методе и технике побољшања својстава тла могу сврстати у четири основне групе: механичко побољшање, физичко и хемијско побољшање, хидрауличко побољшање (дренирање терена) и побољшање употребом геосинтетика (Tiwari and Kumawat, 2014). Такође, многе технике се могу међусобно комбиновати, а као резултат могу настати неке нове методе које не подлежу наведеним класификацијама.

Најширу примену у грађевинској пракси имају механичка и хемијска стабилизација тла. Механичка стабилизација тла најчешће подразумева примену поступка збијања тла, али се може односити и на додавање тлу недостајућих фракција како би се постигао оптималан гранулометријски састав тла, након чега се врши збијање тла при оптималној влажности. С друге стране, хемијска стабилизација је заснована на модификацији својстава тла додавањем хемијски активних материјала (стабилизатора, реагенаса, адитива), и у зависности од типа стабилизатора, процес стабилизације може

трајати краће или дуже време. Важно је изабрати адекватан реагенс за одговарајућу врсту тла, јер успешност методе умногоне зависи од компатибилности својстава тла и изабраног реагенса. Штавише, врло је важно установити на који начин ће се тло понашати након хемијског третмана. Због тога су лабораторијска испитивања од кључног значаја када је реч о овој методи. У исто време, морају се узети у обзир и ефекти процеса на околно тло (друге слојеве у тлу), као и на околне објекте. Сходно томе, пожљиво се морају доносити одлуке о избору стабилизатора и одговарајуће дозе (њихов оптималан садржај у мешавини са тлом).

Хемијска стабилизација тла помоћу стабилизатора на бази калцијума, као што су креч и цемент, рутински се примењује у пракси током протеклих неколико деценија. Њена практична примена најзаступљенија је у путарству, јер је највећа успешност ове методе забележена при стабилизацији површинских, лако доступних слојева тла.

Повећање еколошке свести последњих година резултирало је све већом потражњом за алтернативним материјалима у улози стабилизатора, који би били погодни како са еколошког, тако и са економског становишта, као што су адитиви на бази хлорида или силиката.

Поред тога, савремено инжењерство подстиче коришћење отпадног материјала (из различитих области привреде), како у производњи грађевинских материјала, тако и при стабилизацији тла, попут електрофилтерског (летећег) пепела, каменог брашна, љуски пиринча, полипропиленских влакана, рециклираних текстилних влакана, влакана из индустрије папира и слично.

Примена технике хемијске стабилизације често није погодна за стабилизацију тла испод постојећих објеката или на већим дубинама. У таквим случајевима, када је потребно побољшати карактеристике тла на већим дубинама, чешће се примењује нека од алтернативних техника као што је замрзавање тла, хидрофрактурно инјектирање или електроосмотска консолидација електрокинетичким третманом (Alshawabkeh and Sheahan, 2003). Управо из разлога немогућности примене технике хемијске стабилизације тла на већим дубинама јавила се идеја да се ова техника искомбинује са другим техникама.

Електрокинетички третман тла је техника која се заснива на примени једносмерне струје под напоном у опсегу који је безбедан за људску употребу, да би се обезбедило електрично поље у тлу високе влажности. Цео процес одвија се уз дејство једносмерне

електричне струје, где се процесом електроосмозе врши усмерено кретање молекула воде од позитивно наелектрисане електроде (аноде) ка негативно наелектрисаној (катоди). Ова техника се у новије време успешно користи за ремедијацију контаминираних тла, где се под дејством електричног поља врши уклањање тешких метала и других штетних супстанци (Ghobadi et al., 2021). Ова техника такође има потенцијал примене у сврху стабилизације дубљих слојева у тлу, пре свега са циљем смањења његове влажности, што доводи до побољшања карактеристика и консолидације тла (Bukhary and Azam, 2023). Иако је метода поуздана и успешна, ефекти тако спроведеног третмана тла нису трајног карактера, јер са новим, обилнијим падавинама долази до поновног повећања садржаја воде у тлу и последичног смањења чврстоће тла.

Хемијска електрокинетичка стабилизација тла, која је у фокусу истраживања у оквиру ове дисертације, представља иновативну технику побољшања недовољно добрих природних карактеристика тла комбиновањем електрокинетичких процеса и хемијских реагенаса. Дисертација има за циљ сагледавање могућности примене предложене технике комбинованог хемијског и електричног третмана тла, која би се заснивала на кретању јона хемијских стабилизатора између електрода под дејством једносмерне струје, чиме се обезбеђује њихова равномернија расподела у тлу, као и ефикаснија реакција са честицама тла, што би у коначном резултовало трајним побољшањем карактеристика тла. Процес се заснива на електрофорези, електроосмози и електролизи, који омогућавају контролисано кретање јона и побољшање микроструктуре тла. Предности ове методе огледају се у њеној способности да стабилизује проблематична тла без потребе за великим ископима и заменом великих количина материјала. Ипак, изазови ове методе укључују потребу за оптимизацијом електрода и реагенаса, као и економску исплативост у зависности од обима пројекта који могу захтевати и знатну потрошњу електричне енергије. Свакако, потенцијал примене ове методе је велики.

1.1. Предмет истраживања

Проблеми који се јављају у тлу су често везани за повећање садржаја воде у њему, што за последицу има повећање порног притиска и тежине тла, а самим тим смањење смичуће чврстоће тла. Овакав развој догађаја често резултује појавом нестабилности терена.

Ситнозрна тла, попут глиновитих и прашинастих тла, најосетљивија су на стање и промену влажности. Код глиновитих тла висина капиларног пењања је највиша, док је прашинасто тло најосетљивије на дејство мраза. Из тог разлога планирано је да предметна истраживања буду усмерена на примену технике хемијске електрокинетичке стабилизације на ситнозрним земљаним материјалима, конкретно глиновитих тла, и испитивању могућности побољшања њихових геотехничких својстава овом методом.

С обзиром на све већу потребу за одрживим и ефикасним методама побољшања тла, хемијска електрокинетичка стабилизација тла представља област интензивних истраживања, са циљем да се унапреде постојеће технологије и развију енергетски ефикаснија и економски исплативија решења. Концепт хемијске електрокинетичке стабилизације тла базира се на електрокинетичком третирању тла, пропуштањем једносмерне струје кроз тло између претходно уграђених позитивно и негативно наелектрисаних електрода, анода и катода, уз додатак одговарајућих хемијских агенаса. До сада су са теоријског и практичног аспекта у великој мери утврђени засебно ефекти технике хемијске стабилизације тла, као и ефекти технике електрокинетичког третмана тла.

Хемијска стабилизација тла доприноси трајном побољшању карактеристика тла, али због начина примене може се користити само у површинским слојевима тла, што искључује њену примену код посебно важних геотехничких проблема као што су стабилизација косина, повећање носивости темељног тла, смањење влажности и смањења слегања тла испод постојећих објеката. Са друге стране, електрокинетички третман тла се може спроводити и на већим дубинама тла, али ефекти тако спроведеног третмана нису трајног карактера. Пропуштањем једносмерне струје кроз тло долази до електроосмотског кретања воде у тлу. Резултат овог процеса је смањивање влажности тла, које почиње у зони анода, а онда се шири и у околно тло, што за последицу има смањење порног притиска, пораст ефективних напона у тлу, као и побољшање физичких и механичких карактеристика тла. Предложена хемијска електрокинетичка стабилизација тла представља технику којом се превазилазе недостаци претходно

наведених поступака стабилизације тла. Наиме, техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла представља унапређење технике електрокинетичког третирања тла применом хемијских агенаса (стабилизатора), где се увођење и кретање кроз тло стабилизујућих агенаса одвија под утицајем једносмерне струје, док се сам механизам стабилизације може објаснити принципима хемијске стабилизације. Комбинација сложених електрохемијских процеса под утицајем електричног поља и уз присуство одговарајућих хемијских агенаса треба да доведе до трајног побољшања тла у погледу физичко - хемијских карактеристика, и посебно механичких особина ситнозрног тла које су од нарочитог значаја у геотехничком инжењерству. Такође, њена предност је у томе што се може применити код круцијалних геотехничких проблема као што су стабилизација косина, повећање носивости темељног тла, стабилизација терена за потребе извођења дубоких темељних ископа, тунела и других подземних објеката.

1.2. Циљеви истраживања

Циљеви истраживања у оквиру предметне дисертације су:

- Развој новог приступа и процедура у стабилизацији тла применом комбинованог хемијског и електрокинетичког третмана тла;
- Испитивање ефеката хемијског електрокинетичког третмана тла на физичке, хемијске и механичке карактеристике третираног тла;
- Испитивање ефеката хемијског електрокинетичког третмана тла применом различитих типова хемијских стабилизатора (традиционалних, алтернативних и отпадних материјала).

Основна сврха ових истраживања је утврђивање ефеката примене предложене технике стабилизације на трајно побољшање физичких и механичких својстава тла, што је од нарочитог значаја у геотехничком инжењерству, и на бази тога, процена могућности примене оваквог поступка како у превентивном деловању, тако и у решавању постојећих проблема у области грађевинарства.

1.3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе предложеног истраживања су:

- Постизање ефекта трајног побољшања физичких и механичких карактеристика тла;
- Могућност побољшања физичких и механичких карактеристика тла у дубљим слојевима применом хемијског електрокинетичког третмана;
- Могућност побољшања физичких и механичких карактеристика тла спровођењем предложеног поступка испод постојећих објеката;
- Могућност коришћења различитих хемијских стабилизатора у комбинацији са електрокинетичким третманом тла.

1.4. Примењене методе истраживања

Електрокинетичко третирање ситнозрних тла у комбинацији са хемијским стабилизаторима је током протеклог периода у скромној мери било предмет научних истраживања у свету. У њима је разматрана примена хемијских стабилизатора углавном на бази хлорида, на узорцима тла испитиваних у лабораторијским условима, претежно са аспекта утврђивања хемијских својстава тла, и без сагледавања временског ефекта у смислу контролисања постигнутости трајног побољшања својстава тла. То указује на потребу за спровођењем детаљних експерименталних истраживања са циљем бољег разумевања суштине, ефеката, ефикасности и области примене ове технологије, као и са циљем разматрања могућности примене нових агенаса који би допринели ефекту стабилизације трајног карактера, што је од елементарног значаја у геотехничком инжењерству, а самим тим и примарни циљ предложених истраживања у оквиру ове дисертације.

Планирана експериментална истраживања биће спроведена кроз низ лабораторијских испитивања глиновитог тла, при чему би се као хемијски стабилизатори у комбинацији са електрокинетичким третманом сагледале три варијанте: традиционални стабилизатори (чији ефекти применом електрокинетичке стабилизације на ситнозрна тла до сада нису довољно испитани, нарочито са аспекта физичко - механичких карактеристика тла), отпадни материјали (чији ефекти применом електрокинетичке стабилизације на ситнозрна тла до сада нису уопште испитивани), као и алтернативни материјали (чији утицај на геомеханичке карактеристике тла до сада није испитиван).

- 1) У првој фази лабораторијских испитивања најпре ће се утврдити физичко - хемијске и механичке карактеристике глиновитог тла у природном стању. Затим, у овој фази лабораторијских испитивања извршиће се механичко мешање глиновитог тла у природном стању са предвиђеним хемијским стабилизаторима. На овај начин долази до хемијске стабилизације тла, чији ефекти треба да се утврде преко промене физичких и механичких карактеристика глиновитог тла третираног хемијским стабилизаторима у односу на тло у природном стању. Добијене вредности физичких и механичких карактеристика хемијски третираног тла представљаће референтне вредности са којима ће бити упоређиване одговарајуће вредности добијене након комбинованог хемијског и електрокинетичког третмана. Дакле, ова фаза сагледава само аспект хемијске стабилизације глиновитог тла поређењем ефеката десет различитих стабилизатора (два традиционална, два отпадна и шест алтернативних материјала), са циљем одређивања оптималног садржаја сваког од њих за испитивано тло. Три стабилизатора са најбољим ефектом након фазе хемијске стабилизације тла (по један из сваке од три групације стабилизатора) биће коришћени у трећој фази испитивања.

У оквиру ове фазе паралелно ће бити спроведен и електрокинетички третман тла на експерименталним моделима у претходно припремљеним испитним сандуцима одговарајућих димензија са уграђеним глиновитим тлом. Ово испитивање има за циљ одређивање оптималне влажности тла, оптималног напона између електрода и њиховог међусобног растојања, како би у трећој фази могли бити конструисани одговарајући модели за даља испитивања.

- 2) Друга фаза лабораторијских испитивања представља спровођење истраживања предложене хемијске електрокинетичке стабилизације тла на експерименталним моделима, поређењем ефеката три стабилизатора са најбољим учинком у другој фази истраживања (по један из сваке од три разматране групације стабилизатора). У претходно припремљена три испитна сандука одговарајућих димензија уграђује се глиновито тло, а у њега се утискују шупље челичне електроде које се повезују на извор једносмерне струје. У зидовима електрода постоје отвори кроз које се врши убризгавање одговарајућег хемијског стабилизатора у тло. Вода која се током овог процеса сакупи у зони катода прикупља се у посуди, при чему је

количина прикупљене воде мера ефекта примењеног поступка у погледу дренирања тла.

Упоредо са третманом тла, репрезентативни узорци третираног тла биће узети са локација на различитим удаљеностима од анода, на различитим дубинама, као и у различитим временским интервалима након третмана са циљем испитивања дуготрајности постигнутих стабилизујућих ефеката предложене технике на својства третираног тла. Узети узорци ће бити подвргнути низу адекватних лабораторијских опита (опит директног смицања, опит триаксијалне компресије, едометарски опит, опити одређивања влажности, водопрпусности, граница конзистенције и др.) са циљем утврђивања физичко - механичких својстава тла након хемијског електрокинетичког третмана. Такође, утврдили би се и ефекти хемијског електрокинетичког третирања тла у погледу промене минералошког састава глине.

- 3) У последњој, трећој фази испитивања, стабилизатор који се буде показао као најуспешнији у трећој фази биће подвргнут детаљном испитивању, са циљем оптимизације предложене методе. У испитним сандуцима тло се третира на различите начине, комбинацијом промене влажности тла, јачине струје, као и положаја електрода унутар испитног сандука.

Дакле, ефекти хемијског електрокинетичког третмана тла биће сагледани поређењем физичко - механичких својстава глиновитог материјала у природном стању утврђених лабораторијским путем пре примене технике стабилизације са одговарајућим физичко - механичким својствима глиновитог материјала одређеним након мешања са хемијским стабилизаторима (прва фаза лабораторијских испитивања) и након комбинованог хемијског и електрокинетичког третмана (друга и трећа фаза).

Евалуација предложеног хемијског електрокинетичког третирања тла биће извршена кроз сагледавање ефеката спроведеног комбинованог третмана на побољшање физичких и механичких карактеристика испитиваног тла, као што су параметри смичуће отпорности тла (кохезија и угао унутрашњег трења), модул стишљивости и коефицијент водопрпусности. Побољшање ових параметара тла у коначном би допринело повећању фактора сигурности и тиме стабилности косине, повећању носивости темељног тла и смањењу слегања темељног тла.

2. ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ГЛИНОВИТИХ ТЛА

Глина представља полуvezани кластични седиментни материјал ситнозрнасте структуре, чије су честице ситније од 0,002 mm. Формирана је процесима таложења и коагулације колоидних раствора, а сачињена је од минерала глина као што су каолинит, монтморилонит и илит, уз присуство хидроксида гвожђа, алуминијума, мангана и органских материја.

Према чистоћи, разликују се чисте (масне) и нечисте (посне) глине, у зависности од присуства нечистоћа као што су прашина, песак, лимонит и органске материје. У геолошком смислу глине могу бити резидуалне (аукотоне, елувијалне), које настају на месту распадања примарне стене и транспортоване (алохтоне), које су пренете и таложене на удаљеним локацијама. Различити типови глина попут иловаче, грнчарске, порцуланске, уме и лапоровите глине, разликују се по садржају минерала, карбоната и органских компоненти. Глине поседују високу капиларну и субкапиларну порозност (40–60%), што условљава њихову способност значајне, али споре апсорпције воде. У сувом стању су компактне и тврде, док у додиру са водом постају пластичне и лепљиве. Имају ниску пропустљивост и запреминску тежину која варира у интервалу од 17 до 23 kN/m³.

На основу минералног састава, глине се класификују као каолинитске, монтморилонитске и илитске. Због присуства воде током постанка (формирања), минерали глине се често називају хидратисаним алумосиликатима. Њихова структура и хемијски састав подсећају на примарне минерале магматских и метаморфних стена. Под утицајем временских услова долази до трансформације примарних минерала у секундарне, које углавном чине филосиликати – минерали листасте структуре, чији су основни градивни елементи слојеви тетраедара силиката (SiO₄). Минерали глине су веома ситне честице (мање од 0,002 mm), а због својих особина, пре свега способности бубрења и измене катјона, играју кључну улогу у физичко-хемијским особинама тла. Због ових јединствених особина, минерали глине су деценијама предмет интензивног научног истраживања, посебно од увођења рендгенске дифракционе анализе 1930-их, која је омогућила детаљније проучавање њихове молекуларне структуре.

Минерали глине су један од кључних састојака тла, утичу на многе физичке и механичке особине, а њихово порекло, грађа и функције чине их изузетно важним за даља истраживања у области геотехнике.

2.1. Структура глиновитих тла

Структура глине игра значајну улогу у одређивању њених физичко - механичких карактеристика, што је често од пресудног значаја у геотехничком инжењерству. Глиновита тла састоје се од врло финих честица које поседују велику специфичну површину и јаку способност везивања воде, што директно утиче на њену чврстоћу при притиску и стишљивост.

Један од оснивача геологије, немачки научник Георгиус Агрикола (Georgius Agricola, 1494–1555), први је дефинисао глину као земљу која се у додиру са водом лако обликује, а при сушењу постаје чврста и тврда. *Gillott* (1984) је дао инжењерску дефиницију глине према којој је то тло fine текстуре са честицама изузетно малих димензија, састављено већином од хидратисаних алумосиликата помешаних с различитим примесама. У складу са терминологијом коју дефинише „*Clay Mineral Society*“, глина се описује као природни, фино-дисперзни материјал, састављен претежно од слојевитих минерала, који у присуству одређене количине воде постаје пластичан материјал, док процеси сушења или термичког третмана доводе до његове консолидације и очвршћавања. Глиновито тло у геолошком смислу може се дефинисати на три начина: (1) као природни материјал који се одликује својством пластичности; (2) природни материјал чије су честице врло ситне; (3) секундарни алумосиликат из групе филосиликата, тј. минерала глина (Churchman et al., 2006).

Глине се могу разликовати од других ситнозрних тла на основу величине зрна и минералног састава. У свим релевантним дефиницијама глине, величина честица је један од кључних параметара. Граница између прашинастог и глиновитог тла варира у зависности од научне дисциплине и инжењерских потреба. Геолози и геотехничари обично узимају величину честица од 0,002 mm (2 μ m) као граничну, односно глина је финија од прашине. Седиментолози примењују границу од 4–5 μ m, а колоидни хемичари 1 μ m (Kumari and Mohan, 2021). Према геотехничким инжењерима, разлика између прашине и глине може се направити на основу својства пластичности, одређивањем Атербергових граница. Глиновито тло карактеришу својство пластичности и кохерентности, скупљање приликом сушења, бубрење при повећању влажности и губитак воде под притиском.

Према минералном саставу могу се класификовати неколико врста глина (Ђорђевић и сар., 1991):

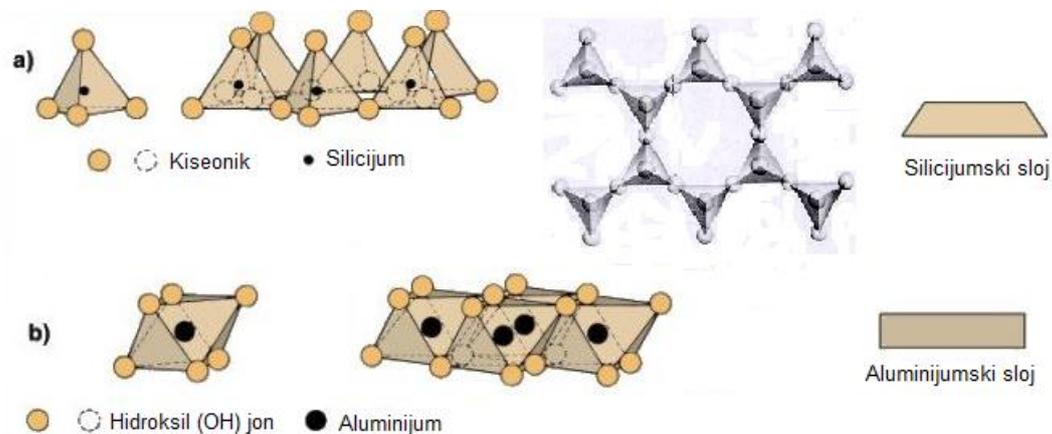
- *Каолинитске или ватросталне глине*, које су претежно изграђене од каолинита. Често настају и као продукти распадања на месту настанка, у непосредној близини матичне стене (обично гранита);
- *Монтморилонитске глине*, изграђене су претежно од монтморилонита. Имају јако изражену особину бубрења и апсорпције органских материја. Бентонитске глине су по саставу монтморилонитске глине, које настају изменама вулканског пепела - туфова. За индустријске потребе, бентонитске глине морају имати бар 80% монтморилонита. Још једна врста монтморилонитске глина је ума, или сукнарска глина. То је глина са великом способношћу за упијање масти, и некада је употребљавана у сукнарству, по чему је и добила име. Ума обично садржи повећану количину магнезијума и калцијума. Као ума се користила и свака монтморилонитска масна глина, укључујући и бентонит;
- *Иловаче* су нечисте глине које садрже песак и калцијум - карбонат. Употребљавају се у цигларској индустрији, уколико састав глина није строго прописан стандардом. Песковита иловача је нечиста глина са великим садржајем песка, као кластична компонента;
- *Лапоровита глина*, садржи калцијум - карбонат, обично 5 - 15%.

Глиновита тла највећим делом настају распадањем фелдспата у површинским условима, или дејством топлих, хидротермалних вода на поједине групе магматских стена. У глинама осим глинених минералних компоненти, могу бити присутне и различите примесе у виду других минерала, органских материја, измењивих јона и растворљивих соли. Може преовладавати само један минерал глине (мономинералне) или више минерала (полиминералне).

Зависно од броја и распореда тетраедарских и октаедарских листова унутар слојева, филосиликати се деле у различите групе. Ове групе укључују слојевите и ланчасте силикате, сесквиоксиде (оксиде са односом два атома метала на три атома кисеоника) и друге неорганске минерале. Свака од ових група има специфичну кристалну структуру, која директно утиче на понашање минерала у тлу, укључујући особине као што су бубрење, капацитет измене јона, као и стабилност у различитим условима средине.

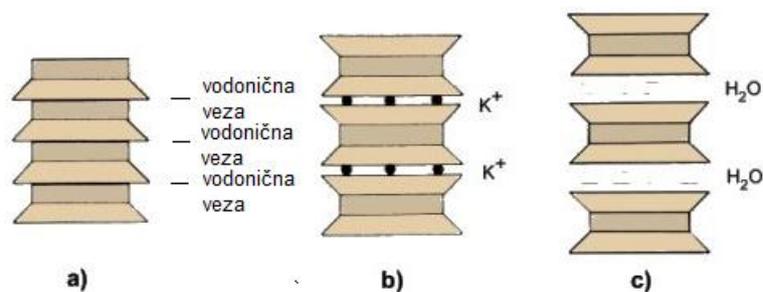
Основна јединица грађе глина су тетраедарски и октаедарски елементи - форме (Mitchell, 1993). Тетраедарски елемент се састоји од 4 атома кисеоника, који су распоређени на теменима тетраедра и атома силицијума у телу тетраедра на подједнаким

растојањима од атома кисеоника (Слика 2.1а). Тетраедри су међусобно повезани на тај начин што је сваки атом кисеоника у бази једног тетраедра заједнички за два суседна тетраедра. Шест тетраедра су повезани тако да, у основи гледано, формирају један хексаедар (Слика 2.1а). Тако повезани тетраедри чине један тетраедарски-силицијумски слој који се графички обележава трапезом (Слика 2.1а). Трапез је дакле, састављен из три реда: доња (дужа) база трапеза представља ред кисеоника, средњи ред је ред силицијума, а горња (краћа) база је ред атома кисеоника који су за себе везали по један јон водоника тако да представљају хидроксилни (OH^-) ред. Октаедарски елемент се састоји од једног атома алуминијума (он може бити понекад замењен и атомима магнезијума или гвожђа) у центру октаедра и 6 хидроксилних (OH^-) јона на теменима октаедра. Октаедри су међусобно повезани на тај начин што је сваки OH^- јон на темену октаедра заједнички за два суседна октаедра (Слика 2.1б). Тако повезани октаедри чине један октаедарски-алуминијумски слој који се графички обележава правоугаоником (Слика 2.1б). На овај начин је правоугаоник састављен из три реда: доња страница правоугаоника представља ред OH^- јона, средњи ред је ред алуминијума, а горња страница је ред OH^- јона (Meunier, 2005).



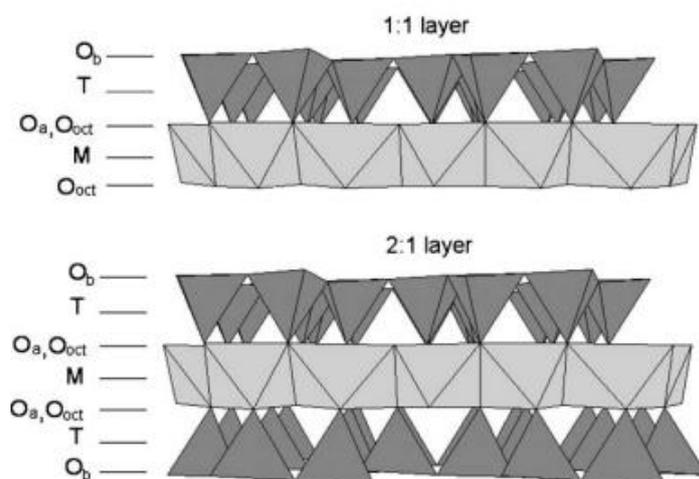
Слика 2.1 Основне јединице грађе минерала глине (Mitchell, 1993)

Глина се може класификовати у зависности од начина на који су тетраедарски и октаедарски листови спаковани у слојеве. Главне групе минерала глине присутних у тлу обухватају слојеве и ланчане силикате, сесквиоксиде и друге неорганске минерале. Комбиновањем тетраедарских и октаедарских слојева добијају се минерали глине од којих су најважнији су каолинит, илит, монтморилонит (Слика 2.2), и који ће у наставку детаљније бити обрађени.



Слика 2.2 Структура основних минерала глине: а) каолинит; б) илит;
 ц) монтморилонит (према Mitchell, 1993)

Минерали глина типа 1:1 и 1:2 представљају основну класификацију фило-силиката на основу односа између структура њихових слојева, што директно утиче на њихова физичка и хемијска својства, као и на њихову примену у грађевинарству, пољопривреди и животној средини. Ови минерали настају као резултат хемијског и физичког распада примарних силикатних минерала и чине најзначајнију компоненту глиновитих тла. Основна структурна разлика између типова 1:1 и 1:2 односи се на број тетраедарских и октаедарских слојева у појединачној јединици структуре. Модели ових слојева приказани су на слици 3. Ознаке O_a , O_b и O_{oct} се односе на тетраедарски базални, тетраедарски апкални и октаедарски ањонски положај. Ознаке М и Т означавају октаедарски, односно тетраедарски катјон (Bergaya et al., 2013).



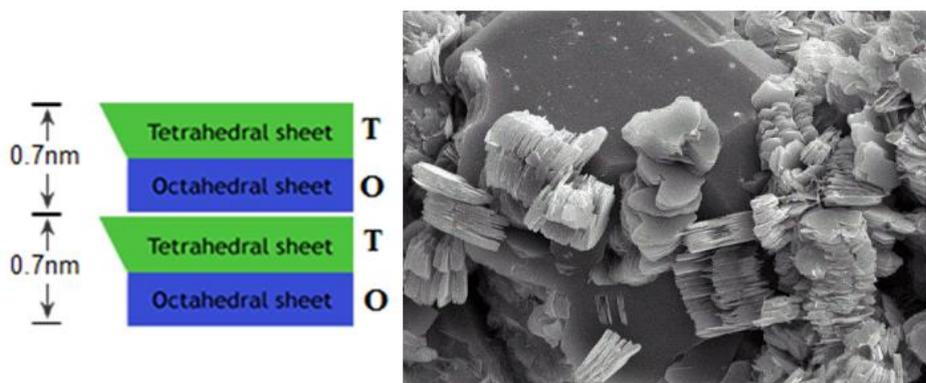
Слика 2.3 Модели слојевите структуре 1:1 и 2:1 (Randelović, 2012)

Минерали глине из каолинитске групе припадају диоктаедарској 1:1 слојевитој структури, са општом хемијском формулом $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. У ову групу спадају минерали као што су каолинит, дикит, накрит и халојзит. Структура ових минерала углавном садржи Al^{3+} јоне у октаедарским позицијама, мада могу постојати и изоморфне замене, при чему се алуминијум делимично замењује јонима као што су Mg^{2+} , Fe^{3+} , Ti^{4+}

и V^{3+} (Brigatti et al., 2006). Ове замене могу утицати на физичко-хемијска својства минерала, као и на њихово понашање у различитим инжењерским и природним условима.

Каолинит $Al_4[(OH)_8Si_4O_{10}]$ је најраспрострањенији минерал глине. Настаје преображајем фелдспата, или лискуна који су битни минерали магматских стена (гранита, кварцмонцонита, гранодиорита итд.) и метаморфних стена (гнајсева, микашиста и других стена који садрже фелдспате). Овај минерал се такође ствара и као седимент, у влажним климатским условима и у киселој средини, па се често среће у барским и језерским слатководним седиментима.

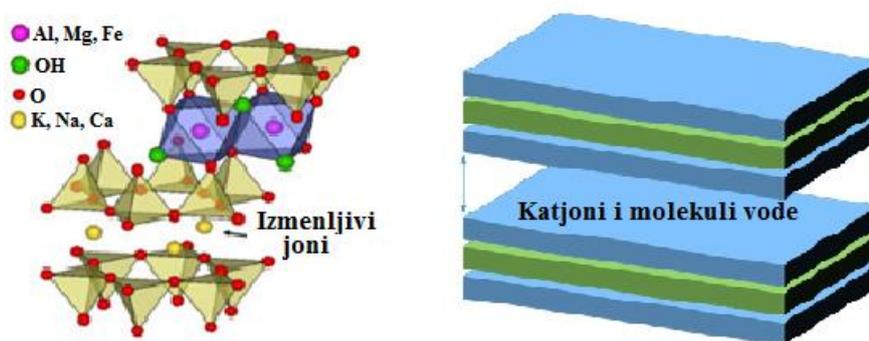
Структуру каолинита чини веза између једног тетраедарског и једног октаедарског слоја. Веза између њих је остварена тако што је кисеоник тетраедарског слоја везан за ОН јон октаедарског слоја водоничном везом (Слика 2.3). Тако је сваки слој каолинита састављен од једног тетраедарског и једног октаедарског слоја (Т-О двослојни лист) па се ова врста глине још зове и 1:1 глина. Дебљина једног таквог слоја је 7×10^{-10} m, док су друге две димензије многоструко веће. Обзиром на јаке водоничне везе између слојева кристал каолинита је стабилан, нема измене јона у кристалној решетци а при влажењу простор између слојева остаје непоремећен па овај минерал глине није склон бубрењу. Обично је кристал каолинита састављен од 100 и више слојева (Слика 2.4). Има мали капацитет измене катјона (*енг. Cation Exchange Capacity – CEC*) и малу ефективну површину ($10 - 30 \text{ m}^2/\text{g}$), јер практично има само спољну површину око слојева. Глина која у највећој мери садржи каолинит најчешће се користи у керамичкој индустрији, индустрији папира и фармацеутској индустрији (Brigatti et al., 2006).



Слика 2.4 Грађа каолинита (модификовано према Mitchell and Soga, 2005)

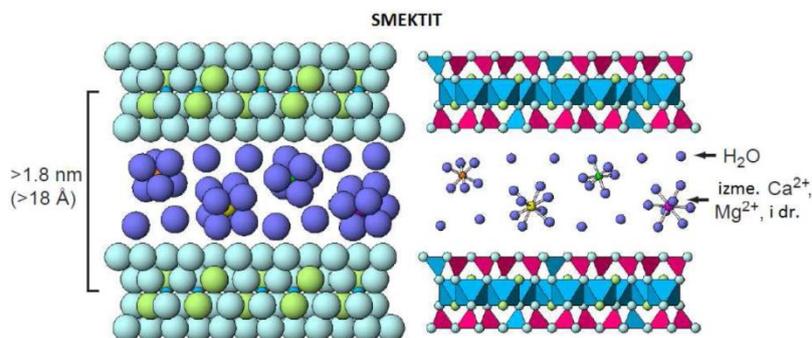
Осим двослојних постоје и глине са трослојним листастим силикатима (такозване

2:1 глине) састављене из два тетраедарска слоја који су рогљевима окренути један према другом и са OH^- јонима у шестоугаоним шупљинама (Слика 2.5). Наелектрисања слојева су неутралисана катјонима (Al^{3+} , Mg^{2+} или Fe^{2+}), који са OH^- јонима чине октаедарску структуру. Слојеви се међусобно држе Ван дер Валсовим силама чиме се објашњава веома мала чврстоћа ових минерала и њихова лака цепљивост. У неким случајевима Si^{4+} јони у тетраедарском слоју могу бити супституисани Al^{3+} јонима, због чега се јавља мањак позитивног наелектрисања, који може бити замењен другим – изменљивим јонима (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) смештеним између слојева глине. У том случају, слојеве глине повезују електростатичке силе. На основу свега може се закључити да су могућности за уграђивање других јона у структуру глинених минерала веома велике. Пре свега, може доћи до изоморфне супституције у самој решетки тетраедарског слоја јонима који имају сличан јонски радијус: Al^{3+} , Mg^{2+} или Fe^{2+} . Јони OH^- групе могу бити замењени другим јонима (Cl^- и F^-), и доћи до уграђивања других јона између појединих слојева. Трослојни листови глине се обележавају још и као Т – О – Т слојеви (Brigatti et al., 2013).



Слика 2.5 Грађа трослојних глина (www.soilsurvey.org)

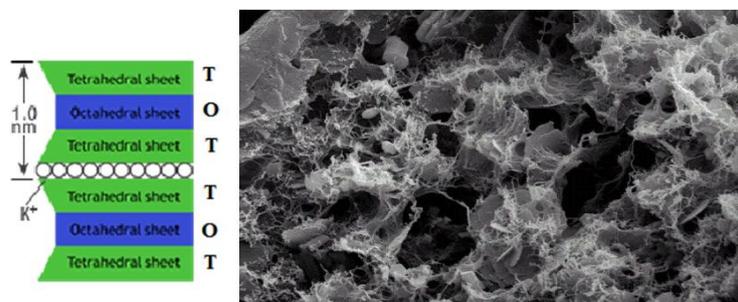
Смектити су минерали који по својој структури подсећају на талк, али се од њега разликују по израженијем степену изоморфне супституције (као што је приказано на Слици 2.6. Код пирофилита (диоктаедарски) и талка (триоктаедарски) слојеви су неутралног наелектрисања, док су код других 2:1 филосиликата као што су смектити, лискуни и хлорити, слојеви углавном негативно наелектрисани. У диоктаедарском слоју ових минерала, алуминијум се често замењује другим катјонима као што су магнезијум, гвожђе и цинк, што доводи до формирања веома слабих међуслојевских веза типа Ван дер Валсових сила (Milošević, 2016). Основна структура се састоји из два тетраедарска слоја са централним алуминијумом у октаедарском слоју (Слика 2.6).



Слика 2.6 Грађа смектита (Milošević, 2016)

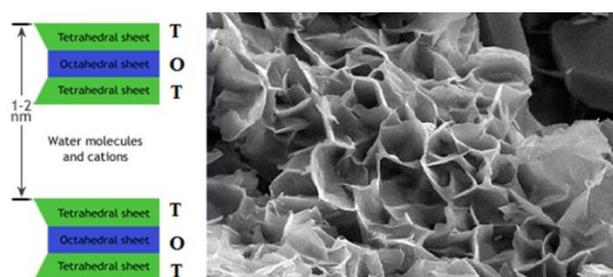
Хлорит је минерал типа 2:1 који је често заступљен у глиновитом материјалу на овим просторима. Овај минерал није експанзиван, јер је његов међуслој (простор између два слоја), усредсређен октаедарским слојем којим доминира магнезијум и који држи суседне слојеве заједно. Хлорит има величину честица, капацитет адсорпције катјона и физичка својства слична онима код ситнозрнатих лискуна. Поред наведених, као основни представници ове групе минерала глина су илит и монтморилонит.

Илит је по структури такође сличан лискунима. Настаје преображајем фелдспата, деградацијом мусковита у алкалној средини или рекристализацијом глиновитих минерала. Илит је основни састојак шкриљаца. У тетраедарским слојевима је Si^{4+} замењен са Al^{3+} јонима што проузрокује вишак електрона и високо негативно наелектрисање на површини тетраедарског слоја и привлачење неизменљивих K^+ јона. Веза негативне површине слоја са неизменљивим је слабија од водоничних веза код каолина те је због тога илит више подложен бубрењу у односу на каолинит. K^+ јоне понекад могу заменити и Ca^{2+} и Mg^{2+} јони. Сви наведени јони спречавају продирање воде између пакета глине, тако да илит спада у неекспанзивне глиновите минерале. Слојеви су сложени на начин приказан на Слици 2.7.



Слика 2.7 Грађа илита (модификовано према Mitchell and Soga, 2005)

Монтморилонит настаје површинским распадањем стена, туфова, или базичних магматских стена. Ствара се, најчешће, у алкалној средини из раствора богатих натријумом, земноалкалим и двовалентним гвожђем. Представља најважнији минерал из групе смектита. Наслаге монтморилонита настале алтерацијом базичних или неутралних туфова називају се бентонити. Монтморилонит је хидратисани алумосиликат, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times \text{H}_2\text{O}$ при чему је у трослојном (Т-О-Т) листу део Si^{4+} јона у тетраедарском слоју често је замењен Al^{3+} јонима, а део Al^{3+} јона из октаедарског слоја је замењен са Mg^{2+} и Fe^{3+} због чега је ослабљена веза између трослојних пакета (Слика 2.8). Као последица тога долази до вишка негативног наелектрисања на површинама пакета које се уравнотежава тако што у међупросторе између пакета може ући различита количина изменљивих јона (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+}) везаних са молекулима воде. Ови катјони су због слабих веза лако изменљиви, што омогућава лако продирање воде између слојева, њихово размицање и бубрење глине. Монтморилонит има велику специфичну површину и представља тзв. реактивне глине. У сувом стању везе између слојева су јаке док додавањем воде она продире између слојева па глина набубри. Има велики капацитет измене катјона, велику ефективну површину ($650 - 800 \text{ m}^2/\text{g}$) јер је унутрашња површина слојева много већа од спољне. У грађевинарству се користи код исплаке дијафрагми (даје течност чији је вискозитет неколико пута већи него код воде) и заустављање процеђивања воде у тлу, бранама и стенама. Међутим, због своје експанзивне природе, може бити веома опасан по грађевинске конструкције (Brigatti et al., 2013).



Слика 2.8 Грађа монтморилонита (модификовано према Mitchell and Soga, 2005)

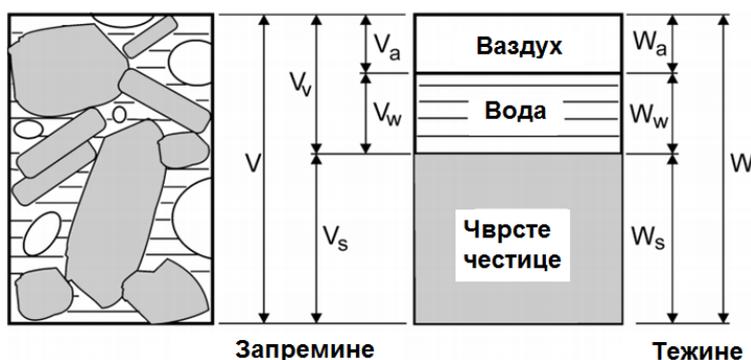
Начин на који су честице глине распоређене унутар тла такође утиче на њене особине. Ако су честице насумично распоређене у такозвану флокулисану структуру, тло ће имати већу отпорност на смицање. Са друге стране, ако су честице оријентисане паралелно, у дисперзованој структури, тло ће бити мање стабилно и подложније деформацијама под оптерећењем. Замена молекула у структури тла зависи од валанце,

релативног броја јона различитих типова, као и величина јона. Логично, мали катјони имају тенденцију да замене веће. Детаљније о потенцијалу замене јона у различитим структурама глине биће речи у наставку.

Један од најважнијих аспеката при сагледавању стабилизације глиновитог тла је његова интеракција с водом. С обзиром на то да глина има изражену способност адсорпције воде, при контакту са водом долази до промена у запремини и потенцијално кохезији самог тла. Када глиновито тло упије воду, оно бубри и доводи до смањења његове чврстоће, док се при исушивању скупља, што може изазвати пукотине и додатну нестабилност тла. Ове промене могу значајно утицати на конструкције на/у тлу или од тла, посебно ако се не предвиде одговарајуће мере стабилизације.

2.2. Физичко - механичке карактеристике глиновитих тла

Узорак тла у природном стању може да се посматра као хетерогена мешавина чврстих честица и пора (шупљина) испуњених водом или ваздухом (Слика 2.9). Тло такође може да садржи и органске и друге материје. Физичке и механичке особине тла зависе директно од интеракција ових фаза (чврсте, течне и гасовите), али и других спољашњих утицаја.



Слика 2.9 Модел тла са учешћем појединих фаза

Тло је анизотропан и хетероген материјал. Има различите особине од локације до локације и оне зависе од структуре и грађе самог тла. За одређивање физичких и механичких својстава тла користе се теренски и лабораторијски опити. У наставку ће бити укратко описане методе који се користе при испитивању физичко-механичких својстава тла, пре свега глиновитог, и то: одређивање гранулометријског састава тла (просејавање и ареометрисање), пластичност (границе консистенције), запреминска тежина, одређивање оптималне влажности, највеће густине у сувом стању и степена збијености (Прокторов опит), одређивање Калифорнијског индекса носивости (CBR

опит), бубрење, водопропусност, стишљивост (едометарски опит), порозност, кохезија и угао унутрашњег трења (опит директног смицања, триаксијални опит), једнооксијална чврстоћа при притиску и др. Поред физичких и механичких карактеристика, сагледана су и хемијска својства значајна за стабилизацију применом хемијске и електрокинетичке технике стабилизације тла.

2.2.1. Одређивање гранулометријског састава тла (просејавање и ареометрисање)

Гранулометријски састав представља расподелу величина зрна у тлу приказану у облику криве. Она изражава проценат масе појединачних фракција у односу на укупну масу узорка. Примарно се користи за класификацију крупнозрних тла, мада се на графичком приказу могу наћи подаци и за ситнозрне фракције. Поред саме криве, за опис тла често се користе и одговарајући нумерички параметри, као што су коефицијент једноличности (C_u) и коефицијент закривљености (C_c), који пружају додатне информације о распону и расподели величина честица.

У циљу одређивања гранулометријског састава–тла примењују се две основне методе. За тла са честицама већим од 0,063 mm користи се метода сејања, док се за тла са фином структуром, чија је величина честица мања од овог прага, примењује метода хидрометрисања (ареометрисања). Ове методе омогућавају прецизну анализу физичког састава тла, што је од значаја за његову инжењерску класификацију и процену понашања у различитим условима.

Метода сејања може се извршити на два начина дефинисана стандардном SRPS EN ISO 17892-4:2017, и то као мокро сејање (за тла састављена углавном од крупнозрних честица тла) и суво сејање (за тла састављена углавном од крупнозрних честица тла, која садрже занемарљиву количину прашинастих и глиновитих фракција).

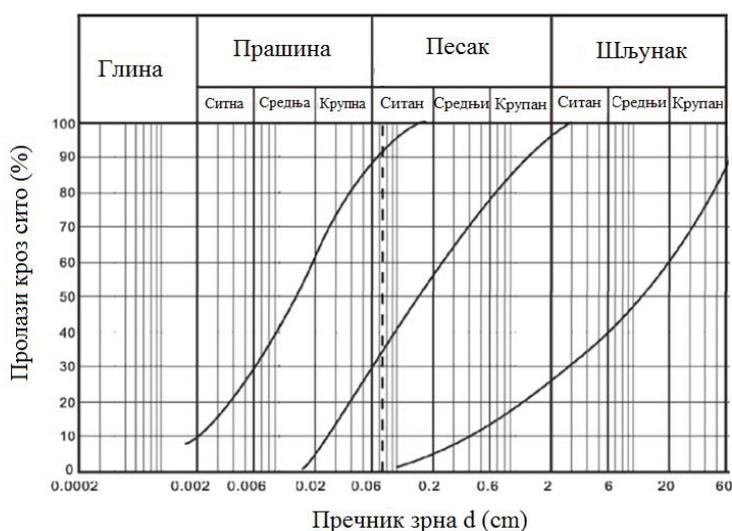
Пре самог испитивања узорак за одређивање гранулометријског састава добија се четвртањем материјала који се испитује и који се затим суши на температури од 105°C да би се добила одговарајућа количина у складу са стандардом. Затим се поступак спроводи кроз неколико корака:

- Измери се маса осушеног дела испитаног узорка тла (m_1), који се ставља у комплет сита. Сито са највећим отвором је на врху, док је испод последњег сита (са најмањим отвором) дно (сито без отвора);
- Сејање се врши ручно или механички. Свако сито се протресе тако да се материјал котрља у њему. Зрна тла се могу ручно ставити у отворе сита да би се

видело да ли ће проћи, али се не смеју гурати да прођу. Мери се маса зрна задржаних на сваком сити посебно (m_i);

- По завршетку сејања, рачуна се однос масе материјала на сваком сити (m_i) у односу на укупну почетну масу материјала (m_1) и резултат се изражава у процентима. Добијене вредности уносе се у табелу на основу које се може нацртати гранулометријска крива, која представља однос величине зрна и процентуалног учешћа на сваком сити.

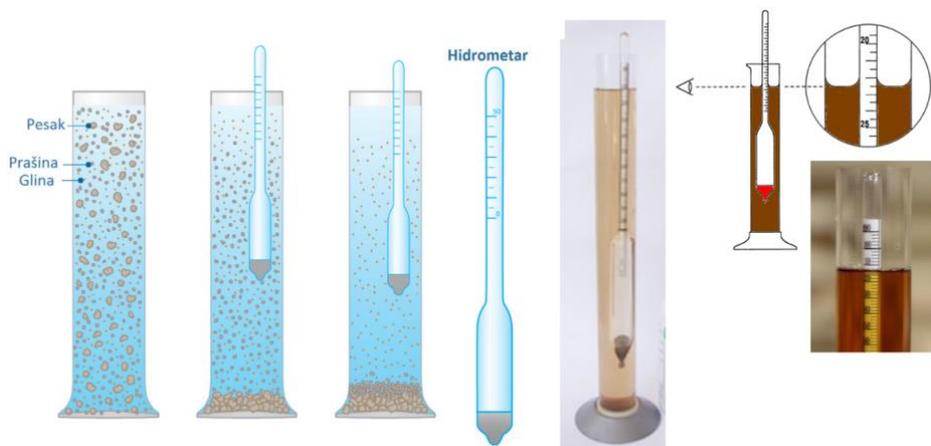
Пример дијаграма гранулометријског састава са карактеристичним кривама за прашинасто, песковито и шљунковито тло и комплет сита може се видети на Слици 2.10. Уколико се после методе сејања установи да тло садржи више од 10% ситнозрних фракција, стандардном је дефинисано да је потребно урадити и методу ареометрисања. Комбиновање методе сејања и ареометрисања омогућава добијање континуалне криве гранулометријског састава тла, почевши од најкрупнијих па до наситнијих честица тла, која се користи при класификацији тла, одређивању осетљивости тла на мраз или пројектовању филтерског слоја.



Слика 2.10 Комплет сита за методу сејања и интерпретација резултата путем гранулометријске криве

Метода хидрометрисања - За испитивање се користи део узорка чије су честице мање од 0,063 mm. Потребна сува маса дела узорка зависи од врсте тла које се испитује, за прашинаста и глиновита тла уобичајно је око 50 грама. Поступак и начин читавања може се видети на Слици 2.11. Сам поступак испитивања спроводи се кроз следеће кораке:

- Измери се сува маса дела узорка који се испитује, што представља почетну суву масу (m_0);
- Дода се 100 cm^3 дисперзивног средства пипетом у посуду са тлом. Интезивно се меша све док честице тла не буду раздвојене у суспензији. Затим се пренесе суспензија из посуде у мензуру запремине 1000 cm^3 и допуни дестилованом водом. Овако припремљена суспензија користи се за испитивање седиментације;
- Мензура са суспензијом затвори се гуменим чепом, снажно промеша, а затим спусти у водено купатило константне температуре. У недостатку воденог купатила, испитивање се врши у просторији у којој не постоји могућност великих температурних промена;
- У другу мензуру од 1000 cm^3 дода се иста количина дисперзивног средства које се користи за дисперзију честица у првој мензури и допуни дестилованом водом. Мензура се спусти у купатило поред мензуре са суспензијом. После једног сата или када се температуре суспензије и раствора са дисперзивном средством изједначе са температуром купатила, извади се мензура са дисперзивним средством, промеша се и одмах се врати у купатило. Извади се мензура са суспензијом, снажно измеша обртањем горе - доле 60 пута за 2 минута и врати у водено купатило;
- У тренутку када је мензура са суспензијом враћена у купатило, штоперица се пушта у рад и пажљиво се скидају гумени чепои са мензура. Ареометар се урони у суспензију 15 секунди пре сваког читања, до дубине мало испод његове плутајуће позиције и пусти да слободно плута;
- Еквивалентно читање ареометра изводи се у различитим временским интервалима (2, 5, 15, 45 минута, 2h, 5h и 24h) од тренутка почетка седиментације и још два пута наредних дана, уколико је то потребно. Након сваког читања, ареометар се полако извади, опере потапањем у дестиловану воду и спусти у мензуру са дисперзивним средством које је на истој температури као и суспензија.



Слика 2.11 Поступак ареометисања

2.2.2. Одређивање пластичности (Атербергове границе конзистенције)

Најчешће се ситнозрна тла не класификују на основу гранулометријског састава, већ на основу Атерберговог дијаграма пластичности. За ову врсту тла карактеристично је да се са променом влажности (w), мењају стања конзистенције, од врло тврдог до течног конзистентног стања. Тако се за класификацију ситнозрног тла, оцену стања конзистенције и као помоћни податак при оцени других физичких и механичких особина тла користе Атербергове границе конзистенције - граница течења, граница пластичности и граница скупљања. Атербергове границе представљају влажности при којима тло прелази из једног у друго стање конзистенције.

Влажност (w) се може дефинисати као однос између масе воде у узорку тла и масе сувог узорка тла. Бездимензионална је величина, али се често изражава у процентима. Влажност тла се одређује (према стандарду SRPS EN ISO 17892-1:2015) на основу најмање два мерења, а као резултат се узима средња вредност. Израчунава по следећем обрасцу:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \cdot 100 [\%] \quad (1.1)$$

где је:

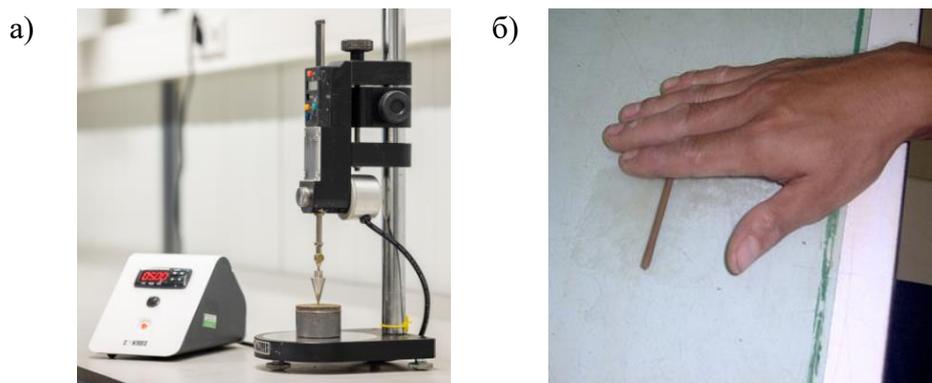
m - маса посуде у грамама;

m_1 - маса посуде са влажним узорком у грамама;

m_2 - маса посуде са сувим узорком у грамама.

Граница течења (w_L) представља садржину воде у тлу при којем ситнозрно тло прелази из пластичног у течно конзистентно стање, граница пластичности (w_P) представља садржину воде при којем ситнозрно тло прелази из пластичног у получврсто

консистентно стање, док граница скупљања (w_s) представља садржину воде при којем ситнозрно тло прелази из полуврстог у чврсто консистентно стање. За одређивање границе течења примењује се поступак помоћу падајућег конуса, у којем се конус масе 80g са углом шиљка од 30° , прислони на посуду са влажним тлом и пушта да слободно пада и продире услед сопствене тежине у узорак тла. Граница течења је постигнута када конус продре у тло 20 mm, што се читава на дијаграму "дубина утискивања (d) – влажност (w)" (Слика 2.12а), како је прописано стандардом SRPS EN ISO 17892-12:2018. Исти стандард прописује да се за одређивање границе пластичности користи поступак ручним ваљањем ваљчића влажног тла на одговарајућој подлози (Слика 2.12б). Узорак тла има влажност на граници пластичности ако се од њега ваљањем на крутој подлози може направити ваљчић пречника око 3 mm и дужине 70 mm тако да се при томе на њему местимично појављују пукотине. Ако се ваљчићи ломе при дебелини од око 3 mm, они имају влажност која одговара граници пластичности.



Слика 2.12 Поступак одређивање Атербергових граница: а) метода са падајућим конусом; б) метода ваљања ваљчића

Колоидална активност глине (или само активност) је индиректна мера специфичне површине која се може изразити емпиријским показатељем дефинисаним од стране Скемптона (Skempton, 1953) у форми обрасца:

$$A = \frac{I_p}{CF} \quad (1.2.)$$

где је:

A – колоидална активност глине;

I_p – индекс пластичности ($I_p = w_L - w_P$);

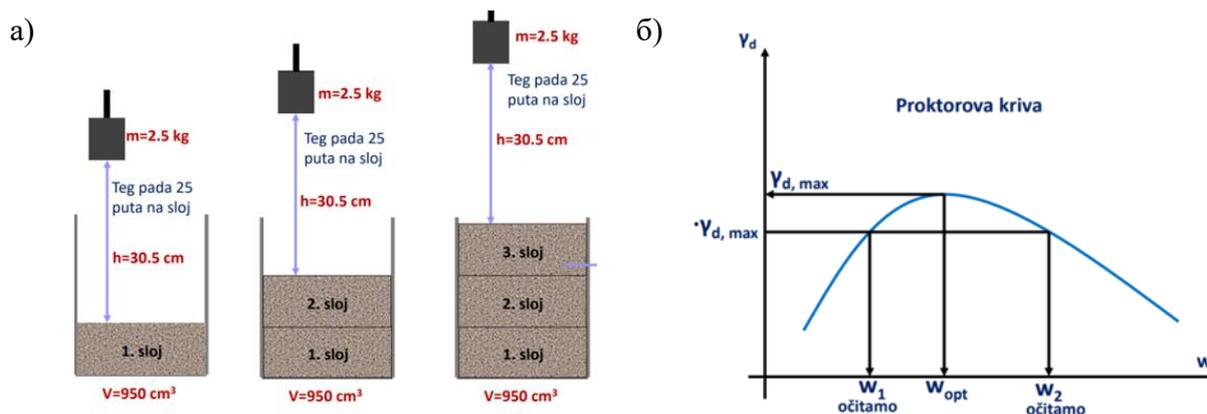
CF – процентуално учешће зрна глине у узорку.

Већу тенденцију промене запремине при промени влажности, а да притом не долази до значајније промене напона, имају тла са већом активношћу. Ово својство

зависи од минералног састава глиновитог тла, односно од специфичне површине глиновитих минерала. Уколико је $A > 0,9$ са сигурношћу се може рећи да тло садржи минерал монтморилонит. Опште прихваћена подела глиновитог тла према активности је на неактивне глине, нормалне глине и активне глине.

2.2.3. Одређивање оптималне влажности и највеће суве густине (Прокторов опит)

Прокторов опит представља стандардизовану лабораторијску методу помоћу које се испитује способност тла да се сабије, односно постигне максимална густина при оптималном садржају воде. Основна сврха овог испитивања јесте одређивање оптималне влажности која омогућава најефикасније збијање тла и максималне суве запреминске масе, односно највеће суве густине тла која се може постићи у датим условима збијања. У пракси се примењују стандардни и модификовани Прокторов опит, који се пре свега разликују у енергији збијања. За ситнозрно тло се примењује стандардни Прокторов опит. Примењује се за тло на које делује оптерећење слабијег интензитета и за мање захтевне грађевинске конструкције, попут локалних путева, насипа мањих висина и стамбених објеката ниже спратности. У овом опиту користи се тег масе 2,5 kg са висином пада од 30,5cm, при чему се тло сабија са по 25 удараца у три слоја (Слика 2.13а). Сваки слој се пажљиво сабија како би се симулирали услови збијања на терену. Након завршетка сабијања мери се запреминска маса и садржај воде, чиме се добија однос између влажности и суве густине тла. Глиновита тла, због својих честица мале величине и изражених кохезивних својстава захтевају дужу припрему и хомогенизацију пре сабијања. У глиновитом тлу влажност игра кључну улогу, јер превише воде отежава сабијање, док је премало воде недовољно за повезивање честица. Зато се мора пажљиво одредити права количина воде да би се постигао најбољи ефекат збијања. Такође, код глина може доћи до стварања грудвица, које додатно компликују сабијање и мерење густине. То се може предупредити додатним просејавањем на ситу мањег пречника него што је прописано стандардом SRPS EN 13286-2:2012. Резултати Прокторовог опита се представљају на дијаграму у облику криве која приказује зависност између влажности и суве густине. Координате вршне тачке те криве дефинишу оптималну влажност (w_{opt}), при којој се тло најбоље збија, односно највећу суву густину ($\gamma_{d,max}$) (Слика 2.13б).

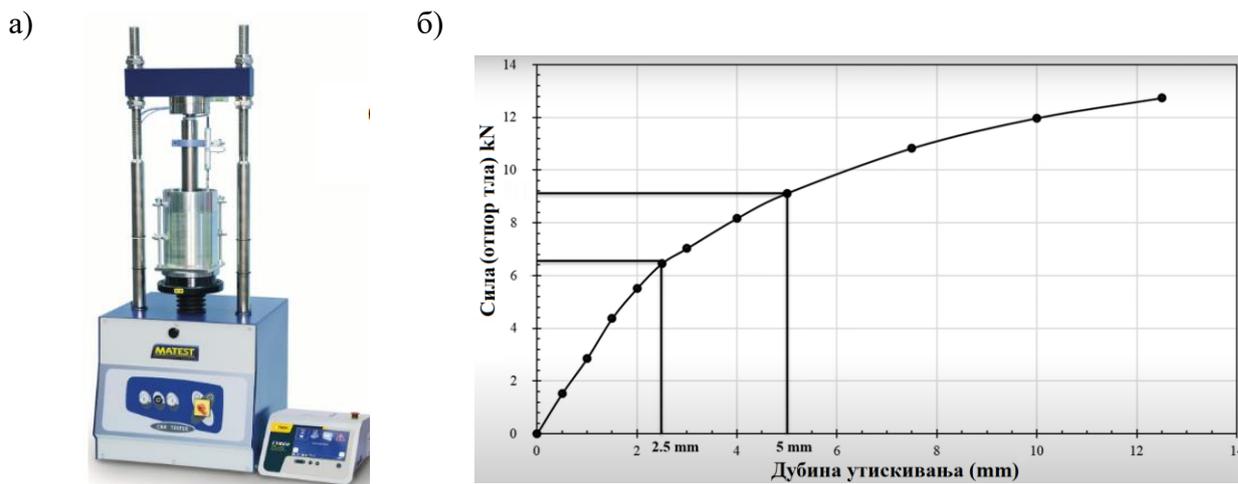


Слика 2.13 Прокторов опит: а) Збијање у слојевима; б) Дијаграм „ $w - \gamma_d$ “

2.2.4. Одређивање Калифорнијског индекса носивости и бубрења тла (CBR опит)

CBR опит се изводи према стандарду SRPS EN ISO 13286-47:2012 и на основу добијених резултата оцењује се подобност тла за уградњу у носеће слојеве при изградњи саобраћајница или других објеката. У опиту се региструје и бубрење узорка тла услед упијања воде. Испитивање се врши тако што се узорак тла уноси у цилиндричну посуду и сабија према одговарајућем поступку (у пет слојева одговарајућом енергијом збијања), затим се на површину узорка наноси вертикална сила преко клипа дефинисаног пречника, који се утискује у узорак при константној брзини пенетрације (Слика 2.14а). Измерене вредности силе при утискивању клипа 2,5 mm односно 5 mm упоређују се са референтним вредностима (Слика 2.14б) и тако се добијају две вредности CBR изражене у процентима. Виша од ових вредности усваја се као меродавна.

На основу измереног бубрења узорка тла у CBR опиту процењује се склоност тла ка повећању запремине услед упијања воде, што је типично за глиновита и експанзивна тла. Након што се тло сабије у калулу, оставља се у води током одређеног периода (обично 96 сати) и мери се вертикално померање површине узорка. Процент бубрења се добија као однос повећања висине узорка током неговања у води и почетне висине. Овај параметар је важан јер прекомерно бубрење може довести до оштећења темеља, коловозних или других конструкција. На основу резултата CBR опита добија се свеобухватна слика о понашању тла у реалним условима, што омогућава безбедније и економичније пројектовање грађевинских објеката.

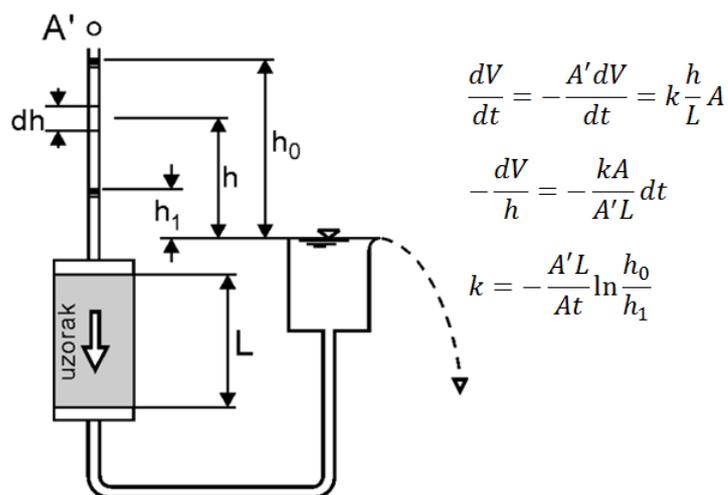


Слика 2.14 CBR опит: а) опрема за лабораторијско испитивање; б) дијаграм “Дубина утискивања клина – Отпор тла при утискивању клина” (www.matest.com.)

2.2.5. Одређивање коефицијента водопрпусности

Коефицијент водопрпусности (k) или хидраулична проводљивост користи се за опис способности тла да пропушта воду кроз своје поре. Представља један од основних параметара за оцену квалитета материјала у геотехници, с обзиром да је вода један од највећих, ако не и највећи, узрок настанка проблема. Његово одређивање је од посебне важности приликом пројектовања дренажних система, брана, депонија и других објеката где интеракција тла и воде има значајну улогу. За ситнозрна тла, нарочито глиновита, одређивање коефицијента водопрпусности представља изазов због врло малих пора и капиларних сила које утичу на проток воде. Вода се кроз таква тла креће веома споро, што захтева специфичне методе и услове испитивања. Ова испитивања се врше према стандарду SRPS EN ISO 10776:2015.

За одређивање коефицијента водопрпусности у ситнозрном тлу примењује се метода са опадајућим притиском воде (Слика 2.15). Узорак тла кружно цилиндричног облика се поставља у метални цилиндар изнад кога је у узаној стакленој цеви вода до нивоа h_0 (на почетку опита). Ова вода се током опита процеђује кроз узорак, тако да ниво воде у цеви опада, па је после одређеног временског интервала (t) измерена нова висина стуба воде h_1 . Ово смањење висине воденог стуба у цеви током времена представља основу за прорачун коефицијента водопрпусности (како је приказано на Слици 2.15).



Слика 2.15 Шема апарата за одређивање коефицијента водопропусности ситнозрног тла

За глиновита тла, због њихове ниске пропусности, испитивање може трајати више дана како би се добили поуздани подаци. Такође, потребно је обезбедити добар контакт узорка са цилиндром, јер се тако спречава процуривање воде поред узорка. Одређивање овог параметра је од кључне важности за анализу понашања тла у условима zasiћења, процену ризика од појаве подземних вода, као и за дефинисање мера заштите и дренаже на грађевинским објектима. Вредности коефицијента водопропусности се крећу у широком распону, од веома малих (за глиновита тла) до великих (за шљунковита и песковита тла), како је приказано у Табели 2.1 (Технички услови за пројектовање путева, 2012).

Табела 2.1. Коефицијент водопропусности за различите врсте тла

Категорија водопропусности	Коефицијент водопропусности k (m/s)
Велика (нпр. шљунак, песак)	$> 10^{-3}$
Средња (нпр. песковита глина)	$10^{-3} - 10^{-5}$
Мала (нпр. глина)	$10^{-5} - 10^{-7}$
Веома мала (нпр. компактна глина)	$10^{-7} - 10^{-9}$

2.2.6. Одређивање стишљивости и порозности (Опит стишљивости у едометру)

Опит у едометру је лабораторијски поступак којим се испитује стишљивост тла на основу смањења запремине узорка тла под дејством ступњевито растућег вертикалног оптерећења у условима спреченог бочног ширења. Овај опит се спроводи према стандарду SRPS EN ISO 17892-5:2017. Главни циљ опита је одређивање модула стишљивости, који је један од најважнијих параметара при пројектовању саобраћајница

и тла испод темеља. Посебно је значајно испитивање код ситнозрних тла, где је консолидација изражена и дуготрајна.

Узорак за испитивање је кружно цилиндричног облика, чији је пречник најчешће 40 mm, а висина 20 mm. Узорак се уграђује у цилиндричну металну ћелију између два порозна камена, који омогућавају дренажање воде из узорка током опита (Слика 2.16а). Поступак испитивања обухвата примену неколико узастопних нивоа вертикалног оптерећења (σ), које се постепено повећава (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa), при чему се сваки ниво задржава у трајању од 24 сата. Током тог периода, региструје се смањење висине узорка, што се евидентира као деформација (ε) услед оптерећења. Након максималног оптерећења, примењује се постепено растерећење узорка, до $\sigma = 0$. На основу измерених вредности црта се дијаграм „ $\sigma - \varepsilon$ “ (Слика 2.16б). Из тог дијаграма се одређује модул стишљивости (Mv), који представља однос промене напона и одговарајуће промене деформације у одређеном интервалу:

$$Mv = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \text{ (kPa)} \quad (1.3.)$$

где је:

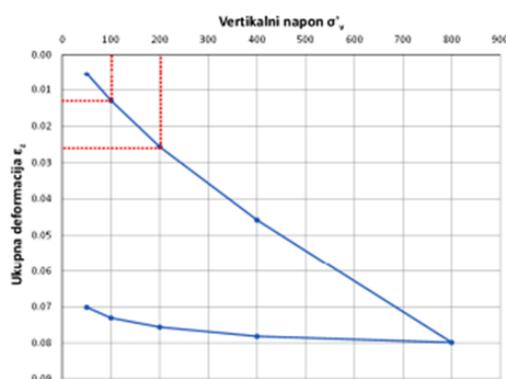
$\Delta\sigma$ — промена вертикалног напона (kPa);

$\Delta\varepsilon$ — одговарајућа релативна деформација.

а)



б)



Слика 2.16 Опит стишљивости у едометру: а) апарат за испитивање стишљивости – едометар; б) дијаграм „ $\sigma - \varepsilon$ “ (www.matest.com)

Из овог опита се поред модула стишљивости добијају и индекс стишљивости (C_c), као и индекс бубрења (C_s). Сви ови параметри су од велике важности за анализу понашања тла под дуготрајним оптерећењима и за избор адекватних мера у пројектовању темељних конструкција.

2.2.7. Одређивање параметара чврстоће тла (Опит директног смицања, триаксијални опит)

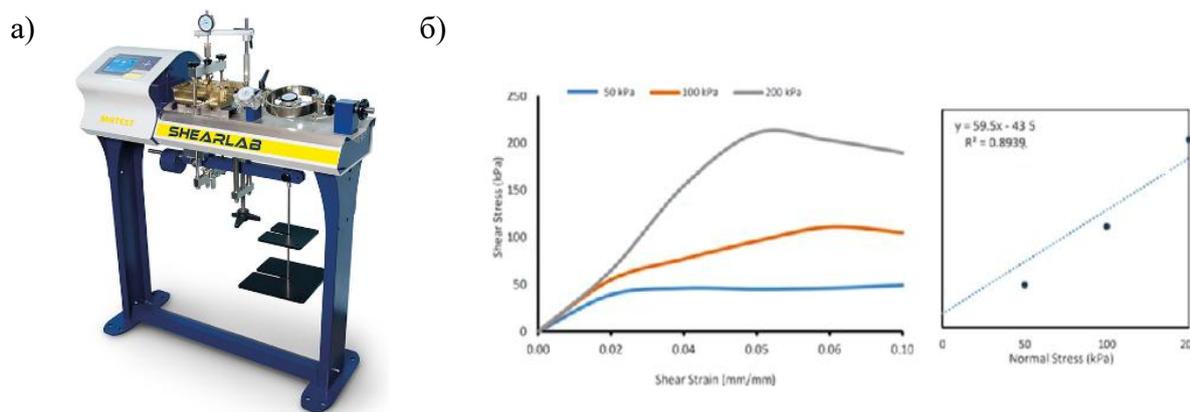
Основни параметри чврстоће тла – кохезија (c) и угао унутрашњег трења (φ) најчешће се одређују у лабораторијским опитима (опиту директног смицања и опиту триаксијалне компресије).

а) Опит директног смицања

Поступак се заснива на смицању узорка тла по унапред дефинисаној равни, тј. испитује се отпорност тла на смицање услед дејства смичућег напона, под различитим вертикалним притисцима. Комплетна процедура за извођење опита директног смицања дефинисана је стандардом SRPS EN ISO 17892-10:2019.

Узорци тла могу бити кружног или квадратног облика у основи, зависно од апарата којим се испитује. Узорци се постављају у калуп, који се састоји од горњег и доњег дела. Током опита, доња половина је фиксирана за постоље, док се горња половина калупа под дејством смичуће силе помера у хоризонталном правцу, изазивајући смицање узорка дуж контактне равни између ових двеју половина. За све време трајања опита на узорак се примењује стално вертикално оптерећење (Слика 2.17а). Испитивањем се добија максимална смичућа сила коју тло може да издржи пре лома. Опит се ради на три пробе, свака под различитим константним нормалним напонам (σ), обично 100, 200 и 400 kPa. Током опита континуално (до лома) се мере смичући напон (τ) и одговарајућа смичућа деформација (δ), па се за сваку пробу црта дијаграм „ $\delta - \tau$ “. Највеће регистроване τ - вредности за сваку пробу уносе се у дијаграм „ $\sigma - \tau$ “, који садржи три тачке (по једна за сваку пробу) кроз које се провлачи права линија чија је једначина $\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi$. Одсечак ове праве на τ -оси представља кохезију (c), а нагиб праве представља угао унутрашњег трења (φ) (Слика 2.17б).

Ова метода је посебно значајна за глиновита тла и тла која су слабије збијена, јер се код њих отпор на смицање јавља као резултат међусобног деловања честица (кохезија), као и трења између њих. Опит директног смицања је релативно једноставан за спровођење. Једно од ограничења ове методе је што се смицање одвија дуж унапред дефинисане равни, што може довести до тога да се не добије права равна лома тла као у природи. Ипак, због своје практичности, брзине извођења и једноставности и расположивости опреме, овај опит се изводи веома често.



Слика 2.17 Опит директног смицања: а) апарат за директно смицање; б) дијаграми за одређивање параметара чврстоће c и φ (www.matest.com)

б) Опит триаксијалне компресије

Опит триаксијалне компресије је један од најпоузданијих и најчешће коришћених лабораторијских тестова у геотехници за одређивање параметара чврстоће тла. Апаратура и поступак испитивања су сложени, али пружају низ предности у односу на једноставније опите, као што је опит директног смицања, јер се узорак тла испитује у условима који највише одговарају напонском стању у терену, омогућена је контрола дренаже узорка, као и мерење притиска воде у порама узорка.

Узорак облика ваљка обмотан танком гуменом мембраном поставља се на постоље ћелије од плексигласа. Оптерећење на узорак се наноси у две фазе: У првој фази ћелија се напуни водом, која затим до краја опита делује на узорак константним хидростатичким притиском σ_3 . У другој фази узорак се оптерећује аксијалним притиском σ_1 , који се повећава до лома узорка по површини најмањег отпора смицању (Слика 2.18а).

Опит се ради најмање на три пробе под различитим вредностима хидростатичког притиска σ_3 у ћелији (нпр. 100, 200 и 400 kPa или нека друга комбинација).

У зависности од дренажних услова и времена консолидације узорка могу се извдојити три типа овог опита, и то:

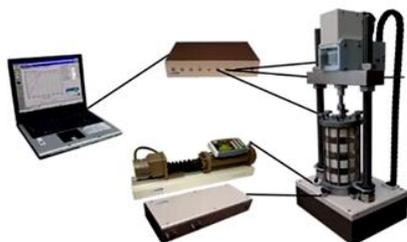
- *CU опит* (консолидовани - недренирани опит (енг. Consolidated - Undrained test)) – где се узорак у првој фази опита консолидује (дренира) под притиском σ_3 , али је у другој фази опита, при порасту девијатора напона ($\sigma_1 - \sigma_3$), спречено дренирање узорка;
- *CD опит* (консолидовани - дренирани опит (енг. Consolidated - Drained test)) – где се узорак дренира током обе фазе опита. Овај тип опита се назива и „спори опит“;

- *UU* опит (неконсолидовани - недренирани опит (енг. *Unconsolidated - Undrained test*)) – где је у обе фазе опита онемогућено дренажање воде из узорка, тј. узорак се одмах излаже порасту девијатора напона ($\sigma_1 - \sigma_3$), без претходне консолидације узорка под притиском σ_3 . Овај тип опита се назива и „брзи опит“.

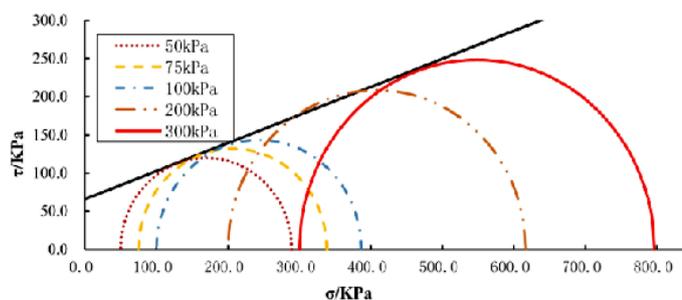
Током опита региструје се промена девијатора напона ($\sigma_1 - \sigma_3$) и аксијална деформација (ϵ_1) узорка при константној величини напона σ_3 . Резултати опита се приказују на дијаграму „ $\sigma - \tau$ “ у виду Морових кругова. Њихова заједничка тангента, чија једначина $\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\varphi$ представља Мор-Кулонов услов лома, прави одсечак на τ -оси, који означава кохезију (c), а њен нагиб означава угао унутрашњег трења (φ) (Слика 2.18б).

Предност опита триаксијалне компресије у односу на опит директног смицања је и у томе што се раван лома у узорку формира природно, под утицајем реалног стања напрезања, што резултира поузданијим резултатима. Као недостаци (мане) опита могу се навести дужи временски период потребан за припрему и извођење, као и сложенија опрема и процедура. Ипак, због своје прецизности, могућности контроле услова и применљивости у анализи стабилности насипа, темеља и косина, овај опит представља један од најмеродавнијих у геотехничком инжењерству.

а)



б)

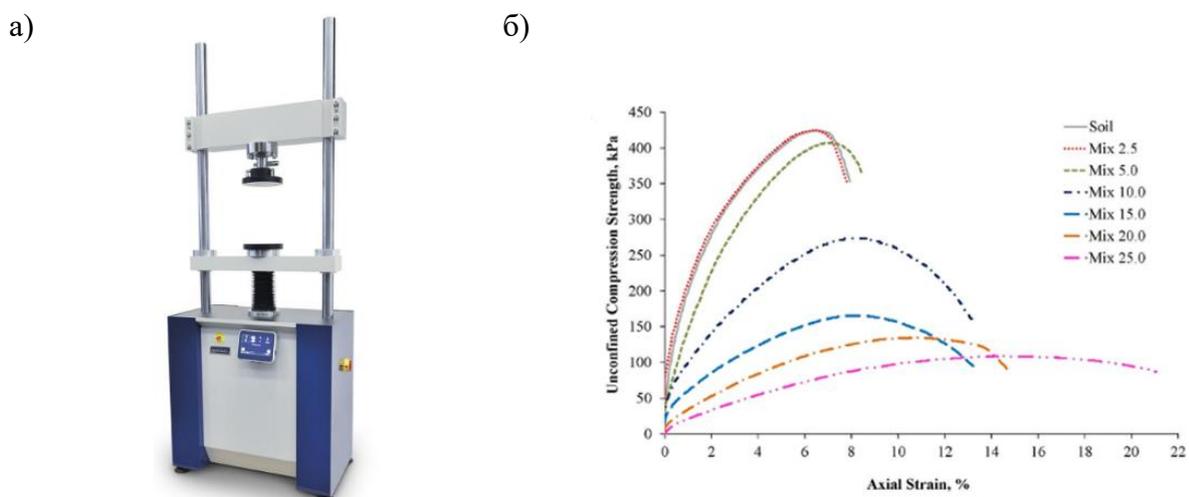


Слика 2.18 Опит триаксијалне компресије: а) апарат за триаксијалну компресију; б) дијаграми за одређивање параметара чврстоће c и φ . (www.gdsinstruments.com)

2.2.8. Одређивање једноаксијалне чврстоће при притиску

Опит једноаксијалне компресије (енг. *Unconfined Compressive Strength - UCS*) служи за одређивање отпора тла на притисак у условима са дозвољеним бочним ширењем. Ова метода се примењује за кохерентна тла. Узорак тла кружно-цилиндричног облика поставља се у апарат за испитивање (Слика 2.19а). На узорак се наноси вертикално оптерећење растућег интензитета и притом се мери његова деформација (промена висине), све до лома узорка. Вертикални притисак при коме је дошло до лома представља једноаксијалну чврстоћу узорка (q_u). Уколико је тло такве структуре да нема јасно дефинисане равни лома, као меродавна вредност q_u усваја се она која је била потребна за деформацију узорка од 20% почетне висине.

Током опита региструју се вертикални притисак (σ) и промена висине узорка (Δh), на основу чега се добија дијаграм „ $\Delta h - \sigma$ “. Са овог дијаграма се одређује једноаксијална чврстоћа тла (q_u) као максимални притисак који узорак може да поднесе пре лома (Слика 2.19б).



Слика 2.19 Опит једноаксијалне компресије: а) апарат за одређивање једноаксијалне чврстоће при притиску; б) дијаграм за одређивање једноаксијалне чврстоће

Једна од предности овог опита је његова једноставност, брзина извођења и ниска цена, али с друге стране ограничење је што се може применити искључиво на кохерентна тла, која могу задржати свој облик после уградње. За песковита или шљунковита тла ова метода није погодна.

2.3. Хемијске карактеристике глиновитог тла

Од хемијских карактеристика сагледане су оне од којих зависи успешност примене коришћених метода хемијске и електрокинетичке стабилизације. На основу досадашњих истраживања изведен је закључак да је сагледавање и сазнање о основним хемијским карактеристикама тла један од кључних корака за остваривање позитивних резултата у примени техника стабилизације (Bergaya et al., 2013; Bukhary and Azam, 2023). Карактеристике сагледане у овом раду, за потребе спровођења предложене хемијске електрокинетичке стабилизације тла, обрађене су у наставку. Сагледани су основни механизми наелектрисања на слојевима, капацитет катјонске измене, апсорпције и адсорпције, као и начини провере методе путем техника Фуријеова трансформациона инфрацрвена спектроскопија (FTIC), рендгенске флуоресцентне спектрометрије (*енг. X-ray Fluorescence - XRF*), рендгенске дифрактометрије (*енг. X-ray Diffractometry - XRD*), скенирајуће електронске микроскопије (*енг. Scanning Electron Microscopy - SEM*), провере електропроводљивости и вредности рН.

2.3.1. Наелектрисање на слојевима

Наелектрисаност слојева представља једну од кључних структурних карактеристика фиолосилката, која значајно утиче на њихово понашање у различитим физичко - хемијским процесима. Ова особина има пресудан утицај на катјонску размену, величину специфичне површине минерала, као и на способност хидратације. Управо на основу наелектрисаности слојева врши се класификација фиолосилката, при чему се разликују структуре са уравнотеженим и неуравнотеженим унутрашњим електростатским набојем унутар кристалне решетке.

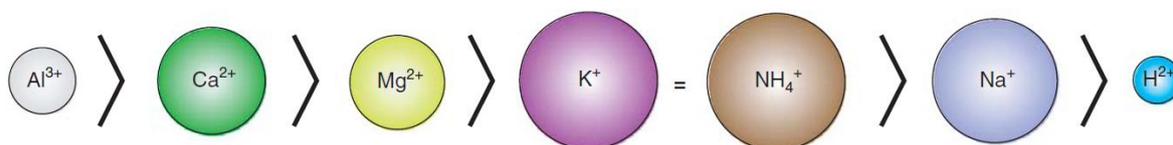
Вишак наелектрисања у структури може настати као последица несавршености у распореду јона у тетраедарским или октаедарским слојевима, али се често јавља и као резултат доприноса оба типа слојева. У том контексту, у литератури се разликују две основне категорије наелектрисаности минералних слојева: стално (непроменљиво, перманентно) и променљиво (варијабилно) наелектрисање. Стално односно непроменљиво наелектрисање настаје услед замене једног јона другим са сличним радијусом и различитим наелектрисањем, без нарушавања основне кристалне структуре. На пример, у тетраедарским слојевима чест је случај да Al^{3+} замени Si^{4+} , док у октаедарским слојевима замене укључују Mg^{2+} , Fe^{2+} или Fe^{3+} уместо Al^{3+} . Ове замене доводе до појаве негативног наелектрисања које је стабилно и не зависи од услова

животне средине. Са друге стране, променљиво наелектрисање, које зависи од рН вредности средине, јавља се као резултат хемијских реакција на површинским функционалним групама минерала. Оно може бити позитивно, услед протонизације површинских OH^- група у киселој средини, или негативно, као последица депротонизације у алкалној средини. Овај тип наелектрисања је карактеристичан за минерале са аморфним или слабо кристалисаним површинама, као што су неки хидроксиди гвожђа или алуминијума (Milošević, 2016).

Познавање природе и порекла наелектрисаности фиолосиликата има велики значај у интерпретацији геохемијског понашања глинених минерала, нарочито у контексту размене јона, адсорпције контаминаната и интеракције са органским супстанцама. Управо овакве карактеристике чине глинене минерале посебно погодним за примену у области хемијске стабилизације тла.

2.3.2. Капацитет катјонске измене

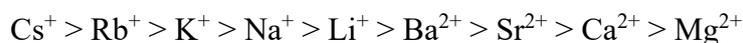
Катјонска измена представља процес у коме долази до замене катјона између две фазе унутар структуре тла које се налазе у непосредном контакту. Измењиви катјони могу бити смештени између слојева минерала глине или на њиховим ивицама (Слика 2.20), а растојање између ових јона и извора наелектрисања има кључан утицај на јачину њиховог везивања за минералне слојеве. Капацитет катјонске измене поједностављено означава способност материјала да замени апсорбоване катјоне са катјонима из раствора. Најзаступљенији катјони у процесу измене су Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ и H^+ . Селективност се смањује са порастом количине катјона, односно са повећаним засићењем површине одређеним јонима. Избор катјона који ће бити везан зависи од односа величине и наелектрисања јона — што је јон мањег радијуса, а већег наелектрисања, то је афинитет за везивање већи.



Radius	Unit	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Al^{3+}
Non-hydrated	nm	0.095	0.133	0.143	0.066	0.099	0.050
Hydrated	nm	0.360	0.330	0.330	0.430	0.410	0.480

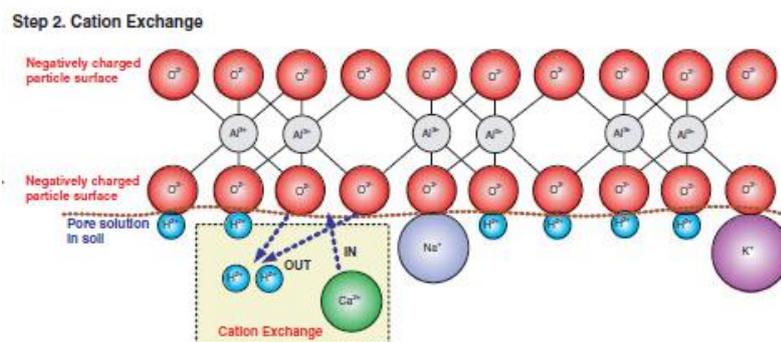
Слика 2.20 Величина елемената и способност измене (Shon et al., 2010)

При ниским вредностима рН, H^+ може заменити друге катјоне у структури (Слика 2.21). Редослед замене катјона углавном зависи од њиховог наелектрисања и јонског радијуса, па се често представља овако (Bergaya et al., 2006):



где су елементи (редом): Цезијум, Рубидијум, Калијум, Натријум, Литијум, Баријум, Стронцијум, Калцијум и Магнезијум.

Овај редослед може бити нарушен у зависности од специфичности минерала и површинских својстава. Минерали из групе глина имају тенденцију да “фиксирају” веће катјоне у својој структури, при чему веће наелектрисање слојева појачава афинитет ка тим катјонима (Bergaya et al., 2006). Тако, услед интеракције између великих алкалних јона и силикатних површина, Cs^+ се чешће уграђује у структуру у односу на мање јоне као што је Li^+ . На јонизованим површинама и ивицама, ова селективност је мање изражена (Anderson and Sposito, 1991). Најчешће се капацитет катјонске измене изражава као укупна количина измењивих катјона које глина или органска материја може да апсорбује. Постоје и други начини, на пример као број позиција за апсорпцију катјона по јединици запремине. Такође, постоји и неколико еквивалентних јединица за исказивање *CEC*, а то су: meq/100g (милиеквивалент на 100 грама узорка), mmol/100g (милимол на 100 грама узорка) и cmolc/kg (центимол наелектрисања по килограму узорка). Најчешће се користи јединица meq/100g, јер она најбоље одражава укупно наелектрисање повезано са катјонима апсорбованим на површини.



Слика 2.21 Пример замене елемената унутар слојева у глини. (Shon et al., 2010)

Капацитет катјонске измене зависи од више фактора, као што су природа самог катјона, степен кристалинитета минерала, величина честица и слично, због чега се он често изражава као опсег вредности. Grim (1953) је представио табеларни преглед капацитета катјонске измене за значајније минерале глине (Табела 2.2).

Табела 2.2 Капацитет катјонске измене код минерала из групе глина (Grim, 1953)

Минерал	Капацитет катјонске измене (meq/100g)
листуници (биотит, мусковит)	до 5
каолинит	3 – 15
халозит	5 – 10
сепиолит, палигорскит	20 – 30
илиит	10 – 40
монтморилонит	70 – 120
вермикулит	130 – 210

2.3.3. Апсорпција и адсорпција

Апсорпција представља процес у коме се једна супстанца (најчешће гас или течност) равномерно распоређује у унутрашњости друге супстанце — апсорбенса. За разлику од адсорпције, која је површински феномен, апсорпција се одвија у целој запремини апсорбенса, односно укључује продирање молекула апсорбоване супстанце у масу материјала. Ово је карактеристично за процесе у којима постоји физичко или хемијска сличност између апсорбенса и апсорбоване материје.

Апсорпција може бити физичка или хемијска. У случају физичке апсорпције, интеракције се базирају на ван дер Валсовим силама и не долази до промене у хемијском саставу супстанци. Она је углавном реверзибилна и зависи од температуре и притиска. С друге стране, код хемијске апсорпције (или хемосорпције) долази до хемијске реакције између апсорбоване супстанце и апсорбенса, често праћене стварањем нових хемијских једињења. Ова врста апсорпције је обично иреверзибилна и захтева већу енергију активирања. Типични пример апсорпције укључује процесе као што је упијање воде у поре цемента или гипса.

У контексту заштите животне средине апсорпција има важну улогу у уклањању растварача, гасова и других штетних материја. За примену у овим системима најчешће се користе течни апсорбенти (као што су органски или неоргански раствори), јер омогућавају ефикасан пренос масе и високу способност задржавања полутаната. По истом принципу могуће је у течном облику уводити хемијске стабилизаторе у тло и очекивати побољшања карактеристика тла када честице глине изреагују са стабилизаторима. Кључна разлика апсорпције у односу на адсорпцију огледа се у дубини пенетрације супстанце и типу интеракције. Док адсорпција искључиво зависи од површине и површинске структуре материјала, апсорпција захтева хомогену структуру и довољну порозност или растворљивост да би супстанца могла да продре у унутрашњост апсорбента. У неким системима, оба процеса се могу одвијати истовремено, што доводи до сорпције, која представља

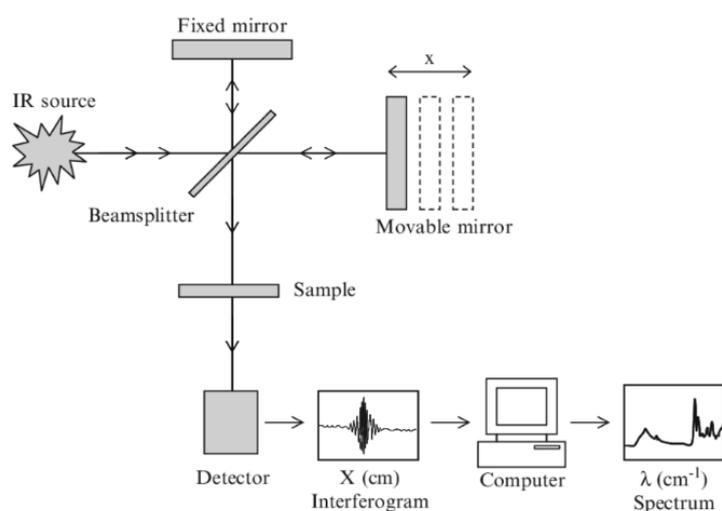
комбиновани ефекат адсорпције и апсорпције.

2.3.4. Фуријеове трансформациона инфрацрвена спектроскопија (FTIC)

У најпростијем смислу, спектроскопија представља интеракцију материје са електромагнетним зрачењем. Интеракцију инфрацрвеног (IR) зрачења са супстанцом проучава спектроскопија инфрацрвене области. Приликом интеракције са инфрацрвеним зрачењем специфичне таласне дужине молекули апсорбују енергију зрачења и претварају је у вибрациону енергију хемијских веза. Уколико се кроз простор испуњен супстанцом, у ма ком агрегатном стању, пропусти сноп инфрацрвеног зрачења разложеног на монохроматске компоненте помоћу монохроматора (призме или решетке), може се запазити да на појединим фреквенцијама долази до опадања интензитета инфрацрвеног зрачења услед селективне апсорпције од стране молекула супстанце, који са зрачењем интерагују. Енергија инфрацрвеног зрачења одговара енергији молекулских вибрација, па тако, у молекулима након апсорбовања инфрацрвеног зрачења долази до вибрационих прелаза. Да би уопште дошло до вибрационих прелаза, неопходно је да хемијска веза поседује својства електричног дипола. Међутим, процес апсорпције зрачења је строго квантиран тако да молекули апсорбују само оне фреквенције зрачења које се поклапају са фреквенцијама вибрација унутар молекула. Поређењем интензитета упадног и излазног инфрацрвеног зрачења добија се инфрацрвени спектар (IR спектар).

На основу података које пружају инфрацрвени спектри, могуће је одредити основне карактеристике молекула (присуство функционалних група), извршити квалитативну анализу органских једињења, квалитативну анализу вишеккомпонентних смеша, а ови подаци могу олакшати и изотопску анализу лаких елемената, одређивање структуре кристалних супстанци, итд. Инфрацрвена спектроскопија је широко применљива техника, јер је недеструктивна и може се користити са другим аналитичким техникама како би се добиле додатне информације о структури и саставу узорка. У овој техници често се користи спектрометар са инфрацрвеном Фуријеовом трансформацијом (*енг. Fourier Transform Infrared Spectroscopy*). Код FTIC спектрометара (Слика 2.22) компјутерски су спојене две класичне методе: интерферометрија и Фуријеова математичка трансформација. Математичка трансформација добијеног интерферограма директно даје зависност интензитета пропуштеног зрака од фреквенције, тј. IR спектар - узорка.

FTIC спектрометар има неколико предности над класичним дисперзионим спектрометром, као што су већи светлосни флуks, повећана осетљивост, висока тачност одређивања таласних дужина, висока моћ разлагања, знатно повећана брзина снимања спектра, олакшане операције са спектрима итд. Ови инструменти повезани су са рачунарима, те спектрометри са Фуријеровом трансформацијом имају побољшане могућности, како у погледу самог квалитета метода, тако и у погледу примене. Уместо посматрања сваке од фреквенција посебно, као код дисперзног спектрометра, код FTIR спектроскопије све фреквенције се испитују истовремено. Монохроматор је замењен интерферометром који дели зрак из извора, генерише оптички пут између зракова, а затим их рекомбинује како би произвео поновљене интерферентне сигнале мерене као њихова разлика у оптичком путу на детектору. Интерферометар производи интерференцијске сигнале који садрже информације створене након проласка кроз узорак. Најчешће се користи *Michelson-ов* интерферометер.



Слика 2.22 Принцип рада FTIC технике

Уређај се састоји из две цеви постављене под правим углом једна у односу на другу. У пресеку тих цеви, под углом од 90° у односу на снопове светлости, постављена је полупропусна, посребрена плоча. На крајевима цеви су два огледала. У телескопу се посматрају зраци који долазе из извора, који затим долазе до интерференционе пруге и бележи се њихов евентуални помак. Сноп светлости који пада на огледало 2 (Слика 2.22) у правцу је кретања Земље, други сноп који пада на огледало 1 (*fixed mirror*), управан је на тај правац. Растојања од плоче до огледала 1 и 2 су једнака.

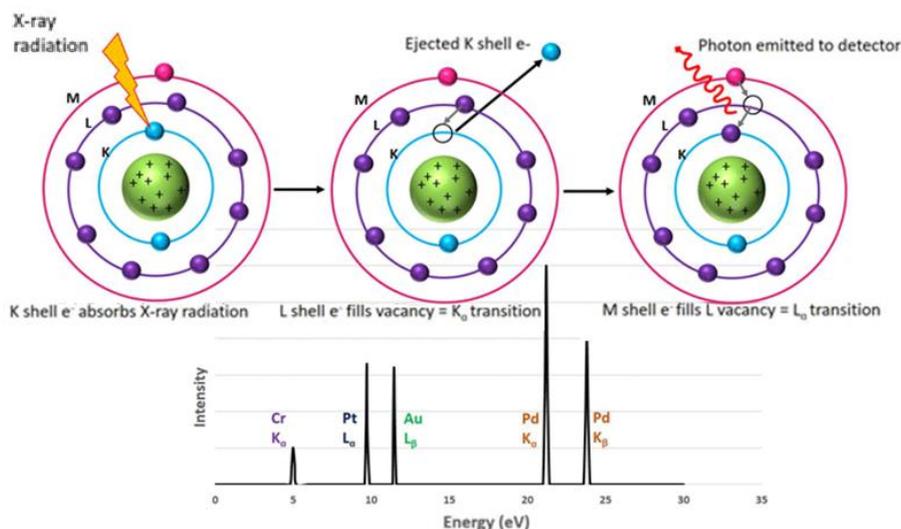
Инфрацрвени зрак који потиче од извора пролази кроз оптички раздвајач зрака (*beamsplitter*), који дели зрак у два правца – ка фиксном и ка покретном огледалу. Светлосни зраци се одбијају од оба огледала и поново укрштају, чиме настаје интерферограм – комбинација резултујућих таласа који зависи од разлике у оптичком путу. Пошто се једно од огледала континуирано помера, долази до константне промене фазе између два зрака, што омогућава снимање интерферограма као функције померања огледала. Тај комбиновани зрак затим пролази кроз испитивани узорак. У току проласка, специфичне хемијске везе у материјалу апсорбују одређене таласне дужине инфрацрвеног зрачења, што оставља карактеристичан траг у регистрованом сигналу. Након што детектор забележи интерферограм, он се подвргава Фуријеовој трансформацији у рачунару, чиме се добија коначан спектар у облику зависности апсорпције од таласног броја (израженог у cm^{-1}). FTIR техника је, захваљујући својој недеструктивности и великој прецизности, изузетно корисна у карактеризацији минерала, анализи органских и неорганских једињења, као и у мониторингу хемијских промена током процеса попут хемијске стабилизације тла.

2.3.5. Рендгенска флуоресцентне спектрометрија (XRF) и рендгенска дифрактометрија (XRD)

XRF је техника која омогућава квалитативне и квантитативне анализе готово свих елемената присутних у непознатом узорку. Анализа није деструктивна, има високу прецизност, а могуће је истовремено одредити више елемената. Основни принцип ове технике огледа се у интеракцији примарног зрачења, фотона довољно високе енергије, испитиваног материјала – узорка.

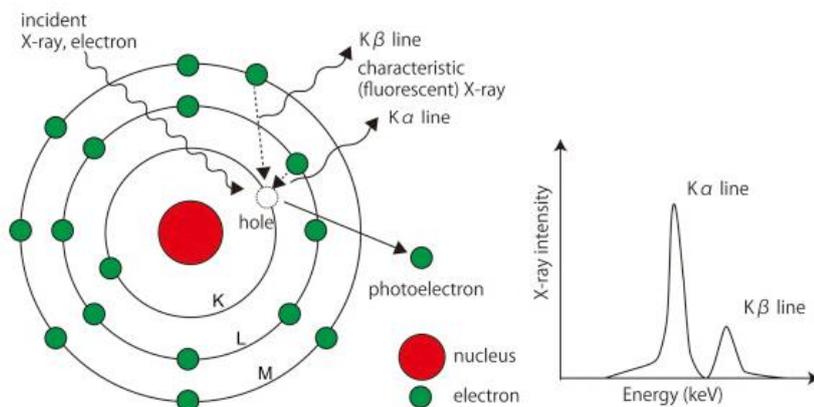
Принцип рада илустрован је на Слици 2.23. Почетно рендгенско зрачење допире до унутрашњег *K* електрона, и на тај начин изазива његово избацавање. Тиме настаје празнина на унутрашњем енергетском нивоу. Електрон *L* се спушта да би попунио ову празнину и тиме ослобађа фотон специфичне енергије (познат као *K α* прелаз). *L* празнину затим попуњава *M* електрон (*L α* прелаз) и други фотон се ослобађа у детектор са енергијом другачијом од првог. Обе енергије фотона су специфичне за елемент који се јонизује и њихова детекција доводи до графикана сличног доњем панелу. XRF спектрометри могу бити различитих облика, од ручног мобилног уређаја који ради на батерије, до лабораторијских уређаја велике снаге. Као извор примарног зрачења у лабораторијским уређајима се најчешће користи родијумска лампа, а подешавањем

параметара (напон и струја) могуће је мењати енергију примарних X зрака и прилагођавати је типу узорка. Примарни X зраци реагују са атомима у испитиваном материјалу тако што узрокују јонизацију – побуђивање електрона стварајући електронске шупљине у унутрашњим љускама (K, L, M, \dots) погођеног атома. Електрони из спољашњих љуски попуњавају ове шупљине уз емисију флуоресцентног зрачења, које је карактеристично за сваки елемент у периодном систему. Фотони настали у овом каскадном попуњавању унутрашњих атомских љуски за сваки елемент имају одређену енергију, тачно дефинисану разликом енергије између два енергетска нивоа.



Слика 2.23 Енергетски нивои електрона K, L и M у атому (Guthrie and Ferguson, 2012)

Зрачење одређене енергије карактерише се спектралним линијама које имају одговарајућу ознаку у зависности од прелаза који се одиграо (носе ознаку нивоа на који прелази (Слика 2.24), нпр. K, L, M, \dots и додатну ознаку α, β, \dots која говори томе са ког нивоа се прелаз одиграо - првог суседног, другог, трећег, ...).



Слика 2.24 Механизам карактеристичних кретања X зрака (Uo et al., 2015)

Принцип рада XRF уређаја заснива се на мерењу таласне дужине или енергије фотона и интензитета карактеристичног зрачења, емитованог из узорка. Све информације за анализу су садржане у снимљеном спектру, који је линијски спектар са свим карактеристичним линијама елемената присутних у материјалу који се анализира. Ово омогућава идентификацију присутних елемената у одређивање њихових маса или концентрација. Остале интеракције, углавном еластична и нееластична расипања примарног зрачења на узорку, одговорне су за настанак фона (позадинског - сигнала).

2.3.6. Скенирајућа електронска микроскопија (SEM)

За потребе лакшег разумевања процеса који се одвијају у тлу спроведена је и микроскопска анализа на одговарајућим узорцима помоћу скенирајућег електронског микроскопа (*енг. Scanning Electron Microscopy - SEM*). Принцип рада заснива се на употреби снопа електрона високе енергије који се фокусира на површину испитиваног узорка. Када примарни електрони ударе у површину узорка, долази до интеракције са атомима у узорку, при чему се емитују секундарни електрони, повратни електрони и карактеристично X-зрачење. Овај сигнал секундарних и повратних електрона се региструје и претвара у слику високе резолуције, која омогућава детаљну визуелизацију микроструктуре тла. Снимањем стабилованих узорака тла помоћу микроскопа могу се идентификовати промењене морфолошке карактеристике честица, начин повезаности честица, као и присуство новоформираних минералних фаза. Ове информације су од кључне важности у процени ефикасности хемијске стабилизације, јер омогућавају директан увид у микроскопске промене које су резултат пуцоланских реакција или електрохемијских процеса (Ural, 2021).

2.3.7. рН вредност и електропроводљивост тла

Вредност рН представља меру киселости или базности воденог раствора у узорку тла и један је од кључних параметара који утиче на хемијске, биолошке и инжењерске карактеристике. Са хемијске тачке гледишта, рН вредност указује на концентрацију водоникових јона (H^+) у раствору: вредности ниже од 7 указују на киселу средину, вредности изнад 7 на базну средину, док је средина са рН вредношћу 7 неутрална. У геотехничким и агрономским испитивањима, одређивање рН вредности се врши мерењем рН водене суспензије тла, обично у односу тло: вода = 1:1 или 1:2.5 по маси. Уређаји који се користе за ову сврху су најчешће дигитални рН метри са стакленом

електродом, која се урања у припремљени узорак.

Електропроводљивост тла представља способност порне воде и растворених јона да преносе електричну струју, и директно је повезана са присуством растворених соли, врстом и концентрацијом катјона и анјона, као и са температуром и влажношћу тла. У контексту стабилизације тла, висока електропроводљивост омогућава ефикаснији пренос јона кроз поре тла, што је од посебне важности када се у тло уводе реагенси. Код електрокинетичког третмана, електрично поље индукује појаве као што су електроосмоса, електрофореза и миграција јона, чиме се убрзава расподела стабилизатора и омогућава боља контрола хемијских реакција унутар матрице тла. Ако тло има ниску електропроводљивост, ефикасност ових процеса се значајно смањује, па је у таквим условима неопходно применити додатне мере као што су повећање концентрације електролита или претходна консолидација тла. Мерење електропроводљивости тла има примену у праћењу миграције потенцијално штетних јона, као што су тешки метали, нарочито у условима где се врши ремедијација контаминираних тла уз примену електричних поља. У том контексту, електропроводљивост тла има двоструки значај – као дијагностички параметар и као фактор који директно утиче на ефикасност процеса стабилизације тла.

3. ТЕХНИКЕ СТАБИЛИЗАЦИЈЕ ТЛА

Третман тла, у области геотехнике, представља скуп инжењерских поступака којима се модификују физичко - механичке особине природног тла у циљу повећања његове подобности за употребу у грађевинске сврхе. У пракси се ови третмани могу дефинисати као побољшање тла и/или стабилизација тла. Ове методе се често примењују у припреми терена или материјала за коришћење (нпр. израда насипа) или трајног решавања проблема код природно нестабилног тла (нпр. санација клизишта).

У литератури се термин побољшање тла може корисити независно од процеса стабилизације тла. Побољшање тла подразумева привремено унапређење особина тла, са циљем да се тло припреми за даљу обраду и изградњу. Овим поступком се најчешће смањује садржај воде (влажност), редукује пластичност и повећава тренутна чврстоћа тла. Резултат побољшања је тло које се може лакше третирати стандардном механизацијом за земљане радове, или се збијати у слојевима до потребне вредности модула стишљивости, као и да се користи као подлога за кретање грађевинских машина и наношење накнадних слојева доњег и горњег строја саобраћајница. Електрокинетички третман тла је један од поступака који се може користи у сврху побољшања тла како би тренутно дошло до смањења влажности у тлу. Том приликом постиже се повећање рН вредности, флокулација честица и смањење пластичности тла. Овим се ствара основа за накнадни третман тла другим материјалима који имају за циљ трајну стабилизацију.

Са друге стране, стабилизација тла представља дугорочни поступак који трајно мења структуру тла, чиме се обезбеђује знатно већа отпорност на спољашња оптерећења, климатске услове и дејство воде и мрза. У овом процесу, додавањем везива тлу долази до хемијских реакција између реагенаса и минерала у тлу, чиме се формирају нове, стабилније структуре. Примењује се у пројектима изградње путева, насипа, индустријских платоа и других инфраструктурних објеката, где се захтева израда поуздане и дуготрајне подлоге.

Развој технике хемијске стабилизације тла представља дугогодишњи инжењерски и научни процес који је еволуирао од коришћења традиционалних материјала до савремених адитива попут геополимера, биополимера или наноматеријала (Bukhary and Azam, 2023). Основни циљ овог процеса је побољшање физичко - механичких својстава тла, као што су повећање чврстоће и смањење стишљивости и

водопропусности, што омогућава безбедну изградњу инфраструктуре на природно нестабилним подлогама.

Посматрано кроз историју, промена метода геотехничких мелиорација прати и промену друштва у целини, напретком у научном, али у неку руку и у уметничком смислу. Од употребе сламе као испуне у мешавини са земљом (блатом) током старих римских цивилизација, као и употребе слонова за збијање земљаних брана током раних азијских цивилизација, па све до данашњих техника ојачања тла употребом геосинтетика, електрокинетике и термичке модификације тла, може се закључити да је ова грана геотехнике у корак пратила напредак цивилизације.

Стабилизација тла подразумева груписање честица тла што директно утиче на модификовану структуру и текстуру тла и омогућава постизање побољшане чврстоће тла (Rahmat et al., 2018). Током година, иако су се развиле многе технике стабилизације тла, оне се могу грубо сврстати у две групе, тј. механичку и хемијску стабилизацију (Estabragh et al., 2014). Механичка или физичка стабилизација укључује збијање, претходно влажење, армирање или електрокинетички третман, док се хемијска стабилизација постиже додавањем материјала у тло који трајно мењају њену структуру.

Први трагови указују на то да се механичко збијање тла вршило пре око 6000 година, у Кини, коришћењем дрвених алата. Касније су коришћене различите врсте набијача, од камених до металних. Историјски гледано, за механичку стабилизацију тла може се рећи да је основна техника стабилизације. Механичким збијањем тла се смањује влажност тла, односно вода (течност) се истискује употребом спољашње силе. Самим тим, смањује се порозност тла, а тако и могућност да се вода врати у третирани простор. Повећањем густине тла уједно се повећава и њена смичућа чврстоћа (Andrus and Chung, 1995). У Јапану, граду Кобе, локације тла које су претходно третиране збијањем показале су се значајно бољим од локација околних подручја током разарајућег земљотреса 1995. године. Слично томе, током земљотреса у Калифорнији 1989. године, неколико локација тла претходно третираних техникама очвршћавања тла претрпело је далеко мању штету од околних места (Elias et al., 2004). У случају физичке стабилизације, карактеристике тла се побољшавају без промене хемијског састава, док у случају хемијске стабилизације, реакције се дешавају у структури тла што доводи до бољег везивања и стабилности (Brigatti et al, 2013). Са развојем технологије методе су се унапређивале, а такође,

откривене су и бројне нове технике. Један од најважнијих критеријума приликом избора технике стабилизације тла је хемијски састав тла. Песковита и глиновита тла понашају се различито на терену при третману истом методом. Песковита тла претежно имају већу чврстоћу, али имају недостатак кохезије и самим тим и мању везивну моћ између зрна. Као таква, могу се лако испирати са нестабилних падина. Са друге стране, глиновита тла садрже ситније честице и поседују довољну везивну силу између зрна, али им недостаје чврстоћа на смицање, посебно када су засићена водом. Стога је присуство воде проблематично у случају глиновитих тла, што ствара велике проблеме у геотехничкој пракси.

Глиновита тла представљала су један од најинтензивније проучаваних проблема у области геотехничког инжењерства, услед њихове склоности бубрењу и појави нестабилности. Још 1930-их година, великани у области геотехнике као што су *Casagrande* (1932) и *Simpson* (1934) започели су анализу структуре глине и њеног утицаја на темеље грађевинских објеката и саобраћајнице. Са развојем грађевинских наука у XX веку, посебно након Другог светског рата, стабилизација тла почиње све више да се примењује у пракси. Због велике потражње за адекватним простором за градњу, али и све строжим и захтевнијим критеријумима, почело се са адаптацијом и коришћењем постојећег, локалног тла. До тада се стварање потребних услова за градњу изводило кроз замену (делимичну или потпуну) и модификацију тла које у природним условима није било одговарајућих физичко - механичких карактеристика.

Крајем 1950-их и током 1960-их година, развијају се лабораторијске методе за праћење ефеката стабилизатора, као и стандардизовани опити. У том периоду посебно су значајна истраживања *Grim-a*, (1953) која су пружила увид у минералогiju и колоидну активност глиновитих тла. Након тога, уследио је развој методологије за процену бубрења (McDowell, 1959). Ипак, као основа за даљи развој ове области може се сматрати извештај Одбора за истраживање грађевинарства - BRAB-a (*Building Research Advisory Board*, 1968) који је означио прекретницу у дефинисању критеријума за пројектовање на глиновитом тлу. Данас, сва ова претходно наведена достигнућа представљају темељ за савремене инжењерске приступе у стабилизацији и пројектовању.

Период од 1970-их до краја 1980-их година обележио је напредак у дефинисању негативних утицаја који вода ствара у тлу, пре свега кроз упијање и бубрење. Истичу

се истраживачи попут *Chen*-а (1973) и *Lytton*-а (1997), који су развили нове концепте и инструменталне методе за поуздано мерење различитих параметара у лабораторијским и теренским условима (Petry and Little, 2002). Крајем XX и у XXI веку технике стабилизације тла бележе значајан напредак, како у погледу примене нових материјала, тако и у разумевању хемијских реакција које побољшавају чврстоћу и дуготрајност тла. Једно од кључних достигнућа је шира примена отпадних материјала као што су летећи пепео (електрофилтерски), шљака из високих пећи, рециклирани материјали попут бетона, цигли и гипса, као и разни други индустријски нуспроизводи (Rahmat et al., 2011; Kulkarni and Ranadive, 2022). Ови материјали се користе као поуздана алтернатива традиционалним стабилизаторима, попут креча и цемента, чиме се смањује укупни утицај на животну средину. Истичу се истраживања која су спровели *Ferguson* (1993), *Mackiewicz* (2005), *Ramadas et al.* (2012), а код нас *Vukićević et al.*, (2015, 2019). Примена нано-материјала у стабилизацији тла представља један од револуционарних приступа. Пре њих појавили су се геополимери и геотекстили, који и данас имају широку примену у многим гранама грађевинарства, а нарочито у геотехници при изградњи саобраћајница. Такође, употреба ензимских стабилизатора добија на популарности (Renjith et al., 2020). Ови органски реагенси утичу на хемијску "реорганизацију" честица тла, смањујући њихову склоност ка упијању воде, чиме се повећава стабилност тла у различитим климатским условима.

Уз савремени мониторинг попут бројних *in situ* мерења (теренска мерења на лицу места) и дигиталних сензора, могуће је прецизније пратити и контролисати ефекте техника стабилизације тла током времена. Развој технике хемијске стабилизације тла представља пример како инжењерска пракса еволуира у складу са напретком научних сазнања и потребама грађевинске индустрије. Од традиционалних метода до напредних технологија које користе нано-честице и еколошки прихватљиве материјале, ова техника наставља да игра веома значајну улогу у савременом грађевинарству.

3.1. Хемијска стабилизација тла

3.1.1. Развој технике хемијске стабилизације тла

Први облици хемијске стабилизације тла потичу још из античких времена, када су стари Египћани и Римљани користили креч и вулкански пепео за побољшање својстава тла на градилиштима. У XIX веку, са процесом индустријализације, почело је

систематско додавање гашеног креча у глиновито тло ради побољшања физичко - механичких карактеристика и смањења пластичности тла. Најранија документована употреба креча као грађевинског материјала датира из периода око 4000. године пре нове ере, када је коришћен у Египту за малтерисање пирамида. Такође, постоје записи о примени креча у изградњи путева у Римском царству, када је креч мешан са глиновитим тлом да би се добило тло које је имало знатно већу чврстоћу, као и при справљању малтера у том периоду. Иако Римљани нису у потпуности разумели својства хидрауличног креча, знали су да је користан приликом грађења, па су додавали пуцолане као што су уситњена керамика, цигла и вулкански туф. Након што су римски војни инжењери усавршили кречни малтер, Грци су поново почели са његовим коришћењем, пре свега приликом обнове византијских утврђења после инвазија у периоду од V до IX века. Зидови су често премазивани кречним малтером ради заштите од воде. Такви примери се налазе широм Грчке, Балкана и Мале Азије.

Осим на тлу Европе, креч се од давнина користио и у другим деловима света. Савремена испитивања показала су да је креч коришћен при изградњи кинеског зида, нарочито у фазама ојачања после његовог првог рушења. Мешавина кречњачке прашине са тлом коришћена је у Јужној Америци у периоду Инка, да би се ојачало тло за потребе изградње велелепних грађевина, као и у областима Месопотамије (област Ура и Вавилонa), где је природно тло имало слабије карактеристике од потребних (Carran et al., 2013). Такође, постоје сазнања о употреби различитих додатака широм света са циљем побољшања тла, било у фази грађења грађења или у фази санације објеката различите намене.

Проналазак нових материјала омогућио је изградњу већих и сигурнијих објеката. Често је један од разлога оштећења конструкције био неадекватно припремљен терен за градњу, па је из тог разлога све више пажње посвећено управо том проблему. С обзиром на мултидисциплинарност проблема, средином XX века стручњаци из различитих области почели су да истражују како да побољшају особине глиновитог тла. *Barshad* (1950) је проучавао како различити јони унутар глине утичу на њено бубрење, док су други аутори (*Allison et al.*, 1953) спровели истраживања на пољу везивања хемијских елемената из стабилизатора за минерале глине током процеса хемијске стабилизације. У том периоду, у пракси су почеле комерцијално да се користе методе на бази додавања креча и цемента (*Jones*, 1958) како би се ублажила неповољна својства глине. По први пут је коришћена стабилизација тла помоћу креча и летећег пепела (*McDowell*, 1959). У

том периоду, бројни инжењери (Hilt and Davidson, 1960) изучавали су механизам по коме се дешава везивање креча за глину, и на бази ових истраживања јавила се потреба за сагледавањем и других материјала као стабилизатора. Уочено је да време неговања тла после третмана повољно утиче на постизање боље збијености тла (Mitchell and Hooper, 1961). Једно од испитивања које је међу првима указало на значај мерења промене рН вредности тла током хемијске стабилизације тла кречом спровели су *Eades and Grim* (1963), које се и дан данас сматра релевантним у погледу одређивања оптималне количине стабилизатора у мешавини са тлом.

Током 1970-их година дошло је до значајног напретка у области хемијске стабилизације, нарочито у истраживањима која су превазилазила употребу сада већ традиционалних стабилизатора. Значајну улогу у овом развоју одиграли су минералози (Carroll and Starkey, 1971), који су објавивљивали резултате истраживања о реактивности глиненых минерала са киселинама и базама. Ово истраживање је отворило врата примени различитих хемијских агенаса у побољшању особина глина. Појавила су се истраживања примене електроосмозе за побољшање глиновите подлоге на ауто-путевима (O’Vannon et al., 1976), што је у то време представљало иновативну идеју.

Упоредо са експанзивним развојем грађевинарства и све већим издвајањима финансијских средстава за изградњу нових објеката, све чешће се указивала потреба за издвајањима значајних средстава и за потребе одржавања постојећих објеката. Трошкови реконструкција и одржавања понекад су чак премашивали и трошкове саме изградње објеката. Штета по грађевинске објекте настала као последица скупљања и бубрења глиновитог тла могла премашити комбиноване годишње губитке од природних катастрофа као што су земљотрес, поплаве, торнада и урагани (Jones and Holtz, 1973).

Иако је примарно цемент коришћен у сврху прављена бетона, почео је да се широко примењује и у другим гранама грађевинарства, па тако и при решавању геотехничких порблема. Наиме, захваљујући појави ефикасних ротирајућих машина за мешање, цемент је успешно коришћен у сврху побољшања својстава глина високе пластичности, што до тада није било уобичајено. Крајем 1970-их година, инжењери су уобличили смернице за технику стабилизације тла, које су нашле примену широм света. Основна идеја ових смерница била је избор одговарајућег стабилизатора тла на основу индекса пластичности глиновитог тла и процента честица које пролазе кроз сито Ø200 mm. Систем је потврђен и каснијим истраживањима у лабораторији, а данас је развијен у форми техничког упутства (Little and Nair., 2009). Такође, вршена је анализа

краткорочних промена у особинама тла након убризгавања мешавине креча и летећег пепела у тло (Petry et al., 1982). Овај приступ је додатно унапређен израдом приручника за потребе *Националне асоцијације за креч Сједињених Америчких држава и Канаде*. Такође, употреба шљаке (као индустријског нуспроизвода), нарочито у комбинацији са портланд цементом, добила је све већу улогу. Иако глина сама по себи делује као пуцолан, неке глине имају ниску реактивност са кречом, те се додавањем пуцоланских материјала постиже виша вредност чврстоће глине.

Упоредо са све распрострањенијом применом, појавиле су и прве озбиљне критике на рачун технике хемијске стабилизације тла (Mitchell, 1986). Кроз детаљне анализе, била је извесна могућност настанка проблема услед занемаривања сагледавања геохемијских услова тла за потребе стабилизације. Упозорења од стране бројних инжењера подржана су обимном студијом *Hunter-a*, (1988), који је детаљно анализирао механизам сулфатне експанзије код стабилизваних тла. Оба истраживања су дала осврт и на неуспешне примере из праксе у погледу примене ове технике.

Сазнања о стабилизацији глиновитих тла систематизована су у књизи коју су објавили (Nelson and Miller, 1997). У том периоду по први пут се јавила идеја о мерењу електропроводљивости тла, као битног аспекта у стабилизацији тла (Bredenkamp and Lytton, 1995). Поједини аутори (Addison and Petry, 1998) су истраживали аспект оптимизације мешавине више различитих агенаса у мешавини са глиновитим тлом ради контроле експанзивног понашања глина. Почели су да се користе и агенси на бази водоничних јона, али су у стручној јавности постојале подељене оцене о њиховој ефикасности. Геомембране су почеле да се примењују са циљем контроле влажности и стабилизације тла. Методе као што су уграђивање геомембранских материјала у комбинацији са хемијском стабилизацијом додатно су се развијале и почеле често да се примењују и у XXI веку.

Почетком новог миленијума, осим физичких, велика пажња посвећена је сагледавању и хемијских и минералošких својстава тла. Хемијска својства обухватају капацитет катјонске измене (енг. *Cation Exchange Capacity - CEC*) (Mitchell and Soga, 2005) и специфичну површину (енг. *Specific Surface Area*) (Chittoori and Puppala, 2011). Као стандардне технике за одређивање хемијских минеролошких својстава у минерологији прихваћене су рендгенска дифракција (*XRD*), скенирајућа електронска микроскопија (*SEM*), диференцијална термичка анализа (енг. *Differential Thermal Analysis - DTA*) и тест адсорпције боје. Међутим, најлакши начин за дефинисање

експанзивног тла на терену је одређивање његовог индекса слободног бубрења (Asuri and Keshavamurthy, 2016).

Хемијска теорија на бази које се интерпретира реакција између стабилизатора минерала глине је и даље јако сложена. Као што је претходно већ поменуто, примарни фактори укључују катјонску размену, флокулацију и агломерацију, пуцоланску реакцију и карбонизацију. Међутим, механизми реакције могу се на основу деловања при стабилизацији класификовати у две различите групе: модификација ради смањења пластичности тла и ради повећања чврстоће тла (Boardman et al., 2001). Модификација генерално може бити реверзибилан процес, али када је реч о поступку очвршћавања тла он резултује неповратним променама у карактеристикама тла. Промена у структури тла настаје кроз флокулацију и активност катјонске размене, док очвршћавање настаје кроз пуцоланску реакцију (Salehi and Sivakugan, 2009).

Високе вредности чврстоће тла, које се постижу стабилизацијом кречом или цементом, нису увек неопходне, што је наметнуло потребу за економичнијим адитивима који се могу користити за промену својстава тла. Данас се, поред традиционалних реагенаса, активно трага за новим стабилизаторима. Тако се све чешће могу пронаћи материјали попут електрофилтерског пепела или шљаке из индустријских процеса, различитих врста геополимера, биополимера или нано-материјала. Ови нови материјали имају мањи утицај на животну средину и често потичу из процеса рециклаже, што технику хемијске стабилизације тла чини економичнијом и еколошки прихватљивијом.

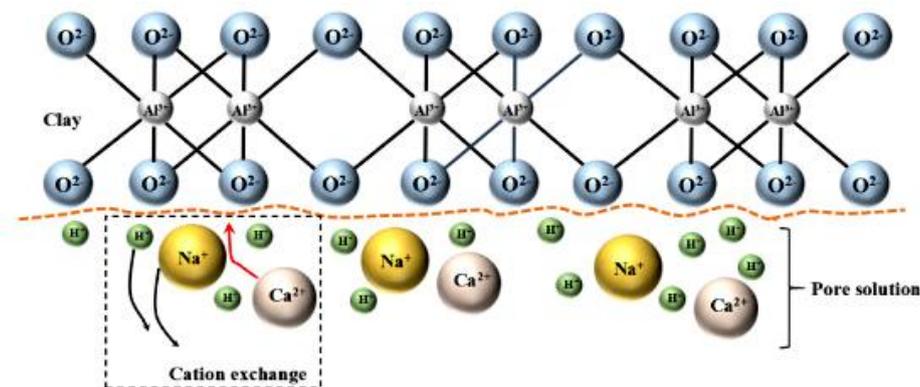
3.1.2. Основни принципи и механизми хемијске стабилизације тла

У савременим истраживањима хемијске стабилизације тла прихваћена су два основна теоријска приступа механизмима стабилизације, а то су теорија кристализације Ле Шателјеа и теорија гела Тејлора. Ове методе интегришу се у обједињени модел познат као гел - кристална теорија, који објашњава различите фазе очвршћавања стабилизованог тла. Ле Шателјеова теорија кристализације наглашава формирање кристала као кључни процес у развоју чврстоће материјала. С друге стране, у основи Тејлорове теорија гела јесте стварање аморфних геластих структура које обавијају честице тла, формирајући почетну матрицу која доприноси повећању кохезије система. Комбинована гел - кристална теорија пружа свеобухватнији приказ понашања стабилованих материјала током процеса хидратације и очвршћавања.

Сам механизам хемијске стабилизације заснива се на физичко - хемијским реакцијама између честица тла и додатог стабилизатора. Прва општа подела, која се и данас може сматрати релевантном, класификовала је стабилизаторе у три велике групе: традиционалне, нуспроизводе и нетрадиционалне (алтернативне) стабилизаторе (Petru and Little, 2002). Цемент и креч се сматрају традиционалним адитивима, док се прашина добијена производњом портланд цемента, камено брашно из каменолома, електрофилтерски пепео и згура сматрају нуспроизводима. Остали стабилизатори на бази полимера, различитих соли, хлорида и ензима убрајају се у нетрадиционалне адитиве. Избор конкретног стабилизатора зависи од минералношког састава тла и специфичних захтева пројекта.

Процеса хидратације цемента може се усвојити и као основа механизма хемијске стабилизације (Sariosseiri, 2009). У присуству довољне количине воде, свака честица цемента бива обавијена танким слојем воде, што доводи до стварања геластог омотача. Ове обложене честице цемента затим прекривају и честице агрегата или тла. У овој почетној фази цемент још увек није очврсно, али хемијском реакцијом воде и цемента почињу да се формирају ситни примарни кристали. Како процес хидратације протиче, ти примарни кристали расту и међусобно се повезују, стварајући тродимензионалну кристалну стуктуру. Важно је напоменути да се везе међу кристалима у овој фази не формирају путем јаких хемијских веза, већ се ослањају на међумолекулске силе, као што су Ван дер Валсове силе. Ова мрежа омогућава пренос напрезања и чини основу побољшане механичке отпорности стабилизованог тла.

Поред процеса хидратације, значајну улогу има и процес катјонске измене, у коме катјони из везива (нпр. Ca^{2+} из креча или цемента) замењују измењиве катјоне на површини глиених честица (нпр. Na^+ или H^+), као што је приказано на Слици 3.1.



Слика 3.1 Измена катјона из стабилизатора и катјона на површини глинених честица

(Shon et al., 2010)

Ова замена резултује смањењем дебљине двоструког електричног слоја, што доводи до коагулације и агрегације честица, или флокулацијом колоидних честица, што побољшава збијање тла и смањује његову пластичност. Додавање стабилизатора треба да доведе до повећања рН вредности у систему (обично на вредности између 11 и 13), како би се замена јона остварила релативно брзо и како би се створили потребни услови за трајну модификацију у структури глиновитог тла. Према испитивањима које је спровео Bell (1996), оптимална рН вредност за креч ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) износи 12,4. Овај алкални услов омогућава растварање силицијум-диоксида (SiO_2) и алуминијум-оксида (Al_2O_3) из глинених минерала, чиме се стварају услови за активирање реакција, пре свега пуцоланских реакција. Поред тога, за цео процес стабилизације јако је важно формирање секундарних минерала као што су калцијум-силикат-хидрат (C-S-H) и калцијум-алуминат-хидрат (C-A-H), који значајно повећавају чврстоћу и стабилност тла (Firoozi et al., 2017). Производи реакција, као што су C-S-H и C-A-H гелови, испуњавају поре у тлу и делују као везиво између примарних честица, чиме се остварује побољшање својстава тла која су битна за геотехничке прорачуне (смањење водопропусности тла, повећање кохезије, смањење склоности ка бубрењу и ерозији, стварање микроструктуре са већом отпорношћу на циклична влажења и сушења).

Дакле, основни механизми деловања укључују:

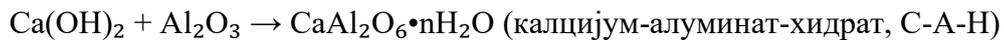
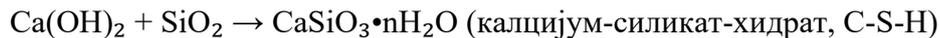
- *Измену катјона* - катјони калцијума (Ca^{2+}) из креча замењују натријумске (Na^+) и друге лако растворљиве катјоне у тлу, чиме се формирају чвршће везе између честица:



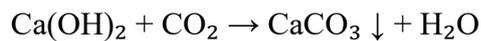
- *Флокулацију* - честица глине повећава ефективну величину зрна, чиме се смањује пластичност глине и повећава њена чврстоћа:



- *Пуцоланску реакцију* - калцијум-хидроксид (Ca(OH)_2) реагује са силицијум-диоксидом (SiO_2) и алуминијум-оксидом (Al_2O_3) из глине и формира стабилне цементирајуће гелове:



- *Цементацију* – калцијум хидроксид (Ca(OH)_2) реагује са угљен-диоксидом (CO_2) из атмосфере и формира талог калцијум-карбоната (CaCO_3), који временом постају чврсти:



3.1.3. Предности и недостаци технике хемијске стабилизације

У поређењу са механичком стабилизацијом, која подразумева збијање тла или мешање са гранулатом, хемијска стабилизација захтева мање физичког рада и простора, јер се може применити и на тешко доступним локацијама, укључујући урбане средине, инфраструктурне објекте и подручја са ограниченим приступом. Такође, у условима високог нивоа подземних вода или код терена где је дренажа отежана, хемијска стабилизација се показује као ефикаснија техника у односу на дренажне методе, јер може директно модификовати својства тла без потребе за значајним хидролошким интервенцијама. Спуштање нивоа подземне воде је потребно само у фази стабилизације, не и током грађења, за разлику од дренажних метода које подразумевају коришћење црпних пумпи или других машина све време.

Међу примарним предностима технике хемијске стабилизације издваја се способност значајног повећања чврстоће тла на притисак и смицање, што директно утиче на способност тла да носи спољна оптерећења високог интензитета. Такође, хемијска стабилизација доводи до смањења индекса пластичности, побољшања компактности и смањења капацитета тла да упија или испушта воду, што је посебно значајно у климатски варијабилним условима где се јављају циклуси наизменичног влажења и сушења тла. Смањена пропустљивост, као и повећана отпорност на циклусе

наизменичног смрзавања и одмрзавања, чини стабилизовано тло погодним за примену у саобраћајној инфраструктури и изградњи објеката са плитким темељима.

Као велика предност технике истиче се и брзина реакције стабилизатора и тла и постизања високе чврстоће тла, нарочито код коришћења портланд-цемента или креча, при чему су ефекти побољшања карактеристика тла видљиви у року од неколико дана након третмана, за разлику од неких биолошких или геосинтетичких метода које захтевају дуже време за активацију.

Ипак, практична примена хемијске стабилизације у теренским условима наилази на низ изазова и ограничења. Проблеми се односе на непредвидивост реакција стабилизатора са тлом у природним, спољашњим условима. Разлог потенцијалног неуспеха јавља се као последица нехомогеног састава у минералошком смислу или услед присуства органских материја. Неадекватни спољашњи услови често резултирају неуједначеном стабилизацијом тла на третираном подручју, што доводи до хетерогених механичких својстава унутар једног слоја. Посебно су проблематична тла са високим садржајем органских или растворљивих материја, где долази до инхибиције пуцоланских реакција, а самим тим и слабљења везивног ефекта. Као један од недостатака у пракси је појава пуцања стабилованих слојева. Употреба стабилизатора који током хидратације и стврдњавања пролазе кроз фазе скупљања, често доводи до појаве микропукотина. Ове пукотине, уколико се не контролишу, могу значајно умањити дугорочну стабилност конструкције, повећати пропустљивост и омогућити инфилтрацију воде, што даље доводи до ерозије или деградације тла. Нарочито су осетљиви танки слојеви стабилованих тла у површинским зонама, испод коловоза или темељних плоча.

Дубина на којој се ова техника може ефикасно применити је често ограничена. Уобичајене методе као што су површинско мешање или стабилизација на лицу места обично не превазилазе дубине од један до један и по метар. За стабилизацију дубљих зона неопходна је употреба специјализоване механизације, као што су дубоке мешалице или инјектирајући системи, што значајно повећава трошкове и техничку комплексност пројекта.

Висока употреба цемента и других конвенционалних везива доприноси емисији гасова са ефектом стаклене баште (у току процеса справљања и током примене), пре свега угљен-диоксида, што је у супротности са принципима одрживог развоја. Осим

тога, одређени хемијски адитиви, уколико се не примене на адекватан начин, могу имати негативан утицај на квалитет подземних вода или биолошку активност у тлу. Хемијска стабилизација тла захтева висок ниво контроле квалитета током примене. Неадекватно мешање, неодговарајуће дозирање стабилизатора или непоштовање услова очвршћавања могу довести до значајних одступања од пројектованих вредности карактеристика тла. Тако, према резултатима бројних студија, неуспешни пројекти стабилизације тла често су последица недовољне контроле током извођења радова.

3.2. Електрокинетички третман тла

Електрокинетички третман тла може се користити као алтернативна, односно као привремена метода за санацију тла. У пракси најчешће има примену испод темеља објеката, али може се применити и код путева, железница или цевовода (Gingine et al., 2013; Tajudin et al., 2015). Као највећа предност ове методе истиче се то што њена употреба доводи до минималних промена на површини терена уз могућност истовременог уклањања подземних загађивача и побољшање инжењерских карактеристика тла на већим дубинама (Chien et al., 2010). Ипак, упркос великом броју студија, релативно је мали број оних које се баве анализом промена физичко - хемијских својстава тла као резултатом примене електрокинетичког третмана (Abiodun and Nalbantoglu, 2020). Још је мањи број истраживања која се фокусирају на примену електрокинетичког третмана у случају глиновитих тла.

3.2.1. Развој технике електрокинетичког третмана тла

Да кроз полупропустљиву мембрану течност може да дифундује и без утицаја спољних сила први пут забележено је крајем XVII века. Недуго затим, дошло се до открића да тло може да проводи струју. Забележио је да се струја која пролази између две електроде укопане у земљу понаша другачије него када се употреби жица ради затварања струјног кола. Једно од првих научних запажања електрокинетичких појава датирају са почетка XIX века, када је *Ruess*, (1808) уочио електроосмозу приликом примене једносмерне електричне струје на смеси глине са водом. *Helmholtz*, (1879) је аналитички обрадио електроосмотске појаве и дао прву математичку основу за разумевање овог процеса (Mosavat, 2012).

У геотехници, темеље истраживања процеса електроосмозе у тлу је поставио *Casagrande* (1983) истраживањем стабилизације глина, пре свега са аспекта дренарања

воде из ње. Његова прва *in situ* примена електроосмозе забележена је 1952. године, након чега је ова метода прихваћена као једна од метода побољшања тла. У својим истраживањима дошао је до закључка да електроосмоза може знатно ефикасније да "премешта" воду кроз поре тла него што је то случај под дејством силе гравитације, што омогућава консолидацију компресибилних тла.

Током 1960-их, процес електромиграције је коришћен у геолошким истраживањима налазишта метала, чиме је проширена практична примена електрокинетичких принципа у другим областима (Ou et al., 2009). Прва документована успешна примена електрокинетичког третмана са циљем ремедијације тла изведена је у Холандији 1986. године. У грађевинарству, ова метода примењивала се за дренарање терена и снижавање нивоа подземних вода (Johnston, 1977), као техника у сврху побољшања стабилности ископа (Morris et al., 1985), затим за ојачавање насипа и стабилизацију падина, као и за стабилизацију путем консолидације (Shang, 1998; Micić et al., 2001). Овај и слични успеси подстакли су даља истраживања и експерименте на терену, што је довело до значајног напретка у разумевању електрокинетичких процеса као могућег начина побољшања особина тла (Mosavat, 2014; Gao et al., 2022).

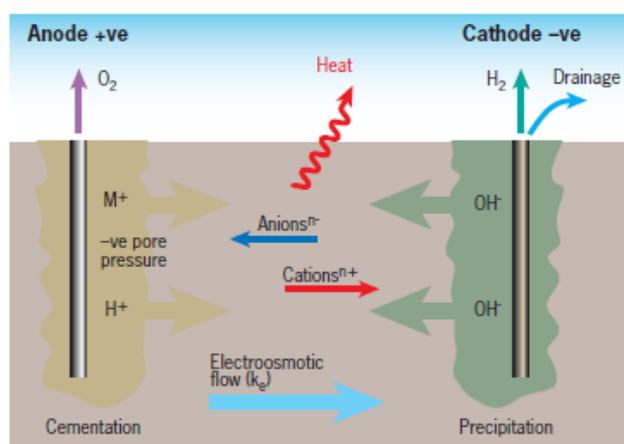
У XXI веку, интересовање истраживача за домен електрокинетичког третмана тла значајно је порасло, нарочито у погледу могућности њене примене као *in situ* технике стабилизације. Лабораторијска и теренска испитивања потврдила су флексибилност и практичност ове методе у реалним условима, нарочито у контексту дренаже и побољшања својстава ситнозрних тла. Ипак, већина ових истраживања фокусира се на аспект ремедијације тла, односно уклањање метала као што су кадмијум, хром, никл, олово, бакар, жива, гвожђе, арсен и цинк (Reddy and Chinthamreddy, 2004; Gao et al., 2022). Разлог овоме лежи у препознатом негативном утицају ових хемијских елемената за екосистеме и јавно здравље, док се из угла геотехничких проблема овој техници није придавала већа пажња.

Са аспекта испитивања утицаја различитих параметара на ефикасност електрокинетичког третмана ситнозрних тла, последњих деценија спроведен је изванредан број истраживања на различитим експерименталним моделима у претежно лабораторијским условима (Barker et al., 2004; Liaki et al., 2010; Azhar et al., 2017; Hosseini et al., 2019).

3.2.2. Основни принципи и механизми електрокинетичког третмана тла

Електрокинетички третман тла представља савремену технику која користи једносмерну струју ниског интензитета или ниски електрични напон са примарним циљем дренарања терена и уклањања вишка воде из тла. Такође, примена ове методе може довести и до модификације у структури тла, пре свега у фази ремедијације тла са циљем уклањањем тешких метала (Chien et al., 2009; Ghobadi 2021). Другим речима, електрокинетички третман се може дефинисати као физичко - хемијски транспорт наелектрисаних честица, уз деловање јона на формирање нових структура при истовременом транспорту флуида у порозним срединама.

Основну опрему за спровођење електрокинетичког третмана чини извор једносмерне струје, који се повезује на (минимум) две електроде – аноду (позитивно наелектрисана електрода) и катоду (негативно наелектрисана електрода). Ове две електроде стварају услове за миграцију јона унутар тла. Том приликом, стварају се два облика миграције: јонска миграција и електрофореза колоидних честица (Iyer, 2001). Наелектрисани јони и колоидне честице присутни су у води која испуњава поре тла. На аноди се одвија оксидација, што доводи до формирања киселог фронта, док се на катоди јавља редукција, стварајући базни фронт (Слика 3.2).



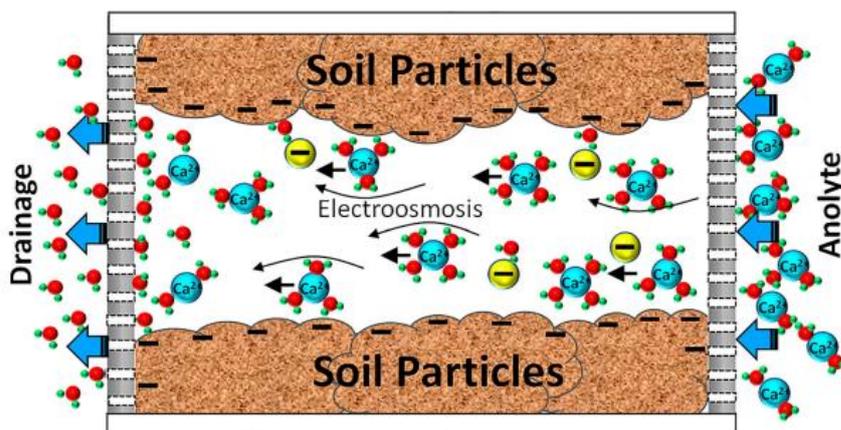
Слика 3.2 Електрокинетички третман тла (Lamont-Black et al., 2015)

Такође, успоставља се електрични напон који доводи до појаве електроосмозе, механизма у коме се вода креће кроз тло од аноде ка катоди под дејством електричног поља. Свакако, електрохемијски ефекти у тлу изазвани електрокинетичким третманом укључују различите процесе, међу којима су: хидролиза, оксидација, електролиза, разградња минерала, јонска дифузија, јонска размена, смањење влажности или исушивање тла услед топлоте настале преко електрода, таложење соли или секундарних

минерала, физичка и хемијска адсорпција и др. (Mitchell and Soga, 2005; Sadeghian, 2022).

Уопштено гледано, електрокинетички третман се састоји из пет главних фаза, односно пет механизма по којима се врши модификација третираног подручја (Mitchell, 1990; Glendinning et al., 2005). Свака од ових фаза је повезана са кретањем наелектрисаних честица у флуидној средини под дејством примењене разлике потенцијала. Поред тога, јавља се кретање флуида унутар тла што индукује разлику потенцијала унутар система. Ових пет категорија је дефинисано као: електроосмоза, електрофореза, електромиграција, потенцијал струјања и седиментациони потенцијал. Савремена истраживања која су усмерена на примену електрокинетичког третмана за потребе стабилизације тла указују да се сам процес може описати са четири механизма, и то: електроосмоза, електрофореза, електролиза и електромиграција (Lamont-Black et al., 2015; Asadollahfardi and Rezaee, 2019; Sadeghian et al., 2022). Ови механизми чине основу за коришћење технике електрокинетичког третмана у сврху побољшања својстава тла, као и у инжењерским и еколошким применама попут стабилизације тла и ремедијације односно третирања загађених локација.

Електроосмоза је појава у којој се вода креће кроз поре тла под утицајем спољашњег електричног поља, од позитивно наелектрисане електроде (аноде) ка негативно наелектрисаној електроди (катоди). Овај процес је од кључног значаја у електрокинетичкој стабилизацији, посебно код глиновитих и нископропусних тла, где традиционалне методе дренажа нису ефикасне. Основни механизам електроосмозе проистиче из структуре електричног двослоја који се формира око површине глиненних честица, које су углавном негативно наелектрисане (Слика 3.3). Када се у такав систем примени једносмерно електрично поље, позитивно наелектрисани јони - катјони (нпр. Na^+ , Ca^{2+}) у дебљем дифузној слоју почињу да се крећу ка катоди, а пошто су хидратисани (везани за молекуле воде), повлаче воду са собом. Резултат је проток воде од аноде ка катоди, односно одвођење вишка воде, уклањање контаминаната растворених у води или консолидација тла (Liu et al., 2018). За разлику од других облика транспорта воде у тлу (попут филтрације или капиларности), електроосмоза успешно функционише у различитим врстама тла чак и када је хидрауличка проводљивост тла изузетно ниска (Mitchell, 1993). То је чини посебно вредном у ситуацијама где је потребно дренажу или консолидацију тла спровести без дубоког копања или употребе јаких механичких сила.



Слика 3.3 Шематски приказ електроосмозе са додатком калцијум-хлорида (Zhang et al., 2019)

Теорија Helmholtz - Smoluchowski-ог представља основу разумевања електроосмозе за тумачење електрокинетичке стабилизације тла. Почетна претпоставка је да честице тла, као што је раније речено, имају негативно наелектрисане површине. Ова претпоставка се посебно односи на глиновита тла због њихове структуре, мада се може применити и у крупнозрном тлу које садржи одређену количину глиновитих фракција (Yuan and Hicks, 2013). У контакту са водом, око честица се формира тзв. двоструки електрични слој — унутрашњи слој чврсто везаних катјона (Хелмхолцов слој) и спољашњи дифузни слој слабије везаних јона. При пропуштању једносмерног електричног поља кроз тло, позитивно наелектрисани јони из дифузног слоја почињу да се крећу ка катоди. Ови јони, због својих електростатичких и вискозних интеракција, повлаче молекуле воде са собом, чиме настаје ток воде, односно процес који називамо електроосмоза. Смолуховски (*Smoluchowski*) је квантификовао овај процес кроз брзину електроосмотског тока, која се и данас користи као основа за прорачун електроосмозе у порозним срединама. Његова једначина повезује електрично поље, особине флуида и наелектрисање површине честица са брзином тока изазваног електроосмозом. Врло често, за потребе разумевања овог механизма користи се коефицијент електроосмотске проводљивости (k_e) тла. Овај коефицијент представља меру течности која може да прође кроз јединицу попречног пресека тла под дејством јединице електричног градијента, у условима када су сви други параметри константни током електрокинетичког испитивања. На овај начин, теорија Helmholtz-Smoluchowski-ог повезује брзину електроосмотског протока са коефицијентом електроосмотске пропустљивости тла (k_e), електричним градијентом (i_e) и површином тла кроз коју вода тече (A):

$$q = k_e \cdot i_e \cdot A \quad (3.1)$$

Коефицијент електроосмотске пропустљивости је независан од величине пора у тлу. Он пак зависи од зета потенцијала (ζ) који се дефинише као електрични потенцијал при површини, тачније између честица које се крећу у примењеном електричном пољу и течности у околини. Просечне вредности коефицијента електроосмотске пропустљивости могу се видети у Табели 3.1.

Табела 3.1 Вредности коефицијента електроосмотске пропустљивости (k_e) за различите врсте тла (Asadi et al., 2013)

Тип тла	k_e (cm ² /s.V)
Лондонска глина	5.8×10^{-5}
Бостонска глина	5.1×10^{-5}
Каолинит	5.7×10^{-5}
Прашинаста глина	5.0×10^{-5}
Монтморилонит	2.0×10^{-5} до 12×10^{-5}
Тресет	4.91×10^{-6} до 1.57×10^{-5}

У грађевинарству, концепт електроосмозе се успешно користи за сушење зидова код објеката који имају проблема са влагом. Овај процес је нарочито користан код темеља, зидова од бетона, камена или опеке који су подложни влажењу. Постоје пасивни и активни системи. Пасивни системи користе природни галвански напон између електрода од различитих метала без спољног извора напона, док активни системи користе спољашњи извор струје за покретање електроосмозе. У пракси се често комбинују оба система, где се електроосмотско струјање користи да вода из зидова иде у супротном смеру од природног влажења. Када се зид осуши, напајање се искључи, а галвански спој наставља да делује као пасивна заштита против поновног влажења.

Електрофореза је процес који се односи на кретање наелектрисаних честица кроз течност под утицајем спољашњег електричног поља. Када се посматра метода електрокинетичке стабилизације тла, електрофореза има значајну улогу у консолидацији на нивоу микроструктуре тла. За разлику од електроосмозе, која се односи на кретање течности, електрофореза се односи искључиво на кретање нерастворивих честица које носе неки вид наелектрисицања. Негативно наелектрисане честице на површини глинених честица, под утицајем електричног поља, крећу се ка аноди што доводи до одређених промена у распореду пора унутар тла. Та реорганизација може утицати на механичка својства тла, пре свега на чврстоћу тла, а такође може утицати и на поједине особине које се пре свега односе на способност задржавања воде и водопропусност.

Кретање честица често прати миграцију јона и промене рН вредности тла у

околини електрода, што додатно утиче на флокулацију или дисперзију честица. Ретко када (скоро никада) се ефекти електрофорезе могу јавити самостално, већ се њихови утицаји испољавају у комбинацији са електромиграцијом и електролизом. Иако је у пракси пажња често усмерена на процес електроосмозе као примарном механизму за одвођење воде, улога електрофорезе не треба бити занемарена, посебно у тлу са високом количином активних честица.

Електромиграција је процес кретања растворених јона у течном медијуму под утицајем спољашњег електричног поља. Овај процес игра кључну улогу у преносу јона унутар порозне структуре тла, што омогућава транспорт корисних (стабилизујућих) јона или уклањање штетних и загађујућих компоненти. За разлику од електроосмозе, која се односи на кретање течности, и електрофорезе, која обухвата кретање чврстих наелектрисаних честица, електромиграција се односи искључиво на јоне растворене у порној води тла.

Под дејством једносмерне електричне струје, позитивно наелектрисани јони - катјони (нпр. Ca^{2+} , Na^+ , Pb^{2+}) се крећу ка катоди, док негативно наелектрисани јони - анијони (нпр. NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) мигрирају ка аноди. На овај начин се путем миграције врши модификација тла у хемијском погледу. Додавањем стабилизатора, унешени јони (нпр. Ca^{2+} , Na^+ , Pb^{2+}) замењују слабије везане јоне на површини глинених честица. Са друге стране, у процесу деконтаминације, штетни јони (нпр. тешки метали) извлаче се ка електродама ради њиховог уклањања из тла. Електромиграција се дешава истовремено са процесом електроосмозе у влажном тлу. Одвија се унутар порне течности у тлу, па су самим тим путеви миграције јона у тлу дужи и тежи него у течности (Liaki, 2006; Liaki et al., 2008).

Електролиза је процес разградње молекула воде у порама под утицајем једносмерне електричне струје. Поред тога, током процеса може се вршити и кретање јона у тлу. Приликом разградње молекула воде долази до стварања H^+ јона (повећава се киселост средине) на аноди и OH^- јона (повећава се алкалност средине) на катоди (Feijoo et al., 2017; Mohammed, 2018). Другим речима, електролиза је процес који обухвата низ реакција којима се електрична енергија претвара у хемијску потенцијалну енергију под дејством електричног поља током електрокинетичког третмана тла (Reddy, 2022). Она иницира добијање електрона, изазива редукцију, генерише H_2 и OH^- јоне, производи базне изворе и повећава рН вредност тла у зони катоде. Генерално, при протицању

једносмерне струје електрони се крећу од катоде и ка аноди. При електрокинетичком третману тла, на катода долази до редукције катјона (примају један или више електрона), формирањем молекула водоника H_2 и хидроксилних група OH^- , повећава се рН вредност, па средина постаје алкалнија-базна. Са друге стране, на аноди долази до оксидације, формирањем молекула кисеоника O_2 и јона водоника H^+ , снижава се рН вредност, па се повећава киселост средине (Malekzadeh and Sivakugan, 2017).

Током електрокинетичког третмана тла киселост извора контролише мобилност јона и брзину електроосмотског протока (Reddy, 2022). Основни циљ коришћења електрокинетичке методе је ради убрзања консолидације и повећања чврстоће на смицање глиновитог тла, што резултује његовим побољшањем. Повећање чврстоће тла на смицање је углавном последица варијације рН вредности и смањења садржаја воде у тлу.

3.2.3. Предности и недостаци електрокинетичког третмана тла

У склопу одређивања карактеристика тла, провера и утврђивање електрокинетичких својстава тла одговарајућим лабораторијским испитивањима још увек нису уобичајени, што представља изазов за потпуну интеграцију ове методе у инжењерској пракси. Једна од најчешћих примена електрокинетичког третмана у пракси је у сврху дренажа тла (као привремена мера стабилизације), где се вода из тла са великом влажношћу усмерава ка цеви повезаној на негативан пол извора једносмерне струје (катоде). Ова цев је перфорирана и окружена филтерским слојем (крупнозрним тлом), како би омогућила ефикасно прикупљање и извлачење воде. Овај процес омогућава брзо и ефикасно сушење тла, што је посебно корисно у припреми терена за предстојеће грађевинске радове. Такође може бити јако корисна у третману глиновитих тла у сврху консолидације, чиме се овај процес значајно убрзава.

Електрокинетички третман тла представља савремену и све чешће примењивану методу у санацији загађених тла, нарочито у условима где конвенционалне методе показују ограничену ефикасност или су превише скупе. Може успешно уклонити тешке метале, органска једињења, па чак и комбинације ових загађивача, што доприноси њеној све широј примени. У поређењу са традиционалним техникама, ова метода доноси низ значајних предности, као што је примена у дубљим слојевима тла и испод постојећих објеката, које је чине конкурентном и одрживом алтернативом. Метода је и врло флексибилна, јер може да се користи и *in situ* (директно на месту контаминације) и *ex*

situ (након депоновања материјала за даљу употребу).

Велика предност у примени ове методе јесте њена једноставност, јер електрокинетичка метода захтева минималну количину опреме и лако се поставља на терену. Такође, процес је безбедан за раднике и околину, јер се ради са напонима струје који не могу да штете живом свету. Метода има широку примену и може се користити када су у питању различите врстама тла, укључујући ситнозрно тло, муљеве, различите седименте или чак подземне воде. На крају, важно је истаћи и економску исплативост ове методе. Електрокинетички третман троши релативно мало електричне енергије, што резултује нижим оперативним трошковима.

Претходне студије су показале да се током процеса електрокинетичког третмана рН вредност глиновитог тла значајно може променити. Поред дирекног утицаја на успешност процеса, промена киселости средине може да наштети и самим електродама. Одабир електрода за примену третмана није једноставан, јер се електроде постепено троше током процеса, што не само да повећава оперативне трошкове, већ може и изазвати секундарно загађење уколико се правилно не управља отпадним материјалом. Корозија материјала током електрокинетичког третмана повећава трошкове и сходно томе смањује ефикасност третмана. Међутим, ефекти варијација напона и рН вредности на ефикасност електрокинетичког третмана, као што су интензитет корозије електрода и чврстоћа на смицање тла, још увек нису довољно истражени (Sadeghian, 2022).

Иако електрокинетички третман тла има бројне предности, ова метода није без ограничења. Разумевање њених недостатака кључно је за правилно планирање и примену у инжењерској пракси. Један од главних проблема примене ове методе може бити време трајања процеса. Електрокинетички транспорт јона и пре свега течности кроз тло одвија се знатно спорије у поређењу са механичким или хидрауличним методама. То значи да третмани често трају недељама или чак месецима. Поред тога, ефикасност третмана значајно зависи од хемијских и физичких својстава тла. Промене у рН вредности, присуство органских материјала и присуство карбоната могу утицати на ток електроосмозе, електромиграције и других електрокинетичких процеса. У многим случајевима долази до повећања киселости тла око аноде и алкализације око катоде, што може изазвати додатне компликације и захтева стални мониторинг. Са финансијског аспекта, ова метода спада у групу јефтинијих. Међутим, електрокинетички третман може бити значајно скупљи у случајевима када је потребна додатна енергија за одржавање електричног поља. Овај случај може се јавити нарочито у хетерогеним

слојевима тла, где отпор у тлу може бити велики. Иако је енергија по јединици запремине тла често ниска, укупни трошкови могу порасти због трајања процеса и потребе за додатним контролним системима.

Као још један од значајних недостатака сматра се неуједначеност у расподели електричног поља, што доводи до неравномерне миграције загађивача и течности. То може резултовати делимичном ремедијацијом терена и потребом за додатним фазама третмана.

Када је реч о примарној проблематици, у области геотехнике, која се обрађује у овој дисертацији, иако је метода поуздана и успешна, њен главни недостатак је тај што ефекти тако спроведеног третмана тла нису трајног карактера, јер са новим, обилнијим падавинама долази до поновног повећања садржаја воде у тлу и последичног смањења чврстоће тла.

На основу свега наведеног, може се закључити да електрокинетички третман има огроман потенцијал и велику предност у примени са циљем стабилизације тла, посебно онда када конвенционалне методе нису ефикасне. Пажљиво пројектовање и поставка система и правилна евалуација услова на терену кључни су за успех ове методе.

С обзиром да електрокинетички третман успешно доприноси привременој стабилизацији тла, очекује се да би у комбинацији са другим методама могао да буде знатно ефикаснији. Предложена техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла управо има за циљ да, са једне стране, допринесе трајном побољшању физичких, хемијских и нарочито механичких карактеристика тла, захваљујући концепту на којем је базирана техника хемијске стабилизације, и да, са друге стране, допринесе трајном побољшању карактеристика тла и на већим дубинама, захваљујући управо дејству једносмерне струје која је у основи електрокинетичког третмана.

4. ПРЕДЛОГ НОВЕ ТЕХНИКЕ ХЕМИЈСКЕ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ СТАБИЛИЗАЦИЈА ТЛА

На бази детаљног излагања о техникама стабилизације тла у претходном поглављу, може се закључити да, са једне стране, техника хемијске стабилизације тла доприноси трајном побољшању карактеристика тла, али да се због начина примене може користити само у површинским, лако доступним слојевима тла, што онемогућава њену примену код веома важних геотехничких проблема као што су стабилизација косина, повећање носивости темељног тла, смањење влажности и смањење слегања тла испод постојећих објеката. Са друге стране, техника електрокинетичког третмана тла се може спроводити и на већим дубинама тла пропуштањем једносмерне струје кроз тло, али ефекти тако спроведеног третмана нису трајног карактера, јер са новим, обилнијим падавинама долази до поновног повећања садржаја воде у тлу и последичног смањења чврстоће тла.

Предложена хемијска електрокинетичка стабилизација тла представља технику којом се превазилазе недостаци претходно наведених поступака стабилизације тла. Наиме, техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла представља унапређење технике електрокинетичког третмана тла применом хемијских агенаса (стабилизатора), где се увођење и кретање кроз тло стабилизујућих агенаса одвија под утицајем једносмерне струје, док се сам механизам стабилизације може објаснити принципима хемијске стабилизације. Дакле, комбинација сложених електрохемијских процеса под утицајем електричног поља и уз присуство одговарајућих хемијских агенаса треба да доведе до трајног побољшања тла у погледу физичко - хемијских карактеристика, и посебно механичких особина ситнозрног тла које су од нарочитог значаја у геотехничком инжењерству. Такође, њена предност је у томе што се може применити код круцијалних геотехничких проблема као што су стабилизација косина, повећање носивости темељног тла, стабилизација терена за потребе извођења дубоких темељних ископа, тунела и других подземних објеката.

У досадашњим истраживањима постигнут је врло скроман напредак на пољу испитивања промена физичких, хемијских и нарочито механичких карактеристика тла као резултата комбинованог хемијског и електрокинетичког третмана тла. Главни закључци ових истраживања су да се тло између електрода може додатно побољшати увођењем хемијског раствора реагенса у смислу смањења киселости тла, пре свега у зони анода. У зависности од количине додатог реагенса могла би се контролисати и рН

вредност у осталим зонама тла. Предуслов за успешну примену електрокинетичног третмана тла је високи садржај воде у тлу који треба да омогући процес електромиграције; међутим, у примени комбинованог хемијског и електрокинетичког третмана, са друге стране, тло не треба да буде презасићено водом, јер би то отежало проток реагенса кроз поре тла (Mosavat, 2014). Примена комбиноване методе уз континуирано додавање течног раствора реагенса у тло одговарајуће влажности може умногоме олакшати процес електроосмотског протока, повећавајући електрохемијску способност порне течности у тлу и способност јона да се транспортују, што у коначном доприноси трајном побољшању својстава тла на већим дубинама.

Електрокинетички третман тла у комбинацији са хемијским стабилизаторима је техника новијег датума, која је почела своју примену у сврху деконтаминације контаминираних терена, и у складу са тим, претежно је разматрана са аспекта побољшања хемијских својстава тла. Досадашња испитивања указују на процесе који се односе на реакције катјонске размене и процеса очвршћавања на површинама глиених минерала, пре свега коришћењем струје за потребе уклањања штетних елемената у тлу. Примена комбиноване методе доводи до модификације тла у погледу његове структуре.

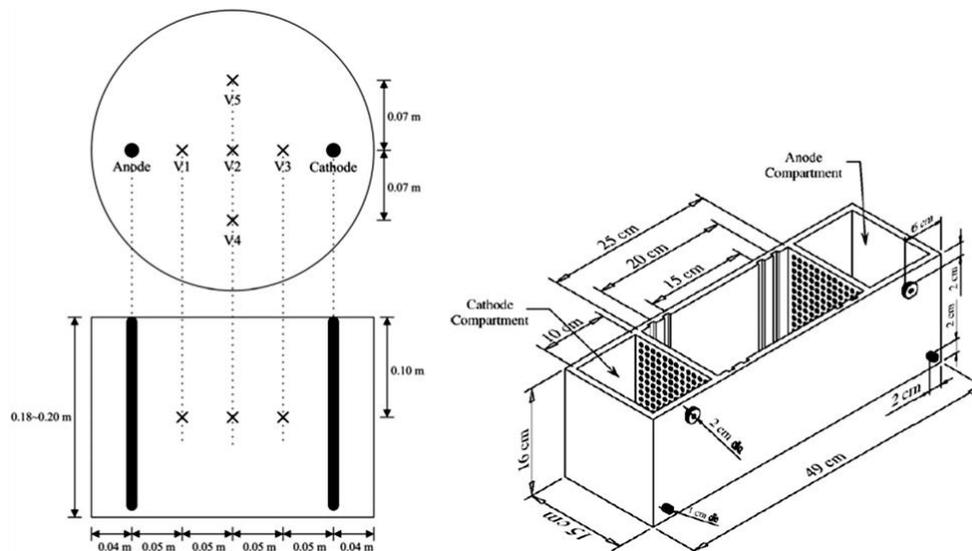
На бази поменутих истраживања, дошло се на идеју да би увођење хемијских реагенса у процес електрокинетичког третмана могло представљати значајан потенцијал и у погледу побољшања физичких и механичких својстава глиновитих тла.

Истраживање *Asavadorndeja and Glawe (2005)* пружа увид у механизме који доводе до побољшања једнооксијалне чврстоће на притисак тла у комбинованом хемијском и електрокинетичком третману тла. Резултати испитивања на локалној глини високе пластичности (Банкок глина) показали су да је убризгавањем креча ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), односно јона Ca^{2+} и OH^- , у тло дошло до формирања чврстих фаза, што је у зависности од положаја мерног места од електрода резултовало повећањем једнооксијалне чврстоће тла од 170% до чак 570% након седмодневног третмана. Ово представља један од релевантних доказа о потенцијалу хемијског електрокинетичког третмана у сврху стабилизације слабоносивих подлога.

Истраживање *Ou et al., (2009)* показало је да је додавање раствора калцијум-хлорида (CaCl_2) током електрокинетичког третмана прашинасте глине довело до петоструког повећања смичуће чврстоће тла у односу на чврстоћу природног тла након седам дана третмана. Истраживање је такође показало да је овај поступак довео до

скраћења времена потребног за консолидацију тла за 40% у поређењу са временом постигнутим само електрокинетичким третманом тла. Шематски приказ експерименталног модела коришћеног у овом истраживању дат је на Слици 4.1а.

У истраживању *Abdullah and Al-Abadi* (2010) приказана је ефикасност катјонско - електрокинетичке методе као иновативне технике побољшања својстава експанзивних тла поређењем индивидуалних ефеката додавања калцијум-хлорида (CaCl_2) и калијум-хлорида (KCl). Након десетодневног третмана, примена калцијумових јона (Ca^{2+}) довела је до смањења индекса пластичности са $I_p = 40$ (природно тло) на $I_p = 32$, док је третман калијумовим јонима (K^+) резултовао знатно већим ефектом – смањењем I_p на вредност од свега 8. Поред тога, вредност слободног бубрења смањена је са 14% на 3,1% коришћењем Ca^{2+} , односно на 0,4% коришћењем K^+ јона, под идентичним условима почетне влажности и суве запреминске масе тла. У погледу побољшања механичких својстава, посебно отпорности на смицање, дошло је до пораста угла унутрашњег трења са 24° (природно тло) на $30,9^\circ$ код тла третираног јонима Ca^{2+} , док је са додатком K^+ јона постигнута вредност од 36° . Ови резултати недвосмислено указују на значај увођења стабилизатора у тло под дејством једносмерне струје као ефикасног начина побољшања својстава тла. Шематски приказ експерименталног модела коришћеног у овом истраживању дат је на Слици 4.1б.



Слика 4.1 Шематски приказ експерименталних модела за примену комбиноване хемијске и електрокинетичке стабилизације тла: а) модел кружног облика (*Ou et al.*, 2009); б) модел са електродама у облику плоча (*Abdullah and Al-Abadi*, 2010)

У највећем броју истраживања побољшање карактеристика тла комбинованом

техником забележено је претежно само у зони аноде, односно, расподела стабилизујућег агенса није била униформна у зони тла између аноде и катоде. *Nordin et al.*, (2013) су у својим истраживањима на узорку каолинита, након седмодневног третмана калцијум-хлоридом (CaCl_2), утврдили да је концентрација Ca^{2+} јона у тлу била претежно у зони аноде. Иако није дошло до стварања нових минералних фаза, забележене су значајне промене у дистрибуцији јона и потенцијална повећања у компактности тла. Са друге стране, *Chien and Lee* (2013) су у својим истраживањима, такође на узорку каолинита третираном шест дана, потврдили да убризгавање калцијум-хлорида (CaCl_2), праћено убризгавањем воденог стакла (натријум-силиката Na_2SiO_3), поспешује ефективно побољшање својстава у зони тла између аноде и катоде. Наиме, ова комбинација стабилизујућих агенаса обезбеђује униформну расподелу агенаса кроз тло и проширује зону стабилизације, што је од круцијалног значаја у инжењерским применама.

У истраживању *Ranjitha and Blessing* (2017) испитивали су утицај различитих концентрација раствора калцијум-хлорида (CaCl_2) при стабилизацији слабоносивог тла, уз примену електрокинетичке методе са електродом од графита и цинка. Експерименти су показали повећање једнооксијалне чврстоће тла на притисак након вишечасовног третмана, што потврђује да је додаток катјонског реагенса, уз напон од 40 V до 60 V током одређеног времена допринео стварању стабилнијих веза у структури тла.

Даље унапређење методе представљено је у раду *Ou et al.* (2018), где је развијен комбиновани третман који обједињује калцијум-хлорид (CaCl_2), натријум-силикат (Na_2SiO_3) и калијум хидроксид (KOH). Након тродневног третмана глиновитог тла, утврђено је да се повећањем концентрације CaCl_2 смањује ефикасност накнадног убризгавања раствора натријум-силиката, док је континуирано убризгавање дејонизоване воде након примене натријум-силиката поспешило миграцију Ca^{2+} јона ка катоде и створило повољне услове за појаву пуцоланских реакција. Услови високе алкалности у близини катоде допринели су интензивној хемијској трансформацији глинених честица, што је резултовало значајним порастом једнооксијалне чврстоће на притисак целокупног узорка глине.

Истраживање које су спровели *Lin et al.* (2018) фокусира се на механизме побољшања чврстоће каолинитног тла у непосредној близини аноде током седмодневног хемијског електрокинетичког третмана. Експерименти су показали да хемијска модификација тла у зони аноде настаје као резултат интеракције између примењеног електричног поља и убризганих хемикалија – пре свега раствора натријум-

силиката (Na_2SiO_3) и калцијум-хлорида (CaCl_2). Резултати показују да се у близини аноде формира високоалкална средина која подстиче разградњу структуре глине, ослобађање активних силиката и алумината. Микроскопске анализе и опити једнооксијалне чврстоће на притисак потврдили су да је зона каолинита у околини аноде претрпела највећи степен стабилизације, у поређењу са остатком узорка.

Поједина истраживања односе се на примену наноматеријала у комбинацији са електрокинетичком методом за стабилизацију тла на бази глиновите прашине (Hosseini et al., 2019). Резултати су показали да присуство наноматеријала, уз примену електричног поља, убрзава стварање цементационих производа, повећава чврстоћу на смицање и смањује слегање тла. Тиме се додатно потврђује потенцијал ове методе за примену у геотехничким условима високог ризика.

Estabragh et al. (2022) анализирали су ефекте два различита агенса на бази хлорида (калцијум-хлорида CaCl_2 и магнезијум-хлорида MgCl_2) у комбинацији са електрокинетичким третманом на побољшање геомеханичких својстава прашинасто - глиновитог тла путем директног убризгавања јона. Експерименти су показали да присуство вишеструко наелектрисаних катјона значајно доприноси повећању једнооксијалне чврстоће на притисак тла и смањењу његове пластичности. Посебно се издвајају ефекти јона калцијума Ca^{2+} који, због своје двовалентне природе, доприносе већем степену стабилизације у поређењу са моновалентним јонским врстама.

У најновијим истраживањима примећен је тренд избора биохемијских агенса и композитних флокуланата са циљем унапређења ефикасности процеса стабилизације. *Teng et al.* (2022) су истраживали могућност побољшања карактеристика меких глина електрокинетичким третманом уз истовремено убризгавање раствора микроорганизама. Показано је да биолошки агенси (микроорганизми) могу поспешити збијање тла. Уочено је да присуство микроорганизама утиче на редукацију електроосмотског отпора тла и поспешивање равномерног преноса јона кроз матрицу тла, чиме се повећава укупна ефикасност третмана.

Han et al. (2024) су у свом истраживању контролисали временски период између фаза убризгавања раствора калцијум-хлорида (CaCl_2) у узорак нископластичне глине. Истраживање је потврдило да оптимизација временског интервала убризгавања стабилизујућег агенса може у значајној мери да се одрази на дистрибуцију Ca^{2+} јона кроз тло, што директно утиче на ефикасност третмана. Такође, уочен је пораст једнооксијалне

чврстоће тла на притисак након четвородневног третмана, посебно у зонама у близини аноде, што је приписано акумулацији Ca^{2+} јона и интензивирању пуцоланских реакција у условима повећане рН вредности тла.

Прегледом доступне литературе, утврђено је да је електрокинетичко третирање ситнозрних тла у комбинацији са хемијским стабилизаторима током протеклог периода у врло скромној мери било предмет научних истраживања у свету. Генерални закључак који се може извести на бази ових истраживања је да комбинација техника хемијске и електрокинетичке стабилизације тла, путем контролисаног тока јона стабилизујућих агенаса под дејством једносмерне струје, има потенцијала за примену у сврху стабилизације тла. Такође је уочено и следеће:

- У фокусу највећег број досадашњих истраживања било је сагледавање ефеката додавања једињења на бази хлорида као течног раствора у тло у комбинацији са електрокинетичким третманом;
- Већина испитивања је вршена углавном на узорцима чистих минерала попут каолинита, на тлу у непосредној близини мора или на експанзивном, односно муљевитом тлу;
- Приказани резултати у највећој мери односе се на испитивање промене хемијских својстава, влажности и једнооксијалне чврстоће на притисак тла;
- Коришћени експериментални модели су претежно малих димензија, што, са једне стране, онемогућава узимање одговарајућег броја репрезентативних узорака за потребе спровођења адекватних лабораторијских опита, а са друге стране резултује малим размаком између електрода, чиме се не одражава реално стање које би постојало на терену у погледу адекватног размака и економичног броја електрода;
- Испитивања основних геомеханичких карактеристика тла пре и после третмана, као што су смичућа чврстоћа тла, кохезија и угао унутрашњег трења, коефицијент водопропусности и сл., готово да и нема;
- У досадашњим истраживањима није вршено поређење ефеката различитих типова стабилизујућих агенаса у комбинацији са електрокинетичким третманом (компарација ефеката традиционалних, отпадних и алтернативних материјала);
- У свим досадашњим истраживањима изостало је сагледавање временског ефекта у смислу контролисања трајности побољшања својстава тла праћењем вредности

параметара тла током дужег временског периода након третмана, а што је од суштинског значаја у геотехничком инжењерству.

На основу свега претходно наведеног, јавила се потреба за спровођењем детаљних експерименталних истраживања са циљем бољег разумевања суштине, ефеката, ефикасности и области примене предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла, као и са циљем разматрања могућности примене нових агенаса који би допринели ефекту стабилизације трајног карактера, што је од елементарног значаја у геотехничком инжењерству, а самим тим и примарни циљ истраживања у оквиру ове дисертације. У складу са тим, у дисертацији су сагледани ефекти хемијске електрокинетичке стабилизације тла на модификовање и побољшање физичких, хемијских и, пре свега, механичких својстава тла. Истраживања су спроведена на локалном глиновитом тлу, које је у природном стању показало неповољне карактеристике, тачније, на тлу које је узето из зоне клизне површи приликом активирања клизишта. Као иновативни стабилизатори у комбинацији са електрокинетичким третманом коришћени су материјали настали као индустријски нуспроизвод (отпадни материјали), чији ефекти применом електрокинетичке стабилизације на ситнозрна тла до сада нису уопште испитивани. Поред њих, сагледани су и традиционални стабилизатори, чији ефекти применом електрокинетичке стабилизације на ситнозрна тла до сада нису довољно испитани, нарочито са аспекта физичко - механичких карактеристика тла, као и алтернативни материјали, чији утицај на геомеханичке карактеристике тла до сада није испитиван.

У почетној фази експерименталних истраживања, која су обухватила само примену технике хемијске стабилизације тла сагледани су индивидуални ефекти десет различитих стабилизатора (два традиционална материјала, два отпадна материјала и шест алтернативних материјала) на побољшање физичко - хемијских и механичких карактеристике глиновитог тла. Избор хемијских стабилизатора заснован је на теоријским и практичним резултатима досадашњих испитивања приликом третмана хемијском стабилизацијом тла. Посебна пажња посвећена је избору хемијских стабилизатора у смислу њихове компатибилности са минералošким саставом локалног глиновитог тла, као и могућности њихове миграције унутар тла у условима примене електрокинетичког поља, односно у погледу њихове растворљивости, која је предуслов за употребу у комбинацији са електрокинетичким третманом, јер се стабилизатори уносе убризгавањем у тло путем перфорираних електрода.

Наредна фаза експерименталних истраживања обухватила је детаљна испитивања спроведена на експерименталним моделима у лабораторијским условима. За три стабилизатора (по један из сваке од разматраних типова стабилизатора, тј. један из групације традиционалних материјала, један из групације отпадних материјала и један од алтернативних материјала) која су показала најбоље ефекте у побољшању својстава тла у претходној фази хемијске стабилизације, у овој фази су сагледани и упоређени њихови појединачни ефекти у комбинацији са електрокинетичким третманом. У претходно припремљена три испитна сандука одговарајућих димензија уграђено је глиновито тло, са утиснутим шупљим челичним електродама повезаним на извор једносмерне струје. У зидовима електрода постоје отвори кроз које се вршило убризгавање одговарајућег хемијског стабилизатора у тло. Вода која се током овог процеса сакупила у зони катода прикупљала се у посуди, при чему је количина прикупљене воде мера ефекта примењеног поступка у погледу дренажа тла. Конструисани експериментални модели омогућили су узимање довољног броја репрезентативних узорака ради спровођења низа адекватних лабораторијских опита (опит директног смицања, опит триаксијалне компресије, едометарски опит, опити одређивања влажности, водопропусности опит крилном сондом, XRF анализа, XRD анализа, и др..) са циљем утврђивања физичко - механичких својстава тла након хемијског електрокинетичког третмана. Такође, сагледани су и ефекти хемијског електрокинетичког третмана тла у погледу промене минералног састава и хемијских својстава глиновитог тла. Са циљем сагледавања ефикасности предложене технике, лабораторијски опити су спроведени на узорцима третираног тла из различитим зона унутар испитних сандука (зона око аноде, средња зона и зона око катоде), као и са различитих дубина. У сврху праћења и сагледавања трајности ефеката примене ове технике, одговарајући лабораторијски опити на репрезентативним узорцима спроведени су и у различитим временским интервалима након третмана тла. Дакле, ефекти хемијског електрокинетичког третмана тла сагледани су кроз компарацију физичко - механичких својстава глиновитог материјала у природном стању утврђених лабораторијским путем пре примене технике стабилизације са одговарајућим физичко - механичким својствима глиновитог материјала одређеним након мешања са хемијским стабилизаторима и након комбинованог хемијског и електрокинетичког третмана. Евалуација предложеног хемијског електрокинетичког третмана тла извршена је кроз сагледавање ефеката спроведеног комбинованог третмана на побољшање физичких и механичких карактеристика испитиваног тла, као што су параметри смичуће отпорности

тла (кохезија и угао унутрашњег трења), модул стишљивости и коефицијент водопропусности, јер би побољшање ових параметара тла у коначном допринело повећању фактора сигурности и тиме стабилности косине, повећању носивости темељног тла и смањењу слегања темељног тла.

У завршној фази експерименталних истраживања извршена је оптимизација предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла за стабилизатор који се у претходној фази показао као најефикаснији. Спроведен је низ испитивања сагледавајући различите услове влажности тла, вредности електричних напона и међусобне размаке електрода. Оптимизација је имала за циљ да пружи одговарајућа сазнања и што боље разумевање ове технике, у сврху процене могућности примене оваквог поступка као потенцијално одрживе теренске методе, како у превентивном деловању, тако и у решавању актуелних проблема у области геотехнике.

Највећи део планираних истраживачких активности, у складу са проблематиком ове дисертације, реализован је у Лабораторији за геотехнику Грађевинско - архитектонског факултета Универзитета у Нишу, док је мањи део испитивања спроведен у Лабораторији за грађевинске материјале Грађевинско - архитектонског факултета, у Лабораторији за општу и неорганску хемију Природно - математичког факултета, у Лабораторији за електронску микроскопију Медицинског факултета Универзитета у Нишу, као и на Институту за рударство и металургију у Бору.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА СТАБИЛИЗАЦИЈЕ ГЛИНОВИТОГ ТЛА ОДВОЈЕНИМ ХЕМИЈСКИМ И ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКИМ ТРЕТМАНИМА

Приликом извођења радова на траси аутопута Е-80, на деоници Ниш – Димитровград, у југоисточном делу Републике Србије, забележено је активирање клизишта у непосредној близини насеља Црвена Река (Слика 5.1). Као део санационих радова, на овој локацији је пројектована и изведена завеса од бушених шипова, дужине и до 30 метара.



Слика 5.1 Локација узорковања материјала

Геолошки и геотехнички услови терена указали су на присуство глиновитог тла са неповољним механичким својствима у зони где је формирана клизна површ. Током извођења радова, тло из зоне клизне површи узето је за потребе лабораторијских испитивања (Слика 5.2). Узорковани материјал представља слој са дубине од око 20 метара, која одговара идентификованој клизној површи. Због свог положаја и проблема које је проузроковао, овај глиновити материјал је одабран као репрезентативан за даљу анализу у третману побољшања његових карактеристика.



Слика 5.2 Ископ материјала за потребе уградње шипова у циљу санације клизишта

Узорковање материјала спроведено је непосредно после бушења, како узорковани материјал не би губио своја природна својства, пре свега природну влажност. За потребе испитивања у лабораторијским условима узимани су поремећени узорци у цаковима од приближно 40 килограма (Слика 5.3).



Слика 5.3 Узорковање материјала на терену

Након што су узорци допремљени у лабораторију, сав материјал је најпре уситњен, а затим промешан како би се хомогенизовао (Слика 5.4а). Први узорци за потребе одређивања влажности су стављени у сушницу одмах по допремању материјала (Слика 5.4б).



Слика 5.4 Припрема материјала допремљеног у лабораторију: а) мешање материјала; б) сушење материјала у сушници

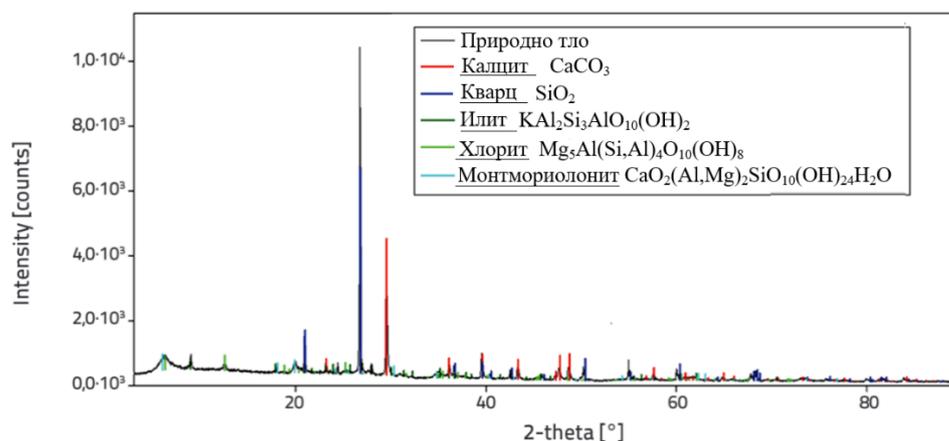
5.1. Испитивања карактеристика глиновитог тла у природном стању

Сва лабораторијска испитивања извршена су у складу са важећим националним стандардима у Лабораторији за геотехнику и Лабораторији за грађевинске материјале на Грађевинско-архитектонском факултету, као и Лабораторији за општу и неорганску хемију на Природно-математичком факултету Универзитета у Нишу. У Табели 5.1 су приказани резултати испитивања карактеристика глиновитог тла у природном стању.

Табела 5.1 Основне карактеристике глиновитог тла у природном стању

Карактеристика тла	Симбол (јединица)	Вредност	Стандард
Специфична тежина	G _s (-)	2,705	SRPS EN ISO 17892-3:2016
Гранулометријски састав	Шљунак (%)	1,2	SRPS EN ISO 17892-4:2017
	Песак (%)	4,9	
	Прашина (%)	40,6	
	Глина (%)	53,3	
Коефицијент неравномерности	C _u (-)	8,0	SRPS EN ISO 14688-2:2018
Коефицијент закривљености	C _c (-)	2,0	
Максимална густина у сувом стању	ρ _{d,max} (%)	1,903	SRPS EN 13286-2:2012/AC:2013
Оптимална влажност	w _{opt} (%)	18,5	
Граница течења	w _L (%)	49	SRPS EN ISO 17892-12:2018/A1:2022
Граница пластичности	w _P (%)	23	
Индекс пластичности	I _P (%)	26	
pH вредност	pH (-)	9,5	SRPS EN ISO 787-9:2019
Електропроводљивост	μS/cm	110	-
Модул стишљивости	M _v (MPa)	12,945	SRPS EN ISO 17892-5:2017
Калифорнијски индекс носивости	CBR (%)	2,71	SRPS EN 13286-47:2022
Бубрење	s (%)	2,91	
Једнооксијална чврстоћа при притиску	q _u (kPa)	205	SRPS EN ISO 17892-7:2018
Коефицијент водопрпусности	k (m/s)	7,12×10 ⁻⁶	SRPS EN ISO 17892-11:2019
Кохезија	c (kPa)	16,9	SRPS EN ISO 17892-10:2019
Угао унутрашњег трења	φ (°)	16,5	

Поред физичких и механичких својстава, одређен је и хемијски састав природног тла помоћу XRD анализе. Карактеристични XRD спектар приказан је на Слици 5.5. Узимајући у обзир минералоски састав, може се видети да доминирају кварц (25%) и калцит (39%). Међу минералима глине првенствено су присутни илит (11%) и монтморилонит (15%), док је хлорит био присутан са садржајем од 10%. Каолинит није идентификован у овом тлу у некој значајнијој мери.



Слика 5.5 XRD спектар глиновитог тла у природном стању

5.2. Експериментална истраживања хемијске стабилизације глиновитог тла

5.2.1. Основна својства коришћених адитива у фази хемијске стабилизације

У оквиру експерименталних истраживања хемијске стабилизације глиновитог тла, сагледан је индивидуални ефекат десет различитих стабилизатора на промене карактеристика глиновитог тла. Сваки од стабилизатора дозиран је са три различита процентуална учешћа у односу на масу у сувом стању, са циљем утврђивања оптималног садржаја стабилизатора у мешавини са тлом. Такође, испитивања су спроведена и у неколико различитих временских интервала након стабилизације, како би се сагледао и ефекат трајности модификованих карактеристика третираног тла. Испитиване су промене једнооксијалне чврстоће при притиску, граница конзистенције (границе течења и границе пластичности) и индекса пластичности, запреминске тежине, коефицијента водопрпусности, модула стишљивости, коефицијента порозности, калифорнијског индекса носивости, бубрења и основних параметара чврстоће – кохезије и угла унутрашњег трења. Поред тога, извршена је и детаљна визуелизација микроструктуре тла применом SEM анализе (увећање микроскопа 1000 и 2000 пута), као и хемијске промене путем FTIR анализе, затим праћењем рН вредности и електропроводљивости.

Стабилизатори коришћени у овом експерименталном истраживању могу се разврстати у три групе и то:

- Традиционални стабилизатори: креч и цемент;
- Индустијски нуспроизводи: електрофилтерски пепео и камено брашно;

- Алтернативни материјали: магнезијум карбонат, водено стакло, калијум хидроксид и једињења на бази хлорида (гвожђе (III) хлорид, калцијум хлорид и калијум хлорид).

Традиционални стабилизатори

Традиционални стабилизатори базирани на калцијума, као што су креч и цемент, представљају основне и широко примењиване реагенсе у хемијској стабилизацији тла. Њихова примена значајно утиче на физичко - хемијске и механичке карактеристике тла кроз низ комплексних хемијских реакција које резултују повећањем чврстоће, смањењем пластичности, повећањем стабилности и свеукупним побољшањем геомеханичких својстава тла.

Креч и цемент омогућавају моментално побољшање механичких својстава, али покрећу и дугорочне хемијске трансформације које значајно утичу на крајњу стабилност и носивост третираног тла. Иако су технички процеси примене ових везива добро истражени, избор и доза стабилизатора морају бити пажљиво прилагођени конкретним условима терена и хемијским својствима тла како би се постигла оптимална ефикасност и трајност стабилизације.

Механизам деловања креча као стабилизатора

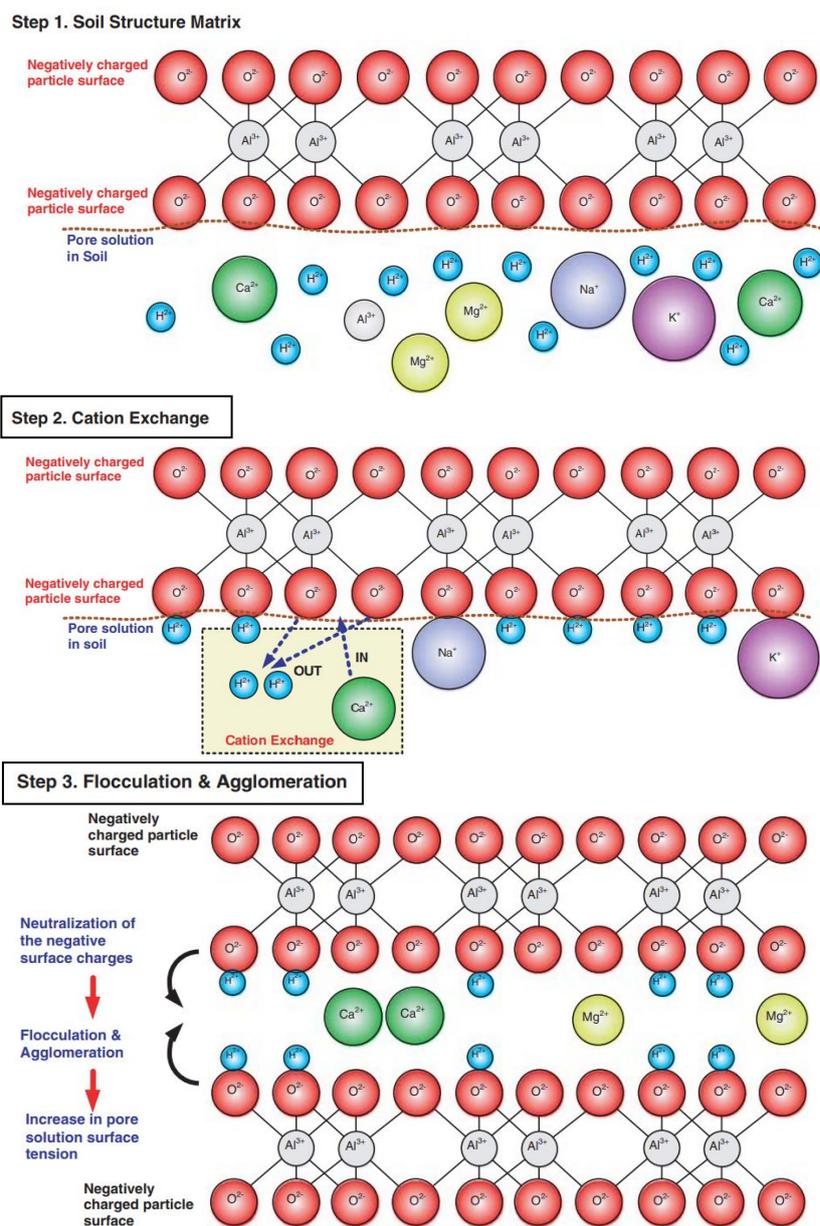
Креч ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) је један од најисплативијих и најефикаснијих стабилизатора, нарочито код ситнозрних тла средње до високе пластичности, али и код крупнозрних тла уколико садрже довољну количину ситнозрних фракција. Његов ефекат базира се на четири кључна процеса: хидратацији, катјонској измени, флокулацији и агломерацији (Firoozi et al., 2017). Дакле, одмах по додавању креча у влажно тло, настају реакције брзе катјонске измене, током којих калцијумови јони из креча замењују моновалентне катјоне натријума, калијума или водоника, на површинама глинених честица. Ова замена доводи до смањења електростатичког одбијања и покреће процес флокулације и агломерације – појаву у којој се честице глине повезују у веће агрегате. Таква трансформација резултује смањењем пластичности и повећањем пропусности тла, што има директан утицај на његово понашање под оптерећењем. Уз то, присуство хидроксидних јона из креча доводи до наглог пораста рН вредности тла, стварајући алкалну средину неопходну за отпочињање спорих, али дуготрајних пуцоланских реакција. Те реакције подразумевају интеракцију калцијума из креча са силицијум-диоксидом и алуминијум-оксидом

присутним у минералној структури глинених честица.

Другим речима, пораст рН вредности тла услед присуства OH^- јона доприноси слабљењу интеркристалних веза, што омогућава бољу растворљивост силицијум-диоксида (SiO_2) и алуминијум-оксида (Al_2O_3) – основних минералних састојака глине. Ови елементи улазе у хемијску реакцију са калцијумом и формирају секундарне минерале као што су калцијум-силикат-хидрати (CSH) и калцијум-алуминат-хидрати (CAH), који имају геласту структуру и изузетна везивна својства (Слика 5.6). Ове пуцоланске реакције могу трајати недељама, али резултују значајним и дуготрајним побољшањем структурне стабилности тла. Док каолинит углавном реагује са алуминијумом (формирајући CAH фазе), монморилонит углавном производи CSH и CAH једињења (Bell, 1996; Eisazadeh et al., 2012).

Све док има довољно калцијума из креча да се комбинује са растворљивим силицијум-диоксидом и алуминијум-оксидом, пуцоланска реакција ће се наставити. У исто време потребна је довољно висока рН вредност тла да одржи растворљивост силицијум-диоксида и алуминијум-оксида (Little, 2010). Повећање чврстоће тла такође у великој мери зависи од количине силицијум-диоксида и алуминијум-оксида присутних у самој глини; стога је утврђено да је стабилизација кречом ефикаснија за тла са већим садржајем монморилонита него каолинита (Lees et al., 1982). Ови хидрати имају геласту, високо везивну структуру, која значајно доприноси повећању чврстоће и стабилности тла у дугом временском периоду. Након додавања креча у тло, у првој фази се јавља фиксација креча – процес у коме се Ca^{2+} јони адсорбују на површину глинених минерала. Тек по задовољењу афинитета тла према калцијуму, вишак креча постаје доступан за пуцоланске реакције. Ова гранична количина креча позната је као тачка фиксације креча, која обично износи 1–3% масе тла (Hilt and Davidson, 1960; Bell, 1996).

Поред пуцоланских реакција, карбонизација такође може довести до дугорочног повећања чврстоће тла стабилизованог кречом. Карбонизација се јавља када креч реагује са угљен-диоксидом из атмосфере и ствара нерастворљив калцијум-карбонат. Ово може бити предност, јер након мешања, спори процеси карбонизације и очвршћавања могу довести до дугорочног повећања чврстоће тла. Међутим, пре мешања, излагање креча ваздуху треба избегавати правилним методама руковања и убрзаним поступцима изградње како би се избегла прерана карбонизација креча (Cristelo et al., 2012).



Слика 5.6 Механизам хемијске стабилизације тла (Shon et al., 2010)

Код глиновитих тла, промене настају и на микроструктурном нивоу — смањује се дељина дифузног двоструког слоја и долази до агломерације честица (Rogers and Glendinning, 2000; Elkady, 2016). У алкалном окружењу долази до растварања силицијумских и алуминијумских компоненти и њихове реакције са Ca^{2+} и OH^- , што резултује трајном стабилизацијом (Federico et al., 2015). Минералoшки састав тла има велики утицај на ефикасност поступка стабилизације. На пример, монморилонит, због своје високе специфичне површине, показује већу реактивност и доприноси бржем повећању чврстоће тла у поређењу са каолинитом и илитом (Bell, 1993; Sivapullaiah et al., 2000). Осим минералoшког састава, за примену креча јако је битна и величина зрна

тла. Најбољи резултати постижу се код тла код којих је више од 25% честица ситнијих од 0,074 mm и индекс пластичности $I_p > 10\%$ и (National Lime Association, 2004). Песковита тла без довољног садржаја пуцоланских компоненти не реагују ефикасно на додавање креча (Nelson et al., 2015).

Са повећањем количине креча, повећава се степен флокулације, концентрација једињења која доприносе очвршћавању тла и укупна ефикасност стабилизације, што се види и кроз смањење интензитета пикова XRD спектра минерала глине (Sakr et al., 2009). Веће рН вредности (>12), постигнуте додавањем $>1\%$ креча, подстичу растворљивост силицијумских и алуминијумских фаза, чиме се омогућава формирање CSH и CАН (Dash and Husein, 2012). Ипак, садржај креча у мешавини са тлом већи од оптималног утиче на смањење максималне густине тла у сувом стању и повећање оптималног садржаја воде у сврху збијања тла (Bell, 1996; Hussain and Dash, 2015), односно пик Прокторове криве на дијаграму " $\rho_{d,max} - w$ " се помера удесно и наниже. Са преко 3% креча, нема великих осцилација у вредностима густине у сувом стању и влажности. Повећање концентрације Ca^{2+} јона доводи до дифузије слободне воде ка површини честица, што може довести до дисперзивне структуре, повећавајући компактибилност тла и густину у сувом стању (Johnson, 1949; Mitchell and Soga, 2005). Додавањем креча, граница течења (w_L) тла се обично смањује, али (додуше, знатно ређе) може доћи и до повећања ове вредности, у зависности од јонске измене и хемијског састава. Границе косистенције се мењају, јер се мења електролитска концентрација у порама (Sridharan et al., 1986). Граница пластичности (w_P) тла, са друге стране, најчешће расте, што доводи до смањења индекса пластичности (I_P) тла ($I_P = w_L - w_P$). Уколико се прекорачи оптимална количина креча, може доћи до неповољних ефеката, попут прекомерне порозности због вишка CSH/CАН гелова, који апсорбују велику количину воде, што умањује стабилизацију и може довести до повећања границе течења и бубрења тла (Dash and Hussain, 2012).

Утицај креча није ограничен само на карактеристике тла у статичким условима. У динамичким условима (земљотреси, вибрације), повећање садржаја креча доводи до раста динамичког модула смицања и, док се коефицијент пригушења смањује због круће структуре тла (Zhao et al., 2020).

Оптимални садржај креча у мешавини са тлом зависи од врсте тла, садржаја глине и услова очвршћавања, и може се утврдити лабораторијским путем, али се обично креће у опсегу 2–8% (Bell, 1996). На основу досадашњих искустава, препоручује се додавање 1% креча на сваких 10% глине (Ingles, 1987). У експерименталним истраживањима у оквиру ове дисертације коришћен је комерцијални хидратисани креч CL 90 S, хемијског састава: CaO – 71,01%, MgO – 3,05% и SiO₂ – 2,14%. Са циљем утврђивања оптималног садржаја креча у мешавини са глиновитим тлом, узорци тла третирани су са додатком 3%, 5% и 7% креча.

Механизам деловања цемента као стабилизатора

Осим креча, најчешће коришћени хемијски адитив је комерцијални портланд цемент, који је првобитно нашао примену дужу од једног века у бројним гранана грађевинарства у сврху справљања бетона, док је његова употреба у сврху стабилизације тла знатно новијег датума (Estabragh et al., 2014; Ma et al., 2018). Портланд цемент је фино уситњена хетерогена смеша, које се састоји од четири различита оксида, као што су трикалцијум-силикат (C₃S), дикалцијум-силикат (C₂S), трикалцијум-алуминат (C₃A) и тетракалцијум-алуминоферат (C₄AF), где је C - CaO, S - SiO₂, A - Al₂O₃, F - Fe₂O₃.

Иако су механизми стабилизације креча и цемента готово идентични (Prusinski and Bhattacharja, 1999; Estabragh et al., 2012), цемент се фаворизује због своје лаке доступности, брзог повећања чврстоће тла на притисак (често у периоду од две до четири недеље) и релативно бољег ефекта у погледу трајног повећања чврстоће (Ouhadi et al., 2014). Механизам стабилизације такође се састоји од хидратације, катјонске измене, флокулације и пуцоланске реакције. Када се глина помеша са цементом и водом, хидратација се одвија истог тренутка. C₃S и C₂S, присутни у цементу, реагују са водом и ослобађају јоне калцијума у глиновиту смешу и тиме формирају цементно једињење као што је CSH. (Prusinski and Bhattacharja, 1999). Ови цементни хидратациони производи су геласте структуре и доприносе значајном побољшању чврстоће тла веома брзо. Генерално, портланд цемент који садржи се веће количине C₃S брзо реагује са водом и тиме више доприноси раном повећању чврстоће него што доприноси цемент који се састоји од C₂S.

Овај процес је егзотерман. Ослобођена топлота повећава се са повећањем почетног садржаја воде и са повећањем температуре приликом очвршћавања (Abbas and Majdi, 2017). Штавише, хидратисани креч (Ca(OH)₂), који се формира током

хидратације C_3S и C_2S , разлаже се на OH^- и Ca^{2+} јоне. Затим, Ca^{2+} јони доприносе флокулацији тла. Такође, цемент реагује са пуцоланским материјалима као што су силицијум-диоксид и алуминијум-оксид. Сходно томе, формирају се цементна једињења, тј. CAH и CSH , што доводи до јачања међучестичних веза и до побољшања карактеристика тла (Estabragh et al., 2014). Захваљујући формирању додатног цементног гела, тло третирано цементом показује већу отпорност на спољашње утицаје од тла третираног кречом (Ouhadi et al., 2014). У почетку, када пуцоланске реакције нису од великог значаја, зрна глине су ојачана цементним производима хидратације. Међутим, током времена, када се пуцоланске реакције развијају, зрна тла су додатно ојачана продукцијом ових реакција. Сходно томе, веза између зрна тежи да постане јача са временом, што доводи до значајног пораста чврстоће које је релативно већа од оне код тла стабилизованог кречом.

Примена цемента као адитива за побољшање инжењерских својстава тла проучавана је у неколико значајних истраживања (Bhattacharja and Bhattu, 2003; Ma et al., 2018). Уочени резултати указују да се, са додатком цемента, пластичност тла и потенцијал бубрења значајно смањују, док се стишљивост и чврстоћа тла на притисак повећавају. Поједини аутори (Goodarzi et al., 2016) су установили да додавање овог стабилизатора повећава концентрацију вишевалентних катјона (нпр. Ca^{2+}). Стога, једновалентни катјони (нпр. Na^+ и K^+), који постоје у минералима глине, имају тенденцију да се замене вишевалентним катјонима, што доводи до смањеног потенцијала бубрења тла. Слично кречу, на стабилизацију цементом такође утиче неколико фактора, као што су садржај цемента, водоцементни фактор, и садржај сулфата и органских материја. Према истраживањима (Sasanian and Newson, 2014), глине са високом активношћу реагују боље са цементом и формирају чвршће цементне везе.

За стабилизацију цементом готово да нема ограничења када је врста тла у питању, али се најпогоднијима сматрају крупнозрна тла са довољним уделом ситнозрних честица, као и глине са ниским до средњим индексом пластичности. Међутим, глине високе пластичности често је тешко равномерно измешати са цементом, па се у тим случајевима препоручује додаток мале количине креча ради лакшег третирања. Цемент је економично и практично решење када индекс пластичности тла не прелази 20% (Chittoori, 2008). Глине са нижим вредностима границама течења показују већу притисну

чврстоћу него оне са вишим (Por et al., 2017). Песковита тла могу бити третирана под условом да мање од 45% материјала остаје на сити величине 4,75 mm (Little and Nair, 2009).

Оптимална количина цемента потребна за стабилизацију тла зависи од садржаја глине. За модификацију експанзивних тла потребно је од 3% до 16% цемента по маси (Bell, 1993). Код глине високе пластичности, забележен је тренд смањења границе течења све док садржај цемента не достигне 6%, након чега су даље промене незнатне (Mutaz et al., 2011; Mahedi et al., 2018). Насупрот томе, за глине које се одликују ниском пластичношћу утврђено је да је граница течења благо порасла са садржајем цемента од око 3%, а затим се смањила (Sariosseiri and Muhunthan, 2009). За глине са границом течења од 40% до 60%, довољно је 4% до 12% цемента за постизање значајног побољшања чврстоће. За глиновита тла код којих је граница течења изнад 60%, често је потребно више од 12% цемента, што често није економично (Horribulsuk et al., 2010).

У овом истраживању је коришћен цемент HRB E2, хемијског састава: СаО (51,73%), SiO₂ (15,20%), Al₂O₃ (5,13%), Fe₂O₃ (2,39%), SO₃ (1,87%) и MgO (1,02%). Ова врста цементног везива се првенствено користи за стабилизацију крупнозрног тла. Из тог разлога, испитивања су спроведена са већим процентуалним уделом цементног везива у мешавини са глиновитим тлом у поређењу са процентуалним уделом креча. Ради одређивања оптималног садржаја цемента у мешавини са глиновитим тлом, испитани су узорци са додатком 5%, 10% и 15% цемента.

Отпадни индустријски материјали као стабилизатори

У савременом свету се са урбанизацијом дешава и огроман индустријски раст, нарочитом у еколошким оквирима. Приликом рада различитих постројења генерише се огромна количина отпада, између осталих летећег пепела и каменог брашна. Ови отпадни материјали коришћени су као стабилизатори у даљим испитивањима.

Летећи (електрофилтерски) пепео настаје у термоелектранама, где се помоћу филтерских уређаја одваја из отпадних гасова. Летећи пепео представља материјал којег је потребно збринути и према њему поступати као према грађевинском отпаду, и то само у случајевима када не спада у класу опасних отпада, односно, уколико нема повећану радиоактивност. У грађевинарству је његова примена у почетку била везана искључиво за справљање бетона, али данас има далеко ширу примену. Иако се још увек најчешће

користи за производњу бетонских производа (приближно 65%), све је чешћа његова употреба и у сврху стабилизације тла, приближно 7% (АСАА, 2023). Због значајне примене у овом веку, неки од еминентних истраживача уврстили су летећи пепео у традиционалне стабилизаторе (Turkoz et al., 2014, Latifi et al., 2016). Иако би се могао употребити при стабилизацији тла као додатак кречу или цементу, истраживања су потврдила да летећи пепео може побољшати својства тла без додатних активатора (Kolay, 2011; Vukićević et al., 2019).

У термоелектранама у Србији годишње се потроши од 35 до 40 милиона тона угља, при чему настане око 7 милиона тона електрофилтерског пепела. Ово чини готово 80% индустријског отпада у Србији. Од ове количине се тек 3% користи у производњи цемента, па постоји огроман потенцијал за примену електрофилтерског пепела у сврху стабилизације тла.

Успех побољшања тла летећим пепелом зависи од својстава тла, удела летећег пепела у мешавини са тлом, временског интервала мешања са тлом и количине воде у тренутку збијања (АСАА, 2003). Досадашња истраживања су показала да оптимални удео пепела у мешавини са тлом износи од 10% до 30%, у зависности од врсте тла и пепела (Zafirovski, 2023).

Електрофилтерски пепео коришћен у овом раду депонован је из термоелектране Костолац. Има следећи хемијски састав: SiO_2 (56,38%), Al_2O_3 (17,57%), Fe_2O_3 (10,39%), CaO (7,46%) и MgO (2,13%). За потребе одређивања оптималног садржаја електрофилтерског пепела, у овој дисертацији испитани су узорци глиновитог тла са додатком 10%, 15% и 20% пепела.

Камено брашно представља отпад из каменолома и успешно се примењује као материјал за завршну обраду на аутопутевима. Настаје приликом производње дробљењог камена, где се око 20% стенског материјала претвара у отпадни материјал - камено брашно. Истраживања су показала да се додавањем каменог брашна успешно могу побољшати геотехничка својства еспанзивних тла (Ene and Oneqila, 2009). Добијени резултати указују на могућност смањења пластичности и повећања носивости тла са повећањем садржаја каменог брашна.

Досадашња истраживања показала су да оптималан садржај каменог брашна у мешавини са тлом није већи од 15% (Omowumi, 2017; Gbadamosi, 2021), те су у овом

истраживању испитани узорци тла са додатком 5%, 10% и 15% каменог брашна. Камено брашно коришћено у овом испитивању депоновано је из каменолома Тијовац. Доминантна стена у каменолому је доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), који чини 99% стене, док секундарни минерали укључују калцит (CaCO_3) и мусковит $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$.

Алтернативни материјали као стабилизатори

Алтернативни адитиви су материјали који не садрже једињења на бази калцијума у великим количинама (Saygili and Sahin, 2017). За потребе предметних експерименталних истраживања коришћена су једињења на бази магнезијума (магнезијум – MgCO_3) и калијума (калијум хидроскид – KOH), затим једињења на бази хлорида (гвожђе (III) хлорид – FeCl_3 , калцијум хлорид – CaCl_2 и калијум-хлорид – KCl), као натријум-силикат – Na_2SiO_3 . Избор поменутих алтернативних стабилизатора извршен је у складу са резултатима претходних истраживања других аутора, у којима је утврђено да додавање ових материјала може побољшати одређена својства тла.

Ефекти додавања алтернативних реагенаса испитивани су са аспекта једнооксијалне чврстоће тла на притисак само за случај примене конкретног адитива на одређеном типу тла (нпр. ефекат магнезијум-карбоната на песковито/муљевито тло (Seco et al., 2020), натријум-силиката на тропско тло (Latifi et al., 2014), соли на бази хлорида на муљевито-глиновито тло (Jafer, 2013). Недостатак ових истраживања је немогућност упоредивости резултата у погледу ефеката појединачних стабилизатора. Управо у овом аспекту огледа се једна од иновативности овог истраживања, јер се појединачни ефекти различитих врста стабилизатора испитују на истој врсти тла, што омогућава њихово међусобно поређење и у коначном утврђивање и селекцију најефикаснијег стабилизатора. Када је реч о чврстоћи тла на смицање и њених релевантних параметара, постоји прилично ограничена база претходних истраживања, посебно са аспекта ефеката алтернативних адитива који се разматрају у овом истраживању. У досадашњим истраживањима углавном су разматрани ефекти комбинације традиционалних адитива са алтернативним материјалима (Huat et al., 2011; Vakili et al., 2016)). Према томе, уочен је недостатак истраживања у погледу примене различитих врста алтернативних адитива на исту врсту тла и међусобном поређењу њихових појединачних ефеката на параметре чврстоће тла на смицање, што представља још један иновативни аспект овог истраживања.

Магнезијум-карбонат ($MgCO_3$) је неорганско једињење које се у природи јавља у неколико минералних облика, као што су магнезит и доломит. Као стабилизатор, магнезијум-карбонат представља алтернативу традиционалним везивима који су на бази калцијума, пре свега због способности да реагује у присуству воде и у условима веће киселости, као и због еколошки прихватљивијег утицаја у поређењу са цементом или кречом. Када се $MgCO_3$ дода тлу, посебно оном са киселом рН вредношћу, он пролази кроз процес разлагања у присуству угљен-диоксида, формирајући магнезијум-хидроксид ($Mg(OH)_2$) и угљен-диоксид. Магнезијум-хидроксид је благо базна супстанца, која доприноси повећању рН вредности тла, чиме се стварају услови за бољу растворљивост глинених минерала као што су силицијум-оксиди и алуминијум-оксиди. Ово је предуслов за иницирање пуцоланских реакција, мада у мањем интензитету него у случају примене традиционалних стабилизатора.

Предност магнезијум-карбоната је и његова способност да учествује у заменама катјона (Mg^{2+} уместо Na^+ или K^+), што доприноси флокулацији и агломерацији честица у глиновитом тлу. У поређењу са калцијум-хидроксидом, реакције са $MgCO_3$ су спорије и захтевају дуже време за развој механичке чврстоће. Из тог разлога се магнезијум-карбонат чешће користи као допунски или секундарни стабилизатор, у комбинацији са другим реагенсима (нпр. цементом или електрофилтерским пепелом). Такве комбинације могу имати синергијски ефекат – Mg^{2+} доприноси структуралној стабилизацији, док Ca^{2+} омогућава брже хемијске реакције.

Натријум-силикат (Na_2SiO_3), познат и као водено стакло, коришћен је за стабилизацију тла у специфичним условима и може се сматрати еколошки прихватљивим и безбедним материјалом (Larsson, 2001; Lindh, 2001). Доприноси смањењу пропусности и побољшању кохезије ситнозрних тла. Натријум-силикат формира хемијске везе са честицама тла, смањујући њихову подложност ширењу и скупљању у присуству воде. Истраживање *Pakir et al. (2015)* је указало на успешну примену овог адитива за побољшање својстава морске глине. Такође, средства за инјектирање се заснивају на реакцији силикатног раствора са тлом, да би се формирао колоид који се даље полимеризује и на тај начин се формира гел који повезује честице тла или седимента попуњавајући поре и шупљине. Натријум-силикат је бели прах или безбојни раствор који је лако растворљив у води, стварајући алкални раствор. Може да се користи као средство за пептизацију да би се побољшала способност мешања *in situ*

и на тај начин повећала хомогеност и чврстоћа тла. Натријум-силикат треба помешати са тлом пре додавања других стабилизатора, уколико се примењује мешавина више адитива (Моayedі, 2012), док се понекад користи у тлу са циљем смањења запреминске тежине и може имати одређени негативан утицај на чврстоћу тла на притисак. Различита истраживања су показала да натријум-силикати могу повећати чврстоћу и носивост песковитих и мочварних тла, као самостални реагенс или уз додатак традиционалним стабилизаторима (Ahnberg et al., 2003). Као везивно средство коришћен је натријум-силикат СП 3,0-3,3 у течном стању. Према наводима произвођача, ГаленикаМагмаСил, густина натријум-силиката је била $1,38 \text{ g/m}^3$, а рН вредност је износила 10 - 11.

Калијум-хидроксид (КОН) је високо алкална супстанца која се може користити за стабилизацију тла у одређеним условима. Посебно је ефикасан за побољшање носивости и компактности глиновитих тла. Додатак калијум-хидроксида покреће реакције које повећавају чврстоћу тла на притисак и смањују његову осетљивост на промене у садржају влаге. Калијумови K^+ јони омогућавају додатне компактне и блиске поликондензационе реакције, што значајно повећава општу дуготрајну чврстоћу тла активираним алкалијама. Према бројним ауторима, једињења које садрже K^+ јоне показале су ниже степене кристалитета и веће специфичне површине и чврстоћу на притисак у режимима дугог очвршћавања (Elkhebu et al., 2019).

У доступној литератури, процентуални удео адитива на бази магнезијума, калијума и натријум-силиката не прелази 10% (Maaitah, 2012; Yi et al., 2013; Latifi et al., 2014; Gu et al., 2014; Seco et al., 2020), док је садржај ових адитива у комбинацији са другим стабилизаторима често нижи од 3% (Huat et al., 2011; Vakili et al., 2016; Gobinath, 2020). Стога су за потребе овог истраживања, као и у случају хемијске стабилизације кречом, испитивани су узорци глиновитог тла са додатком 3%, 5% и 7% магнезијум-карбоната, а иста процентуална учешћа су изабрана и за мешавину глиновитог тла са натријум-силикатом, односно са калијум-хидроксидом.

Једињења на бази хлорида су реагенси углавном у течном стању, који су за транспорт економичнији од традиционалних и који се на лицу места разблажују водом. Могу се директно наносити на слој тла пре збијања или убризгавати под притиском у дубље слојеве (Martо et al., 2014). Нека истраживања (Jafer, 2013; Latifi et al., 2016; Zumrawi et al., 2016) су показала да електролити на бази хлорида могу ефикасно заменити креч или цемент због своје боље растворљивости, лакшег мешања са тлом и

обезбеђивања катјона потребних за процес катјонске измене. Када је реч о оптималном садржају реагенса на бази хлорида, у литератури се може наћи податак да је понекад и мање од 1% хлорида оптимална количина потребна за стабилизацију, што се углавном односи на експанзивна тла (Singh et al., 2020; Vinod, 2021), док је у неким истраживањима утврђен оптимални садржај хлорида у мешавини са тлом од око 5% (Jafer, 2013).

Као стабилизатори у овом истраживању коришћени су јаки електролити попут калијум-хлорида (KCl), калцијум-хлорида (CaCl₂) и гвожђе-хлорида (FeCl₃). За потребе одређивања оптималног садржаја у мешавини са глиновитим тлом, за сваки од разматраних хлорида испитани су узорци тла са додатком 1%, 2% и 3% реагенса.

5.2.2. Резултати спроведених експерименталних истраживања стабилизације глиновитог тла хемијским третманом

Испитивање промена својстава глиновитог тла третираног сваким од претходно описаних хемијских стабилизатора спроведено је са циљем утврђивања најефикаснијег стабилизатора из сваке од три разматране групације стабилизујућих агенаса (традиционални, отпадни и алтернативни материјали), а чији би се ефекти у комбинацији са електрокинетичким третманом испитали у наредној фази експерименталних истраживања.

Ефекти хемијске стабилизације на промену карактеристика тла сагледани су кроз две фазе, при чему су и у првој и у другој фази, узорци испитивани у различитим временским интервалима након хемисјког третмана, како би се сагледала трајност ефеката стабилизације.

У првој фази извршено је испитивање једнооксијалне чврстоће третираног тла при притиску, промена Атербергових граница (граница течења, граница пластичности), промена рН вредности и електропроводљивости. Сваки од стабилизатора коришћен је са три различита процентуална учешћа у мешавини са глиновитим тлом, са циљем одређивања оптималне количине за сваки стабилизатор понаособ. Оптимални садржај стабилизатора представља његово процентуално учешће у мешавини са тлом које обезбеђује услове за најефикасније побољшање слабих својстава тла у његовим природним условима.

У другој фази, припремљени су нови узорци са претходно утврђеном оптималном количином стабилизатора у мешавини са тлом, и то за сваки стабилизатор посебно. На овим узорцима спроведен је нови сет лабораторијских испитивања. Испитиване су

промене модула стишљивости, калифорнијског индекса носивости (CBR), бубрења и основних параметара смичуће чврстоће (кохезије и угла унутрашњег трења). Поред тога, узорци са оптималним садржајем хемијских додатака подвргнути су и хемијској анализи применом FTIR и SEM техника.

5.2.2.1. Утицај стабилизатора на једнооксијалну чврстоћу тла при притиску

Узорци за испитивање једнооксијалне чврстоће при притиску, према стандарду SRPS EN 13286-41:2022, припремани су у лабораторијским условима, са оптималном влажношћу, која је изабрана да буде иста као и оптимална влажност глиновитог тла у природном стању по Проктору (18,5%, Табела 5.1), ради упоредивости резултата за природно и третирано глиновито тло. Цилиндрични узорци висине 15 cm и пречника 10 cm су збијани током спровођења стандардног Прокторовог опита енергијом збијања од 600 kNm/m^3 . Узорци су до одговарајућег тренутка испитивања након хемијског третмана чувани у пластичној фолији. Испитивања су спроведена на преси произвођача *UTEST*, која може да забележи и релативно мале вредности притисака (Слика 5.7).



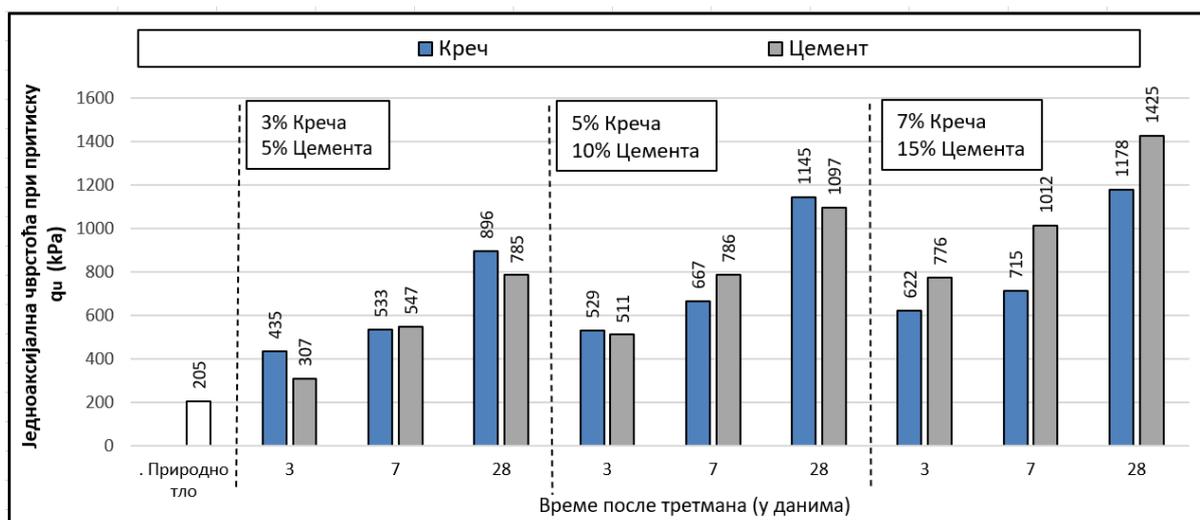
Слика 5.7 Опрема и узорци за испитивање једнооксијалне чврстоће при притиску

Да би се испитала промена једнооксијалне чврстоће при притиску (q_u), коришћени су узорци са различитим процентуалним учешћем у мешавини са тлом за сваки од разматраних реагенаса, са циљем одређивања оптималног садржаја реагенаса у смеши са глиновитим тлом. На Сликама 5.8–5.11 приказани су резултати добијени за сваки од разматраних реагенаса са три различита процентуална учешћа у мешавини са тлом. Узорци су испитани 3, 7 и 28 дана након хемијског третмана. Приказане вредности

представљају средњу вредност граничног оптерећења при лому три узорка.

а) Утицај традиционалних стабилизатора на једнооксијалну чврстоћу на притисак (q_u)

На основу резултата добијених додавањем традиционалних реагенаса (креча, цемента) може се закључити да су вредности q_u након хемијског третмана глиновитог тла вишеструко повећане (Слика 5.8).



Слика 5.8 Вредности једнооксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла традиционалним стабилизаторима

Са додатком **креча** постигнуто је значајно повећање вредности q_u након хемијског третмана. Без обзира на количину додатог адитива, уочено је значајно побољшање овог својства тла током времена. Наиме, резултати испитивања након 3 и 7 дана од хемијског третмана показују сличне вредности q_u , док су 28 дана након третмана регистроване вредности q_u знатно веће. Тако, са додатком 3% креча, након 3 дана од хемијског третмана, вредност q_u се повећала два пута (од вредности 205 кПа за тло у природном стању на 435 кПа). После 7 дана, вредност q_u се повећала на 533 кПа, а након 28 дана повећање вредности q_u је износило четири пута (896 кПа). Сличан тренд повећања вредности q_u са временом је забележена и на узорцима са 5% и 7% додатог креча. Оно што је такође уочено јесте да се посебно значајно побољшање овог својства тла постиже када је садржај креча у мешавини са глином повећан са 3% на 5%, док повећање садржаја креча на 7% није допринело значајнијој разлици у вредности q_u у поређењу са резултатима за случај 5% додатка креча. Овај резултат је у складу са закључцима истраживања других аутора (Ene and Okagbue, 2009; Sharma et al., 2018),

према којима тло помешано са нижим садржајем креча показује већу вредност q_u у поређењу са тлом помешаним са већим количинама креча. Тако, након 28 дана од хемијског третмана, вредност q_u са додатком 3% креча повећана је скоро четири пута (896 kPa), са додатком 5% креча повећање вредности q_u је износило 5,5 пута (1145 kPa), док је вредност q_u са додатком 7% овог адитива била готово шест пута већа (1178 kPa) од почетне вредности за природно тло (205 kPa). Овакав резултат указује на закључак да се оптималним садржајем креча у мешавини са глиновитим тлом може сматрати вредност од 5%.

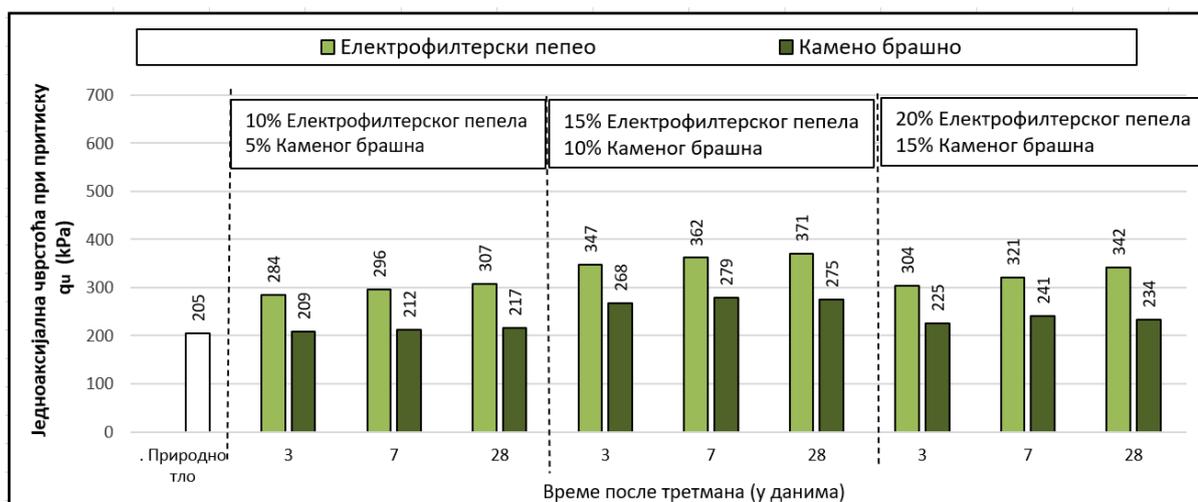
За разлику од креча, са додатком **цементног везива** тренд повећања вредности q_u је забележен како са повећањем процентуалног учешћа везива, тако и током времена протеклог од хемијског третмана. За период после 3 дана од третмана са додатком 5% цементног везива дошло је до повећања вредности q_u 1,5 пута (307 kPa), са додатком 10% цемента повећање вредности q_u је износило 2,5 пута (511 kPa), док је са додатком 15% цемента вредност увећана скоро 4 пута (776 kPa) у односу на природно тло (205 kPa). Сличан тренд повећања, који је приближно линеаран, забележен је и опитима након 7 и 28 дана од третмана са додатком цементног везива. Максимална вредност q_u забележена је додавањем 15% цемента (1425 kPa) после 28 дана од третмана (повећање вредности q_u готово седам пута), а што је уједно и максимална вредност q_u забележена поређењем свих разматраних материјала у улози стабилизатора (традиционалних, отпадних и алтернативних). Овакав резултат указује на закључак да се оптималним садржајем цемента може сматрати вредност од 15%.

Поређењем ове две врсте традиционалних стабилизатора, запажено је да се за све временске интервале испитивања након хемијског третмана глиновитог тла, са додатком 3% креча постижу бољи резултати него са додатком 5% цементног везива. Додавањем 5% креча, односно 10% цементног везива, постижу се веома блиске вредности q_u . Додавањем 15% цемента постижу се нешто више вредности q_u у поређењу са додатком 7% креча.

У коначном би се могло закључити да је при стабилизацији глиновитог тла, са аспекта овог својства тла, употреба креча рационалнија у односу на цемент.

б) Утицај стабилизатора на бази отпада на једнооксијалну чврстоћу на притисак (q_u)

Додавање електрофилтерског пепела, односно каменог брашна, резултовало је слабијим побољшањем овог својства тла у односу на традиционалне реагенсе (Слика 5.9). Оно што је такође приметно јесте да је промена q_u вредности израженија са порастом количине додатог отпадног материјала (процентуално учешће електрофилтерског пепела и каменог брашна у мешавини), док временски интервал који је протекао од хемијског третмана није имао значајнијег удела.



Слика 5.9 Вредности једнооксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла стабилизаторима из индустријског отпада

Максималне вредности q_u са додатком 10% (307 kPa), односно 20% (342 kPa) електрофилтерског пепела су биле ниже неголи са додатком 15% (371 kPa) након 28 дана од хемијског третмана. Овакав резултат указује на закључак да се за оптимални садржај електрофилтерског пепела у мешавини са глиновитим тлом може сматрати вредност од 15%. Вредност q_u забележена 3 дана након третмана није се у значајнијој мери мењала са даљим протоком времена.

Сличан тренд промене вредности q_u забележен је на узорцима са додатком каменог брашна, додуше са нешто нижим вредностима у поређењу са случајем примене електрофилтерског пепела. Наиме, у односу на тло у природном стању (205 kPa) максимално побољшање (279 kPa) постигнуто је додатком 10% каменог брашна, 7 дана након третмана. Слични резултати добијени су после 3 дана (268 kPa), односно после 28 дана од третмана (275 kPa). Додавање 5% и 15% каменог брашна није допринело значајнијем повећању вредности q_u . Овакав резултат указује на закључак да се оптималним садржајем каменог брашна може сматрати вредност од 10%.

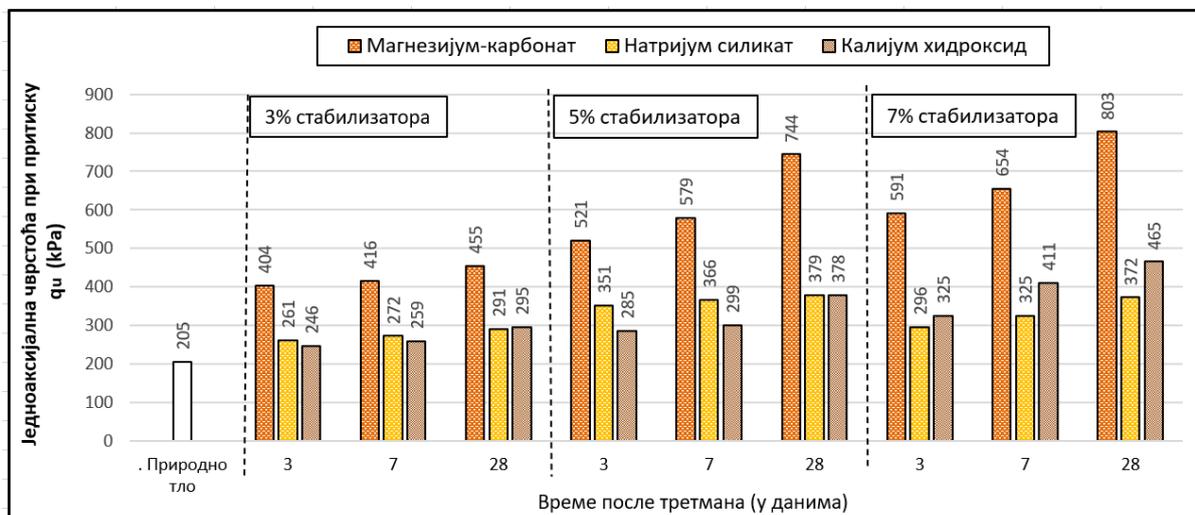
в) Утицај алтернативних стабилизатора на једнооксијалну чврстоћу на притисак (q_u)

Три дана после третмана са додатком 3%, 5% и 7% магнезијум-карбоната, вредности q_u су сличне вредностима добијеним при додавању креча. Међутим, током времена, побољшање овог својства тла није било толико изражено као у случају додавања традиционалних стабилизатора. Стога, са додатком 3% магнезијум-карбоната, вредност q_u се повећала са 205 кПа на 404 кПа након 3 дана од третмана. После 7 дана, вредност q_u се повећала на 416 кПа, а након 28 дана вредност q_u је износила 455 кПа. За узорке са додатком 5% односно 7% магнезијум-карбоната, приметан је нешто већи тренд повећања вредности q_u током времена. Поред тога, већи пораст вредности q_u је примећен када се садржај магнезијум-карбоната повећао са 3% на 5% него када се повећао са 5% на 7%. На пример, након 28 дана, вредност q_u са додатком 3% магнезијум-карбоната повећала се приближно два пута (455 кПа); са додатком 5% магнезијум карбоната, повећање је било приближно 3,5 пута (744 кПа), док је вредност q_u са додатком 7% магнезијум-карбоната била четири пута већа од почетне вредности за природно тло (803 кПа). Стога је утврђено да је оптималан садржај магнезијум-карбоната са становишта овог својства тла 5%.

Измерене вредности q_u са додатком натријум-силиката или калијум-хидроксида биле су значајно ниже од оних добијених са додатком магнезијум-карбоната (Слика 5.10). Ипак, њихова примена је резултовала повећањем чврстоће тла у односу на тло у природном стању. Максимална вредност q_u за натријум-силикат добијена је додатком 5% овог стабилизатора након 28 дана (379 кПа). Резултати су такође показали да су нешто веће вредности q_u добијене додатком 5% натријум-силиката него додатком 7% силиката у свим временским интервалима након третмана. Овакав резултат указује да је оптималан садржај овог адитива у мешавини са глиновитим тлом 5%.

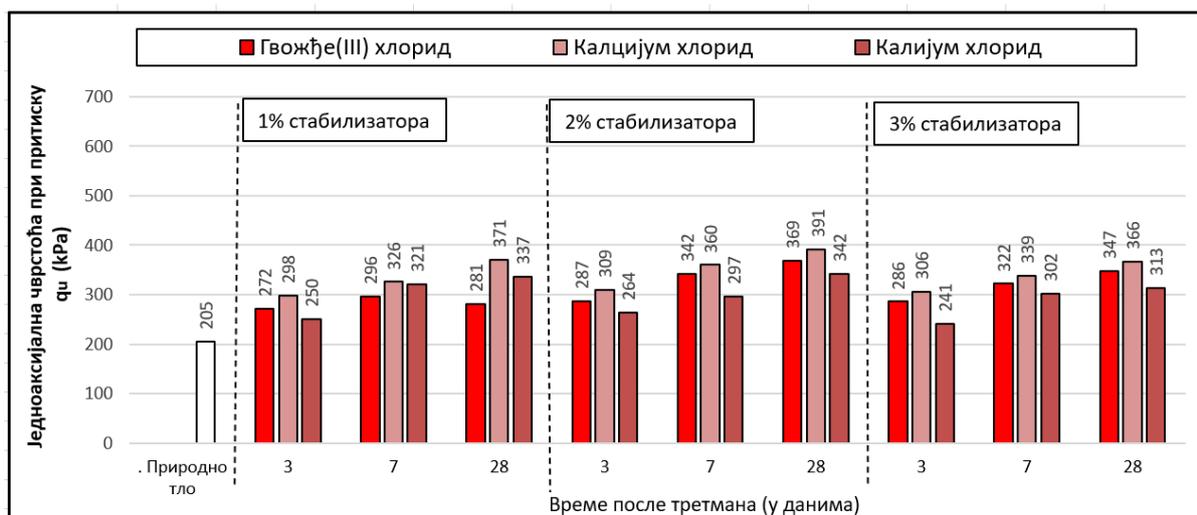
Узорци третирани калијум-хидроксидом достигли су максималну вредност q_u на узорцима са додатком 7% овог адитива након 28 дана од третмана (465 кПа). За разлику од два претходно поменута алтернативна адитива, за све разматране временске интервале, примећен је скоро константан пораст вредности једнооксијалне чврстоће тла на притисак са повећањем садржаја калијум-хидроксида. Из тог разлога, констатовано је да је оптималан садржај калијум-хидроксида у мешавини са глиновитим тлом 7%. С обзиром на приближно константан пораст вредности q_u са повећањем садржаја калијум-хидроксида, имало би смисла спровести даља истраживања сагледавајући више

вредности процената овог везива у смеси, како би се одредио његов оптимални садржај за ову врсту глиновитог тла.



Слика 5.10 Вредности једноаксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла алтернативним стабилизаторима

За све разматране реагенсе на бази хлорида, измерене вредности q_u биле су значајно ниже од вредности постигнутих додатком традиционалних стабилизатора. Њихова примена је, међутим, свакако резултовала повећањем чврстоће тла, што је у опсегу вредности постигнутих применом стабилизатора на бази отпадних материјала (Слика 5.11).



Слика 5.11 Вредности једноаксијалне чврстоће при притиску након третмана глиновитог тла алтернативним стабилизаторима на бази хлорида

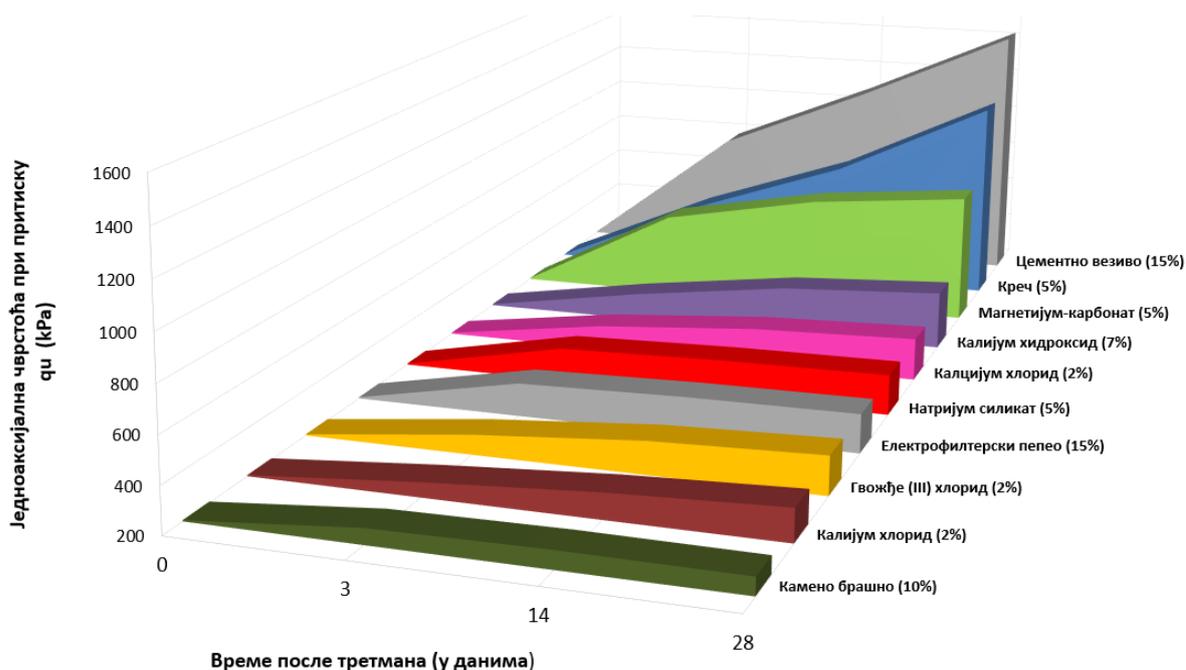
Са додатком 1% гвожђе (III) хлорида, резултати испитивања добијени 3, 7 и 28 дана након третмана су прилично слични, док су, са додатком 2% и 3% стабилизатора, вредности q_u значајније расле са временом. У поређењу са тлом у природном стању (205 kPa), максимално повећање вредности q_u је регистровано са додатком 2% гвожђе (III) хлорида после 28 дана од третмана (369 kPa).

Са додатком калцијум-хлорида, односно калијум-хлорида, узорци третирани са 1% стабилизатора резултовали су вишим вредностима q_u него узорци са додатком 3% стабилизатора. Примећено је да су вредности након 28 дана са додатком 1% калцијум-хлорида (371 kPa) и 2% калцијум-хлорида (391 kPa) веома блиске. Још ближе вредности q_u регистроване су са додатком 1% калијум-хлорида (337 kPa) и 2% калијум-хлорида (342 kPa). Треба напоменути да је додатком 1% калијум-хлорида након 7 дана од третмана добијена већа вредност (321 kPa) него додатком 2% овог стабилизатора (297 kPa).

У случају сваког од разматраних стабилизатора на бази хлорида, максимална вредност q_u постигнута је додатком 2% стабилизатора 28 дана након третмана, што доводи до закључка да се оптималним садржајем хлорида као реагенса у мешавини са глиновитим тлом може сматрати вредност од 2%.

g) Поређење ефеката различитих стабилизатора на једноаксијалну чврстоћу на притисак (q_u)

Тренд промене вредности q_u глиновитог тла током времена на узорцима припремљеним са оптималним садржајем за сваки од разматраних стабилизатора приказан је на Слици 5.12. Са слике се може видети да је у случају сваког од разматраних стабилизатора постигнут ефекат побољшања овог својства тла током времена. Додавањем оптималне количине креча (5%) или цемента (15%) као традиционалних стабилизатора, али и у случају додатка оптималне количине магнезијум-карбоната (5%) као алтернативног стабилизатора, постигнуто је значајно побољшање вредности q_u . Поред наведених реагенаса, додаток оптималне количине калијум-хидроксида (7%) је такође допринео повећању вредности q_u више од два пута. Сви остали стабилизатори допринели су побољшању тла са овог аспекта, али у знатно мањој мери.



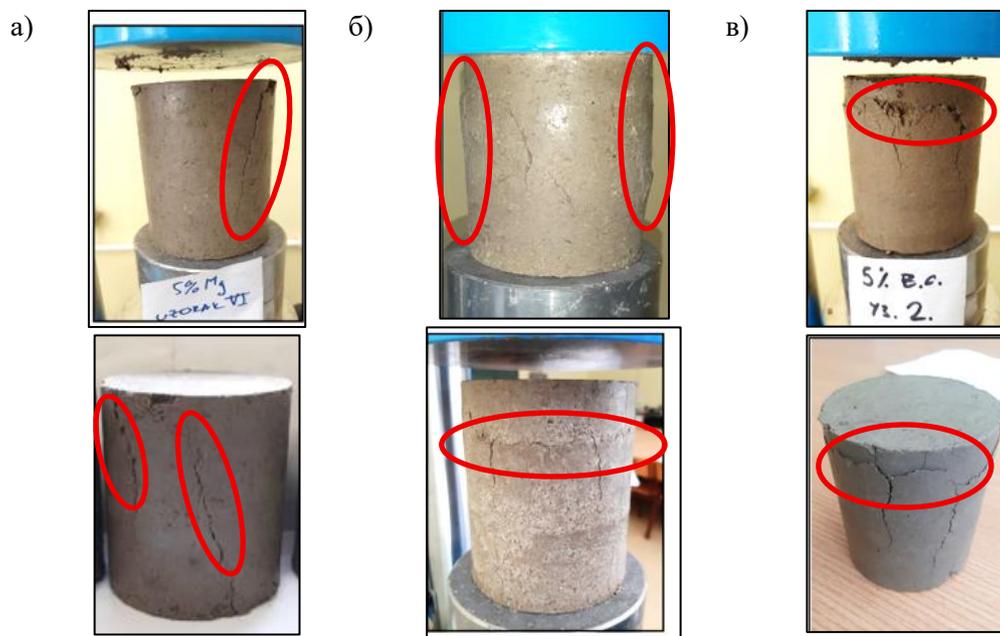
Слика 5.12 Поређење тренда промене вредности q_u током времена након хемијске стабилизације глиновитог тла одговарајућим оптималним садржајем за сваки од анализираних стабилизатора

Додавањем креча, цемента, односно магнезијум-карбоната, може се уочити брзи раст вредности q_u током прва 3 дана након третмана. У наредним интервалима испитивања, 14 и 28 дана након третмана, традиционални стабилизатори су одржавали приметан тренд раста вредности q_u , док је код тла са додатком магнезијум-карбоната примећен спорији раст вредности чврстоће тла. Блажи пораст вредности q_u , након наглог раста током прва 3 дана након третмана, примећен је и у случају додатка натријум-силиката, електрофилтерског пепела и каменог брашна. Готово линеарни тренд раста током времена примећен је са додатком калијум-хидроксида, као и у случају сваког од разматраних хлорида, што упућује на закључак да би било корисно у будућим истраживањима испитати вредност q_u и након 28 дана од третмана.

д) Ефекат стабилизатора на облик лома узорака тла приликом испитивања једноаксијалне чврстоће на притисак (q_u)

Приликом испитивања узорака, примећени су и различити облици лома узорака, као што се може видети на Слици 5.13. Узорци третирани традиционалним стабилизаторима, као и магнезијум карбонатом имали су изражену линију (раван) лома (Слика 5.13а). Код узорака са додатком хлорида лом није уочен ни на једном узорку, постојале су површинске пукотине у свим правцима, али се почента висина смањила за

више од 20%. Код ових узорака било је изражена промена обима по висини узорака, односно, уођено је изражено бочно ширење (Слика 5.13б). Са осталим стабилизаторима, лом узорака дешавао се у свим правцима, а карактеристични су били узорци код којих је дошло до продора (узикавања) једне половине узорка у другу (Слика 5.13в).



Слика 5.13 Различити облици лома узорака са разматраним стабилизаторима при испитивању једноаксијалне чврстоће тла при притиску

5.2.2.2. Утицај стабилизатора на промену стања конзистенције

За сваки од разматраних реагенаса, на узорцима припремљеним са три различита процентуална учешћа реагенса у мешавини са глиновитим тлом, забележена је промена Атербергових граница (граница конзистенције, односно границе течења (w_L) и границе пластичности (w_P)), и на основу њих је срачуната одговарајућа вредност индекса пластичности (I_P) као разлика w_L и w_P ($I_P = w_L - w_P$).



Слика 5.14 Припрема и испитивање граница конзистенција

Према стандарду, испитивање Атербергових граница врши се на честицама тла које су прошле кроз сито отвора 4 mm (Слика 5.14). Затим се узорак машински меша са различитим процентуалним учешћем сваког од стабилизатора. За испитивање границе течења коришћена је метода са падајућим конусом, а за одређивање границе пластичности метода прављења ваљчића. Резултати ових испитивања приказани су у Табелама 5.2 – 5.4.

Табела 5.2 Промена границе течења (w_L [%]) са додатком хемијских стабилизатора у различитим временским интервалима

		Граница течења w_L (%)											
Време испитивања после третмана (дани)		3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28
Коришћени стабилизатор	Учешће (%)	1%				2%				3%			
	Гвожђе (III) хлорид	46	47	46	45	49	44	43	42	45	45	44	43
	Калцијум (II) хлорид	46	46	45	45	48	46	45	43	44	44	45	42
	Калијум хлорид	47	46	45	45	48	45	45	44	45	43	43	43
	Учешће (%)	3%				5%				7%			
	Креч	49	49	51	50	50	49	51	52	51	53	53	53
	Магнезијум карбонат	50	48	50	49	49	51	51	50	52	52	53	54
	Натријум силикат	50	50	49	50	52	50	50	50	53	51	52	52
	Калијум хидроксид	49	51	51	51	50	51	52	51	52	49	50	51
	Учешће (%)	5%				10%				15%			
	Камено брашно	50	48	48	46	49	50	51	51	50	49	52	50
	Цементно везиво	48	49	49	48	48	48	49	48	48	47	47	47
	Учешће (%)	10%				15%				20%			
	Електрофилтерски пепео	51	52	52	50	51	53	50	52	49	50	48	48

* Вредност границе течења тла у природном стању износи $w_L = 49\%$ (Табела 5.1)

На основу резултата у Табели 5.2, може се закључити да се додатком било ког од разматраних стабилизатора не постиже значајнија промена у вредностима границе течења, без обзира на његово процентуално учешће у мешавини са тлом и без обзира на временски интервал испитивања тла након третмана. У случају сваког од разматраних алтернативних стабилизатора на бази хлорида вредност w_L се смањила. У односу на природно стање тла ($w_L = 49\%$) максимално смањење вредности w_L забележено је уз додатак 2% гвожђе (III) хлорида после 28 дана од третмана ($w_L = 42\%$), као и 3% калцијум хлорида. У случају преосталих алтернативних стабилизатора (магнезијум-карбонат, натријум-силикат и калијум-хидроксид) вредност границе течења је незнатно повећана, при чему је максимално повећање постигнуто са додатком 7% магнезијум-карбоната после 28 дана ($w_L = 54\%$).

Повећање вредности границе пластичности w_p је забележена код свих испитиваних узорака (Табела 5.3). Може се уочити да је максимално повећање у највећем броју случајева постигнуто после 28 дана, без обзира на процентуално учешће стабилизатора у смеси. Максимално повећање вредности w_p у односу на природно

стање тла ($w_p = 23\%$) забележено је уз додатак традиционалних стабилизатора, односно са 7% садржаја креча после 7 дана од третмана ($w_p = 37\%$) и 15% цементног везива после 28 дана ($w_p = 36\%$).

Табела 5.3 Промена границе пластичности (w_p [%]) са додатком хемијских стабилизатора у различитим временским интервалима

Граница пластичности w_p (%)													
Време испитивања после третмана (Дани)		3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28
Коришћени стабилизатор	Учешће (%)	1%				2%				3%			
	Гвожђе (III) хлорид	25	26	26	27	25	25	26	27	28	27	26	27
	Калцијум (II) хлорид	26	27	28	27	26	26	28	28	25	27	28	28
	Калијум хлорид	26	25	26	26	26	26	27	28	26	28	26	28
	Учешће (%)	3%				5%				7%			
	Креч	23	25	28	31	28	30	32	34	34	37	36	36
	Магнезијум карбонат	26	29	25	24	28	29	29	28	34	36	35	34
	Натријум силикат	29	23	25	25	29	30	28	27	36	35	35	33
	Калијум хидроксид	24	28	26	25	29	32	30	29	35	35	36	35
	Учешће (%)	5%				10%				15%			
	Камено брашно	26	28	27	26	26	29	28	29	27	29	29	30
	Цементно везиво	27	30	31	33	26	31	33	35	28	32	35	36
	Учешће (%)	10%				15%				20%			
	Електрофилтерски пепео	28	28	27	28	27	28	29	29	29	29	30	30

* Вредност границе пластичности тла у природном стању износи $w_p = 23\%$ (Табела 5.1)

Значајно смањење вредности I_p после 28 дана након третмана такође је регистрована у случају примене разматраних хлорида ($I_p < 20\%$). Додавањем отпадних материјала вредност I_p није се значајније променила, односно разлика вредности w_L и вредности w_p слична је разлици вредности за тло у природном стању. Може се претпоставити да је разлог оваквог резултата изостанак хемијских реакција између тла и отпадних материјала. Са друге стране, додатак традиционалних стабилизатора или алтернативних стабилизатора, пре свега на бази хлорида, поспешује стварање једињења која апсорбују воду из тла, чиме се смањује његова влажност.

Табела 5.4 Промена индекса пластичности (I_p [%]) са додатком хемијских стабилизатора у различитим временским интервалима

Индекс пластичности I_p (%)													
Време испитивања после третмана (Дани)		3	7	14	28	3	7	14	28	3	7	14	28
Коришћени стабилизатор	Учешће (%)	1%				2%				3%			
	Гвожђе (III) хлорид	21	21	20	18	24	19	17	15	17	18	18	16
	Калцијум (II) хлорид	20	19	17	18	22	20	17	15	19	17	17	14
	Калијум хлорид	21	21	19	19	22	19	18	16	19	15	17	15
	Учешће (%)	3%				5%				7%			
	Креч	26	24	23	19	22	19	19	18	17	16	17	17
	Магнезијум карбонат	24	19	25	25	21	22	22	22	18	16	18	20
	Натријум силикат	21	27	24	25	23	20	22	23	17	16	17	19
	Калијум хидроксид	25	23	25	26	21	19	22	22	17	14	14	16
	Учешће (%)	5%				10%				15%			
	Камено брашно	24	20	21	20	23	21	23	22	23	20	23	20
	Цементно везиво	21	19	18	15	22	17	16	13	20	15	12	11
	Учешће (%)	10%				15%				20%			
	Електрофилтерски пепео	23	24	25	22	24	25	21	23	20	21	18	18

* Вредност индекса пластичности тла у природном стању износи $I_p = 26\%$ (Табела 5.1)

5.2.2.3. Утицај стабилизатора на промену рН вредности и електропроводљивости тла

За потребе испитивања рН вредности и електропроводљивости тла, припремани су узорци који су ручно мешани. Мешавина тла са различитим процентуалним учешћем сваког од стабилизатора спроведена је са оптималном влажношћу тла од 18,5% (вредност према Табели 5.1, за тло у природном стању, ради упоредивости резултата за случај нетретираног и случај третираног тла). Разматрано глиновито тло у природном стању има рН вредност од 9,5 и електропроводљивост од 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Табела 5.1). Резултати испитивања промене рН вредности и електропроводљивости глиновитог тла након хемијског третмана за сваки од разматраних стабилизатора приказани су у Табели 5.5.

Досадашње, врло детаљне, студије (Eades and Grim, 1963; Bell, 1996; Dash and Hussain, 2012; Rosone et al., 2020) су показале да се у случају примене креча, најефикаснији резултат примене стабилизатора постиже при рН вредности тла од 12,4. При овој вредности обезбеђују се одговарајући спољашњи услови како би се развила пуцоланска реакција између стабилизатора и тла. Том приликом, при високој рН вредности, додати стабилизатор брзо и ефикасно раствара једињења на површини глиновитих минерала, пре свега оних на бази силицијума и алуминијума.

На основу резултата рН вредности у Табели 5.4, примећено је повећање рН вредности већ у првих 24 сата након мешања са стабилизатором, након чега су вредности остале константне или благо смањене код свих коришћених стабилизатора. Ови резултати јасно указују на потенцијал стабилизатора да изазову трајне хемијске промене у тлу. Креч и магнезијум-карбонат коришћени у овом истраживању резултовали су највећим повећањем рН вредности глиновитог тла, што је главни предуслов за обезбеђивање услова за одвијање пуцоланских реакција. Високе рН вредности повезане су са растварањем примарних минерала, посебно глиновитих. Њихова растворљивост доводи до формирања секундарних минерала. Такође, приметно је да је предложена оптимална рН вредност од 12,4, која резултује најјачим дејством стабилизатора, осим у случају креча, постигнута и у случају цемента (као традиционалних стабилизатора), као и магнезијум-карбоната, натријум-силиката и калијум-хидроксида (као алтернативних материјала). У случају стабилизатора на бази отпадних материјала рН вредност је била нешто нижа. Најслабији ефекат са аспекта побољшања овог својства тла забележен је са додатком стабилизатора на бази хлорида, што указује на њихову мању способност да изреагују са минералима глине.

Табела 5.5 Промена рН вредности и електропроводљивости тла током времена

Стабилизатор	Процентуално учешће стабилизатора у мешавини са тлом	рН вредност тла (-)			Електропроводљивост ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
		24h након третмана	3 дана након третмана	28 дана након третмана	24h након третмана
<i>Традиционални стабилизатори</i>					
Креч	3%	12,1	12,0	12,0	1920
	5%	12,5	12,5	12,4	> 2000
	7%	12,8	12,8	12,7	> 2000
Цементно везиво	5%	11,6	11,6	11,6	905
	10%	12,0	12,0	12,0	1200
	15%	12,4	12,4	12,4	1570
<i>Отпадни материјали као стабилизатори</i>					
Електрофилтерски пепео	10%	11,2	11,2	11,0	730
	15%	11,6	11,3	11,3	825
	20%	12,0	11,8	11,6	940
Камено брашно	5%	10,5	10,5	10,2	125
	10%	10,9	10,8	10,5	180
	15%	11,1	11,1	10,6	210
<i>Алтернативни материјали као стабилизатори</i>					
Магнезијум-карбонат	3%	10,9	10,7	10,7	225
	5%	12,1	12,1	12,0	295
	7%	12,7	12,7	12,6	365
Натријум-силикат	3%	11,7	11,7	11,7	1450
	5%	12,0	12,0	12,0	1620
	7%	12,1	12,1	12,0	1810
Калијум хидроксид	3%	12,0	11,8	11,8	1940
	5%	12,2	12,2	12,1	> 2000
	7%	12,5	12,4	12,3	> 2000
Гвожђе (III) хлорид	1%	9,5	9,5	9,2	1660
	2%	9,4	9,4	9,2	1880
	3%	9,4	9,3	9,0	> 2000
Калцијум (II) хлорид	1%	9,2	9,2	9,2	1930
	2%	9,0	9,0	9,0	> 2000
	3%	9,0	9,0	9,0	> 2000
Калијум-хлорид	1%	9,5	9,5	9,5	1850
	2%	9,5	9,5	9,5	> 2000
	3%	9,4	9,4	9,4	> 2000

* рН вредност тла у природном стању износи 9,5, електропроводљивост 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Табела 5.1)

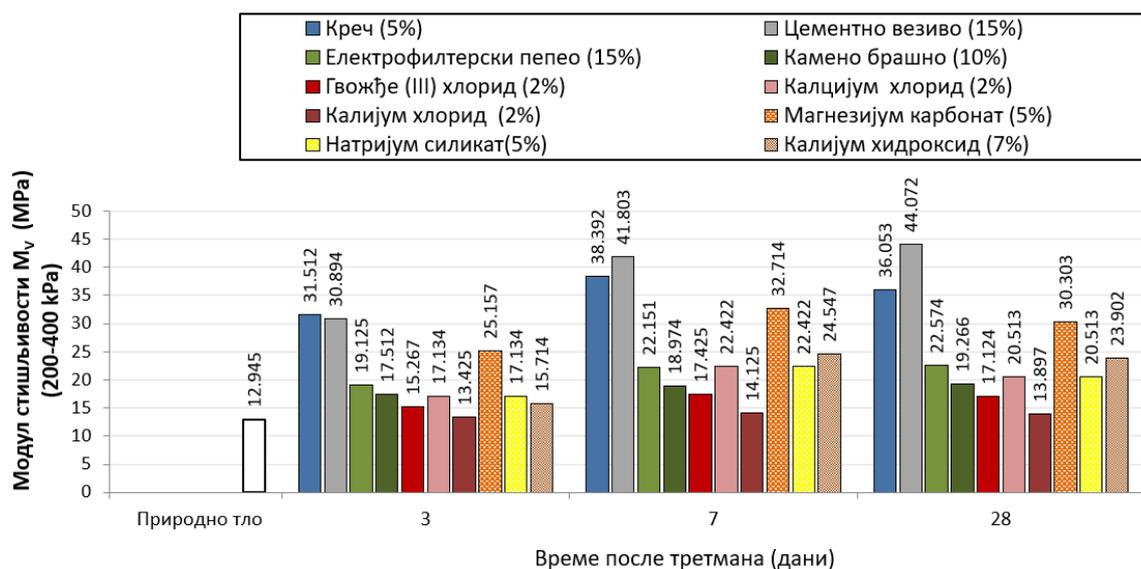
Провера успешности примене стабилизатора огледа се не само кроз повећање вредности једнооксијалне чврстоће тла на притисак, већ и на основу резултата рН вредности тла након третмана. Имајући у виду вредности оптималног садржаја сваког од разматраних стабилизатора у мешавини са тлом, утврђене на основу резултата чврстоће тла на притисак (Поглавље 5.2.2.1.), може се констатовати да су оне одговарајуће и са аспекта резултата рН вредности тла након третмана. Дакле, потврђено је да вредност оптималног садржаја креча у мешавини са глиновитим тлом износи 5%, док је њена вредност у случају примене цементног везива 15%. Када је реч о стабилизаторима на бази отпадних материјала, за оптимални садржај електрофилтерског пепела утврђена је вредност од 15%, док је за камено брашно 10%. Алтернативни

стабилизатори на бази хлорида имају исту вредност оптималног садржаја у мешавини са тлом од 2%, у случају магнезијум-карбоната и натријум-силиката оптимални садржај у мешавини са тлом износи 5%, док калијум-хидроксид као оптималну вредност процента учешћа у мешавини са тлом има 7%.

Са друге стране, електропроводљивост је повећана додавањем свих стабилизатора. Електропроводљивост је одређена урађејем *HANANA Instruments (Conductivity Tester DIST3 EC Tester)*, којим се могу измерити вредности до 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Припрема узорка за анализу је изсоветна оном за одређивање рН вредности. Тло са додатком креча, калијум-хидроксида и стабилизатора на бази хлорида показују електропроводљивост већу од 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Као стабилизатори са најмањим утицајем на повећање електропроводљивости издвајају се камено брашно, магнезијум-карбонат и електрофилтерски пепео, који не прелазе вредност од 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5.2.2.4. Утицај стабилизатора на промену модула стишљивости тла

Модул стишљивости (M_v) је одређен за четири нивоа оптерећења (50, 100, 200 и 400 кПа) у едометарском опиту. Узорци су тестирани у временским интервалима од 3, 7 и 28 дана након третмана глиновитог тла са претходно утврђеним оптималним садржајем сваког од разматраних стабилизатора. Регистроване вредности M_v за максимални ниво оптерећења од 200 – 400 кПа приказане су на Слици 5.15.



Слика 5.15 Промена вредности модула стишљивости после 3, 7 и 28 дана од третирања глиновитог тла оптималним садржајем сваког од коришћених стабилизатора

На основу дате графичке интерпретације резултата, може се закључити да је сваки од разматраних стабилизатора допринео повећању вредности M_v . Највеће повећање вредности M_v постиже се додавањем креча (38,392 МПа) или цемента (44,07 МПа), при чему се вредност повећава око 3 пута у поређењу са природним стањем тла (12,945 МПа).

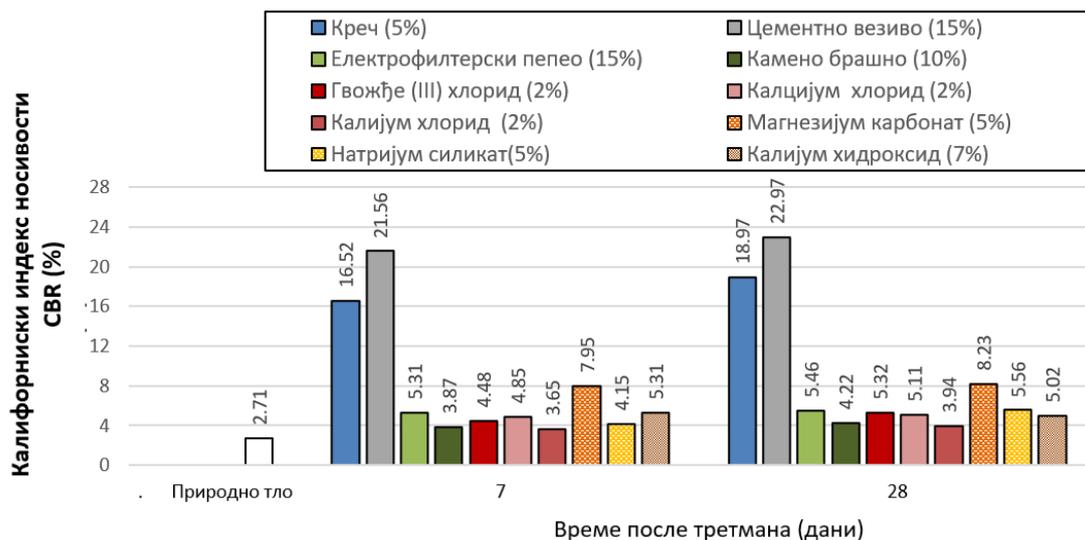
Што се тиче отпадних материјала као стабилизатора, ефекат на побољшање овог својства тла је нешто мањи. Забележено је повећање вредности M_v од око 1,5 пута у случају додатка каменог брашна и око 2 пута у случају електрофилтерског пепела.

Узимајући у обзир алтернативне материјале као стабилизаторе, највећа вредност M_v је постигнута додавањем магнезијум-карбоната, при чему се вредност повећала више од 2,5 пута. Додавањем натријум-силиката, односно калијум-хидроксида, постигнуте су нешто веће вредности M_v него додавањем алтернативних стабилизатора на бази хлорида, које су скоро два пута више у односу на вредност за тло у природном стању. Из групе преосталих алтернативних стабилизатора, највећа вредност постигнута је додавањем калцијум-хлорида (повећање од око 2 пута), затим додавањем гвожђе(III) хлорида (вредност је повећана око 1,5 пута), док је калијум-хлорид имао најмањи ефекат на побољшање овог својства тла (свега 10% повећања вредности M_v). Такође је приметно да је код половине разматраних стабилизатора вредност M_v постигнута 28 дана након третмана била нешто нижа од вредности регистроване након 7 дана.

Са аспекта овог својства тла, традиционални стабилизатори резултовали су највећим побољшањем, при чему се цемент незнатно истиче у поређењу са кречом. Међутим, с обзиром на оптималан садржај стабилизатора, употреба креча (са оптималним садржајем од 5%) је рационалнија од примене цементног везива (са оптималним садржајем од 15%).

5.2.2.5. Утицај стабилизатора на промену вредности CBR и бубрења тла

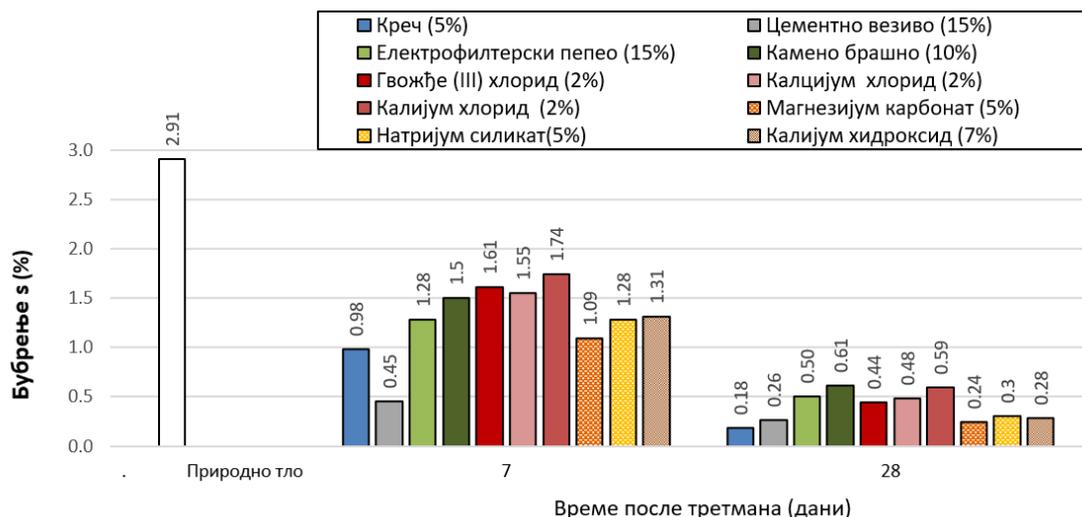
Један од најчешћих разлога за замену земљаног материјала у инжењерској пракси јесте ниска вредност калифорнијског индекса носивости (CBR), нарочито када је реч о ситнозрном (глиновитом) тлу. И са аспекта овог својства тла истраживања су спроведена на узорцима глиновитог тла припремљеним са оптималним садржајем сваког од разматраних стабилизатора у мешавини. Резултати ових испитивања, приказани на Слици 5.16, показују да је сваки од разматраних материјала као стабилизатора допринео повећању CBR вредности тла 7 и 28 дана након хемијског третмана.



Слика 5.16 Промена вредности CBR после 7 и 28 дана од третирања глиновитог тла оптималним садржајем сваког од коришћених стабилизатора

Тренд повећања CBR вредности тла са протеклим временом забележен је у случају свих стабилизатора, односно резултати после 28 дана од третмана су бољи него после 7 дана. У поређењу са тлом у природном стању (CBR = 2,71%), највеће побољшање је регистровано додатком традиционалних стабилизатора. Додавањем креча регистровано је повећање од седам пута (CBR = 18,97%), а додатком цементног везива до 8,5 пута (CBR = 22,97%) након 28 дана од третмана. Од алтернативних стабилизатора, као и код већине досадашњих испитивања, боље резултате од осталих показало је тло третирано мегнезијум-карбонатом (CBR = 8,23%). Најмање повећање вредности CBR забележено је додатком каменог брашна (CBR = 4,22%), односно калијум хлорида (CBR = 3,94%). С обзиром да је у изградњи путева, према техничким условима, за постељицу у нивоу подтла захтевана вредност CBR већа од 3%, добијени резултати упућују на закључак да би сваки од разматраних стабилизатора према овом критеријуму могао бити примењен у сврху побољшања овог својства тла.

Према стандарду за испитивање вредности CBR, узорци стоје потопљени у води 96 сати пре испитивања у лабораторијским условима, током којих се мери бубрење тла (s). Сви анализирани стабилизатори допринели су значајном смањењу бубрења (Слика 5.17), посебно 28 дана након хемијског третмана тла. Поред тога, сви разматрани стабилизатори допринели су смањењу бубрења испод 1,75% већ 7 дана након третмана.



Слика 5.17 Промена вредности бубрења после 7 и 28 дана од третирања глиновитог тла оптималним садржајем сваког од коришћених стабилизатора

Најзначајније смањење бубрења након 7 дана од третмана регистровано је у случају додатка цемента, док је након 28 дана највеће смањење бубрења показао узорак тла третиран оптималном количином креча (смањење до петнаест пута). Стабилизатори на бази хлорида допринели су већем смањењу бубрења од стабилизатора на бази отпадних материјала. Са друге стране, сви остали алтернативни стабилизатори, попут магнезијум-карбоната, натријум-силиката и калијум-хидроксида, постигли су такође веома добре резултате са аспекта смањења бубрења тла, у домену вредности које се постижу додатком традиционалних стабилизатора.

Најизраженија разлика у ефектима између традиционалних и свих осталих стабилизатора коришћених у овом истраживању уочена је управо у погледу вредности СBR, док су у погледу бубрења ефекти разматраних стабилизатора били врло уједначени. Као и у погледу модула стишљивости, традиционални стабилизатори су се показали најефикаснијим, уз нешто бољи ефекат цемента у повећању вредности СBR, док се креч показао као најефикаснији у погледу смањења бубрења. Међутим, с обзиром на оптималан садржај стабилизатора (у случају примене креча 5%, у случају примене цемента 15%), употреба креча је рационалнија од цементног везива.

5.2.2.6. Утицај стабилизатора на промену параметара смичуће чврстоће тла

Смичућа чврстоћа тла је једна од најважнијих геомеханичких карактеристика тла. Она је дефинисана Мор - Кулоновим условом лома, који даје зависност смичућег (τ) и нормалног напона (σ) облика $\tau = \sigma \cdot \text{tg}\varphi + c$, где су c и φ параметри смичуће чврстоће тла, односно кохезија и угао унутрашњег трења, респективно. Ови параметри су у оквиру

ових истраживања одређени опитом директног смицања.

Опити директног смицања су изведени на узорцима са претходно одређеним оптималним садржајем у мешавини са тлом за сваки од анализираних стабилизатора. Испитивања су изведена при нормалним притисцима од 50 kPa, 100 kPa и 200 kPa, у три временска интервала после 3, 14 и 28 дана од мешања стабилизатора са природним тлом.

Максимална чврстоћа на смицање (τ) узорка глиновитог тла са разматраним стабилизаторима под нормалним напонима σ од 50 kPa, 100 kPa и 200 kPa приказани су у Табели 5.6. Може се видети да се чврстоћа на смицање (τ) повећава са временом за све испитиване узорке. Према резултатима, све максималне вредности смичуће чврстоће су добијене за време испитивања од 28 дана након третмана, при нормалном напону од 200 kPa. Вредности добијене на узорцима са додатком традиционалних стабилизатора представљају највеће забележене вредности међу испитаним узорцима. Додатак цементног везива (са оптималним учешћем у мешавини са тлом од 15%) допринео је нешто вишим вредностима смичућег напона при лому ($\tau = 178,6$ kPa) у поређењу са додатком креча у оптималној количини од 5% ($\tau = 167,8$ kPa).

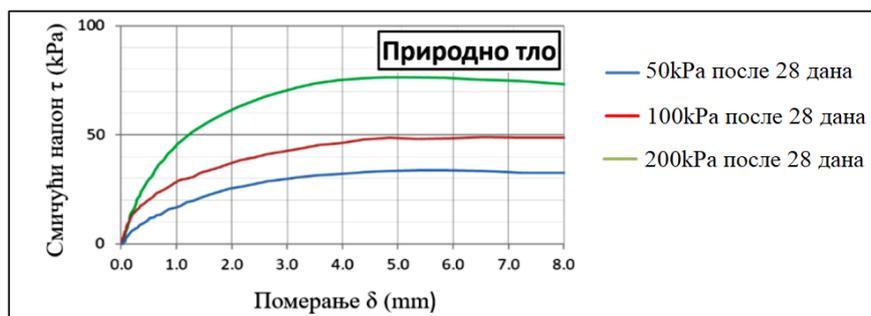
Резултати добијени додавањем стабилизатора на бази отпадног материјала спадају у слабије ефикасне у овом испитивању, док додавање једињења на бази хлорида доприноси најнижим вредностима смичуће чврстоће тла, уз изузетак калцијум хлорида којим се постиже нешто бољи резултат него додавањем електрофилтерског пепела. Иако доста слабијих ефеката у поређењу са традиционалним, и ови стабилизатори доприносе повећању смичуће чврстоће у односу на природно тло.

Алтернативни стабилизатори попут магнезијум-карбоната ($\tau = 119,9$ kPa), натријум-силиката ($\tau = 114,0$ kPa) и калијум-хидроксида ($\tau = 109,4$ kPa) указали су на потенцијал коришћења ових стабилизатора у сврху повећања вредности смичућег напона тла. Сличан тренд се може уочити и при нормалном напону од 100 kPa, односно 50 kPa. За разлику од других вредности, при нормалном напону од 50 kPa, најмању вредност чврстоће на смицање имао узорак са додатком оптималне количине електрофилтерског пепела.

Током испитивања регистрован је и однос промене смичућег напона (τ) и померања (δ) дуж равни лома, што је илустровано на Слици 5.18 за тло у природном стању и на Слици 5.19 за тло третирано одговарајућим оптималним садржајем за сваки од анализираних стабилизатора. Дијаграми представљају зависност ових величина при нормалном напону од 50 kPa, 100 kPa и 200 kPa, после 3 и после 28 дана од третмана.

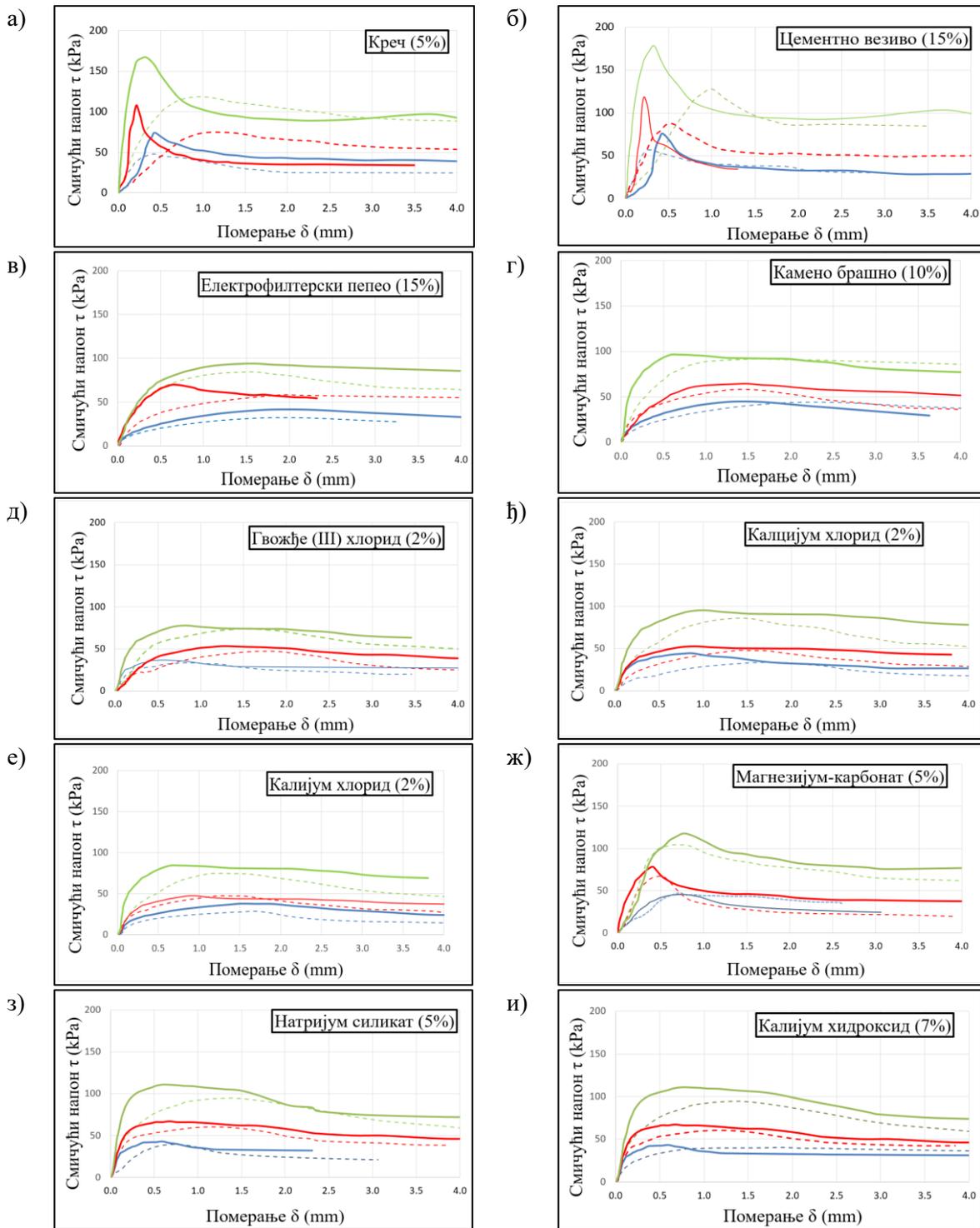
Табела 5.6 Регистроване вредности смичућег напона при лому (τ) за примењене вредности нормалног напона (σ) у опиту директног смицања

Стабилизатор (оптимални садржај у мешавини са тлом)	Нормални напон σ (кПа)	Смичући напон при лому τ (кПа)		
		3 дана након третмана	14 дана након третмана	28 дана након третмана
Природно тло	50	30,9	-	-
	100	49,8	-	-
	200	78,1	-	-
Традиционални стабилизатори				
Креч (5%)	50	48,1	61,4	72,2
	100	80,2	85,7	108,0
	200	117,7	141,3	167,8
Цементно везиво (15%)	50	55,2	61,4	75,7
	100	87,9	90,2	115,1
	200	131	135,7	178,6
Отпадни материјали као стабилизатори				
Електрофилтерски пепео (15%)	50	32,4	35,7	38,7
	100	54,6	56,7	60,8
	200	81,1	89,1	93,2
Камено брашно (10%)	50	40,6	42,7	46,7
	100	59,8	66,7	65,2
	200	91,7	97,5	98,7
Алтернативни материјали стабилизатори				
Магнезијум- карбонат (5%)	50	40,1	41,4	44,6
	100	71,4	78,9	82,8
	200	103,1	109,2	119,9
Натријум-силикат (5%)	50	36,2	41,5	42,1
	100	58,7	63,7	65,1
	200	94,2	101,2	114,0
Калијум-хидроксид (7%)	50	39,2	39,3	46,8
	100	61,5	62,5	68,7
	200	99,8	95,5	109,4
Гвожђе (III) хлорид (2%)	50	31,5	36,2	39,4
	100	47,7	49,1	51,8
	200	79,5	83,6	88,6
Калцијум (II) хлорид (2%)	50	34,3	40,8	44,9
	100	48,3	53,7	54,6
	200	83,6	90,1	95,2
Калијум-хлорид (2%)	50	30,1	34,1	39,4
	100	49,2	46,7	48,0
	200	77,1	83,8	85,7



Слика 5.18 Дијаграм зависности смичућег напона и деформације на узорку тла у природном стању

--- 50kPa после 3 дана - - - 100kPa после 3 дана - - - 200kPa после 3 дана
 — 50kPa после 28 дана — 100kPa после 28 дана — 200kPa после 28 дана



Слика 5.19 Дијаграм зависности смичућег напона и деформације на узорку тла са додатком оптималног садржаја стабилизатора: а) креч; б) цементно везиво; в) електрофилтерски пепео; г) камено брашно; д) гвожђе (III) хлорид; ж) калцијум хлорид; е) калијум хлорид; ж) магнезијум-карбонат; з) натријум силикат; и) калијум хидроксид

Јасно се може уочити да су највеће промене настале на узорцима са додатком креча и цементног везива (Слика 5.19а и 5.19б). Поред знатно већих вредности смичућег напона, облик дијаграма има изражен пик који указује на крти лом. Од алтернативних стабилизатора, једино још узорак са додатком магнезијум-карбоната указује на појаву оваквог облика лома (Слика 5.19ж). Код свих осталих узорака (Слика 5.19в, г, д, ђ, е, з, и) уочен је дуктилни лом, односно, без велике промене у сили смицања, долази до значајних померања у равни лома.

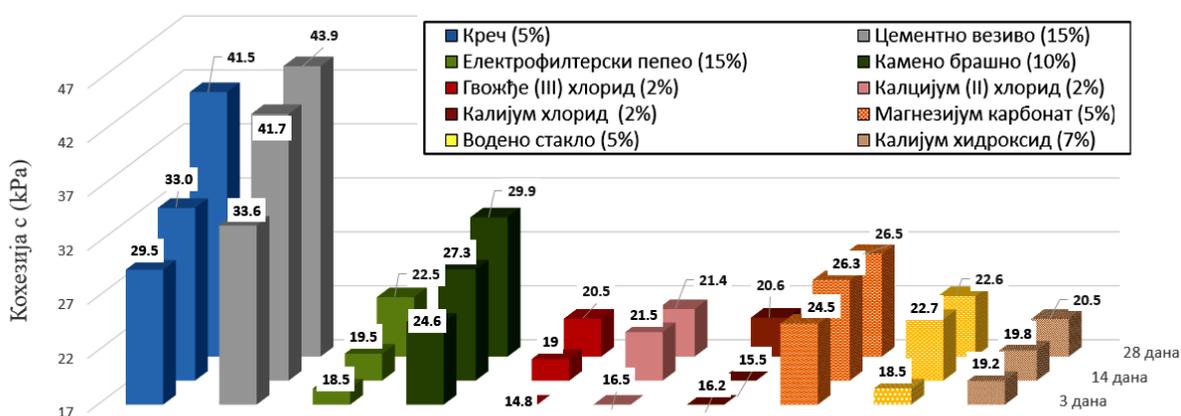
Регистроване промене у вредностима параметара чврстоће тла на смицање (кохезије (c) и угла унутрашњег трења (φ)) у односу на природно стање глиновитог тла ($c = 16,9$ кРа и $\varphi = 16,5^\circ$) дате су на Сликама 5.20 и 5.21. Традиционални стабилизатори значајно су допринели увећању вредности параметара чврстоће на смицање у односу на природно стање тла. Побољшање карактеристика тла је уочљиво у свим интервалима испитивања. Са додатком креча и цементног везива, тренд повећања вредности параметара чврстоће са временом је скоро линеаран, како у погледу повећања вредности кохезије (након 28 дана од третмана, повећање вредности c износило је више од 2,5 пута), тако и у погледу повећања вредности угла унутрашњег трења (након 28 дана повећање вредности φ износило је више од 2 пута).

Додавање електрофилтерског пепела, у поређењу са традиционалним стабилизаторима, у мањој мери је утицало на промену параметара чврстоће (повећање вредности c - 28 дана након третмана је износило 33%, а вредности φ - 17%). Са друге стране, додавање каменог брашна довело је до значајнијег побољшања кохезије (77%), док вредност угла унутрашњег трења није значајније порасла (15%). Ова вредност кохезије је уједно највећа после вредности које су добијене употребом традиционалних стабилизатора.

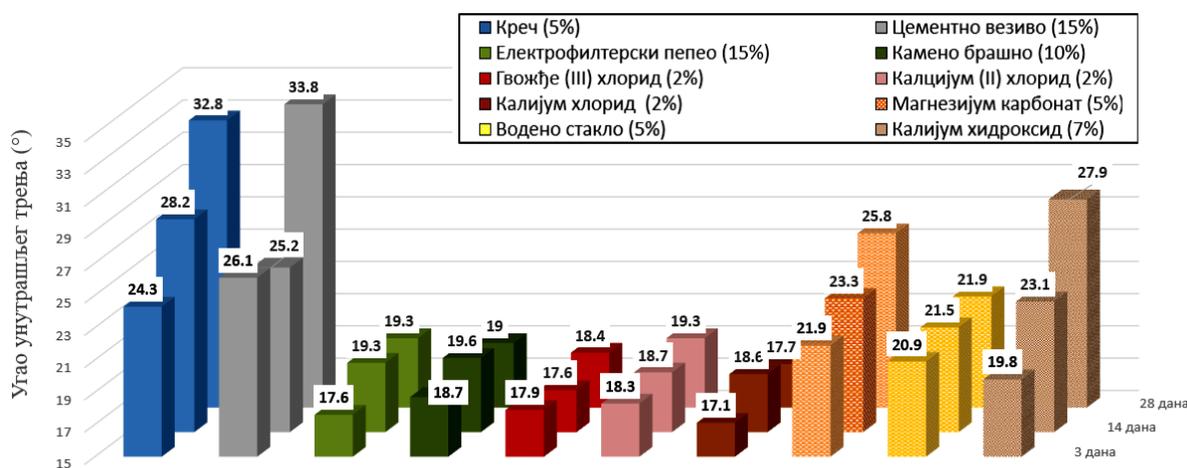
Алтернативни стабилизатори такође су допринели побољшању параметара чврстоће у односу на природно тло, али у мањој мери у поређењу са традиционалним. Додатком магнезијум-карбоната постигнуто је врло значајно повећање вредности оба параметра смичуће чврстоће тла (након 28 дана од третмана, повећање вредности c износило је 57%, колико је износило и повећање вредности φ). Са додатком натријум-силиката вредности параметара смичуће чврстоће тла такође су побољшане у односу на природно стање - резултати за вредност кохезије после 14 дана и 28 дана су приближне, док је повећање вредности угла унутрашњег трења било видљиво већ у почетном периоду од 3 дана након третмана и та вредност се није у значајнијој мери мењала током времена (повећање и вредности c и вредности φ износило је око 35%). Додатак калијум-

хидроксида је довео до значајног повећања угла унутрашњег трења (69%), док је вредност кохезије незнатно порасла у односу на тло у природном стању (21%). Ова вредност угла унутрашњег трења је уједно највећа после вредности које су добијене употребом традиционалних стабилизатора.

За случај сваког од разматраних хлорида, после 3 дана од третмана, вредност кохезије је незнатно смањена у односу на вредност за нетретирано тло, док је вредност угла унутрашњег трења повећана. После 14 дана, са додатком калијум-хлорида вредност кохезије је и даље била мања од вредности кохезије тла у природном стању, док је после 28 дана од третмана у случају сваког од разматраних хлорида примећено побољшање почетних вредности (вредности c и φ у просеку су увећане око 23% и 13%, респективно).



Слика 5.20 Промена вредности кохезије третираног глиновитог тла после 3, 14 и 28 дана од третмана



Слика 5.21 Промена вредности угла унутрашњег трења третираног глиновитог тла после 3, 14 и 28 дана од третмана

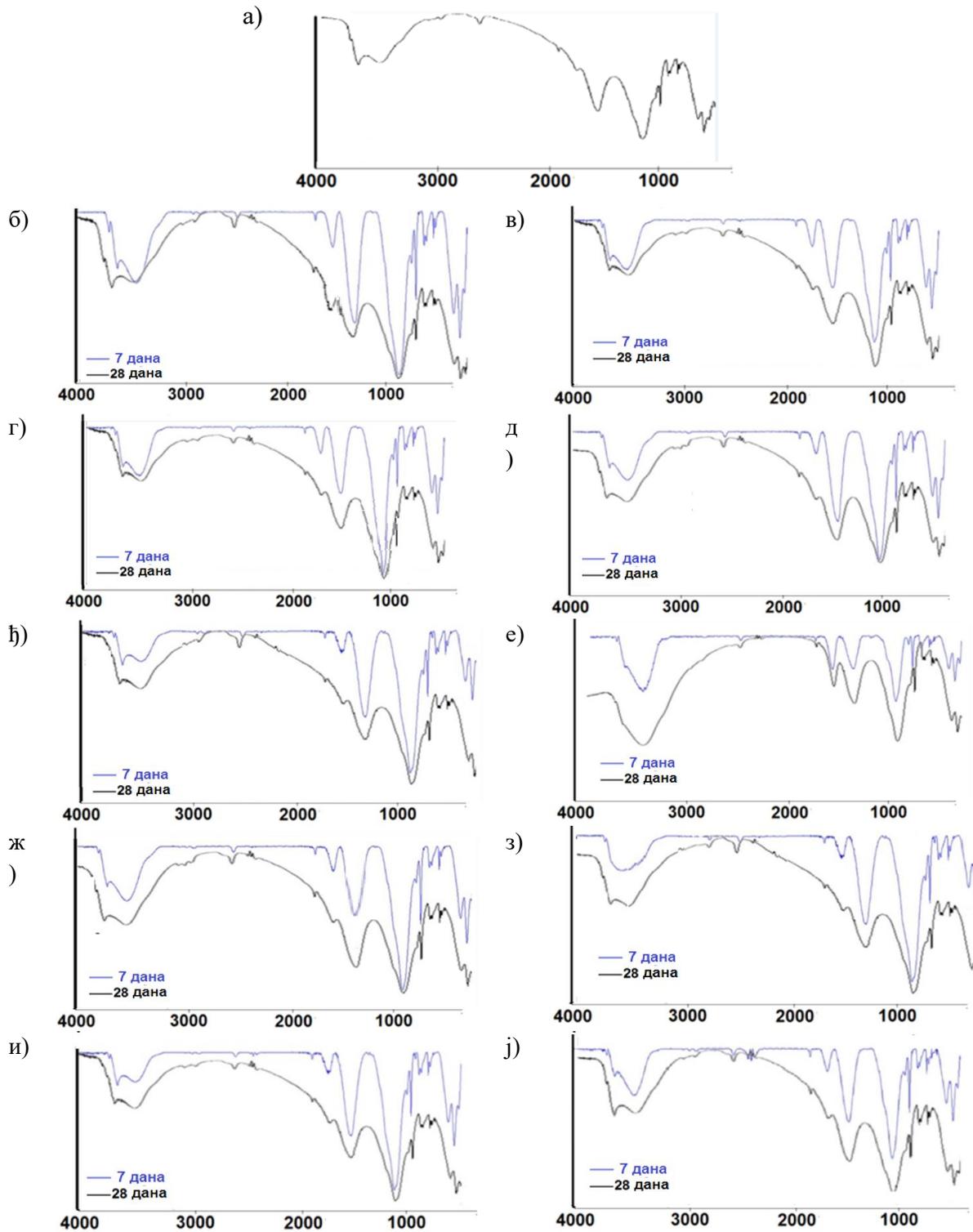
5.2.2.7. Утицај стабилизатора на хемијску промену у структури тла – FTIR

FTIR спектри су снимљени у Лабораторији за општу и неорганску хемију Природно - математичког факултета Универзитета у Нишу на претходно припремљеним узорцима (Слика 5.22). FTIR анализа узорака је извршена коришћењем *Bruker Tensor 27* спектроскопа, у опсегу од $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$, са резолуцијом од 2 cm^{-1} . За снимање FTIR спектра коришћен је поступак калијум бромида (*KBr*) за припрему чврстих узорака. Тестирани узорци су fino уситњени и равномерно дисперговани у *KBr* ($1,5 \text{ mg} / 150 \text{ mg KBr}$). Смеша је затим подвргнута вакуумирању и пресовању под притиском од 200 MPa , чиме је добијена одговарајућа пастила. Спектроскопски чист *KBr*, произвођача *Merck*, је претходно растопљен на 700°C , уситњен и чуван у електричном ексикатору загрејаном на 30°C ради заштите од влаге. Пелет чистог *KBr* је коришћен као референца. FTIR спектри су снимљени у опсегу таласних дужина између 460 cm^{-1} и 4000 cm^{-1} .



Слика 5.22 Припрема узорака за испитивање

Као што се види на Слици 5.23а, тј. на спектру природног глиновитог тла, траке у области таласних дужина од 3000 до 3500 cm^{-1} одговарају вибрацијама истезања ОН група. Трака на 1636 cm^{-1} приписује се деформационим вибрацијама карбонилне групе, које вероватно потичу од калцита. Слабе траке које се појављују у области између 690 и 780 cm^{-1} одговарају савијајућим вибрацијама ОН групе. Траке у опсегу од $950-1200 \text{ cm}^{-1}$ повезане су са асиметричним вибрацијама истезања Si-O веза (које се могу приписати кварцним тракама), као и са структурним јединицама алуминосиликатних тетраедарских оквира, Si(Al)-O , типичним за минерале глине.



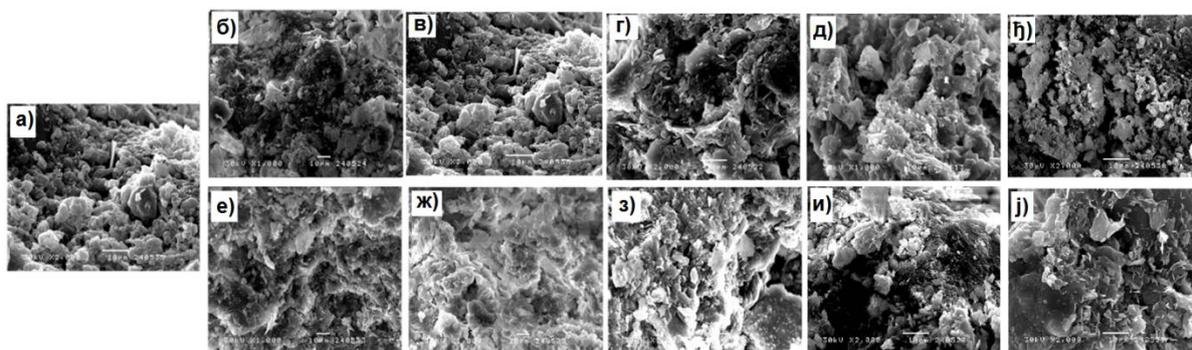
Слика 5.23 FTIR спектри: а) глиновито тло у природном стању; б) тло са оптималном количином креча; в) тло са оптималном количином цементног везива; г) тло са оптималном количином електрофилтерског пепела; д) тло са оптималном количином каменог брашна; е) тло са оптималном количином гвожђе (III) хлорида; ж) тло са оптималном количином калијум хлорида; з) тло са оптималном количином магнезијум карбоната; и) тло са оптималном количином натријум-силиката; ј) тло са оптималном количином калијум хидроксида

У спектрима узорака стабилованих различитим хемијским реагенсима (Слике 5.23б–5.23ј), нису примећене значајне спектралне промене. Траке карактеристичне за природно глиновито тло су и даље евидентне у овим спектрима. Међутим, приметне су варијације у интензитету горе поменутих трака. Ово сугерише да је дошло до одређених промена у структури тла, што указује на степен хемијске стабилизације.

5.2.2.8. Утицај стабилизатора на физичку промену у структури тла - SEM

Припрема узорака за SEM анализу (скенирајућу електронску микроскопију), као и сама анализа, спроведене су у Лабораторији за електронску микроскопију на Медицинском факултету Универзитета у Нишу. Да би узорак био проводљив за електронски сноп, на узорк је нанесен танак слој злата, као припрема. Узорци су смештени у скенирајући електронски микроскоп *JEOL JSM-5300*, који је радио на напону од 30 kV, а дубина продирања електронског снопа била је 10 μm . Карактеристике површина узорака су посматране при различитим увећањима ($\times 100$, $\times 1000$, $\times 2000$), а затим фотографисане.

SEM анализа је урађена да би се посматрале микроскопске морфолошке промене које се јављају у земљишту након додавања различитих реагенса. Резултати SEM анализе могу се видети на Слици 5.24. Додавање стабилизатора има сличан ефекат на природу морфолошких промена.



Слика 5.24 SEM анализа: а) глиновито тло у природном стању; б) тло са оптималном количином креча; в) тло са оптималном количином цементног везива; г) тло са оптималном количином електрофилтерског пепела; д) тло са оптималном количином каменог брашна; е) тло са оптималном количином гвожђе (III) хлорида; е) тло са оптималном количином калцијум хлорида; ж) тло са оптималном количином калијум хлорида; з) тло са оптималном количином магнезијум карбоната; и) тло са оптималном количином натријум-силиката; ј) тло са оптималном количином калијум хидроксида

Поређењем слика може се видети да се равне и глатке честице природног тла распадају на грубе и фрагментиране делове уз додатак стабилизатора. Таква промена може допринети повећању кохезије, чиме се побољшава чврстоћа тла и смањује његова пластичност.

Фотографије добијене SEM анализом указују на карактеристичну компактну структуру узорка са врло мало пора и присуством кристалних честица. Такође је примећено да је површина тла неравна, сложена и неправилног облика. Претежан број честица је неправилног облика. Најфиније честице имају тенденцију да се агломерирају са већим честицама.

5.2.3. *Анализа резултата хемијске стабилизације тла*

Истражени су и упоређени ефекти различитих материјала коришћењем технике хемијске стабилизације на побољшање геомеханичких својстава глиновитог тла, узимајући у обзир традиционалне материјале (креч и цемент), отпадне материјале (електрофилтерски пепео и камено брашно), као и алтернативне материјале (магнезијум-карбонат, натријум-силикат, калијум-хидроксид, и једињења на бази хлорида – гвожђе (III) хлорид, калцијум хлорид и калијум-хлорид). Најпре су спроведена испитивања једнооксијалне чврстоће тла при притиску, промена Атербергових граница и промена рН вредности и електропроводљивости, на узорцима са три различита процентуална учешћа сваког од стабилизатора у мешавини са тлом. На основу ових резултата, утврђена је оптимална количина сваког од стабилизатора у мешавини са тлом, са којом су припремљени узорци за нову серију испитивања. Спроведена су додатна испитивања промене модула стишљивости, калифорнијског индекса носивости (CBR), бубрења и основних параметара чврстоће – кохезије и угла унутрашњег трења. На крају, спроведена је хемијска анализа промене структуре тла применом FTIR и SEM технике. На основу добијених резултата може се закључити следеће:

- Сви разматрани стабилизатори допринели су побољшању једнооксијалне чврстоће тла на притисак, међу којима су се традиционални стабилизатори истакли као најефикаснији, нешто слабији ефекат је постигнут додатком магнезијум-карбоната, док су у случају преосталих стабилизатора постигнути знатно скромнији резултати;
- Ниједан од испитиваних стабилизатора није допринео значајнијој промени вредности границе течења тла, док је сваки од њих допринео повећању вредности

границе пластичности, што је на крају довело до смањења индекса пластичности третираног глиновитог тла;

- Резултати промене рН вредности показали су да су традиционални стабилизатори најуспешнији у повећању алкалности тла, регистрован је благи пораст рН вредности додавањем отпадних материјала, док се уз употребу хлорида рН вредност природног тла смањила;
- Резултати промене електропроводљивости указују на потенцијал примене сваког од анализираних стабилизатора у комбинацији са електрокинетичким третманом, јер су допринели побољшању електропроводљивости тла у односу на тло у природном стању;
- Утврђено је да оптимални садржај стабилизатора за третирано глиновито тло у случају примене хлорида достиже 2%, у случају креча, магнезијум-карбоната и натријум-силиката 5%, за калијум-хидроксид 7%, за камено брашно 10%, за електрофилтерски пепео 15%, док је за цементно везиво утврђено да је већи од разматраних 15%, што са друге стране намеће питање економске оправданости поступка стабилизације применом овог везива;
- Најбољи резултати у погледу повећања вредности модула стишљивости постигнути су додатком традиционалних стабилизатора, иако су и остали разматрани стабилизатори допринели смањеној стишљивости третираног тла у поређењу са природним материјалом;
- У случају свих разматраних стабилизатора, вредности CBR су веће од 3%, што је од велике користи када је у питању изградња путева, при чему је највеће побољшање постигнуто у случају стабилизације тла традиционалним стабилизаторима;
- Сваки од разматраних стабилизатора допринео је смањењу бубрења тла, са врло уједначеном ефикасношћу, при чему је највеће смањење постигнуто додатком традиционалних стабилизатора;
- Повећање чврстоће тла на смицање уочено је за сваки од анализираних стабилизатора. Највеће повећање вредности кохезије забележено је додавањем традиционалних стабилизатора. Од алтернативних стабилизатора, највећа промена је забележена додатком магнезијум-карбоната, односно натријум-силиката, док је најмање повећање забележено додатком калијум-хлорида;

- Најизраженије повећање вредности кохезије забележено је додатком традиционалних стабилизатора, калијум-хидроксида, као и магнезијум-карбоната, док су за све остале разматране стабилизаторе добијене вредности c биле нешто ниже и међусобно приближне;
- Значајније повећање вредности угла унутрашњег трења забележено је додатком традиционалних стабилизатора, каменог брашна, као и магнезијум-карбоната, док су за све остале разматране стабилизаторе добијене вредности φ биле незнатно више од вредности за тло у природном стању, без обзира на време протекло након третмана;
- Током опита директног смицања, промене у начину отказа третираног тла могу се уочити на основу δ - τ дијаграма. Наиме, узорци са додатком креча, цементног везива и са додатком магнезијум-карбоната имали су израженији врх при отказу у поређењу са осталим стабилизаторима, што указује на крти лом тла. Код осталих стабилизатора забележен је дуктилни лом.

Након спровођења опсежних лабораторијских испитивања и након сагледавања ефеката анализираних стабилизатора, за наредну фазу истраживања, у чијем фокусу је предложена техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла, одабран је по један стабилизатор из сваке од три анализираних групе стабилизатора, при чему су узети у обзир првенствено критеријум ефикасности стабилизатора, али и врло важан критеријум могућности примене стабилизатора у комбинацији са електрокинетичким третманом.

Као традиционални стабилизатор одабран је креч. Иако су у испитивањима неких од анализираних својстава тла резултати добијени употребом цементног везива били нешто повољнији, овај стабилизатор ипак није одабран. Разлог томе лежи у својству цемента да очвршћава, што онемогућава његову примену у комбинацији са електрокинетичким третманом који подразумева течну стању примењеног стабилизатора.

Из групе стабилизатора на бази отпадних материјала одабран је електрофилтерски пепео. Иако су резултати применом електрофилтерског пепела и каменог брашна са аспекта великог броја испитиваних својстава тла били прилично уједначени, пепео је изабран за наредну фазу истраживања из разлога његове лакше растворљивости у води, што погодује његовој примени у комбинацији са електрокинетичким третманом.

На крају, када је реч о групи алтернативних материјала, изабран је магнезијум-карбонат, имајући у виду да се у погледу највећег броја испитиваних својстава тла овај стабилизатор показао као најефикаснији из ове групе стабилизатора.

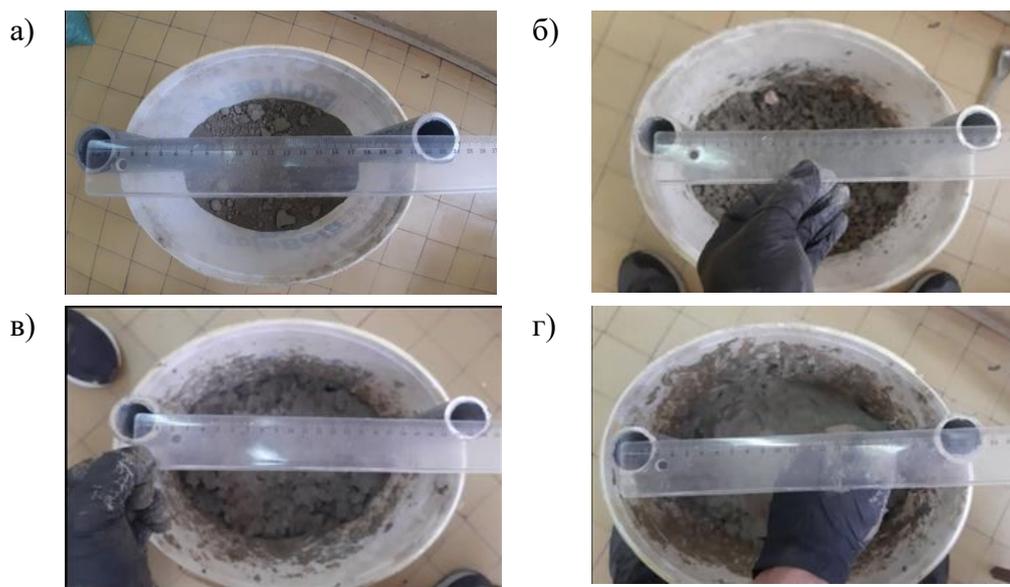
5.3. Електрокинетички третман тла

Са циљем адекватног осмишљавања експерименталног програма за наредну фазу истраживања, у чијем фокусу је предложена хемијска електрокинетичка стабилизација тла, било је неопходно спровести и одговарајућа претходна лабораторијска испитивања са аспекта технике електрокинетичког третмана глиновитог тла.

У испитивањима су коришћен уређај *DC INSTEK PSP603*, који представља извор стабилног и континуираног једносмерног напона (струје). Уређај *PSP603* омогућава прецизну контролу и примену електричног поља. Напаја се на стандардни мрежни напон од 220–240 V. За уређај *PSP603* излазни напон може бити подешен у интервалу од 0 до 60 V, као и излазна струја у опсегу од 0 до 3,5 A. Подешавање напона и струје се врши ручно, што је погодно за испитивања која захтевају контролу над електричним параметрима. Уграђени дисплеј пружа могућност високе читљивости и омогућава оператору да у реалном времену прати вредности напона (U) и јачине струје (I), чиме се обезбеђује потпуна контрола током експеримента. Поред тога, уређај је опремљен системом безбедносних заштита као што су заштита од преоптерећења, прегревања и кратког споја, што омогућава поуздан и сигуран рад током дужих експерименталних сесија.

5.3.1. Утицај влажности тла на успешност електрокинетичког третмана

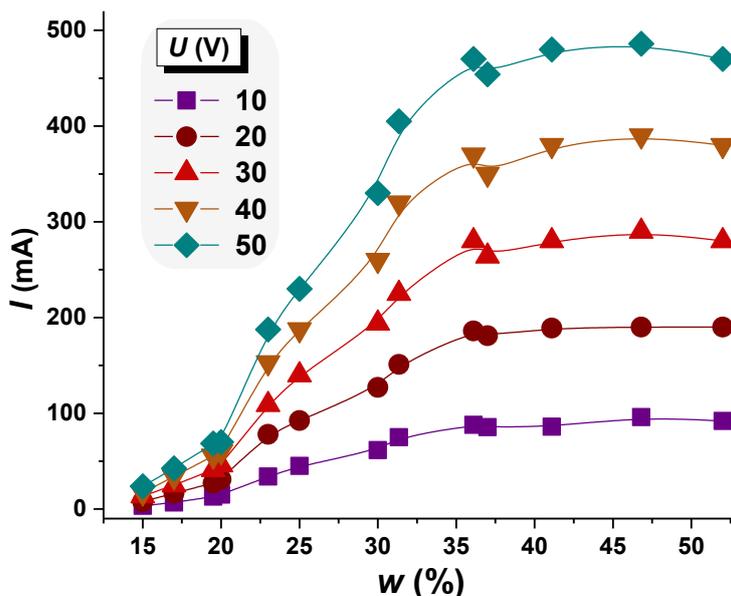
Примена технике електрокинетичког третмана тла условљена је постојањем воде у тлу. Сходно томе, неопходно је било спровести испитивања која омогућавају сагледавање утицаја промене влажности тла на јачину електричне струје. Испитивања су спроведена у лабораторијским условима, у сандуцима елипсастог облика уз коришћење две електроде кружног попречног пресека унутрашњег пречника $\varnothing 25,4$ mm (Слика 5.25).



Слика.5.25 Припрема земљаног материјала са различитим влажностима:

а) $w=15\%$; б) $w=20\%$; в) $w=25\%$; г) $w=30\%$

Тло је третирано при различитим влажностима у опсегу од 15% до 55%, са поделом на по 5%. Осим влажности тла, у испитивања су вариране и вредности напона (од 10 V до 50 V). Резултати промене јачине електричне струје при различитим вредностима напона и различитим влажностима третираног тла су приказани на Слици 5.26. При нижим вредностима влажности тла, вредности јачине електричне струје су доста уједначене. Могу се уочити две карактеристичне промене на дијаграму. Први "скок" на дијаграму забележен је при влажности од 20% што приближно одговара вредности границе пластичности глиновитог тла у природном стању од 23%. Дакле, промена стања конзистенције (прелаз из получврстог у пластично стање) утиче на нагли скок јачине струје. Овакав скок забележен је за све примењене вредности напона, при чему је тренд раста јачине струје израженији при већим напонима. У границама између 20% и 35% бележи се приближно линеарни тренд повећања електричне струје са повећањем влажности. Влажност од 35% приближно одговара влажности при засићењу узорка глиновитог тла од 33%, и са влажностима већим од ове вредности уочава се тренд споријег раста јачине електричне струје. Са вредностима влажности тла већим од 45% бележи се занемарљива промена вредности јачине електричне струје.



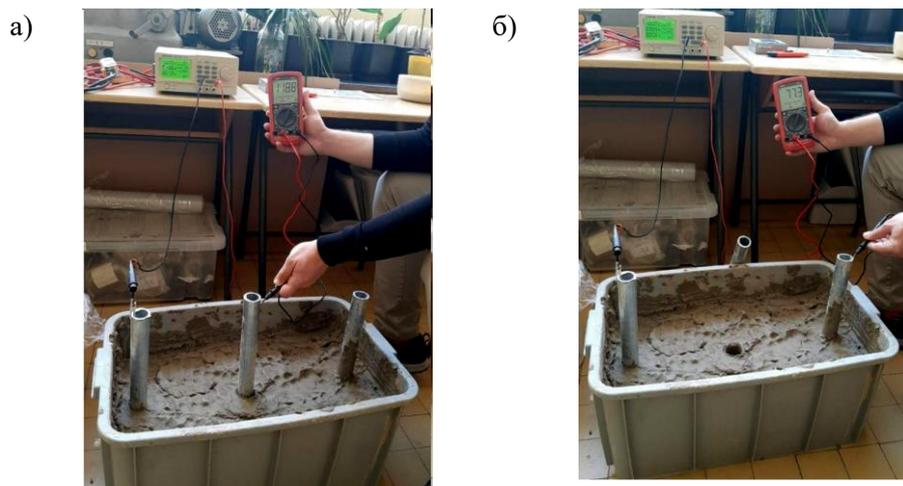
Слика 5.26 Промена јачине електричне струје (I) при различитим вредностима напона (U) и различитим влажностима (w) третираног тла

5.3.2. Утицај растојања и дубине уграђивања електрода у тло на успешност електрокинетичког третмана

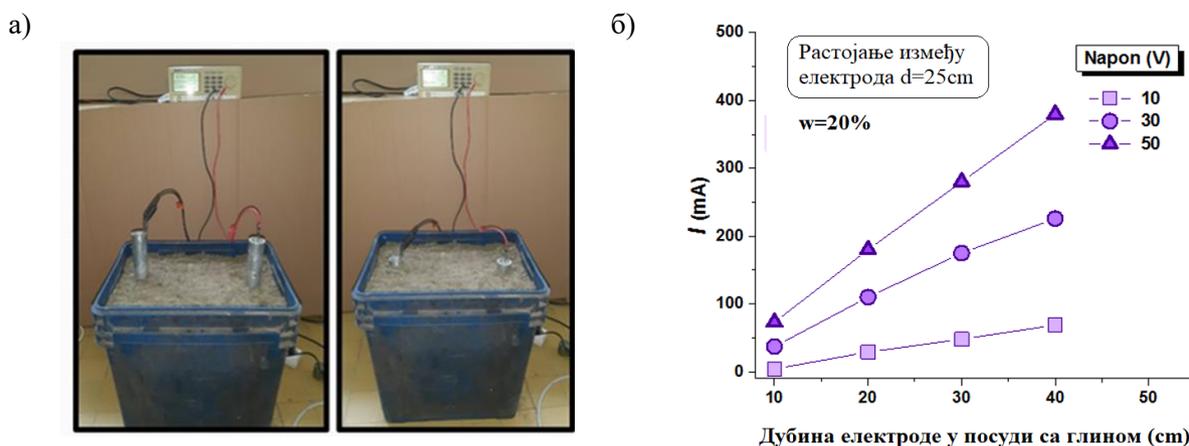
Ради оптимизације броја електрода, као и њиховог распореда за потребе спровођења наредне фазе истраживања, било је неопходно проверити утицај међусобног растојања електрода (аноде и катоде) и дубине њиховог постављања.

Праћена је промена јачине струје за међусобна осовинска растојања аноде и катоде од 22,5 cm и 45 cm (Слика 5.27), при вредности напона $U = 30$ V и влажности тла $w = 30\%$. Резултати су показали да су електроде које су на ближем међусобном растојању резултовале већом јачином струје у односу на веће растојање између електрода. Тако је при растојању електрода од 22,5 cm измерена јачина електричне струје износила 670 mA, док је на двоструко већем растојању од 45 cm јачина електричне струје износила 510 mA, што је пад у јачини струје од око 24%. Дакле, уочено је да пад вредности јачине струје није пропорционалан порасту растојања између електрода, већ је пад знатно мањи.

Када је реч о дубини уграђивања електрода у тло, што подразумева и већу површину електроде у контакту са тлом, у испитивањима су вариране вредности дубине од 10, 20, 30 и 40 cm. Резултати су показали да је већа површина електроде у контакту са тлом, односно већа дубина електроде, допринела значајном повећању јачине струје (Слика 5.28). Због тога је одлучено да за потребе даљих испитивања електроде буду што дубље уграђене у тло.



Слика 5.27 Промена јачине струје у зависности од растојања електрода:
а) размак електрода 22,5 cm; б) размак електрода 45 cm



Слика 5.28 Промена јачине струје у зависности од дубине уграђивања електроде у тло: а) поставка експеримента; б) резултат експеримента

5.3.3. Утицај корозије електрода на ефикасност електрокинетичког третмана

Током третмана, услед електроосмозе, велика количина воде се сакупља у зони катоде (Слика 5.29а). Веома често, уколико третман тла траје дужи временски период, може доћи до кородирања електрода (Слика 5.29б). Савремена истраживања су указала на овај процес, анализирајући различите материјале електрода, попут челика, алуминијума, бакра итд. (Sadeghian et al., 2022). Истраживања новијег датума су показала да су електроде од месинга за примену у електрокинетичком третману најповољније са аспекта корозије, јер су за исти градијент електричног напона, ове електроде показале дужу отпорност на дејство корозије и резултовале већом брзином протока струје (односно, бољом проводљивошћу) у поређењу са електродама од бакра (Keraouti et al., 2024).

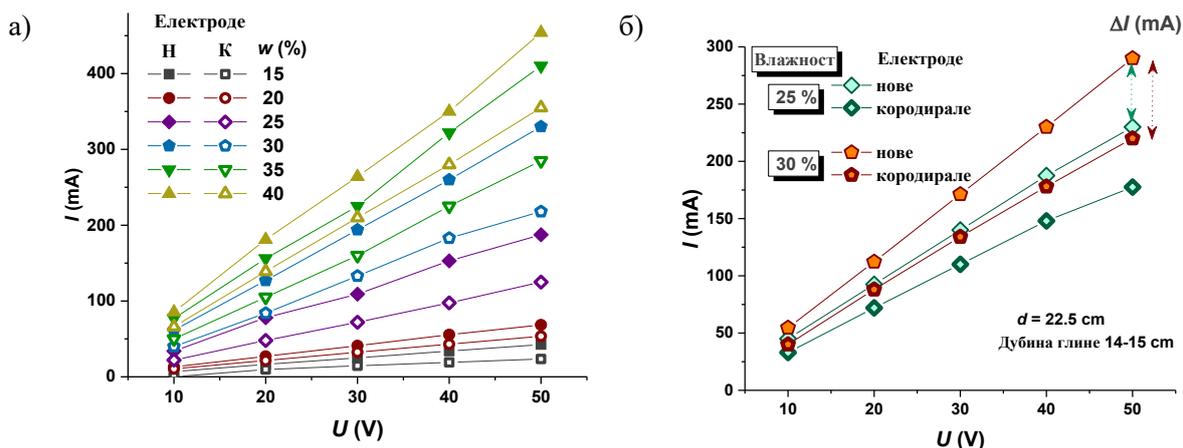


Слика 5.29 Електрокинетички третман глиновитог тла: а) сакупљање воде у зони катоде; б) електроде пре и после коришћења

Како временом дође до појаве корозије електрода под дејством воде и под дејством хемијског стабилизатора, може доћи до смањења капацитета електрода у погледу преноса електричне енергије. Наиме, на електродама долази до стварања оксида и других слојева, што проузрокује повећање отпорности. Из тог разлога, у испитивањима су сагледане вредности јачине једносмерне електричне струје и са аспекта поређења употребе нових (некоришћених) електрода и кородираних (коришћених) електрода од поцинкованог челика. Испитивања су вршена са растојањем електрода (анодe и катоде) од 22,5 cm, при различитим напонима у интервалу од 10 до 50 V и при различитим влажностима тла у интервалу од 15% до 45%. Резултати су приказани на Слици 5.30а. Као што се са слике може видети, пораст вредности јачине струје је скоро линеаран при повећању напона, без обзира на влажност, и то како у случају нових, тако и у случају кородираних електрода.

У поглављу 5.3.1. је објашњено да већа влажност тла резултује већом јачином електричне струје при истом напону. На основу резултата приказаних на Слици 5.30а може се закључити да се, при истом напону и истој влажности, јачина електричне струје у извесној мери смањује када се користе кородирале електроде, из разлога повећане отпорности услед корозије електрода.

Пример уоченог најдрастичнијег смањења јачине струје услед корозије електрода издвојен је на Слици 5.30б. Оно што се може уочити на слици јесте да је јачина струје када су кородирале електроде, при влажности тла од 30% мања у поређењу са јачином струје када се користе нове (некоришћене) електроде при влажности тла од 25%. Такође се може уочити да је пад у јачини струје када су кородирале електроде израженији са порастом напона.



Слика 5.30 Промена јачине електричне струје при различитим влажностима тла и различитим напонима коришћењем старих (кородираних) и нових (некоришћених) електрода: а) после 14 дана третмана б) после 30 дана третмана

На основу спроведених испитивања, као и прегледом литературе, за меродавни напон при третирању тла предложеном комбинованом хемијском електрокинетичком методом у наредној фази истраживања одабран је напон од 30 V. Напони већи од ове вредности обично не доприносе значајнијем побољшању карактеристика тла, а са друге стране негативно утичу на електроде повећавајући ризик од појаве корозије.

Као почетна влажност глиновитог тла у испитним сандуцима у наредној фази истраживања изабрана је влажност при засићењу од 33%. У тлу влажности већих од ове вредности, како је то било објашњено према Слици 5.26, јачина електричне струје је такоређи имала константну вредност, док је при нижим вредностима влажности тла јачина струје значајно мања, те се вредност влажности при засићењу намеће као логичан избор. Такође, како је претходно и показано, веће растојање између аноде и катоде не утиче драстично на смањење јачине електричне струје, те поставка експерименталног модела омогућава уграђивање електрода на довољно великом међусобном растојању. Тиме је обезбеђен довољно велики простор између електрода за узимање потребног броја узорака у сврху спровођења релевантних лабораторијских опита, са циљем сагледавања ефеката предложене технике стабилизације тла са меродавних геотехничких аспеката.

6. ХЕМИЈСКИ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКИ ТРЕТМАН ТЛА

Истраживања ефеката побољшања глиновитог тла предложеном техником хемијског електрокинетичког третмана спроведена су на експерименталним моделима у лабораторијским условима. Спроведена су истовремена испитивања у три испитна сандука, при чему је у сваком сандуку природно тло третирано различитим хемијским стабилизатором. Избор стабилизатора био је такав да је из сваке од претходно три дефинисане групе стабилизатора изабран онај који је показао најбоље резултате. Из групе традиционалних стабилизатора коришћен је креч (Сандук 1 - у наставку С1*), из групе отпадних материјала изабран је електрофилтерски пепео (Сандук 2 - у наставку С2*), док је из групе алтернативних одабран магнезијум-карбонат (Сандук 3 - у наставку С3*). Сваки од стабилизатора је дозиран на исти начин и у исто време током третмана који је трајао 56 дана (8 седмица).

Приликом поставке експерименталног испитивања, природни глиновити материјал хомогенизован је помоћу апарата за ручно мешање, при влажности од 33% (Слика 6.1).



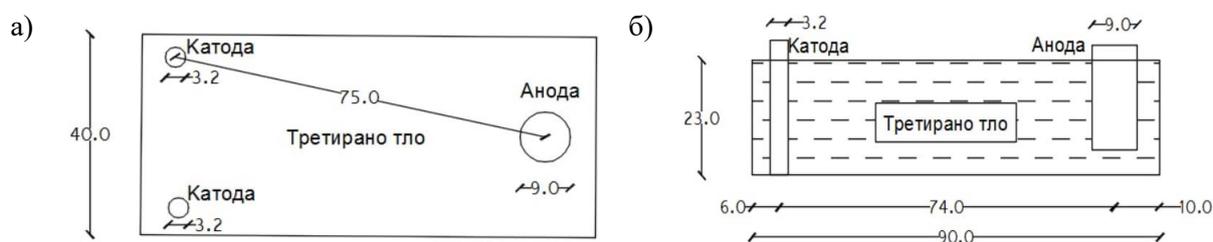
Слика 6.1 Хомогенизовање природног глиновитог материјала: а) апарат за ручно мешање; б) механичко мешање тла у сандуку

Изабрани проценат влажности одговара вредности влажности при засићењу (w_z) за ову врсту тла (Једначина 6.1, у којој је: ρ_d густина тла у сувом стању, ρ_s густина тла без шупљина и пора, ρ_w густина воде). Влажност при засићењу може се сматрати критичном у природним условима (приликом активирања клизишта, приликом лома тла испод темеља и др.).

$$w_z = \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right) \cdot \rho_w = \left(\frac{1}{1.44} - \frac{1}{2.70} \right) \cdot 1 = 0.695 - 0.365 = 0.33 \cdot 100\% = 33\% \quad (6.1)$$

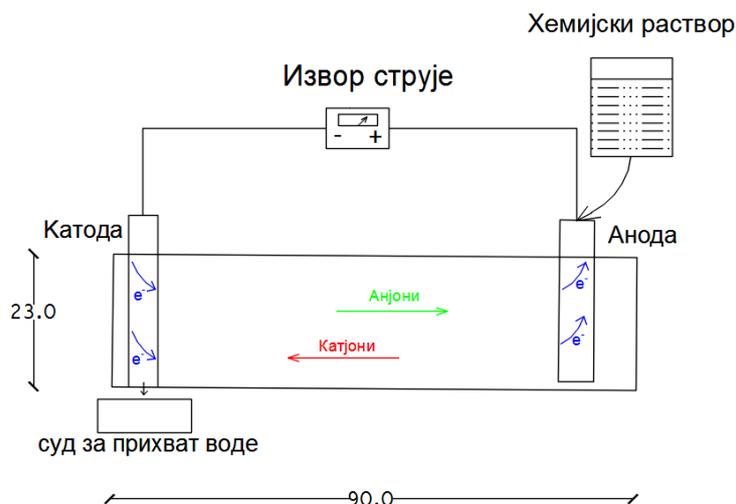
За сваки од стабилизатора коришћених у овој фази експерименталних истраживања направљен је концентровани раствор од 10%. За прављење раствора одмерено је 110 g креча (калцијум-карбоната), односно 125 g магнезијум-карбоната и 130 g електрофилтерског пепела. Сваки од стабилизатора растворен је у посуди са запремином од једног литра воде.

Димензије испитних сандука у којима је вршено испитивање су 90 cm × 40 cm у основи и 23 cm висине. Сваки сандук садржи једну перфорирану електроду кружног попречног пресека Ø90 mm (аноде) и две перфориране електроде кружног попречног пресека Ø32 mm (катоде). Анода је постављена по средини дуж једне стране сандука, на 5cm од ивице сандука, док су катоде постављене у угловима сандука на супротној страни (Слика 6.2). Осовински размак између аноде и катода износи 75 cm.



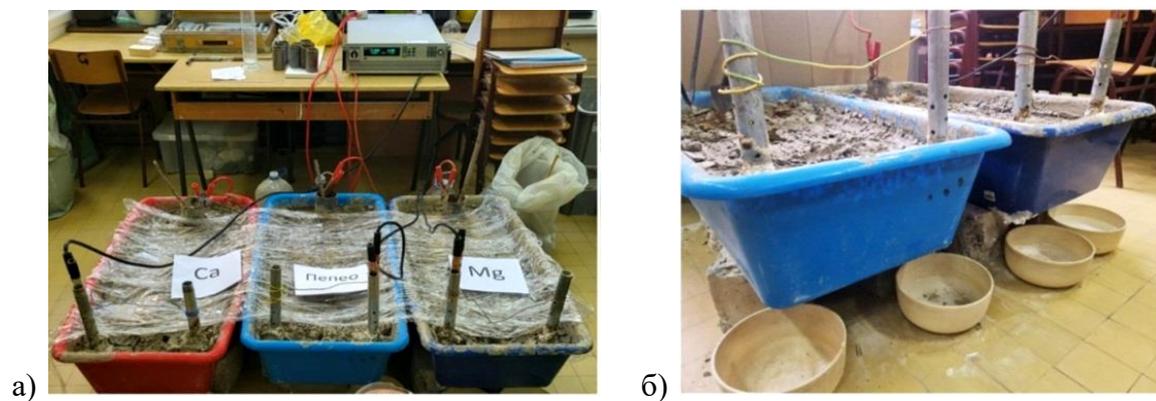
Слика 6.2 Шематски приказ испитних сандука: а) приказ у основи; б) подужни пресек (димензије у cm)

Поставка експеримента са сандуком прикљученим на извор струје, резервоаром за додавање хемијског раствора стабилизатора и кретањем јона приказана је на Слици 6.3 (шематски приказ) и Слици 6.4а (поставка у лабораторији). Електроде су прикључене на извор струје и током третмана тла изложене су контролисаном напону од 30 V, док је јачина једносмерне струје свакодневно мерена. Измерене јачине струје пре почетка третмана су: 180 mA (C1*), 190 mA (C2*), 170 mA (C3*).



Слика 6.3 Шематски приказ поставке експеримента за хемијски електрокинетички третман глиновитог тла у лабораторијским условима (димензије у cm)

Испод катода изведени су отвори на дну испитних сандука, како би се омогућило отицање воде која се услед електроосмозе прикупља у зони негативно наелектрисаних електрода - катода. На тим местима постављени су судови за прихват дренаране воде (Слика 6.4б).



Слика 6.4 Експериментална истраживања технике хемијског електрокинетичког третмана глиновитог тла: а) поставка експеримента у лабораторији (три испитна сандука са три разматрана стабилизатора - креч, електрофилтерски пепео и магнезијум-карбонат (слева на десно)); б) прикупљање воде испод катода

6.1. Испитивања током реализације експеримента

6.1.1. Опит крилном сондом

Током трајања експеримента, на сваких 10 дана, вршено је испитивање крилном сондом у сваком од испитних сандука. Испитивање је вршено у три зоне – зона аноде, средишња зона и зона катоде. После сваког опита, узет је репрезентативни узорак за одређивање влажности тла на том месту. После сушења материјала, урађена је провера садржаја хемијских елемената путем *XRF aparata* (Слика 6.5). Испитивање је урађено према унапред дефинисаном плану, односно на раније обележеним местима, како се не би нарушила структура тла за потребе каснијих узорковања, после завршетка хемијског електрокинетичког третмана глиновитог тла.

Опит крилном сондом се првенствено користи за одређивање недрениране смичуће чврстоће глиновитих тла. Крилна сонда се састоји од четири крилца под међусобним углом од 90° на крају челичне шипке. Када се сонда утисне у тло, на горњи крај шипке се наноси торзиони момент преко одговарајућег механизма, све док не дође до смичућег лома глине по бази и омотачу цилиндра који описују крилца сонде. На основу очитаног торзионог момента у тренутку лома ($M_{t,max}$), може се одредити недренирана кохезија глине (c_u) према обрасцу:

$$c_u = \frac{M_{t,max}}{D^2\pi\left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6}\right)} \quad (6.2)$$

где су D и H пречник и висина крилаца крилне сонде, респективно.

Вредности добијене на овај начин нису сасвим поуздане, јер полазе од претпоставке да је тло засићено водом, односно да је вредност угла унутрашњег трења тла приближно нула. Овакав предуслов важи само у почетном тренутку третмана, те корелација вредности момента торзије са недренираном кохезијом c_u из тог разлога није урађена. Свакако, вредности момената добијених опитом крилне сонде међусобно су упоредиве, јер је реч о прелиминарном упоређивању вредности смичуће чврстоће тла. Конкретне вредности параметара смичуће чврстоће одређене су на узорцима после третмана и сви закључци базирани су на меродавним вредностима добијеним на непоремећеним узорцима из испитних сандука (опитом триаксијалне компресије). Резултати добијени опитом крилном сондом приказани су Табели 6.1.

Табела 6.1 Резултати опита крилном сондом у различитим временским интервалима током експеримента

Момент торзије утврђен опитом крилне сонде - $M_{t,max}$ (kNm)						
Протекло време (у данима)		10	20	30	40	50
Сандук 1 са кречом (C1*)	Зона аноде	4,1	6,4	10,6	12,1	15+
	Средња зона	3,4	4,8	5,4	6,2	7,5
	Зона катоде	1,2	3,8	3,9	5,0	7,5
Сандук 2 са електрофилтерским пепелом (C2*)	Зона аноде	3,7	8,4	8,2	9,1	9,9
	Средња зона	6,0	6,0	5,4	5,8	6,4
	Зона катоде	5,2	5,7	5,1	4,6	5,1
Сандук 3 са магнезијум карбонатом (C3*)	Зона аноде	3,8	6,1	6,4	8,2	10,5
	Средња зона	2,4	4,8	4,6	4,4	5,7
	Зона катоде	3,7	5,0	4,8	5,1	5,7

*Почетна вредност момента торзије (пре третмана) износи 1,4 kNm,

Током третмана, сандуци су били прекривени фолијом, са циљем спречавања губитка влажности површинског слоја тла услед ослобађања топлоте. Фолија је током третмана уклањана само током мерења. Забележени резултати се односе на средњу вредност момената торзије измерених у површинском и дубинском слоју.

Највеће вредности момента торзије после првих десет дана третмана забележене су у испитном сандуку са додатком електрофилтерског пепела (C2*), док су просечне вредности у сандуцима C1* и C3* биле међусобно приближно једнаке. Занимљиво је да је у сандуку C1* у зони катоде забележена мања вредност ($M_{t,max} = 1,2$ kNm) у односу на почетну ($M_{t,max} = 1,4$ kNm). Овакав резултат је вероватно последица спорог дренарања у зони катода услед процеса електроосмозе. Са друге стране, у сандуку C2* најмања вредност забележена је у зони аноде, вероватно из разлога спорог инфилтрирања раствора у тло током додавања стабилизатора. Код осталих мерења (сандуци C1* и C3*) је, према очекивањима, највећа вредност момента забележена управо у зони аноде, те се измерена вредност у сандуку C2* може третирати као изолован случај.

После 20 дана од почетка третмана, измерене вредности момента торзије у свим испитним сандуцима су биле доста уједначеније. Може се уочити да је најмања вредност момента измерена у сандуку C1* у зони катоде из разлога веће влажности тла у овој зони. Забележена је разлика у количини прикупљене воде у посудама испод сандука C1* у односу на сандуке C2* и C3*, што указује на различите ефекте које предложена метода има током третмана уз коришћење различитих стабилизатора.

Резултати после 30 и 40 дана су веома слични. Незнатно веће промене забележене су у зони аноде, док су измерене вредности момената у осталим зонама биле незнатно промењене у односу на претходна мерења. У испитном сандуку C2* у зони катоде, као и у сандуку C3* у средњој зони, забележен је пад вредности момента у односу на вредност након 20 дана, иако је третирање дуже трајало. У сандуку C1* забележен је континуитет у расту вредности момента у свим зонама, иако се интензитет прикупљања воде није променио.

Након 50 дана третмана, односно при крају третмана, у сандуку C1* у зони аноде дошло је до значајног очвршћавања тла (регистрована је врло висока вредност момента торзије), и то до вредности момента коју крилна сонда није у могућности да измери. У свим сандуцима забележене су максималне вредности момената у свим зонама од почетка третмана. Такође, код свих сандука, количина прикупљене воде у току дана свела се на свега неколико капи, те је из тог разлога експеримент завршен после осам седмица.

6.1.2. Испитивање промена хемијске структуре тла - XRF и XRD анализа

Тло са крилне сонде, након спроведеног опита, узето је за потребе одређивања влажности тла и после сушења подвргнуто анализи хемијских елемената. Снимање узорака је најпре вршено ручним XRF спектрометром, марке "LANScientific", модел "RTU-XRF7460" (Слика 6.5). Овај уређај је могуће користити за утврђивање концентрације хемијских елемената у тлу на претходно уситњеним узорцима у чврстом агрегатном стању. Овакав начин испитивања је недеструктиван и прилагодљив узоркованом материјалу, јер се не постављају готово никакви захтеви у погледу облика или величине узорка. Излазни подаци се након снимања добијају у облику табела (*Excel* документ) или текста (*PDF* документ). Резултати представљају процентуално учешће хемијских елемената у узорку тла изражено у масеним процентима (%). За потребе прелиминарних анализа, забележене су промене у садржају преко 30 елемената. Међутим, највеће промене су уочене у садржају калцијума (Ca), гвожђа (Fe), магнезијума (Mg), силицијума (Si) и алуминијума (Al). Концентрације ових елемената су приказани у Табели 6.2.



Слика 6.5 XRF ручни анализатор и узорци тла за утврђивање промена хемијских елемената у тлу након хемијског електрокинетичког третмана

Највеће промене забележене су у испитном сандуку С1* са кречом ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) као стабилизатором, где је промена садржаја калцијума регистрована у свим зонама (зона аноде, средња зона и зона катоде). Са друге стране, у сандуцима С2* са електрофилтерским пепелом и С3* са магнезијум карбонатом (MgCO_3), у зони катоде није дошло до велике промене садржаја хемијских елемената услед додавања стабилизатора, што указује на слаб потенцијал транспорта коришћених раствора кроз ову врсту тла под овим условима. Код свих узорака тла, у зони аноде дошло је до повећања концентрације елемената који су носиоци раствора. Притом, у свим сандуцима уочено је смањење концентрације силицијума, те се може закључити да су силикатне компоненте реаговале са носиоцима раствора. Осим промене садржаја доминантног елемената из раствора, уочава се промена и других, секундарних елемената у тлу.

Током периода третирања узорка, постојала је тежња да се достигне оптималан садржај сваког од реагенса који је одређен физичким мешањем са тлом кроз фазу хемијске стабилизације. С обзиром да је за креч, односно магнезијум-карбонат утврђен оптимални садржај у мешавини са тлом од 5%, може се видети да је у сандуцима С1*, односно у С3*, повећање садржаја калцијума, односно магнезијума значајно порасло, пре свега у зони аноде. У испитном сандуку С1* може се уочити да је зона у којој се бележи повећана концентрација стабилизатора значајно шири у односу на сандук С3*, у коме је магнезијум-карбонат у већој концентрацији остао само у зони аноде.

Табела 6.2 Резултати мерења садржаја репрезентативних елемената у тлу током третмана техником хемијске електрокинетичке стабилизације

XRF анализа		Трајање третмана (у данима)														
		10			20			30			40			50		
испитно место	хемијски елементи	Зона аноде	Средња зона	Зона катоде	Зона аноде	Средња зона	Зона катоде	Зона аноде	Средња зона	Зона катоде	Зона аноде	Средња зона	Зона катоде	Зона аноде	Средња зона	Зона катоде
		Сандук 1 са кречом (C1*)	Ca	7,9	5,9	5,6	9,5	6,8	5,7	10,1	7,7	6,0	11,4	8,3	6,8	11,9
Fe	5,7		5,8	5,5	5,8	5,7	5,6	7,0	5,6	5,6	7,2	5,7	5,5	7,7	5,5	5,9
Mg	3,5		3,8	3,7	3,6	3,9	3,8	3,9	3,5	3,8	3,7	4,2	3,9	3,7	3,9	3,7
Si	31,5		32,1	33,2	30,9	32,1	31,5	30,1	31,6	31,9	29,4	32,0	31,5	29,6	31,5	30,8
Al	9,7		9,5	9,4	9,1	9,6	9,1	8,7	8,9	9,3	8,4	8,7	9,0	8,9	9,0	9,2
Сандук 2 са електрофилтерск им пелелом (C2*)	Ca	6,0	5,7	5,9	6,4	6,2	5,8	6,9	6,6	5,9	7,2	6,6	5,8	7,8	6,8	5,9
	Fe	5,9	5,8	5,7	6,2	5,7	5,6	7,5	5,8	5,7	7,8	5,8	5,7	8,7	5,7	5,9
	Mg	3,5	3,7	3,6	3,5	3,7	3,8	3,8	3,9	3,5	3,6	3,4	3,6	3,7	3,7	3,6
	Si	32,4	32,9	33,1	32,2	33,0	32,6	31,8	32,0	32,6	31,5	31,9	32,5	31,5	31,9	32,2
	Al	9,2	9,6	9,5	9,5	9,7	9,4	9,8	9,7	9,5	9,7	9,8	9,4	9,9	9,9	9,5
Сандук 3 са магнезијум-карбонатом (C3*)	Ca	5,8	5,7	5,7	5,9	5,8	5,9	5,9	6,0	5,8	6,2	6,0	5,8	6,1	6,1	6,0
	Fe	6,0	5,6	5,8	6,4	5,7	5,5	6,8	5,1	5,7	7,4	5,7	5,5	7,7	5,5	5,9
	Mg	5,5	3,9	3,6	5,8	4,3	3,9	5,9	4,6	3,8	6,2	4,9	3,9	6,4	5,2	4,0
	Si	33,1	33,2	33,0	32,0	32,5	32,7	32,1	32,4	32,5	31,2	31,5	31,7	31,5	31,8	32,0
	Al	9,7	9,5	9,4	9,6	9,2	9,4	9,6	9,3	9,4	9,1	9,3	9,4	9,0	9,4	9,2

* Измерен садржај елемената у глиновитом тлу у природном стању: Ca - 5,6%; Fe - 5,7%; Mg - 3,4%; Si - 33,4%; Al - 7,7%,

Како је XRF анализа само контролна, коначни закључци о променама унутар третираног тла могу се донети након спровођења XRD анализе, која даје прецизније и поузданије резултате.

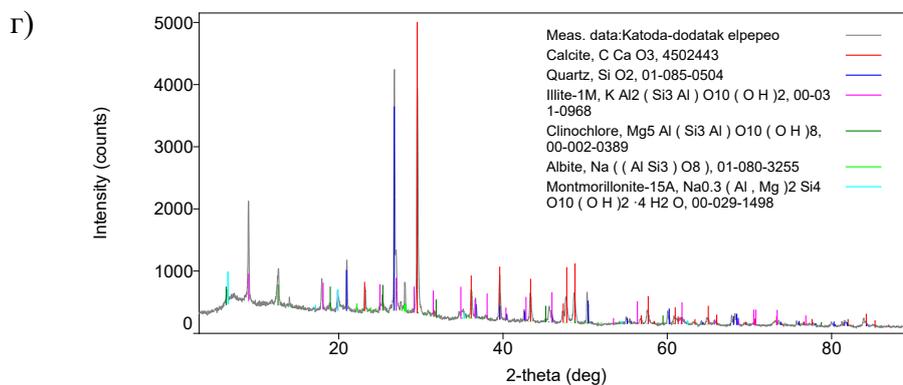
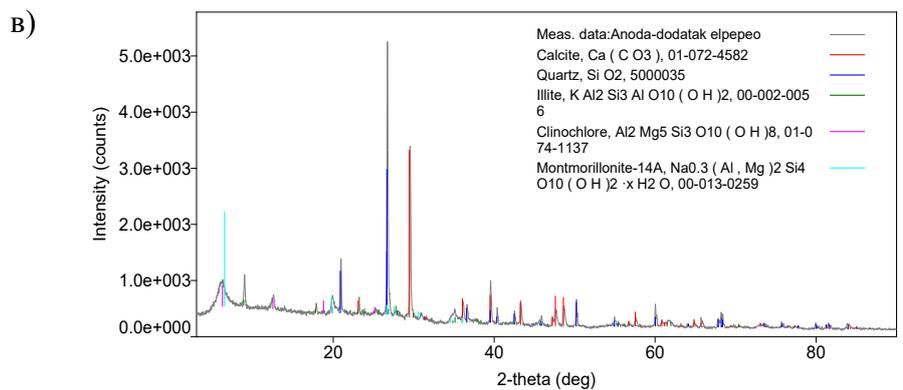
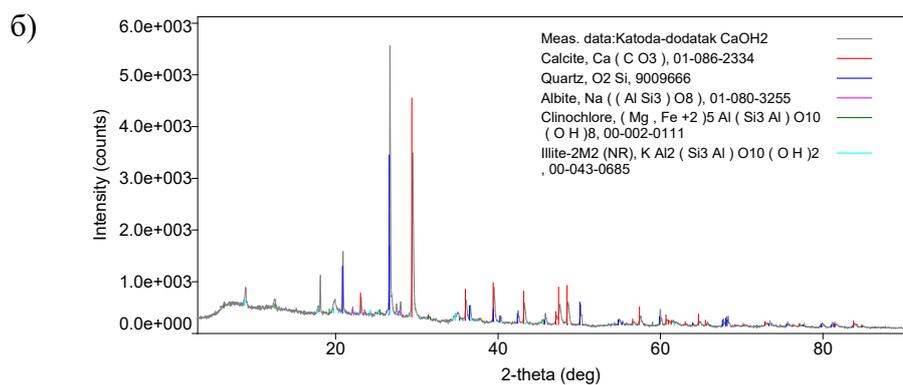
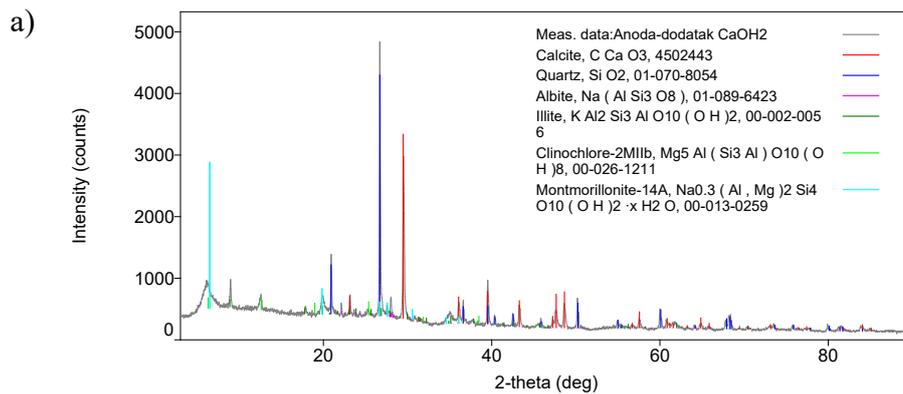
Рендгенско - дифракциона (XRD) анализа вршена је на инструменту „RigakuMiniFlex 600“ са „D/teXUltra 250“ детектором високе брзине и рендгенском цеви са бакарном анодом. Услови снимања били су: опсег угла 3–90°, корак 0,02°, брзина снимања 10°/min. Напон рендгенске цеви био је 40 kV, а јачина струје била је 15 mA. Идентификација минерала вршена је у софтверу PDXL 2 Version 2.4.2.0, а добијени дифрактограми су упоређивани са подацима из базе података ICDD PDF-2 2015. Граница детекције XRD анализе је око 1%. Резултати квалитативне рендгенско -

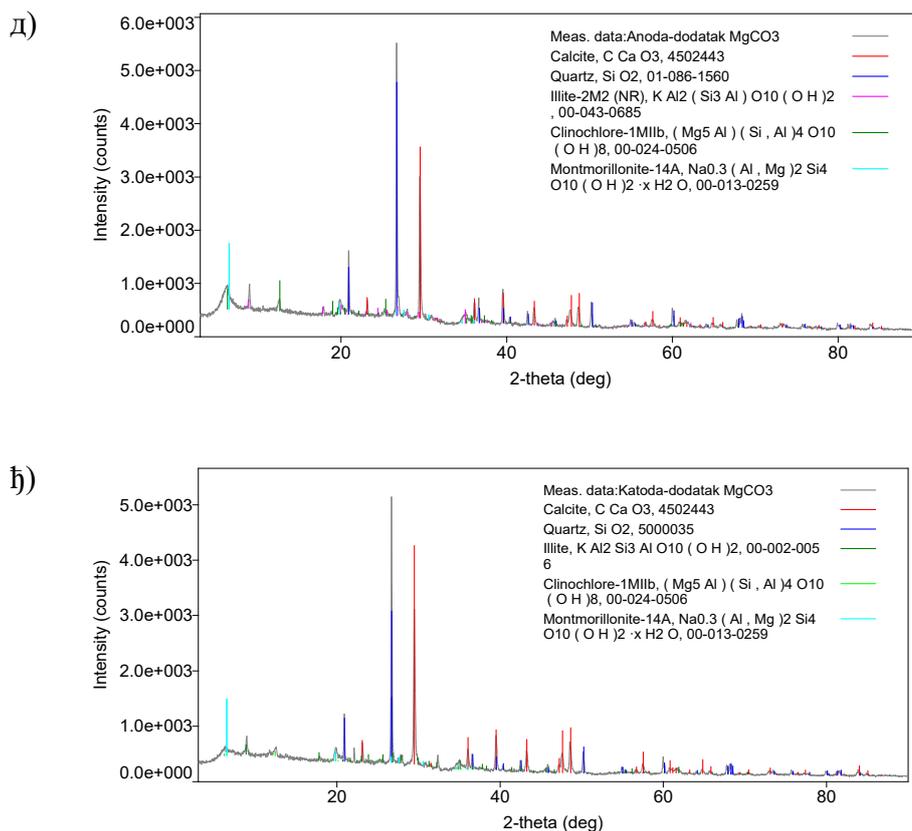
дифракционе анализе приказани су у Табели 6.3, а дифрактограми узорака приказани су на Слици 6.6.

Табела 6.3 Резултати квалитативне XRD анализе третираног тла

Назив узорка		Процена садржаја минерала (%)					
		Калцит	Кварц	Илит	Хлорит	Монтморилонит	Плагиоклас
Природно стање тла		39	25	11	10	15	-
Сандук 1 са кречом (C1*)	Зона аноде	35	24	10	8	19	4
	Зона катоде	43	34	12	6	-	5
Сандук 2 са електрофилтерским пепелом (C2*)	Зона аноде	38	25	10	8	18	-
	Зона катоде	32	29	19	9	5	6
Сандук 3 са магнезијум - карбонатом (C3*)	Зона аноде	36	29	9	9	17	-
	Зона катоде	38	35	10	6	11	-

На основу резултата добијених XRD спектра може се видети да је заједничко за све узорке смањење садржаја кварца у зони аноде у односу на природно тло, али и повећање присуства минерала монтморилонита, који је и најактивнији код глиновитог тла. У сандуку C1* може се уочити да монтморилонита нема у зони катоде, као и да је присуство хлорита скоро преполовљено (са 10% на 6%). На рачун тога, дошло је до повећања калцита (43%) у односу на природно тло (39%), као и кварца (34% у односу на 25%). С обзиром на то да су калцит и кварц минерали који имају веће чврстоће од минерала глина, овај показатељ охрабрује да је примарни циљ, а то је трајна модификација и повећање чврстоће тла предложеном техником хемијске електрокинетичке стабилизације глиновитог тла могућа. Такође, може се видети да је проценат монтморилонита у зони аноде у сандуку C1* (19%) већи од концентрације у глиновитом тлу пре третмана (15%), што указује на потенцијалну миграцију и промену у структури тла. Исти феномен забележен је у остала два сандука (18% у сандуку C2*, 17% у сандуку C3*), што упућује на закључак да је и овакав резултат последица електрокинетичких процеса. Поред свега, детектован је минерал плагиоклас, који је измерен у сандуку C1* (код аноде 4% и код катоде 5%), као и у зони аноде у сандуку C2* (6%). У сандуку C2*, у зони катоде забележено је смањење процента калцита (32%), као и монтморилонита (5%), док је проценат илита скоро удвостручен (са 11% на 19%).





Слика 6.6 XRD спектрометри: а) зона аноде у C1*; б) зона катоде у C1*; в) зона аноде у C2*; г) зона катоде у C2*; д) зона аноде у C3*; њ) зона катоде у C3*

Количина осталих минерала није се значајно променила у односу на природно тло. У случају тла третираног магнезијум-карбонатом установљена је најмања промена у односу на природно тло. У сандуку C3*, најзначајније промене у односу на природно тло односе се на повећање садржаја кварца (35%) и смањење садржаја хлорита (6%) у зони катоде.

6.1.3. Електронска микроскопија - SEM

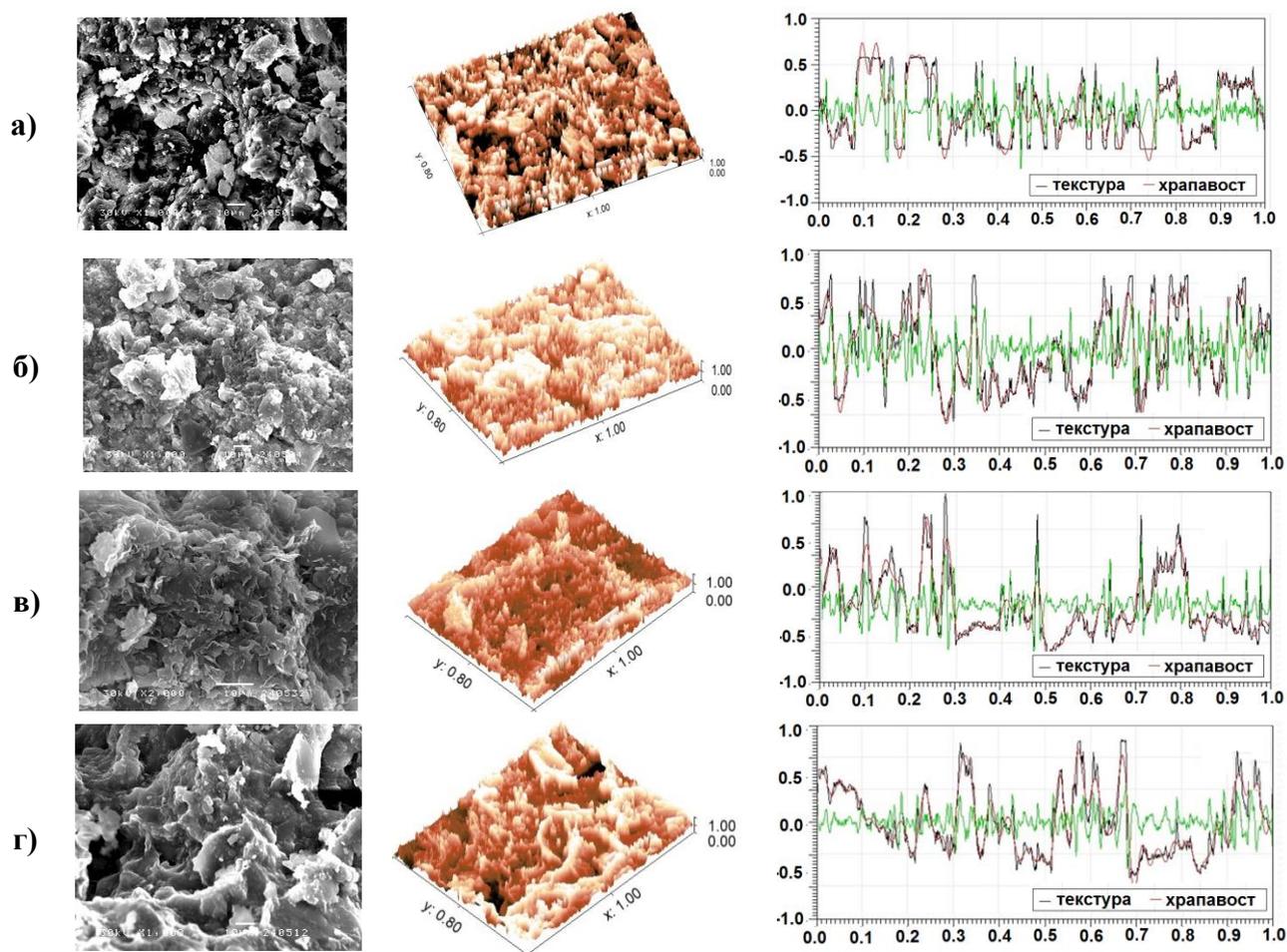
Током експеримента, праћене су и физичке промене на узорцима третираног тла. Посебно се могу приметити промене у зонама аноде (где је у непосредној близини електроде дошло до појаве корозије) и катоде (где је у непосредној близини електроде дошло до стварања соли).

Снимања су извршена применом скенирајућег електронског микроскопа "JEOL JSM-5300", при напону од 30 kV и са дубином продирања електронског снопа 10 μm . Из средине сваког сандука узет је репрезентативни узорак, који је посматран под микроскопом уз увећање од 2000 пута, како би се детектовала промена у структури тла.

На основу добијених фотографија, спроведена је додатна анализа коришћењем "Gwyddion" софтвера. Овај софтвер омогућава унос SEM слика у програм, након чега се свака слика интерпретира као тродимензионална, односно пружа визуелни и квантификовани приказ микрофотографије површине. Користећи алат за извлачење линијских пресека (енг. *Line Profile*), могуће је добити попречни приказ површине честица, што омогућава анализу текстуре, храпавости и морфолошких карактеристика (Слика 6.7). Промена у текстури подразумева сагледавање промене општег изгледа и распореда елемената на посматраној површини, док храпавост представља мању или већу промену (неправилност) на површини која карактерише глаткоћу.

На основу слика добијених коришћењем софтвера "Gwyddion" промене на површини глиновитих честица уочавају се у свим узорцима. У сандуку C1*, пикови на дијаграму који представљају храпавост двоструко су већи од пикова регистрованих за тло у природном стању, што указује на модификацију минерала глине. У сандуцима C2* и C3*, вредности пикова су такође већег интензитета, али је њихово међусобно растојање веће од растојања у сандуку C1*. Већа храпавост површине глиновитих честица која је уочена после третмана, може се одразити на повећање кохезије и пре свега на повећање угла унутрашњег трења. Ову претпоставку треба да потврди и испитивање узорака где ће се упоредити вредности параметара чврстоће тла (кохезије и угла унутрашњег трења), о чему ће бити речи у наставку.

Промене су, осим SEM анализом, забележене и фотоапаратом (резулације 50 MP), као и USB дигиталним микроскопом који омогућава увећање од 900 пута (Слика 6.8а). Поред поменуте корозије у зони аноде, и у зони катоде, у непосредној близини цеви, забележена је површинска модификација тла. Најуочљивије промене дешавају се на месту утискивања катода у тло, у површинском делу, где је дошло до стварања соли које су сликане камером (Слика 6.8б) и дигиталним микроскопом (Слика 6.8в).



Слика 6.7 SEM фотографије (лево), микрофотографије површине (средина) и приказ храпавости и текстуре за карактеристични пресек (десно): а) тло у природном стању; б) узорак тла из сандука C1*; в) узорак тла из сандука C2*; г) узорак тла из сандука C3*

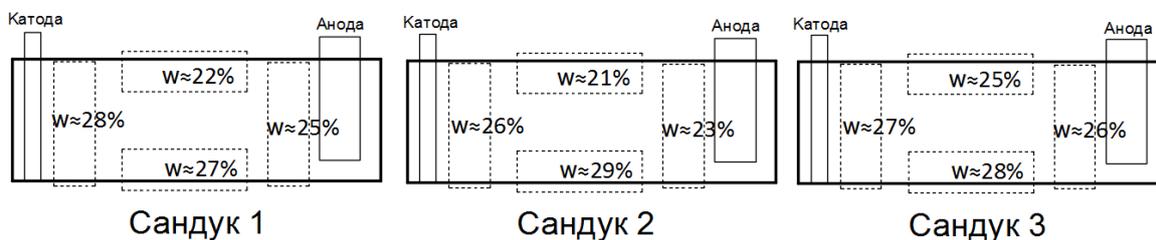


Слика 6.8 Апарат и фотографије добијене снимањем: а) дигитални микроскоп; б) површина електроде снимана фотоапаратом; в) површина тла у зони катоде снимана дигиталним микроскопом

6.2. Испитивања након спроведеног експеримента хемијског електрокинетичког третмана тла

Након третмана глиновитог тла предложеном техником хемијске електрокинетичке стабилизације у трајању од 56 дана (8 седмица), узети су поремећени и непоремећени узорци из сва три испитна сандука за потребе даљих лабораторијских испитивања. Узорци тла за одређивање параметара чврстоће на смицање су узимани утискивањем челичних цилиндара висине 10 cm и пречника 5 cm, док је за узимање узорака за одређивање коефицијента водопропусности коришћен цилиндар висине 15 cm и пречника 10 cm.

За сваку од унапред дефинисаних зона (зона аноде, средња зона и зона катоде) измерена је влажност тла након третмана (Слика 6.9). Иако су сандуци били прекривени фолијом са циљем спречавања промене влажности услед ослобађања топлоте, у свим сандуцима је било утврђено да су слојеви при површини тла имали мању влажност од слојева при дну сандука. Такође, влажност тла у зони аноде је према очекивањима била мања у односу на зону катоде. У свим испитним сандуцима, регистроване вредности влажности тла су биле мање од почетне влажности (пре третмана) од 33%.



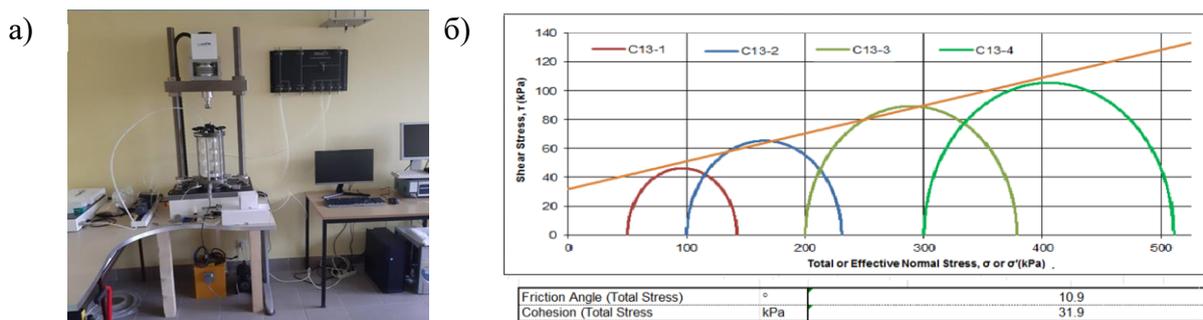
Слика 6.9 Влажност тла у испитним сандуцима након хемијског електрокинетичког третмана: С1* - креч; С2* - електрофилтерски пепео, С3* – магнезијум-карбонат

6.2.1. Опит триаксијалне компресије

Лабораторијско одређивање параметара чврстоће тла спроведено је у апарату *Triaxial Automated System (Load Frame type)* произвођача *GDS Instruments*. Испитивања су обављена у контролисаним условима у складу са релевантним стандардима. Коришћен је систем са рамом капацитета 5 kN преко кога се наноси вертикално оптерећење, у комбинацији са триаксијалном ћелијом за узорке стандардних димензија - пречника 50 mm и висине 100 mm (Слика 6.10a).

Цео ток испитивања, као и обрада података регистрованих током испитивања,

представљају аутоматизован процес, уз коришћење *GDSLAB софтвера*. Мерења током опита су вршена дигиталним мерачима силе и деформације високе прецизности, уз примену степенастог или континуираног оптерећивања, у зависности од врсте испитивања. Сви добијени подаци су аутоматски обрађени у оквиру софтверског пакета, који омогућава графички и табеларни приказ резултата, као и одређивање параметара чврстоће и деформабилности узорака тла (Слика 6.10б).



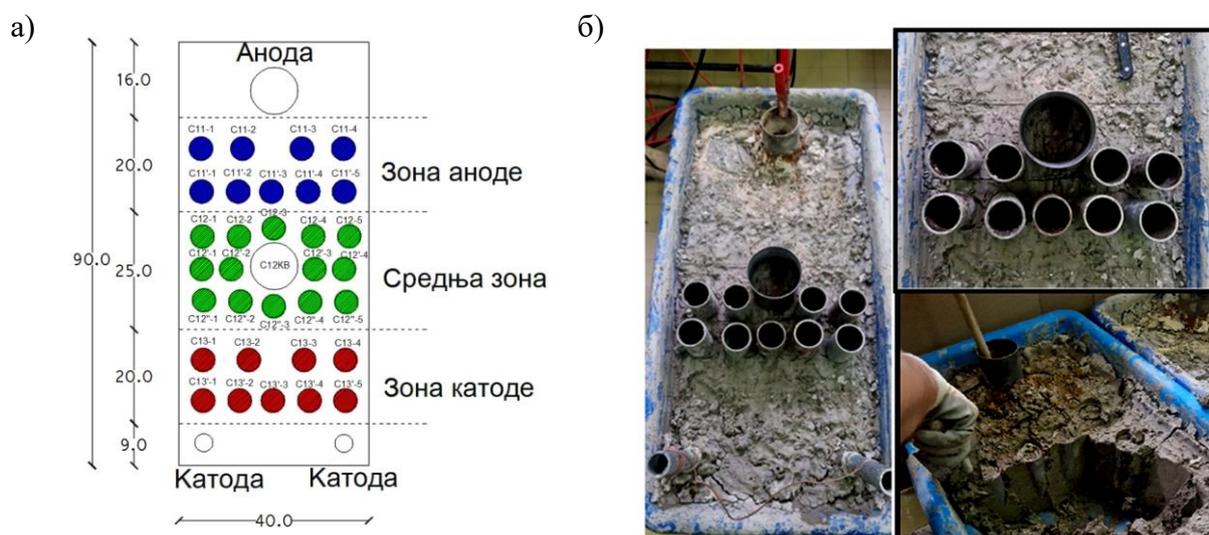
Слика 6.10 Опит триаксијалне компресије: а) траиксијални апарат; б) илустрација резултата испитивања

Испитивање узорака извршено је одмах после узорковања, али и касније, у различитим временским интервалима након хемијског електрокинетичког третмана глиновитог тла, како би се утврдила трајност ефеката стабилизације. Сви узорци су чувани у фолији до дана испитивања, како не би губили влажност. Поступак засићења узорка у овом случају није било могуће спровести (укупно 96 проба), јер засићење подразумева дуг временски период, с обзиром да се ради о глиновитом материјалу. Због тога су спроведени UU опити (без консолидације и дренажања). Како је прва серија подразумевала испитивања одмах после узорковања, узимање узорака у свим сандуцима није вршено истог дана због немогућности истовременог испитивања више проба у триаксијалном апарату. Због тога, узорци из другог сандука извађени су 4 дана после првог, а узорци из трећег сандука 4 дана после другог.

Током опита пробе су оптерећене константним хидростатичким (бочним) притиском $\sigma_3 = 50$ kPa (проба 1), 100 kPa (проба 2), 200 kPa (проба 3), 300 kPa (проба 4) и 400 kPa (проба 5). Иако је стандардом дефинисано да је довољно урадити три пробе, узета је најмање једна проба више, како би се добили поузданији резултати. Вредност бочног (хоризонталног) главног напона (σ_3) може се произвољно задати и он је константан током опита. Вредност вертикалног главног напона (σ_1) током опита расте до лома и региструје се помоћу аквизиције и софтвера. Девиијатор напона ($\sigma_1 - \sigma_3$)

представља разлику вредности вертикалног и бочног напона. Свака проба дефинише центар и полупречник једног Моровог круга. Центар круга представља половину збира бочног напона и девијатора напона, док је полупречник круга њихова разлика. Вредности параметара чврстоће (c , φ) читавају се са Мор - Кулонове праве која представља заједничку тангенту Морових кругова добијених на основу испитивања сваке пробе (Слика 6.10б).

Обележавање узорака урађено је према припремљеном моделу (шеми), ради лакше обраде резултата. Прва цифра у ознаци узорка, после слова С (сандук) односи се на ознаку сандука (1 - тло третирано кречом, 2 - третман електрофилтерским пепелом, 3 - третман магнезијум-карбонатом). Наредна цифра односи се на зону из које је узет узорак (1- зона аноде, 2 - средња зона, 3 - зона катоде). Последња цифра у ознаци односи се на број пробе (1 - проба оптерећена са $\sigma_3 = 50$ кРа, 2 - проба оптерећена са $\sigma_3 = 100$ кРа, 3 - проба оптерећена са $\sigma_3 = 200$ кРа, 4 - проба оптерећена са $\sigma_3 = 300$ кРа, 5 - проба оптерећена са $\sigma_3 = 400$ кРа). На пример, ознака С12-3 односи се на узорак из сандука С1* са тлом које је третирано кречом, из средње зоне и у опиту триаксијалне компресије је био изложен бочном притиску од 200 кРа. Шема узорака на примеру првог испитног сандука приказана је на Слици 6.11.



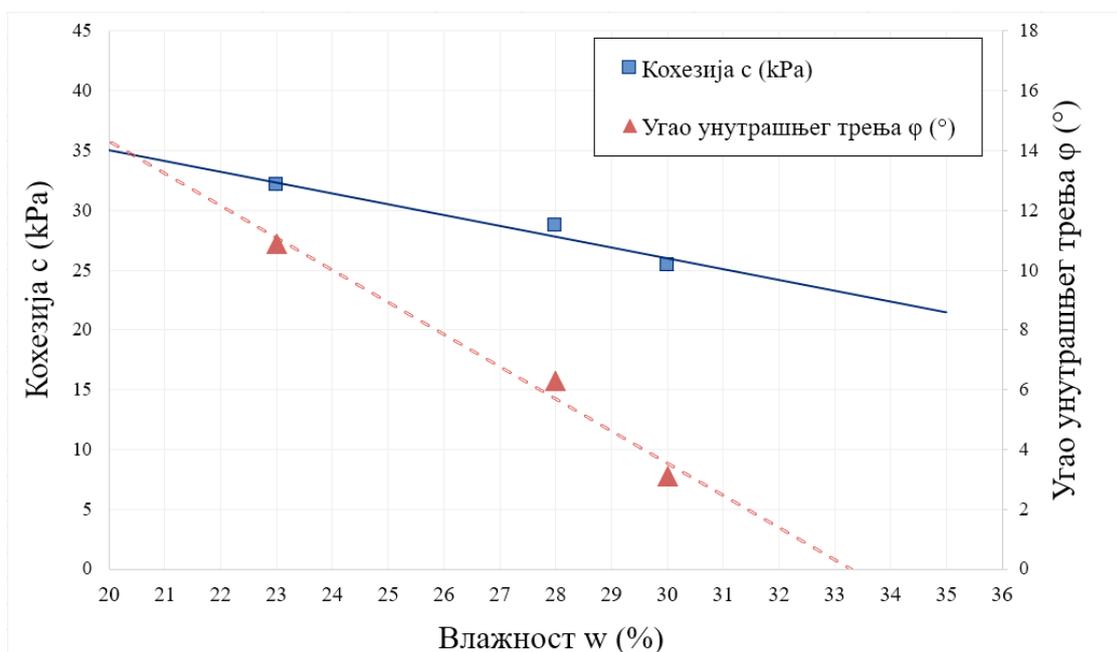
Слика 6.11 Узорковање третираног тла из сандука С1* за испитивање у опиту триаксијалне компресије: а) шематски приказ; б) на експерименталном моделу

С обзиром на број узорака, није било могуће испитати промене параметара чврстоће тла на смицање у свим дефинисаним зонама у исто време. Због тога је направљен план, који се односи на све сандуке, и који дефинише испитивања према следећој динамици: у зони аноде вршено је испитивање узорака одмах после третмана и

након 90 дана; у средњој зони вршено је испитивање узорака после 30 дана, после 90 дана и после 180 дана од третмана; у зони катоде вршено је испитивање узорака после 30 дана и после 180 дана од третмана, а са циљем праћења трајности ефеката током времена. Дакле, због ограничења капацитета у опреми (један триаксијални апарат у лабораторији) испитивања су вршена у различитим временским интервалима за сваку зону. После спроведеног опита триаксијалне компресије, за сваки узорак тла је одређена и његова влажност. Због различите влажности узорака из испитних сандука који су испитивани након третмана, урађено је најпре испитивање параметара смичуће чврстоће природног тла за различите влажности узорака. Добијене су следеће вредности:

- при влажности $w = 23\%$: $c = 31,2 \text{ kPa}$, $\varphi = 10,9^\circ$;
- при влажности $w = 28\%$: $c = 28,7 \text{ kPa}$, $\varphi = 6,3^\circ$;
- при влажности $w = 30\%$: $c = 25,4 \text{ kPa}$, $\varphi = 3,1^\circ$.

На дијаграму на Слици 6.12 приказане су све ове вредности, као и на основу њих добијена линеарна зависност између кохезије, односно угла унутрашњег трења, и влажности за тло у природном стању. Помоћу успостављене зависности могу се упоређивати вредности параметара смичуће чврстоће тла за различите влажности и пратити трајност ефеката побољшања након третмана тла, за сваку зону засебно.



Слика 6.12 Зависност параметара смичуће чврстоће од влажности тла у природном стању

Параметри — кохезија и угао унутрашњег трења — дефинишу чврстоћу тла на смицање τ_f према изразу:

$$\tau_f = \sigma_f \cdot \operatorname{tg}\varphi + c \quad (6.3)$$

где је:

τ_f - смичући напон при лому, односно чврстоћа тла при смицању (кРа);

σ_f - нормални напон при лому (кРа);

φ – угао унутрашњег трења ($^\circ$);

c – кохезија (кРа).

При прорачуну смичућег напона при лому (према једначини 6.3) усвојена је вредност нормалног напона при лому од $\sigma_f = 200$ кРа, која одговара реалним теренским условима (*in situ*) и представља апроксимацију вертикалних притисака тла на дубини од приближно десет метара. Оваквим приступом омогућено је прецизније поређење утицаја предложеног комбинованог третмана на отпорност тла при смицању у реалним условима.

Резултати компаративне анализе са аспекта ефеката разматраних хемијских стабилизатора у комбинацији са струјом на параметре c , φ и τ_f су приказани у Табелама 6.6, 6.7 и 6.8. У њима су дате вредности које се односе на тло у природном стању (пре третмана) упоредо са вредностима по завршетку третмана и након третмана, за сваку зону, у сваком испитном сандуку, при истој влажности. Како би резултати били међусобно упоредиви, вредности кохезије и угла унутрашњег трења за одређене влажности узорка тла у природном стању добијене су интерполацијом, на основу података приказаних на дијаграму (Слика 6.12). За сваку вредност очитане кохезије (c) и угла унутрашњег трења (φ) срачуната је вредност смичућег напона при лому (τ_f) према Једначини 6.3. Поред тога, за сваки узорак третираног тла из испитних сандука одређени су параметри чврстоће при лому узорка (c_f и φ_f) и за ове вредности према истом изразу срачунат је смичући напон при лому (τ_f).

6.2.1.1. Промена параметара чврстоће у зони аноде

У свим испитним сандуцима, после третмана, тло у зони аноде има најмању влажност. Управо се у зони аноде уочава највећа модификација у структури тла услед додавања хемијских стабилизатора (Поглавље 6.1.2), што је потврђено и значајно већим вредностима кохезије (c), угла унутрашњег трења (φ) и смичуће чврстоће (τ_f) третираног глиновитог тла (Табела 6.4).

Табела 6.4 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w) у зони аноде

ЗОНА АНОДЕ	Тло у природном стању				Одмах по завршетку третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	23,1	31,3	11,0	70,18	27,4	18,9	95,88	-12,46	71,82	36,62
C2*	23,4	31,0	10,7	68,79	45,0	9,8	79,55	45,16	-8,41	15,64
C3*	23,3	31,1	10,8	69,25	30,8	12,5	75,14	-0,96	15,74	8,50

ЗОНА АНОДЕ	Тло у природном стању				90 дана након завршетка третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	23,6	30,8	10,5	67,87	23,9	21,6	103,09	-22,40	105,71	51,89
C2*	23,5	30,9	10,6	68,33	39,2	10,1	74,83	26,86	-4,72	9,51
C3*	23,7	30,7	10,4	67,41	34,1	11,2	73,70	11,07	7,69	9,34

Најзначајније повећање вредности **кохезије** глиновитог тла забележено је са додатком електрофилтерског пепела (сандук 2 - C2*), где је одмах по завршетку третмана одређена вредност кохезије од 45 kPa, што је повећање од 45% у односу на вредност кохезије тла у природном стању при истој влажности од 23,4% (31 kPa). У истом сандуку, после 90 дана од завршетка третмана, утврђена вредност кохезије износила је незнатно мање (39,2 kPa), што говори у прилог трајности ефекта побољшања овог својства тла применом предложене технике стабилизације, са коначним повећањем од 27%.

Други по ефикасности од разматраних стабилизатора у комбинацији са једносмерном струјом био је магнезијум-карбонат (сандук 3 - C3*), где је у зони аноде, одмах по завршетку третмана, забележена готово непромењена вредност кохезије од 30,8 kPa у поређењу са вредношћу за нетретирано тло (вредност кохезије тла у природном стању при истој влажности од 23,3% износи 31,1 kPa). Након 90 дана по завршетку третмана, регистровано је незнатно повећање вредности кохезије на 34,1 kPa, што представља трајно побољшање овог својства тла за 11%.

Са додатком креча (сандук 1 - C1*), у зони аноде, одмах после третмана, забележена је вредност кохезије од 27,4 kPa, што је пад од око 12% у односу на вредност кохезије тла у природном стању при истој влажности од 23,1% (31,3 kPa), док је вредност

кохезије након 90 дана од завршетка третмана износила 23,9 kPa, што је у коначном пад од 22% у односу на вредност кохезије тла у природном стању при истој влажности од 23,6% (30,8 kPa).

Највеће повећање вредности **угла унутрашњег трења** у зони аноде забележено је у сандуку 1 (C1*) са додатком креча (18,9° одмах по завршетку третмана, односно 21,6° након 90 дана од завршетка третмана), што у односу на тло у природном стању и при истој влажности ($w = 23,6\%$; $\varphi = 10,5^\circ$) представља трајно повећање вредности угла унутрашњег трења од два пута.

У сандуку 3 (C3*) са додатком магензијум-карбоната, вредност угла унутрашњег трења незнатно је порасла на 12,5° (одмах по завршетку третмана), што је повећање вредности угла унутрашњег трења од 16% у односу на вредност за тло у природном стању ($w = 23,3\%$; $\varphi = 10,8^\circ$). Када је реч о трајности овог ефекта, 90 дана по завршетку третмана, регистрована вредност угла је износила 11,2°, што је повећање од 8% у односу на вредност за природно тло при истој влажности ($w = 23,7\%$; $\varphi = 0,4^\circ$).

Са додатком електрофилтерског пепела (сандук 2 - C2*), дошло је до смањења вредности угла унутрашњег трења на 9,8° одмах по завршетку третмана, односно на 10,1° после 90 дана од третмана, што у коначном представља пад од 5% у односу на вредност угла за природно тло ($w = 23,5\%$; $\varphi = 10,6^\circ$).

Иако је код појединих узорака тла након третмана дошло до појаве смањења вредности кохезије или вредности угла унутрашњег трења, то се у већини случајева није негативно одразило на вредност чврстоће тла при смицању (тј. није дошло до смањења вредности чврстоће у поређењу са чврстоћом тла у природном стању).

У зони аноде забележено је повећање **чврстоће тла при смицању** у свим испитним сандуцима одмах после третмана, док је после 90 дана од третмана у сандуку C2* (са електрофилтерским пепелом) дошло до пада вредности смичуће чврстоће, али је она и даље већа од смичуће чврстоће тла у природном стању.

Највеће повећање чврстоће забележено је у сандуку са додатком креча (сандук C1*) и то како одмах после третмана ($\Delta\tau_f = 36\%$), тако и 90 дана после завршетка третмана ($\Delta\tau_f = 52\%$).

У сандуку са додатком електрофилтерског пепела (сандук C2*), максимално повећање смичућег напона у зони аноде износило је 15,5% одмах по завршетку третмана, односно 9,5% након 90 дана од третмана.

У сандуку са додатком магнезијум-карбоната (сандук С3*), максимално повећање смичућег напона у зони аноде износило је 8,5% одмах по завршетку третмана, односно 9,5% након 90 дана од третмана, што је приближно и ефекат постигнут електрофилтерским пепелом.

6.2.1.2. Промена параметара чврстоће у зони између аноде и катоде

У средњој зони, односно зони између аноде и катоде, која је најшира, може се уочити и значајнија разлика у влажности тла поређењем три испитна сандука са три различита хемијска стабилизатора у комбинацији са струјом (Табела 6.5).

Табела 6.5 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w) у средњој зони

СРЕДЊА ЗОНА	Тло у природном стању				30 дана након завршетка третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	24,5	30,2	9,5	63,67	38,7	14,2	89,31	28,15	49,47	40,27
C2*	23,6	30,3	10,5	67,37	38,3	10,4	75,01	26,40	-0,95	11,34
C3*	24,5	30,2	9,5	63,67	29,9	11	68,78	-0,99	15,79	8,02

СРЕДЊА ЗОНА	Тло у природном стању				90 дана након завршетка третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	25,5	29,7	8,4	59,23	41,2	11,1	80,44	38,72	32,14	35,80
C2*	23,2	31,2	10,8	69,35	39,8	9,9	74,71	27,56	-8,33	7,72
C3*	26	29,1	7,8	56,50	27,1	9,7	61,29	-6,87	24,36	8,48

СРЕДЊА ЗОНА	Тло у природном стању				180 дана након завршетка третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	26,1	29,2	7,7	56,24	40,0	11,9	82,15	36,99	54,55	46,06
C2*	25,3	29,7	8,7	60,30	35,0	7,8	62,40	17,85	-9,34	3,47
C3*	27,4	28,1	6,2	49,83	25,1	8,0	53,21	-10,68	29,03	6,79

Вредности **кохезије** у средњој зони највеће су у сандуку 1 (C1*) са додатком креча (за разлику од зоне аноде, где су измерене најмање вредности кохезије и где је дошло до пада вредности), и износе од 38,7 kPa (после 30 дана од завршетка третмана),

41,2 kPa (након 90 дана од третмана) до коначних 40 kPa (након 180 дана од третмана). Дакле, ефекат трајног побољшања овог својства тла је врло евидентан, уз коначно повећање вредности кохезије третираног тла од 37% ($w = 26,1\%$; $c = 29,2$ kPa).

Сличне максималне вредности кохезије регистроване су са додатком електрофилтерског пепела (сандук 2 - C2*) - од 38,3 kPa (после 30 дана од завршетка третмана) и 39,8 kPa (након 90 дана од третмана), што је повећање вредности кохезије за око 27%, али са благим падом до коначних 35 kPa (након 180 дана од третмана), што је у коначном повећање вредности кохезије за око 18% у односу на природно тло ($w = 25,3\%$; $c = 29,7$ kPa).

Најмање вредности кохезије забележене су у сандуку 3 (C3*) са додатком магнезијум-карбоната, уз регистровану тенденцију опадања вредности током времена протеклог након третмана: од 29,9 kPa (након 30 дана, што је у домену вредности за природно тло при истој влажности: $w = 24,5\%$; $c = 30,2$ kPa), затим 27,1 kPa (након 90 дана), до коначних 25,1 kPa (након 180 дана од завршетка третмана), што представља пад вредности кохезије од оне почетне за тло у природном стању ($w = 27,4\%$; $c = 28,1$ kPa) за око 11%.

Највеће повећање вредности **угла унутрашњег трења** постигнуто је такође са додатком креча (сандук 1 - C1*), са вредношћу угла 14,2° након 30 дана од третмана (повећање вредности за око 50% у односу за вредност за природно тло ($w = 24,5\%$; $\varphi = 9,5^\circ$)), односно 11,9° након 180 дана од третмана (тј., трајно повећање вредности за око 55% у односу за вредност за природно тло ($w = 26,1\%$; $\varphi = 7,7^\circ$)).

Електрофилтерски пепео у комбинацији са једносмерном струјом (сандук 2 - C2*) имао је нешто слабији ефекат у погледу побољшања овог својства тла у средњој зони, са вредностима угла унутрашњег трења од 10,4° након 30 дана од третмана (што је у домену вредности за природно тло при истој влажности: $w = 23,6\%$; $\varphi = 10,5^\circ$), затим 9,9° након 90 дана и коначних 9,5° након 180 дана од третмана (тј., трајно повећање вредности за око 9% у односу за вредност за природно тло ($w = 25,3\%$; $\varphi = 8,7^\circ$)).

Најслабији ефекат у овој зони постигнут је са додатком магнезијум-карбоната (сандук 3 - C3*). Вредност угла унутрашњег трења кретала се од 11° након 30 дана од третмана (повећање вредности за око 16% у односу за вредност за природно тло: $w = 24,5\%$; $\varphi = 9,5^\circ$), затим 9,7° након 90 дана, до коначних 8° након 180 дана од третмана (тј., постиже се трајно повећање вредности за око 30% у односу за вредност угла за природно тло ($w = 27,4\%$; $\varphi = 6,2^\circ$)). Треба напоменути да су узорци из средње зоне испитног сандука C3* имали највећу влажност, што се значајно одразило на вредности

параметара смичуће чврстоће третираног тла, које су ниже од вредности добијене на узорцима из сандука С1* и С2* у истом периоду времена.

Када је реч о **чврстоћи тла на смицање**, и у средњој зони се креч (сандук С1*) у комбинацији са електрокинетичким третманом истакао као стабилизатор који је допринео највећем повећању ове вредности. Вредност чврстоће тла при смицању је имала тренд раста од око 40% током времена након завршетка третмана (40% након 30 дана, 36% након 90 дана и коначних 46% након 180 дана од третмана).

Са додатком електофилтерског пепела (сандук С2*), бележи се тренд благог пада процента повећања вредности чврстоће после 90 дана ($\Delta\tau_f = 8\%$), односно 180 дана од завршетка третмана ($\Delta\tau_f = 3\%$). Овакав резултат може бити последица удаљености позиције узорка (проба) од електроде (анодe) у коју је раствор дозиран (иако у истој зони, удаљеност иситиваних узорака од аноде после 180 дана је нешто већа од удаљености узорака који су испитивани после 30 дана, као што је то приказано на Слици 6.11).

У испитном сандуку С3*, са додатком магнезијум-карбоната, забележено је повећање вредности чврстоће тла при смицању на свим испитаним узорцима, које је било врло приближно у свим временским интервалима (након 30 дана $\Delta\tau_f = 8\%$, након 90 дана $\Delta\tau_f = 8,5\%$ и након 180 дана од третмана $\Delta\tau_f = 7\%$).

6.2.1.3. Промена параметара чврстоће тла у зони катоде

У зони катоде узорци тла су имали највећу влажност, што се одразило и на најмање вредности параметара смичуће чврстоће тла у поређењу са зоном аноде и средњом зоном (Табела 6.6).

Након 30 дана од завршетка третмана, највеће повећање вредности **кохезије** забележено је са додатком креча (31 kPa) у сандуку С1*, што је раст од 5% у односу на вредност за природно тло при истој влажности ($w = 25,7\%$; $c = 29,5$ kPa). Након 180 дана од третмана, вредност је опала на $c = 27$ kPa, што је, у поређењу са вредношћу за природно тло ($w = 27,1\%$; $c = 28,4$ kPa), у коначном мали пад вредности кохезије од 5%.

Табела 6.6 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (φ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w) у зони катоде

ЗОНА КАТОДЕ	Тло у природном стању				30 дана након завршетка третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	φ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	φ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \varphi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	25,7	29,5	8,1	57,96	31,0	10,9	69,51	5,08	34,57	19,93
C2*	25,3	29,7	8,7	60,30	30,5	8,4	60,03	2,69	-3,45	-0,45
C3*	27,2	28,3	6,6	51,44	24,5	8,4	54,03	-13,43	27,27	5,04

ЗОНА КАТОДЕ	Тло у природном стању				180 дана након завршетка третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	φ (°)	τ_f (kPa)	c_f (kPa)	φ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \varphi$ (%)	$\Delta \tau_f$ (%)
C1*	27,1	28,4	6,7	51,89	27,0	8,2	55,82	-4,93	22,39	7,57
C2*	26,5	28,8	7,3	54,42	26,7	7,4	52,68	-7,29	1,37	-3,21
C3*	27,6	28,0	6,0	49,02	25,4	7,1	50,31	-9,29	18,33	2,63

Ефекат електрофилтерског пепела у комбинацији са једносмерном струјом (сандук C2*) у погледу вредности кохезије третираног тла у зони катоде је нешто слабији у поређењу са кречом. Након 30 дана од завршетка третмана, вредност кохезије износила је 30,5 kPa, што је у поређењу са вредношћу за природно тло при истој влажности повећање кохезије за око 3%. Након 180 дана од завршетка третмана, вредност кохезије износила је 26,7 kPa, што је у поређењу са вредношћу за природно тло при истој влажности у коначном пад вредности кохезије за око 7%.

Када је реч о магнезијум-карбонату у комбинацији са једносмерном струјом (сандук C3*), регистрован је пад вредности кохезије третираног тла у зони катоде са временом. Након 30 дана од завршетка третмана, вредност кохезије износила је 24,5 kPa, што је у поређењу са вредношћу за природно тло при истој влажности пад кохезије за око 13,5%. Након 180 дана од завршетка третмана, вредност кохезије износила је 25,4 kPa, што је у поређењу са вредношћу за природно тло при истој влажности пад кохезије за око 9%.

Као и у зони аноде, и у овој зони се највећа вредност **угла унутрашњег трења** бележи у испитном сандуку C1* са додатком креча након 30 дана од третмана ($\varphi = 10,9^\circ$), што је повећање вредности угла од 34,5% у односу на вредност за природно тло при

истој влажности ($w = 25,7\%$; $\varphi = 8,1^\circ$). Након 180 дана од третмана, регистрована вредност φ износила је $8,2^\circ$, што је у коначном повећање вредности угла унутрашњег трења за $22,5\%$ у односу на случај нетретираног тла ($w = 27,1\%$; $\varphi = 6,7^\circ$).

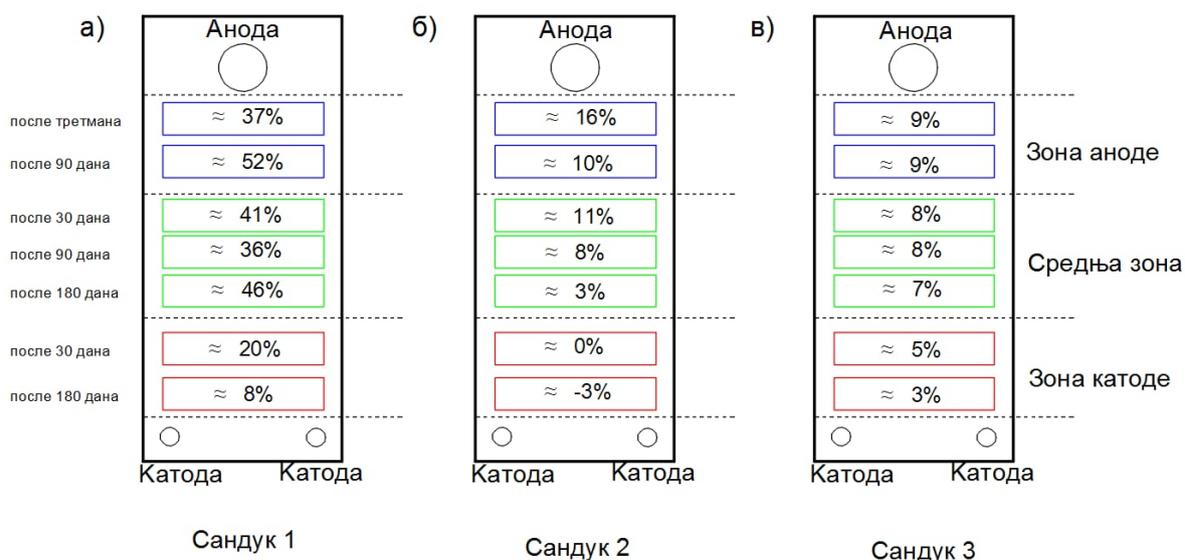
У случају сандука С3*, са додатком магнезијум-карбоната, након 30 дана од завршетка третмана регистровано је повећање вредности угла унутрашњег трења за 27% (са вредности $\varphi = 6,6^\circ$ за тло у природном стању на вредност $\varphi = 8,4^\circ$ при влажности тла од $27,2\%$), док је након 180 дана од третмана коначно повећање вредности угла износило $18,5\%$ (са вредности $\varphi = 6^\circ$ за тло у природном стању на вредност $\varphi = 7,1^\circ$ при влажности тла од $27,6\%$).

Најслабији ефекат у погледу овог својства тла у зони катоде постигнут је са додатком електрофилтерског пепела (сандук С2*), у чијем случају је након 30 дана од третмана констатован пад вредности угла унутрашњег трења за $3,5\%$ (са $\varphi = 8,7^\circ$ за тло у природном стању на $\varphi = 8,4^\circ$ при влажности тла од $25,3\%$), док је у коначном, 180 дана након завршетка третмана, регистровано повећање вредности од око $1,5\%$ (са $\varphi = 7,3^\circ$ за тло у природном стању на $\varphi = 7,4^\circ$ при влажности тла од $26,5\%$).

У зони катоде, побољшање смичуће чврстоће применом предложене технике стабилизације тла је најмањег интензитета. Штавише, са додатком електрофилтерског пепела (сандук С2*) регистровано је и смањење вредности смичуће чврстоће третираног тла у односу на стање пре третмана, које је реда величине око 3% .

У сандуку С1* са додатком креча и сандуку С3* са додатком магнезијум-карбоната, са друге стране, дошло је до повећања вредности смичуће чврстоће третираног тла у зони катоде. Са додатком креча, повећање износи приближно 20% после 30 дана, односно приближно $7,5\%$ после 180 дана од завршетка третмана. Са додатком магнезијум-карбоната, повећања вредности чврстоће тла на смицање износила су 5% и $2,5\%$, респективно.

На основу приказаних резултата и њихове анализе (који су графички сумирани на Слици 6.13), може се закључити да је ефекат предложене технике хемијске стабилизације тла у комбинацији са електрокинетичким третманом најизраженији у зони аноде, незнатно је слабији у средњој зони, док се у зони катоде бележе најслабији ефекти. Са друге стране, поређењем ефеката разматраних стабилизатора у комбинацији са једносмерном струјом на побољшање чврстоће тла на смицање, евидентно је да је додатак креча као стабилизатора допринео постизању најбољих резултата, и то у све три зоне.



Слика 6.13 Промена чврстоће глиновитог тла при смицању након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима: а) сандук 1 – креч; б) сандук 2 - електрофилтерски пепео; в) сандук 3 - магнезијум-карбонат.

6.2.2. Одређивање коефицијента водопрпусности тла

Спроведено одређивање коефицијента водопрпусности (k), у лабораторијским (контролисаним) условима, указало је на значајне разлике између водопрпусности глиновитог тла у природном стању у односу на исто тло третирано предложеном техником. Из сваког испитног сандука, из средње зоне тла између аноде и катоде, узет је репрезентативан узорак за потребе испитивања коефицијента водопрпусности (Слика 6.11а). Пре самог испитивања, узорци су засићени водом како је предвиђено стандардом. У Табели 6.7. приказане су почетне и завршне висине воденог стуба (h_1 и h_2) у стакленој цеви апарата за сваки узорак посебно, одговарајуће вредности коефицијента водопрпусности (k), као и процентуално побољшање (смањење) вредности k .

Треба напоменути да висина h_2 представља средњу вредност мерења које је вршено свакодневно, у трајању од три дана. Наиме, прво евидентирање резултата уследило је после 24h од почетка опита, да би након тога вода у стубу била наливена до почетне висине од 100cm. Поступак је поновљен након 48h, односно 72h.

Табела 6.7 Вредности коефицијента водопропусности (k) на третираним узорцима

Узорак	Време (сати)	Почетна висина h_1 (cm)	Висина после 24h h_2 (cm)	k (m/s)	Побољшање (%)
Тло у природном стању	3 × 24	100	70,0	$1,286 \times 10^{-5}$	-
Сандук 1 (C1*)		100	83,5	$6,95 \times 10^{-6}$	≈46%
Сандук 2 (C1*)		100	79,0	$8,74 \times 10^{-6}$	≈32%
Сандук 3 (C1*)		100	77,0	$9,90 \times 10^{-6}$	≈23%

Почетна вредност коефицијента водопропусности природног тла износи $1,286 \times 10^{-5}$ m/s, што указује на умерено пропусну структуру, типичну за умерено консолидована глиновита тла (Табела 2.1). Увођењем хемијских стабилизатора уз електрокинетички третман тла дошло је до очигледног смањења водопропусности, што је директан показатељ повећане компактности и промене у структури пора тла након третмана. Најзначајнији ефекат при стабилизацији постигнут је употребом креча (сандук 1 - C1*), који је довео до смањења коефицијента водопропусности за чак 46%, што указује на снажно везивање честица и формирање стабилне микроструктуре кроз пуцоланске реакције и хидратацију. Стабилизација коришћењем електрофилтерског пепела као раствора у комбинацији са једносмерном струјом довела је до смањења коефицијента водопропусности тла за 32% у односу на тло у природном стању. Најмање побољшање од коришћених стабилизатора, у овој фази, резултирало је додавањем магнезијум-карбоната, где је постигнуто смањење коефицијента водопропусности од 23%.

Свакако, сва три стабилизатора показала су потенцијал за редуковање коефицијента водопропусности у великој мери коришћењем предложене технике стабилизације тла, што се може сматрати значајним нарочито код изградње темеља, саобраћајница (путева и железница) и хидротехничких објеката.

6.3. Анализа резултата

Поред испитивања промене механичких карактеристика тла (кохезије и угла унутрашњег трења), као и коефицијента водопропусности, анализа садржаја одређених хемијских елемената и једињења додатно је пружила увид у ефекат предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла за време самог процеса током експеримента. На основу спроведених лабораторијских испитивања, може се закључити

да додавање стабилизатора током електрокинетичког третмана доприноси очвршћавању тла, посебно у подручју третирања око аноде.

У току третмана, вршена су контролна мерења смичуће чврстоће крилном сондом. Добијени резултати показали су да се у испитном сандуку са додатком креча јавила шира зона очвршћавања тла у односу на друга два сандука, где су као стабилизатори коришћени електрофилтерски пепео и магнезијум-карбонат. Како се овај опит односи на вредности недрениране чврстоће тла на смицање, резултати се не могу сматрати апсолутно поузданима, те су спроведена додатна испитивања за одређивање механичких карактеристика третираног тла.

Накнадна испитивања су вршена у различитим временским интервалима након завршетка хемијског електрокинетичког третмана и дала су потврду да су ефекти предложене технике стабилизације тла трајног карактера, односно да су ефекти побољшања карактеристика тла трајни. Сваки испитни сандук подељен је на три зоне (зона аноде, средња зона и зона катоде) и у њима је узорковано тло за потребе испитивања параметара чврстоће тла на смицање и коефицијента водопропусности.

У зони аноде, електрофилтерски пепео је допринео највећем побољшању кохезије, док је највеће побољшање угла унутрашњег трења забележено са додатком креча.

У средњој зони, креч је допринео највећем побољшању како кохезије, тако и угла унутрашњег трења, ефекат електрофилтерског пепела на повећање кохезије је био нешто слабији (уз смањење угла унутрашњег трења), док је магнезијум-карбонат допринео нешто слабијем ефекту у повећању угла унутрашњег трења (у поређењу са кречом), уз смањење вредности кохезије.

У зони катоде, ефекти стабилизатора на вредност кохезије су били знатно слабији, док је у погледу побољшања угла унутрашњег трења допринос био најизраженији у случају креча и нешто слабији у случају магнезијум-карбоната.

У погледу чврстоће тла на смицање, ефекат предложене технике хемијске стабилизације тла у комбинацији са електрокинетичким третманом је најизраженији у зони аноде, незнатно је слабији у средњој зони, док су у зони катоде регистровани најслабији ефекти. Са друге стране, поређењем ефеката разматраних стабилизатора у комбинацији са једносмерном струјом на побољшање чврстоће тла на смицање, евидентно је да је додатак креча као стабилизатора допринео постизању најбољих резултата, и то у све три зоне.

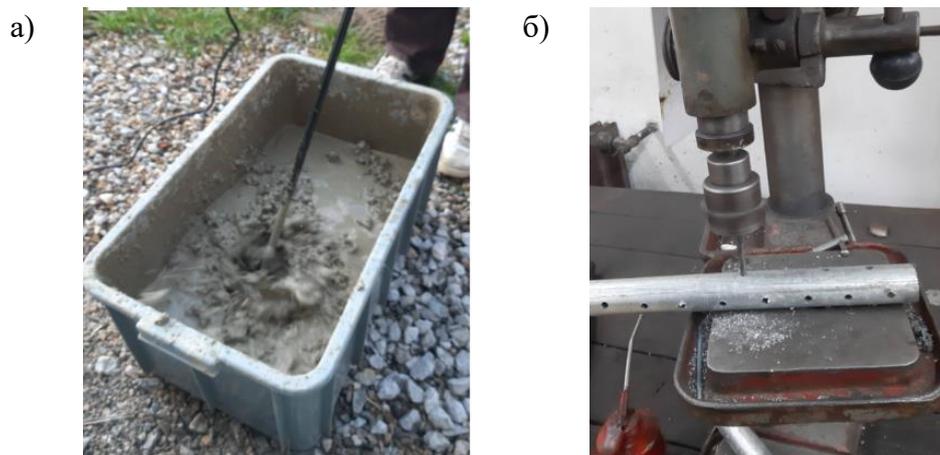
Добијене резултате и закључке који су потекли од њих, поткрепиле су и хемијске XRF и XRD анализе. На основу сагледавања промене минерала глине, може се закључити да се најмање модификације дешавају са додатком магнезијум-карбоната, док креч и електрофилтерски пепео доприносе одређеним променама у структури тла. Сва три стабилизатора допринела су смањењу коефицијента водопропусности на узорцима узетих из средишњег дела испитних сандука.

У циљу даљег и детаљнијег сагледавања могућности примене предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла, спроведена су додатна испитивања, која су обухватила аспекте различитих влажности тла, различитих електричних напона једносмерне струје и различитих међусобних удаљености електрода (анода и катода). Као стабилизатор којим је вршена оптимизација предложене технике (при различитим влажностима тла, напонима струје и растојањима електрода), изабран је раствор на бази креча који се, на основу резултата презентованих у овом поглављу, показао као најефикаснији у комбинацији са електрокинетичким третманом.

7. ОПТИМИЗАЦИЈА ПРИМЕНЕ ТЕХНИКЕ ХЕМИЈСКЕ ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ СТАБИЛИЗАЦИЈЕ ТЛА

За потребе оптимизације примене предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла, изабран је реагенс који је у претходној фази експерименталних истраживања показао најбоље резултате, а то је креч (калцијум-хидроксид), који је прављен у концентрацији од 20% у мешавини са водом.

Испитни сандуци у којима се третирало тло били су мањих димензија него сандуци коришћени у претходној фази истраживања. Посматрано у основи, испитни сандуци су дужине 60 cm и ширине 30 cm. У њима је тло дозирано до висине од око 25 cm, колико је износила и дубина до које је свака електрода била уроњена. Тло је хомогенизовано са одабраном количином воде помоћу мешалице (Слика 7.1а), на исти начин како је то приказано у претходном поглављу. Коришћене су електроде кружног попречног пресека, са спољашњим пречником од 3,2 cm. Све електроде биле су перфориране унакрсно, по систему "цик-цак", као што се може видети на Слици 7.1б.



Слика 7.1 Припрема опреме и материјала за испитивање: а) мешање тла; б) бушење електроде (перфорирање цеви)

У оквиру лабораторијских испитивања, као извор једносмерне струје коришћени су уређаји *DC Velleman LABPS3030SM* и *DC INSTEK PSP603*. Апарат *Velleman LABPS3030SM* се напаја на стандардни мрежни напон од 220–240 V, док излазни напон може бити постављен у интервалу од 0 до 30 V, а јачина излазне струје у опсегу од 0 до 30 A. Подешавање напона и струје се врши ручно, а вредности напона (U) и јачине струје (I) се могу пратити на екрану самог апарата. Поред тога, уређај је опремљен системом безбедносних заштита као што су заштита од преоптерећења, прегревања и кратког

споја, што омогућава поуздан и сигуран рад током дужих временских интервала. Карактеристике апарата *DC INSTEK PSP603* приказане су у Поглављу 5.3 (напајање на стандардни мрежни напон од 220–240 V, излазни напон у интервалу од 0 до 60 V, излазна струја у опсегу од 0 до 3,5 A).

Циљ ове фазе истраживања био је да се ефекат предложене технике стабилизације тла сагледа са аспекта различитих параметара. С обзиром на велики број параметара који се могу мењати, одлучено је да фокус при оптимизацији буде усмерен на утицај:

- влажности тла (w);
- вредности напона једносмерне струје (U);
- међусобног растојања између аноде и катоде (d);
- начина додавања раствора креча као стабилизатора.

У претходној фази експерименталних испитивања, влажност природног глиновитог материјала у испитним сандуцима је износила 33%, што одговара влажности тла при засићењу. Стога су у оквиру оптимизације предложене технике испитивања спроведена на узорцима глиновитог тла веће влажности (45%) од оне при засићењу и на узорцима тла мање влажности (30%).

Имајући у виду величину напона једносмерне струје која је примењена у претходној фази истраживања (30V), вариране вредности напона при третману тла у комбинацији са кречом у овој фази биле су 23V, 30V и 50V.

У погледу ефекта међусобног растојања између аноде и катоде, у овој фази истраживања, испитивања су спроведена за растојање између електрода од 45 cm, као и за упола мање растојање од 22,5 cm.

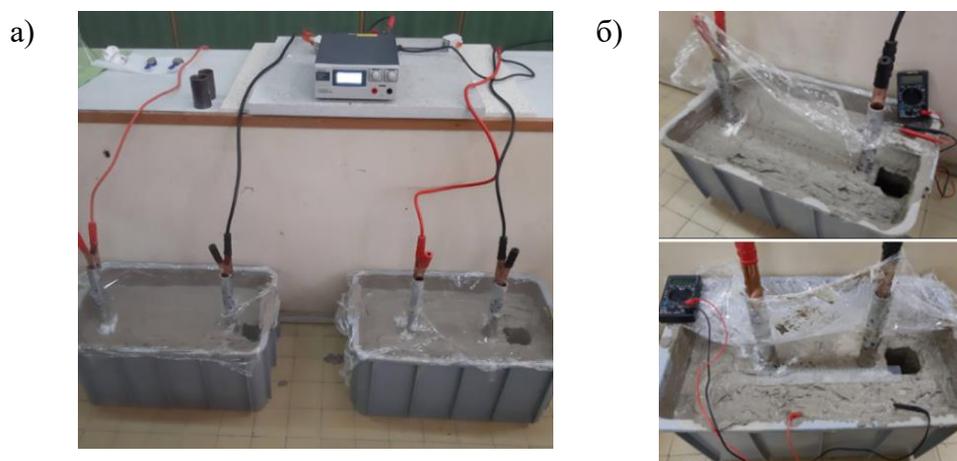
Када је реч о начину додавања раствора креча, упоређене су варијанте аутоматизованог (континуалног) и ручног дозирања стабилизатора (досипање раствора у одређеним временским интервалима).

7.1. Опис експерименталних модела

7.1.1. Испитни сандуци *C1*, *C2* и *C3*

Овим сетом експерименталних модела сагледани су утицаји промене растојања између електрода (d) и промене напона (U) (односно, почетне јачине струје (I)) на ефекат предложене технике стабилизације тла. У свим испитним сандуцима почетна влажност глиновитог тла је износила 45%. Тло у свим сандуцима третирано је предложеном техником хемијске електрокинетичке стабилизације у трајању од 14 дана.

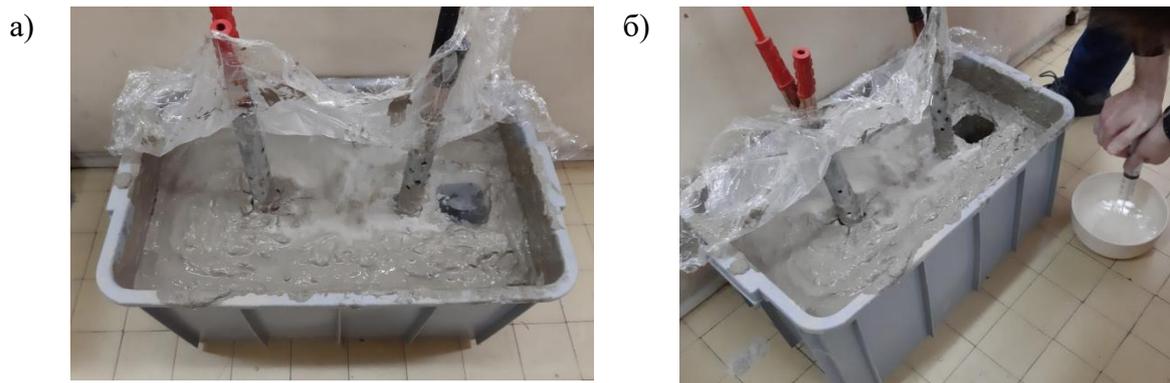
Испитни сандуци C1 и C2, који су испитивани истовремено, међусобно су се разликовали у растојањима између електрода (аноде и катоде). У првом сандуку (C1) растојање између електрода је износило 45 cm, док је у другом сандуку (C2) растојање било упола мање и износило је 22,5 cm (Слика 7.2а). Вредност напона једносмерне струје износила је $U = 30 \text{ V}$. Почетна јачина струје у првом сандуку износила је $I = 300 \text{ mA}$, а у другом сандуку, где су електроде биле међусобно ближе, износила је $I = 480 \text{ mA}$. Сандуци су све време током трајања третмана били прекривени фолијом, како би се спречило сушење површине тла због ослобођене топлоте услед загревања од примене струје. За потребе испитивања, фолија је привремено уклањана, а затим враћана у првобитни положај (Слика 7.2б).



Слика 7.2 Експериментална истраживања у сандуцима C1 и C2: а) током третмана; б) за време испитивања

Поставка у испитном сандуку 3 (C3) по свему је одговарала поставци као у сандуку C2 (размак електрода $d = 22,5 \text{ cm}$). Разлика је једино у мањој вредности напона струје ($U = 23 \text{ V}$) у односу на сандук C2 ($U = 30 \text{ V}$), са циљем постизања исте почетне јачине струје као у сандуку C1 ($I = 300 \text{ mA}$), односно, постизању исте отпорности тла, која представља однос напона и јачине електричне струје ($R = U / I$).

Претходно припремљени раствор креча у води био је дозиран у тло кроз аноду. Нове количине раствора креча су додаване на свака 2 до 4 сата. Непосредно иза катоде постављен је перфориран пластични суд који је служио за прихватање доспеле воде (Слика 7.3). Након што би се суд напунио, био би испразњен узимањем воде шприцом како се не би пореметио ток експеримента.

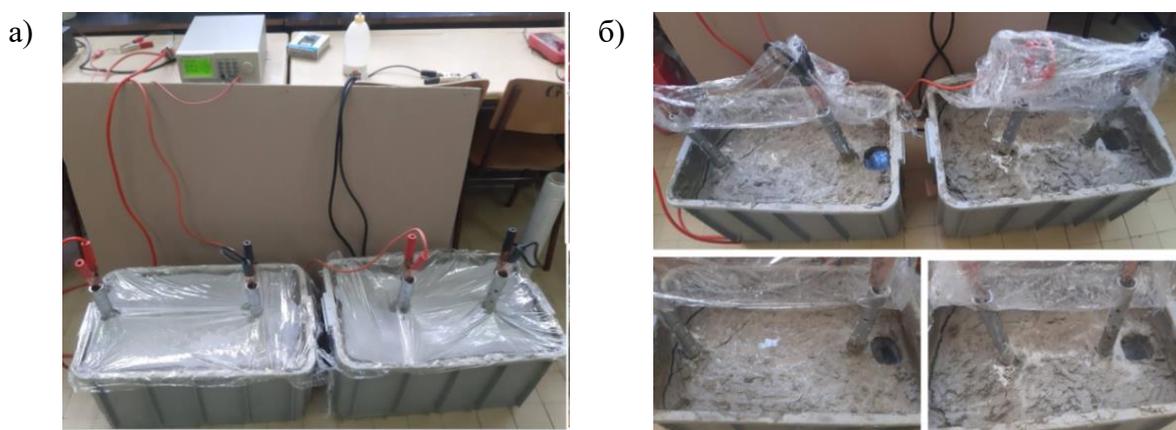


Слика 7.3 Дренирање тла током третмана: а) прикупљена вода у зони катоде;

б) уклањање прикупљене воде

7.1.2. Испитни сандуци C4 и C5

Као и у случају испитних сандука C1 и C2 у претходном сету, и у овом сету је тло истовремено третирано у сандуку 4 (C4) и сандуку 5 (C5). У оба испитна сандука почетна влажност глиновитог тла је износила 30%, док је вредност напона једносмерне струје износила $U = 50 \text{ V}$. Сандуци су се међусобно разликовали једино у погледу растојања између електрода. У сандуку C4 растојање између електрода износило је 45 cm, док је у сандуку C5 оно било упола мање и износило је 22,5 cm (Слика 7.4а). Почетна јачина струје у сандуку C4 износила је $I = 520 \text{ mA}$, а у сандуку C5, где су електроде биле на ближем растојању, јачина струје била је $I = 670 \text{ mA}$. Као извор струје коришћен је апарат *DC INSTEK PSP603*. И у овом случају, сандуци су све време током трајања третмана (14 дана, уз ручно досипање раствора креча у аноду на свака 2 до 4 сата) били прекривени фолијом, а за потребе спровођења испитивања током третмана, фолија је привремено уклањана, а затим враћана у првобитни положај (Слика 7.4б).



Слика 7.4 Експериментална истраживања у сандуцима C4 и C5: а) током третмана;

б) за време испитивања

На Слици 7.4 могу се видети и површинске промене третираног тла које су уочене у оба сандука. У сандуку С4, услед високе вредности напона, након 7 дана третмана појавиле су се површинске пукотине услед сушења тла. Са друге стране, у сандуку С5 види се јасан траг беле боје између електрода, који указује на правац усмереног кретања раствора креча.

7.1.3. Испитни сандуци С6 и С7

И у овом сету модела испитивања су вршена у два испитна сандука истовремено, који су међусобно имали идентичну поставку (иста влажност $w = 30\%$, исти напон $U = 30 \text{ V}$ и исто растојање између електрода $d = 45 \text{ cm}$), али су се разликовали по начину дозирања стабилизатора.

Наиме, за потребе испитивања у сандуку С6 конструисан је механизам са две пумпе, од чега је једна била постављена на дно аноде, док је друга била у посуди са концентрованим раствором стабилизатора (Слика 7.5 лево). Ове пумпе су имале за циљ константно мешање креча раствореног у води, имајући у виду да је уочено стварање талоба у аноди приликом демонтаже ранијих сетова модела у којима је раствор креча био дозиран ручно досипањем у аноду на одређени временски период. Константно окретање пропелера унутар пумпи имало је за циљ спречавање талочења креча у аноди и на тај начин додатно поспешивање транспорта креча кроз тло. У сандуку С7, са друге стране, дозирање је вршено ручним досипањем раствора креча у аноду на сваких 2 до 6 сати (Слика 7.5 десно).

Такође, у овом сету модела, за разлику од претходних, због промене механизма додавања стабилизатора (убацивања пумпе у аноду у сандуку С6), повећане су и димензије попречног пресека аноде у оба сандука. Као позитивне електроде коришћени су кутијасте челични профили димензија попречног пресека $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, чији су зидови били перфорирани на исти начин као и код анода кружног попречног пресека из претходних сетова модела.

За разлику од претходних, ово испитивање трајало је 30 дана.

Треба напоменути да је овај сет испитивања рађен искључиво ради међусобног упоређивања ручног и аутоматизованог начина дозирања стабилизатора.



Слика 7.5 Експериментална истраживања у сандуцима С6 и С7: са пумпом (лево) и без пумпе (десно)

7.1.4. Збирни преглед експерименталних модела

У укупно седам експерименталних модела (седам испитних сандука) направљене су комбинације варирањем четири различита параметра (различите влажности тла, различита растојања између електрода, различите вредности напона једносмерне струје и различити механизми додавања раствора). У Табели 7.1. сумиран је преглед експерименталних модела са сагледаним комбинацијама наведених утицаја.

Табела 7.1 Табеларни приказ поставке модела за експериментална истраживања у процесу оптимизације технике хемијске електрокинетичке технике стабилизације тла

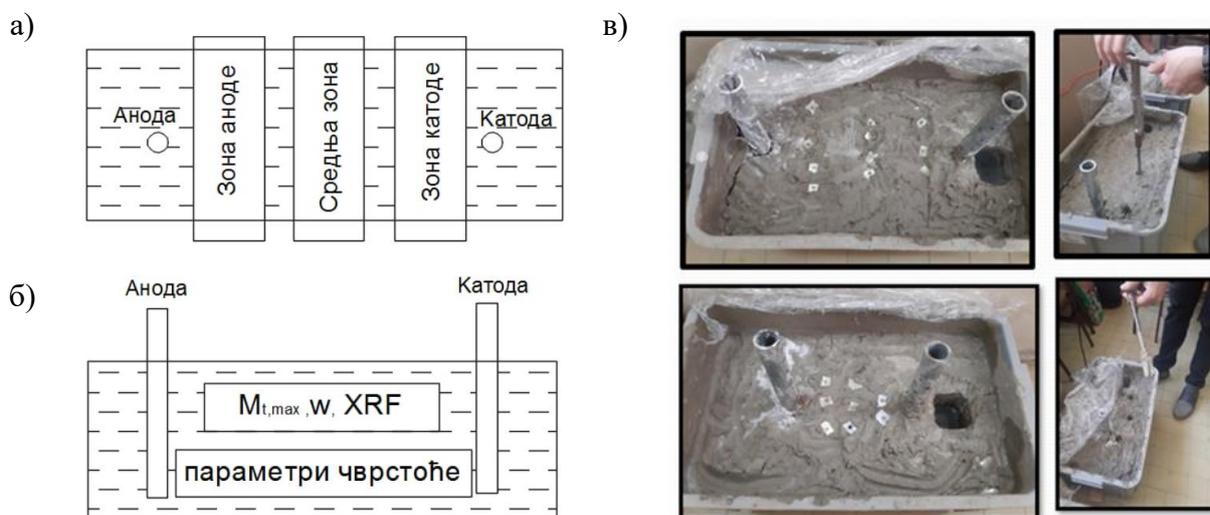
Утицаји Експерим. модел	Почетна влажност тла у сандуку w (%)	Растојање између анодe и катодe d (cm)	Напон струје током третмана U (V)	Почетна јачина електричне струје I (mA)	Начин дозирања раствора креча током третмана
сандук С1	45	45	30	300	ручно сипање
сандук С2	45	22,5	30	480	ручно сипање
сандук С3	45	22,5	23	300	ручно сипање
сандук С4	30	45	50	520	ручно сипање
сандук С5	30	22,5	50	670	ручно сипање
сандук С6	30	45	30	560	аутоматизовано (пумпом)
сандук С7	30	45	30	560	ручно сипање

7.2. Испитивања током реализације експеримената

Као и код испитних сандука у претходној фази експерименталних истраживања (Поглавље 6), и у овој фази истраживања третирано тло у испитним сандуцима је подељено на три зоне – зону аноде, средњу зону (зона између аноде и катоде) и зону катоде (Слика 7.6а). У испитним сандуцима код којих је растојање између електрода било мање (22,5 cm) није било могуће издвојити три зоне, па је третирано тло подељено на две зоне – зону аноде и зону катоде.

Током трајања третмана, унутар сваке од поменутих зона у сандуку спроведена су испитивања опитом крилном сондом. Овај опит је вршен у горњој половини испитних сандука, на дубини до 10 cm од површине тла (Слика 7.6б), како се тло на већој дубини не би пореметило за потребе узорковања ради спровођења накнадних испитивања опитом триаксијалне компресије (Поглавље 7.3).

Тло са крилаца крилне сонде је, након спровођења опита крилном сондом, било подвргнуто одређивању влажности, а затим је, после сушења, на уситњеном узорку тла спроведена XRF анализа са циљем праћења промене садржаја хемијских елемената у тлу, пре свега калцијума као саставног елемента креча као стабилизатора.



Слика 7.6 Приказ позиција испитних места током третмана: а) шематски приказ у основи; б) шематски приказ у подужном пресеку; в) током опита крилном сондом

7.2.1. Резултати испитивања на сандуцима C1, C2 и C3

Резултати испитивања спроведених на испитним сандуцима C1, C2 и C3 при почетној влажности тла од 45% приказани су у Табели 7.2.

Из приложене табеле може се јасно уочити да је током трајања третмана дошло

до повећања вредности торзионог момента при лому тла у опиту крилном сондом, што указује на тренд раста отпорности тла на лом смицањем. Почетна вредност торзионог момента при лому тла пре третмана износила је 0,3 kNm.

У сандуку C1 (са већим међусобним размаком електрода) дошло је до повећања момента торзије током свих мерења у различитим временским интервалима. После 14 дана, у зони аноде вредност торзионог момента износила је 4,0 kNm, односно у зони катоде 3,0 kNm. У сандуку C2 (са двоструко мањим међусобним размаком електрода у поређењу са сандуком C1), вредност момента после истог временског периода износила је 2,9 kNm у зони аноде, односно 2,2 kNm у зони катоде. До десетог дана третмана, вредности торзионог момента у сандуцима C1 и C2 су биле врло уједначене. На основу ових резултата произишао је закључак да је двоструко већи размак између електрода резултовао нешто вишим вредностима торзионог момента, односно већом отпорношћу тла на лом смицањем, после 14 дана третмана.

Тренд раста момента торзије током третмана био је праћен константним опадањем влажности тла, са почетних 45% влажности тла у природном стању на вредност од 28% у сандуку C1 (већи размак електрода), односно вредност од 26% у сандуку C2 (двоструко мањи размак електрода) након 14 дана третмана. Према томе, размак између електрода готово да није показао неки значајнији ефекат у погледу овог својства тла.

Током трајања третмана такође је уочен тренд повећања садржаја калцијума (Са) у третираном глиновитом тлу у односу на почетну вредност за нетретирано тло (5,62%). У сандуку C1 (већи размак електрода), у зони аноде, после 3 дана од почетка третмана садржај Са је износио 6,56%, а после 14 дана 9,87%, док је у сандуку C2 (мањи размак електрода) садржај после 3 дана износио 6,62%, а после 14 дана 10,14%. С обзиром на то да се раствор креча константно додаје управо у зони аноде, садржај калцијума је очекивано у мањи у зони катоде. У сандуку C1 у зони катоде после 14 дана садржај калцијума износио је 6,96%, док је у сандуку C2 износио 7,49%. Закључак је да двоструко мањи размак између аноде и катоде није резултовао значајнијим повећањем садржаја калцијума у третираном глиновитом тлу.

Табела 7.2 Резултати опита крилном сондом, одређивања влажности тла и промене садржаја калцијума (Ca) током третмана тла у испитним сандуцима C1, C2 и C3

Зона испитивања	Зона аноде				Зона катоде			
	3	7	10	14	3	7	10	14
Сандук C1 ($w = 45\%$ $d = 45\text{ cm}$ $U = 30V$ $I = 300\text{ mA}$)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	1,9	2,4	2,6	4,0	0,4	2,3	2,5	3,0
Влажност w (%)	≈ 43	≈ 35	≈ 31	≈ 27	≈ 41	≈ 34	≈ 30	≈ 28
Садржај Ca (%)	6,56	7,02	8,11	9,87	6,12	6,79	7,02	6,96
Сандук C2 ($w = 45\%$ $d = 22,5\text{ cm}$ $U = 30V$ $I = 480\text{ mA}$)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	1,9	2,6	2,7	2,9	0,4	2,4	2,6	2,2
Влажност w (%)	≈ 41	≈ 32	≈ 27	≈ 25	≈ 40	≈ 32	≈ 28	≈ 26
Садржај Ca (%)	6,62	7,65	8,76	10,14	6,19	6,78	7,24	7,49
Сандук C3 ($w = 45\%$ $d = 22,5\text{ cm}$ $U = 23V$ $I = 300\text{ mA}$)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	1,8	1,9	3,2	3,4	0,9	1,0	1,9	2,6
Влажност w (%)	≈ 42	≈ 36	≈ 31	≈ 29	≈ 43	≈ 35	≈ 30	≈ 28
Садржај Ca (%)	6,60	6,91	7,96	9,76	6,33	7,13	7,35	7,31

* Почетна вредност момента торзије (пре третмана) износи 0,3 kNm, док је почетна вредност садржаја Ca у нетретираном тлу 5,62%.

Када је реч о испитном сандуку C3 (мањи размак електрода, као у сандуку C2, али нижа вредност напона једносмерне струје у поређењу са сандуком C2), вредности торзионог момента одређене опитом крилном сондом су током третмана генерално биле нешто ниже у поређењу са вредностима у сандуку C2, што се закључује да је последица нешто ниже вредности напона струје током третмана тла у испитном сандуку C3.

У погледу ефекта третмана на смањење влажности тла, утврђено је да је он нешто слабији у испитном сандуку C3 у поређењу са сандуком C2 (након 14 дана третмана, у зони аноде влажност је опала на 29%, а у зони катоде на 28%), што је такође последица нешто ниже вредности напона струје током третмана тла у испитном сандуку C3.

Вредности садржаја калцијума у испитном сандуку C3 током третмана су генерално такође нешто ниже у поређењу са вредностима у сандуку C2 (после 14 дана садржај калцијума је порастао на 9,76% у зони аноде, док је у зони катоде у истом

временском интервалу садржај Са износио 7,35%), што се такође приписује нешто нижим вредностима напона струје током третмана тла у испитном сандуку С3.

7.2.2. Резултати испитивања на сандуцима С4 и С5

У Табели 7.3 приказани су резултати испитивања спроведених на испитним сандуцима С4 и С5 при почетној влажности тла од 30% и са константним напоном једносмерне струје током третмана од 50 V.

У сандуку С4 (са растојањем електрода 45 cm) дошло је до повећања момента торзије током свих мерења у различитим временским интервалима. После 14 дана, у зони аноде вредност торзионог момента износила је 3,4 kNm, односно у зони катоде 3,8 kNm. У сандуку С5 (са растојањем електрода 22,5 cm), вредност момента после истог временског периода износила је 3,2 kNm у зони аноде, односно 2,8 kNm у зони катоде. Као и код сандука 1 и сандука 2 и овде се може закључити да је двоструко већи размак између електрода резултовао нешто вишим вредностима торзионог момента после 14 дана третмана.

Иако је тло третирано при почетној влажности од приближно 30%, у првих неколико дана забележено је повећање влажности и у зони аноде и у зони катоде, у оба сандука. Повећање влажности јавља се вероватно као последица константног досипања раствара (који је у течном стању), што доводи до засићења тла (за тло у природном стању $w_z = 33\%$). Овај тренд повећања влажности тла у зони аноде регистрован је до седмог дана, када влажност почиње да опада. Са друге стране, у зони катоде влажност тла већа од почетне регистрована је нешто дуже време током третмана, до око десетог дана од почетка третмана од када влажност тла има тренд опадања. Влажност третираног тла после 14 дана била је значајно мања у сандуку С4 у односу на влажност тла у сандуку С5 и у зони аноде ($w = 22\%$ у С4 и $w = 27\%$ у С5) и у зони катоде ($w = 24\%$ у С4 и $w = 29\%$ у С5). На основу ових резултата, може се закључити да већи размак између електрода при напону од 50V доприноси ефикаснијем смањењу влажности тла применом предложене комбиноване технике стабилизације.

У односу на почетну вредност за нетретирано тло (5,62%), током трајања третмана уочен је тренд повећања садржаја калцијума (Са) у третираном глиновитом тлу у оба испитна сандука. У сандуку С4 (већи размак електрода), у зони аноде, после 3 дана од почетка третмана садржај Са је износио 6,75%, а после 14 дана 9,2%, док је у сандуку С5 (мањи размак електрода) садржај после 3 дана износио 7,06%, а после 14 дана 10,47%.

С обзиром на то да се раствор креча константно додаје управо у зони аноде, садржај калцијума је у овој зони очекивано већи него у зони катоде. У сандуку С4 у зони катоде по завршетку третмана од 14 дана садржај калцијума износио је 7,79%, док је у сандуку С5 износио 8,42%. Закључак је да двоструко мањи размак између аноде и катоде није резултовао значајнијим повећањем садржаја калцијума у третираном глиновитом тлу.

Табела 7.3 Резултати опита крилном сондом, одређивања влажности тла и промене садржаја калцијума (Са) током третмана тла у испитним сандуцима С4 и С5

Зона испитивања	Зона аноде				Зона катоде			
	3	7	10	14	3	7	10	14
Сандук С4 ($w = 30\%$ $d = 45\text{ cm}$ $U = 50V$ $I = 520\text{ mA}$)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	2,4	3,1	2,9	3,4	0,8	2,8	4,0	3,8
Влажност w (%)	≈ 32	≈ 28	≈ 25	≈ 22	≈ 38	≈ 30	≈ 26	≈ 24
Садржај Са (%)	6,75	7,86	8,77	9,2	6,21	7,44	7,62	7,79
Сандук С5 ($w = 30\%$ $d = 22,5\text{ cm}$ $U = 50V$ $I = 670\text{ mA}$)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	3,0	2,3	3,0	3,2	1,3	1,6	3,0	2,8
Влажност w (%)	≈ 35	≈ 28	≈ 27	≈ 27	≈ 40	≈ 34	≈ 29	≈ 29
Садржај Са (%)	7,06	7,95	9,92	10,47	6,33	7,68	7,87	8,42

* Почетна вредност момента торзије (пре третмана) износи 1,2 kNm, док је почетна вредност садржаја Са у нетретираном тлу 5,62%.

У поређењу са резултатима добијеним испитивањима у претходном сету експерименталних модела (сандуци С1, С2 и С3), вредности максималних момената торзије незнатно су већи од оних добијених у прва три сандука. Поређењем резултата испитивања у сандуцима С1 и С4 (у којима је размак електрода износио 45 cm), утврђено је да је у сандуку С1 ($U = 30V$, $w = 45\%$) максимална вредност $M_{t,max}$ у зони аноде износила је 4,0 kNm, а у сандуку С4 ($U = 50V$, $w = 30\%$) износила 3,4 kNm. У зони катоде, вредност момента торзије износила је 3,0 kNm у сандуку С1, док је у сандуку С4 износила 3,8 kNm.

Незнатна разлика уочена је поређењем резултата испитивања у сандуцима са мањим растојањем између електрода ($d = 22,5\text{ cm}$). У сандуку С2 ($U = 30V$, $w = 45\%$) максимална вредност $M_{t,max}$ у зони аноде износила 2,9 kNm, у сандуку С3 ($U = 23V$, $w = 45\%$) износила 3,4 kNm, а у сандуку С5 ($U = 50V$, $w = 30\%$) износила 3,2 kNm. У зони

катоде, вредност момента торзије износила је 2,2 kNm у сандуку C2, у сандуку C3 износила 2,6 kNm, док је у сандуку C5 износила 2,8 kNm.

Дакле, може се закључити да су вредности момента торзије у свих пет испитних сандука, како у зонама аноде, тако и у зонама катоде, веома уједначене без обзира на примењени напон једносмерне струје у третману, односно да већи напон не доприноси нужно повећању вредности торзионог момента при лому тла.

Када је реч о влажности глиновитог тла, иако су се почетне влажности тла у првом сету експерименталних модела (C1, C2 и C3: $w = 45\%$) и у другом сету модела (C4 и C5: $w = 30\%$) у значајној мери разликовале, на крају третмана (после 14 дана од почетка третирања тла) влажност тла у свих пет испитних сандука опала је на вредности мање од 30%. Овакав резултат указује на чињеницу да је у погледу дренарања тла ефекат предложене технике израженији у тлу са већим садржајем воде.

У погледу садржаја калцијума, без обзира на различите услове третмана тла у испитним сандуцима C1 – C5, резултати испитивања су били врло уједначени, како у зони аноде, тако и у зони катоде.

Такође, примећено је да су аноде у сандуку C4 и сандуку C5 (са вишом вредношћу напона струје током третмана) приликом испитивања у већој мери кородирале у поређењу са електродама коришћеним у првом сету испитивања (C1 – C3, са нижом вредношћу напона). У складу са тим, препорука би била да максимални напон током третмана тла предложеном техником у дужим временским интервалима не би требало да буде већи од 30 V.

7.2.3. Резултати испитивања на сандуцима C6 и C7

На основу резултата испитивања у претходним сетовима испитних сандука, за поставку у сандуку C6 и C7 одабрано је да влажност глиновитог тла пре третмана буде $w = 30\%$ и напон једносмерне струје током третмана у комбинацији са кречом $U = 30V$. Растојање између електрода од $d = 45$ cm одабрано је због могућности узимања већег броја узорака тла из испитних сандука, за потребе испитивања током и након третмана. Примарни циљ овог сета испитивања био је да се испита ефекат различитог начина досипања раствора стабилизатора у тло током третмана на испитивана својства тла. Такође, у овом сету модела, за разлику од претходна два, због промене механизма додавања стабилизатора (убацивања пумпе у аноду у сандуку C6), повећане су и димензије попречног пресека аноде у оба сандука. Из наведених разлога, резултати

испитивања током третмана у сандуцима С6 и С7 нису поређени са резултатима из претходних сетова испитивања (у којима је коришћено ручно досипање раствора креча).

Из приложене Табеле 7.4 може се јасно уочити да је током трајања третмана дошло до повећања вредности торзионог момента при лому тла у опиту крилном сондом, што указује на тренд раста отпорности тла на лом смицањем. Почетна вредност торзионог момента при лому тла пре третмана износила је 1,2 kNm. Занимљиво је да су у оба испитна сандука забележене веће вредности момената торзије у зони катоде при опиту крилном сондом у односу на зону аноде за све време трајања третмана (30 дана). Тако је, у сандуку С6 (са пумпом), у зони аноде после 5 дана вредност момента била 1,8 kNm, док је на крају третмана, после 30 дана, износила 4,8 kNm. У зони катоде повећање вредности момента је израженије – после 5 дана вредност момента је била 2,6 kNm, док је после 30 дана измерена вредност од 5,5 kNm. У сандуку С7 (без пумпе), после 5 дана у зони аноде момент је износио 2,0 kNm, а после 30 дана 5,2 kNm, док је у зони катоде после 5 дана измерено 3,0 kNm, а после 30 дана 6,1 kNm. Мање вредности момента торзије у зони аноде вероватно су последица величине саме електроде, у којој се константно налази раствор креча који се транспортује кроз тло под дејство струје и повећава влажност у овој зони. На основу резултата може се закључити да оба механизма додавања раствора утичу на повећање момента торзије, односно доприносе повећању отпорности тла при смицању, при чему ручно досипање креча резултује незнатно већим вредностима момента торзије.

Због већих димензија попречног пресека аноде у коју је константно досипан раствор креча, и у сандуку С6 и у сандуку С7 влажност тла у зони аноде је после 5 дана била незнатно већа од почетне влажности од 30%, док је од десетог дана па све до краја третмана уочен тренд пада влажности тла до вредности 24 - 25%. Са друге стране, у зони катоде, такође у оба сандука, тренд опадања влажности тла уочен је од почетка третмана. Упоредјујући саме вредности влажности у сандуцима С6 и С7, све време током трајања третмана влажности тла у оба сандука, и у обе зоне, су биле врло уједначене.

У погледу садржаја калцијума, без обзира на различите начине досипања раствора креча у испитним сандуцима С6 и С7, резултати испитивања су били врло уједначени, како у зони аноде, тако и у зони катоде, све време трајања третмана.

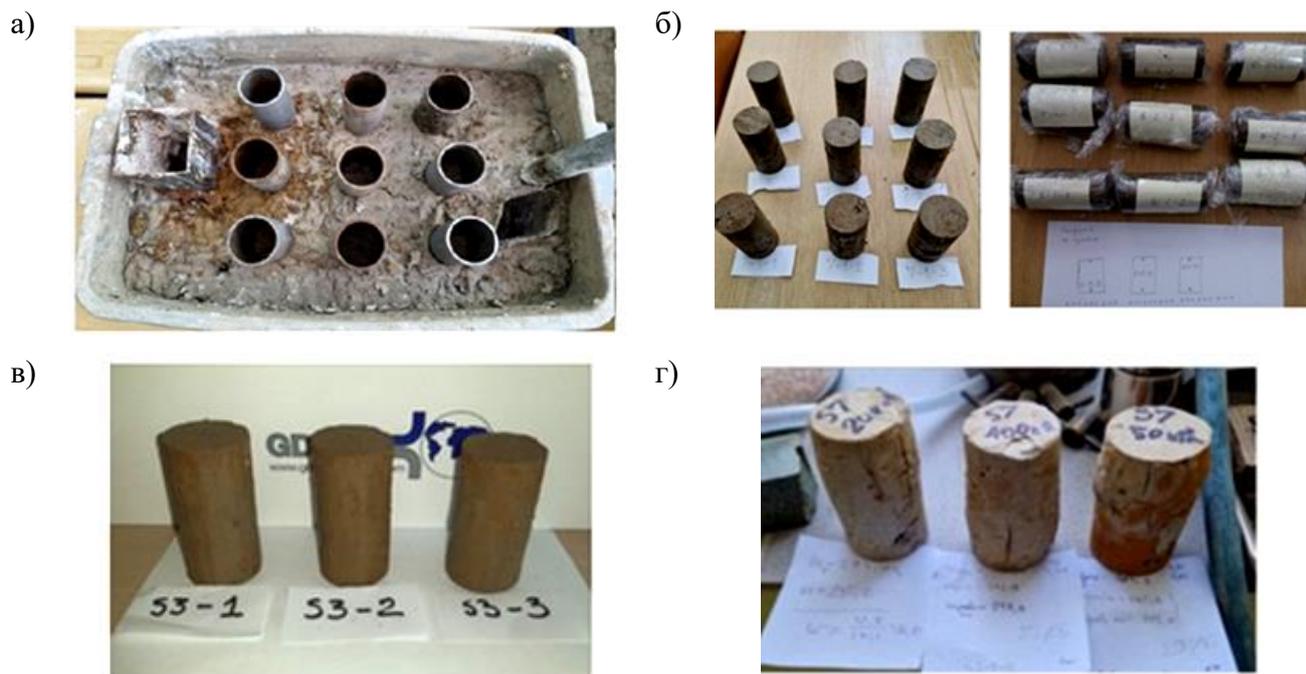
Табела 7.4 Резултати опита крилном сондом, одређивања влажности тла и промене садржаја калцијума (Ca) током третмана тла у испитним сандуцима C6 и C7

Зона испитивања	Зона аноде				Зона катоде			
	5	10	20	30	5	10	20	30
Сандук C6 ($w = 30\%$ $d = 45\text{ cm}$ $U = 30V$ $I = 560\text{ mA}$ аутоматизовано сипање)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	1,8	2,4	4,0	4,8	2,6	3,2	4,5	5,5
Влажност w (%)	≈ 32	≈ 30	≈ 26	≈ 25	≈ 30	≈ 28	≈ 25	≈ 24
Садржај Ca (%)	7,95	8,44	9,92	10,81	6,67	7,06	7,52	8,14
Сандук C7 ($w = 30\%$ $d = 45\text{ cm}$ $U = 30V$ $I = 560\text{ mA}$ ручно сипање)								
Момент торзије $M_{t,max}$ (kNm)	2,0	2,8	4,4	5,2	3,0	4,6	4,9	6,1
Влажност w (%)	≈ 31	≈ 28	≈ 26	≈ 24	≈ 29	≈ 27	≈ 25	≈ 26
Садржај Ca (%)	7,62	9,14	10,26	10,61	6,34	7,24	7,72	8,55

* Почетна вредност момента торзије (пре третмана) износи 1,2 kNm, док је почетна вредност садржаја Ca у нетретираном тлу 5,62%.

7.3. Испитивања након спроведених експеримената хемијског електрокинетичког третмана тла

Након завршених третмана у свим испитним сандуцима C1 – C7, узети су узорци третираног тла за потребе спровођења опита триаксијалне компресије, како би се одредили параметри чврстоће тла на смицање и упоредили са почетним вредностима чврстоће тла у природном стању. Лабораторијско одређивање параметара чврстоће тла спроведено је у апарату *Triaxial Automated System* произвођача *GDS Instruments*. Испитивања су обављена у контролисаним условима како је то описано у претходном поглављу (Поглавље 6.2.1.). Узимање узорака вршено је из сваке од претходно дефинисаних зона (зона аноде, средња зона и зона катоде) утискивањем цилиндара (Слика 7.7а). Узети узорци чувани су у фолији (Слика 7.7б) до дана испитивања како не би губили влажност.



Слика 7.7 Узимање узорака тла после третмана: а) позиција узорковања; б) обележавање и нега узорака; в) узорци пре испитивања; г) узорци после испитивања

Резултати опита триаксијалне компресије (кохезија и угао унутрашњег трења), као и вредности смичуће чврстоће тла, за све испитане узорке су приказани у Табели 7.5.

У претходном поглављу (Поглавље 6) дато је објашњење утицаја влажности тла на вредност параметара смичуће чврстоће, с обзиром да су испитивања била спроведена на узорцима тла без њиховог засићења (UU опити, без консолидације и без дренажа), односно на узорцима тла различите влажности после завршетка третмана. Због тога су вредности параметара чврстоће, као и вредности чврстоће при смицању, упоређене су са одговарајућим вредностима за природно тло (Слика 6.12), како је то објашњено у Поглављу 6.2.1.

Такође, као и у претходном поглављу, при прорачуну смичуће чврстоће тла (према једначини 6.3) и у овом је усвојена вредност нормалног напона при лому од $\sigma_f = 200 \text{ kPa}$, која одговара реалним теренским условима (*in situ*) и представља апроксимацију вертикалних притисака тла на дубини од приближно десет метара, одакле је узет глиновити материјал за експериментална истраживања. Оваквим приступом омогућено је прецизније поређење утицаја предложеног комбинованог третмана на отпорност тла при смицању у реалним условима.

Табела 7.5 Промена вредности кохезије (c), угла унутрашњег трења (ϕ) и смичуће чврстоће (τ_f) након хемијског електрокинетичког третмана у испитним сандуцима при одговарајућим влажностима тла (w)

Зона аноде	Тло у природним условима				Одмах по завршетку третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau$ (%)
C1	27,2	28,3	6,6	51,44	30,1	14,7	82,57	6,36	122,73	60,51
C2	24,5	30,2	9,5	63,67	27,2	16,2	85,31	-9,93	70,53	33,98
C3	27,6	28,0	6,0	49,02	28,2	12,7	73,27	0,71	111,67	49,47
C4	23,2	31,2	10,8	69,35	31,1	16,6	90,72	-0,32	53,70	30,81
C5	27,2	28,3	6,6	51,44	26,9	14,3	77,88	-4,95	116,67	51,40
C6	25,3	29,7	8,7	60,30	40,6	12,7	85,67	36,70	45,98	42,07
C7	23,7	30,7	10,4	67,41	42,1	15,6	97,94	37,13	50,00	45,30

Средња зона	Тло у природним условима				Одмах по завршетку третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau$ (%)
C1	27,7	27,8	5,8	48,12	25,7	12,1	68,58	-7,55	108,62	42,53
C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C4	25,3	29,7	8,7	59,23	27,4	14,7	79,87	-7,74	68,97	34,84
C5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C6	25,5	29,7	8,4	59,23	32,1	11,4	72,43	8,08	35,71	22,27
C7	25,7	29,5	8,1	57,96	29,9	10,7	67,69	1,36	32,10	16,78

Зона катоде	Тло у природним условима				Одмах по завршетку третмана			Промена		
	w (%)	c (kPa)	ϕ (°)	τ (kPa)	c_f (kPa)	ϕ_f (°)	τ_f (kPa)	Δc (%)	$\Delta \phi$ (%)	$\Delta \tau$ (%)
C1	27,9	27,5	5,7	47,46	26,7	6,5	49,49	-2,91	14,04	4,27
C2	27,2	28,3	6,6	51,44	28,6	7,2	53,87	1,06	9,09	4,71
C3	27,7	27,8	5,8	48,12	25,2	6,7	48,69	-9,35	15,52	1,20
C4	25,3	29,7	8,7	60,30	29,5	11,6	70,55	-0,67	33,33	17,00
C5	28,4	27,5	5,3	46,05	27,1	6,4	49,53	-1,45	20,75	7,56
C6	25,9	29,2	7,8	56,60	29,8	8,2	58,62	2,05	5,13	3,58
C7	26,2	29,0	7,6	55,69	30,7	7,9	58,45	5,86	3,95	4,97

7.3.1. Промена параметара чврстоће у зони аноде

У сандуцима у прва два сета испитивања (С1 до С5) вредност кохезије незнатно је промењена, док се вредност угла унутрашњег трења значајно повећала.

Код сандука С1 забележено је повећање вредности кохезије са $c = 28,7$ кРа на $c = 30$ кРа. У истом сандуку јавља се максимално повећање угла унутрашњег трења која је у односу на вредност пре третмана ($w = 27,2\%$; $\varphi = 6,6^\circ$) порасла више од 120% ($w = 27,2\%$; $\varphi = 14,7^\circ$). Смањење вредности кохезије за око 10% (са $c = 30,2$ кРа на $c = 27,2$ кРа) забележено је у узорку из сандука С2, док је угао унутрашњег трења порастао за више од 70% при истој влажности од $w = 24,5\%$ (са $\varphi = 9,5^\circ$ на $\varphi = 16,2^\circ$). Прва два сандука третирана су са напоном од $U = 30$ V. У сандуку С3, где је напон током третмана био мањи ($U = 23$ V), вредност кохезије скоро да се није мењала ($c = 28$ кРа пре третмана и $c = 28,2$ кРа после третмана), док је угао унутрашњег трења повећан више од два пута ($w = 27,6\%$; $\varphi = 6,0^\circ$ пре третмана и $\varphi = 12,7^\circ$ после третмана).

Вредност кохезије није се променила после третмана у сандуку С4 ($c = 31,1$ кРа), где је тло третирано са напоном од 50 V, док је вредност угла унутрашњег трења у односу на вредност пре третмана ($w = 23,2\%$; $\varphi = 10,8^\circ$) повећана за мало више од 50% ($w = 23,2\%$; $\varphi = 16,6^\circ$). У сандуку С5, вредност кохезије смањена је са почетних 28,3 кРа а на 26,9 кРа после третмана. Са друге стране, вредност угла унутрашњег трења удвостручена је у односу на вредност пре третмана при истој влажности $w = 27,2\%$ ($\varphi = 6,6^\circ$ пре третмана и $\varphi = 14,3^\circ$ после третмана).

Добијени резултати при испитивању узорака тла из сандука С6 и сандука С7 су међусобно слични. Промена вредности кохезије најизраженија је у односу на све претходне експерименталне моделе. У сандуку С6 забележено је повећање вредности кохезије са $c = 29,7$ кРа на $c = 40,6$ кРа (повећање од 36%), док је у сандуку С7 регистровано повећање са $c = 30,7$ кРа на $c = 41,1$ кРа (37%). Разлог већих вредности кохезије у односу на остале моделе вероватно је последица већих димензија попречног пресека аноде и дужег третмана предложеном техником хемијске електрокинетичке стабилизације тла. Повећање угла унутрашњег трења у сандуку С6 ($w = 25,3\%$; $\varphi = 8,7^\circ$ пре третмана и $\varphi = 12,7^\circ$ после третмана) слично је повећању које је постигнуто у сандуку С7 ($w = 23,7\%$; $\varphi = 10,4^\circ$ пре третмана и $\varphi = 15,6^\circ$ после третмана).

На основу добијених вредности параметара смичуће чврстоће, срачунате су вредности чврстоће тла при смицању (τ_f). Може се закључити да је у зони аноде, код свих испитних модела, дошло до значајног повећања чврстоће тла при смицању. Маскимално повећање утврђено је у сандуку С1 ($\approx 60\%$) док је најмање повећање чврстоће регистровано у сандуку С2 ($\approx 33\%$), Посебно је интересантно да су повећања вредности чврстоће при смицању у сандуцима С6 ($\approx 42\%$) и С7 ($\approx 45\%$) скоро идентична, с обзиром на то да су начини досипања раствора креча у тло били различити.

7.3.2. Промена параметара чврстоће у зони између аноде и катодe

У сандуцима С2, С3 и С5, у којима је растојање између електрода износило 22,5 cm, није било простора за узимање узорака тла из средње зоне, те су у овој зони узорци испитани из четири сандука: С1, С4, С6 и С7. Код свих испитаних узорака у средњој зони изражено је, као у зони аноде, повећање вредности угла унутрашњег трења, док је вредност кохезије незнатно промењена.

Код узорака из сандука С1 и сандука С4, вредност кохезије после третмана ($c = 25,7$ kPa за сандук С1 и $c = 27,4$ kPa за сандук С4) је нешто мања у односу на почетну вредност ($c = 27,8$ kPa за сандук С1 и $c = 29,7$ kPa за сандук С4). Са друге стране, вредност угла унутрашњег трења значајно је повећана у оба сандука. У сандуку С1 са почетних $\varphi = 5,8^\circ$ пре третмана вредност угла унутрашњег трења повећана је за више од два пута ($w = 27,7\%$; $\varphi = 12,1^\circ$) после третмана. Иако је у сандуку С4 напон током третмана био већег интензитета, повећање угла унутрашњег трења је мање од оног у сандуку С1. Тако је, у сандуку С4, вредност угла унутрашњег трења у односу на вредност пре третмана ($w = 25,3\%$; $\varphi = 8,7^\circ$) повећана за мало више од 50% ($w = 25,3\%$; $\varphi = 14,7^\circ$).

У сандуку С6 и сандуку С7 бележи се благо повећање вредности кохезије, с тим што је оно нешто израженије у сандуку С6. У њему је вредност кохезије повећана са почетних $c = 29,7$ kPa на $c = 31,2$ kPa (повећање од 8%), док је у сандуку С7 забележено повећање са $c = 29,5$ kPa на $c = 29,9$ kPa (повећање свега 1,5%). Побољшање вредности угла унутрашњег трења, са друге стране, доста је уједначено у оба сандука. Тако се у сандуку С6 бележи повећање са $\varphi = 8,4^\circ$ пре третмана на $\varphi = 11,4^\circ$ након третмана при влажности од $w = 25,5\%$, што представља приближно 36% већу вредност угла унутрашњег трења. У сандуку С7, повећање вредности угла износи приближно 32%, односно са почетних $\varphi = 8,1^\circ$ пре третмана вредност угла унутрашњег трења је повећана на $\varphi = 10,7^\circ$ ($w = 25,7\%$).

У коначном, код свих сандука се у зони између аноде и катоде бележи повећање чврстоће тла при смицању. Срачунато повећање чврстоће при смицању код сандука С1 износи близу 45%, што је нешто мање него у зони аноде. Са друге стране, у сандуку С4 срачунато повећање чврстоће при смицању износи близу 35%, што је нешто веће него у зони аноде. Повећање вредности чврстоће при смицању у сандуку С6 ($\approx 22\%$) незнатно је веће од повећања вредности чврстоће при смицању у сандуку С7 ($\approx 17\%$), што даје малу предност аутоматизованом начину досипања раствора креча коришћењем пумпи у односу на ручно досипање на одређени број сати.

7.3.3. Промена параметара чврстоће у зони катоде

У зони катоде, промене вредности кохезије најмањег су интензитета у односу на остале зоне (и не одступају за више од 5% од почетне вредности, осим у сандуку С3), док је тренд повећања угла унутрашњег трења регистрован и у овој зони.

У сандуку С1 након третмана забележено је незнатно смањење кохезије (са $c = 27,5$ кРа на $c = 26,7$ кРа), док је угао унутрашњег трења повећан са $\varphi = 5,7^\circ$ на $\varphi = 6,5^\circ$ при истој влажности ($w = 27,9\%$). У сандуку С2 дошло је до незнатног повећања кохезије са 28,3 кРа на 28,6 кРа, као и угла унутрашњег трења са $\varphi = 6,6^\circ$ на $\varphi = 7,2^\circ$ (при $w = 27,2\%$). У узорку из сандука С3, вредност кохезије смањена је са $c = 27,8$ кРа на $c = 25,2$ кРа, што уједно представља и највеће смањење од скоро 10% узимајући у обзир све сандуке. Међутим, угао унутрашњег трења је и у овом случају повећан, и то са $5,8^\circ$ на $6,7^\circ$ ($w = 27,7\%$).

Код сандука С4 и сандука С5, третман већим напоном није утицао на промену вредности кохезије (промена мања од 2% у оба сандука). Са друге стране, вредност угла унутрашњег трења повећана је са $\varphi = 8,7^\circ$ на $\varphi = 11,6^\circ$ ($w = 25,3\%$) у сандуку С4, односно са $\varphi = 5,3^\circ$ на $\varphi = 6,4^\circ$ ($w = 28,4\%$) у сандуку С5.

Узорци из сандука С6 и С7 показују веома сличне резултате. Вредност кохезије је повећана за максималних 6% у С7 (са $c = 29,0$ кРа на $c = 30,7$ кРа), док је у сандуку С6 забележена мања промена (са $c = 29,2$ кРа на $c = 29,8$ кРа). Насупрот томе, вредност угла унутрашњег трења у сандуку С6 ($w = 25,9\%$) порасла је за нешто више од 5% ($\varphi = 7,8^\circ$ пре третмана и $\varphi = 8,2^\circ$ после третмана), док је у сандуку С7 ($w = 26,2\%$) забележена мања промена ($\varphi = 7,6^\circ$ пре третмана и $\varphi = 7,9^\circ$ после третмана).

На основу опитом одређених параметара смичуће чврстоће израчуната вредност

смичуће чврстоће тла у свим експерименталним моделима указује на побољшање тла и у овој зони. Највеће повећање вредности смичуће чврстоће забележено је у сандуку С4 ($\approx 42\%$) где је коришћен највећи напон једносмерне струје током третмана од 50 V, а најмање повећање је у сандуку С3 ($\approx 1\%$) са напоном најмањег интензитета од 23 V, што је супротан тренд од онога који је уочен у зони аноде. Посебно је значајно што су вредности повећања смичуће чврстоће и у овој зони у сандуку С6 ($\approx 3\%$), и сандуку С7 ($\approx 5\%$), приближне, иако су начини досипања раствора креча у ова два сандука били различити.

7.4. Анализа резултата експерименталних истраживања са аспекта оптимизације предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла

На основу резултата претходних истраживања могу се извести следећи закључци:

- Предложена техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла у погледу смањења влажности тла показала се ефикасном како у глиновитом тлу, чија је влажност у природном стању мања од влажности засићења, тако и у тлу са већим садржајем воде од вредности при засићењу. Нешто израженији ефекат технике у погледу дренажа тла био је уочен у природном тлу са већим садржајем воде;
- Једино значајније повећање вредности кохезије ($\approx 35\%$) забележено је у зони аноде на узорцима из сандука С6 и С7 где је коришћена анода већих димензија попречног пресека и где је третман трајао 30 дана (у осталим сандуцима трајање третмана је 14 дана). У средњој зони максимално повећање кохезије је око 10% (С6), док је у зони катоде кохезија у свим сандуцима била готово непромењена у односу на почетну вредност (изузетак је узорак у сандуку С3, у коме је тло третирано са најмањим напоном, где је вредност кохезије смањена за скоро 10% у односу на почетну вредност);
- У свим испитаним узорцима после третмана бележи се значајно повећање угла унутрашњег трења. Тренд повећања угла унутрашњег трења приметан је у свим зонама. Повећање угла унутрашњег трења највеће је у зони аноде где се креће у интервалу од 45% (С6) до 125% (С1), затим у зони између аноде и катоде у интервалу од 30% (С7) до 110% (С1) док је у зони катоде ефекат предложене технике на повећање угла био најмањи и то у интервалу од 4% (С7) до 34% (С4).
- Код свих испитаних узорака, у свим зонама, дошло је до повећања чврстоће тла при смицању након третмана тла предложеном техником. У зони аноде, највеће

- повећање чврстоће при смицању износи 60% (C1), у средњој зони 43% (C1), док је у зони катоде срачунато максимално повећање од 17% (C4);
- Мање растојање између електрода (аноде и катоде) имало је ефекта на већи садржај калцијума из креча у зони катоде, међутим, то се није нарочито одразило на вредности круцијалних геотехничких показатеља попут кохезије, угла унутрашњег трења и чврстоће тла на смицање;
 - Повећање напона једносмерне струје са 23 V на 30 V, односно са 30 V на 50 V није допринело побољшању параметара смичуће чврстоће тла у зони аноде и у средњој зони, док је у зони катоде највеће побољшање овог својства тла постигнуто управо третманом са највећим напоном. Ипак, након третмана уочено је да су електроде (аноде) коришћене у експерименталним моделима са напоном од $U = 50 \text{ V}$ у значајној мери кородирале, па се из тог разлога овај интензитет напона једносмерне струје не препоручује за третмане предложеном техником у дужим временским интервалима;
 - Начин досипања раствора креча у тло током третмана није у већој мери утицао на резултате истраживања. Утврђене вредности параметара чврстоће, као и вредности чврстоће при смицању такође су идентичне у моделу са пумпом и моделу са ручним досипањем раствора.

Ова сазнања умногоме могу да усмере даљи ток развоја предложене технике стабилизације тла, нарочито у погледу спровођења будућих теренских експерименталних истраживања.

8. ЗАКЉУЧЦИ НА ОСНОВУ СПРОВЕДЕНИХ ИСТРАЖИВАЊА

До сада су са теоријског и практичног аспекта у великој мери утврђени ефекти технике хемијске стабилизације тла независно од ефеката технике електрокинетичког третмана тла. У овој дисертацији приказана је могућност примене предложене технике стабилизације тла која се заснива на комбинацији општеприхваћених техника хемијске стабилизације и електрокинетичког третмана тла. Иако се успешно користе засебно, свака од ових метода има ограничену примену. Хемијска стабилизација тла доприноси трајном побољшању карактеристика тла, али се може примењивати искључиво за побољшање карактеристика тла у површинским лако доступним слојевима, док се електрокинетички третман тла применом једносмерне струје може користити на већим дубинама, али ефекти побољшања својстава тла нису трајног карактера. Интеграција ових двеју техника превазилази њихова појединачна ограничења, што указује на њен потенцијал примене у практичне сврхе за потребе трајне стабилизације дубљих слојева тла.

Основни принципи предложене технике хемијске електрокинетичке стабилизације тла базиране су на електрокинетичком третирању тла, применом једносмерне струје кроз тло између двеју (или више) претходно уграђених електрода (анода и катода), уз додатак одговарајућих хемијских стабилизатора. У сврху провере предложене технике спроведена су опсежна лабораторијска експериментална истраживања у оквиру дисертације. За разлику од досадашњих истраживања у овој области, у фокусу дисертације су били ефекти предложене технике на промене пре свега физичких и механичких карактеристика тла. Посебна пажња била је усмерена на праћење промена параметара смичуће чврстоће и коефицијента водопрпусности тла, као круцијалних аспеката у области грађевинске геотехнике.

Побољшање параметара смичуће чврстоће тла доприноси повећању фактора сигурности на клижење (односно стабилности косине), повећању носивости и смањењу слегања темељног тла. Сагледани су ефекти трајног смањења водопрпусности испитиваног тла преко одређивања коефицијента водопрпусности, као и побољшања параметара смичуће чврстоће, чиме се доказано трајно побољшавају кључне особине тла које су од значаја при пројектовању свих типова грађевинских објеката.

С обзиром на све већу потребу за одрживим и ефикасним техникама стабилизације и побољшања карактеристика тла, предложена техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла представља област великог потенцијала за

интензивна истраживања у будућности. Уз бројне могућности за унапређење постојећих технологија, стварају се предуслови за развој енергетски ефикаснијих и економски исплатљивијих решења са циљем побољшања карактеристика тла.

8.1. Рекапитулација резултата експерименталних истраживања

За потребе истраживања депонован је материјал са клизне равни при санацији клизишта у близини места Црвена Река. Глиновито тло са терена је донешено у Лабораторију за геотехнику Грађевинско - архитектонског факултета Универзитета у Нишу, где је највећи део истраживања и спроведен. Поред тога, део испитивања спроведен у Лабораторији за грађевинске материјале Грађевинско - архитектонског факултета, у Лабораторији за општу и неорганску хемију Природно - математичког факултета Универзитета у Нишу, у Лабораторији за електронску микроскопију Медицинског факултета Универзитета у Нишу, као и на Институту за рударство и металургију у Бору.

Експериментална истраживања спроведена су кроз три фазе.

У оквиру **прве фазе** спроведена су опсежна експериментална истраживања. Одређене су карактеристике тла пре третмана, а затим је тло третирано засебно хемијским третманом и електрокинетичким третманом. Сагледавање успешности хемијског третмана обухватило је десет различитих стабилизатора, који су подељени у три категорије: традиционални, алтернативни и стабилизатори на бази индустријског отпада. За сваки од коришћених стабилизатора спроведена су испитивања промене једнооксијалне чврстоће на притисак, стања конзистенције, рН вредности и електропроводљивости на узорцима са три различита процентуална учешћа стабилизатора у мешавини са глиновитим тлом, са циљем утврђивања оптималног садржаја сваког од стабилизатора. На основу добијених резултата одређен је оптимални садржај сваког стабилизатора засебно, и на узорцима који су били припремљени са оптималним садржајем стабилизатора спроведен је додатни сет лабораторијских испитивања. Додатна испитивања су обухватила праћење промене модула стишљивости, калифорнијског индекса носивости, потенцијала бубрења и параметара смичуће чврстоће (кохезије и угла унутрашњег трења). Као најефикаснији стабилизатори из прве фазе експерименталних истраживања за наредну фазу изабран је по један стабилизатор из сваке од претходно дефинисаних група: креч (као традиционални стабилизатор), магнезијум-карбонат (као алтернативни материјал) и електрофилтерски пепео (као стабилизатор на бази отпадног материјала). Са друге

стране, електрокинетички третман тла имао је за циљ анализу утицаја различитих влажности тла, различитих напона једносмерне струје и различитих растојања између електрода, како би поставка експерименталних истраживања у наредној фази била одговарајућа.

У **другој фази**, глиновито тло је третирано предложеном техником хемијске електрокинетичке стабилизације тла у три испитна сандука, са циљем упоређивања ефеката три стабилизатора са најбољим учинком у претходној фази истраживања (по један из сваке од три разматране групације стабилизатора). Тло у сандуцима било је подељено у три зоне (зона аноде, средња зона и зона катоде), како би се пратиле промене карактеристика тла у зависности од растојања од електрода. Испитивања карактеристика тла су спроведена како током трајања третмана, тако и у различитим временским интервалима по завршетку третмана, са циљем утврђивања трајности ефеката побољшања тла.

У току третмана испитивана је промена недрениране смичуће чврстоће тла опитом крилном сондом, уз праћење промене влажности тла и промена садржаја хемијских елемената техником XRF спектроскопије. На основу резултата спроведених истраживања, у свим испитним сандуцима забележен је тренд повећања момента торзије при лому тла током времена, упоредо са трендом опадања влажности тла.

Након завршетка третмана, спроведена су испитивања опитом триаксијалне компресије, како би се пратила промена параметара смичуће чврстоће тла, као и одређивање коефицијента водопрпусности тла. Добијени резултати показују да је предложена техника хемијске електрокинетичке стабилизације тла допринела повећању параметара смичуће чврстоће третираног тла, пре свега угла унутрашњег трења. У погледу чврстоће тла на смицање, најизраженији ефекат предложене технике забележен је у зони аноде, незнатно је слабији у средњој зони, док су у зони катоде регистровани најслабији ефекти ове технике. Сваки од анализираних стабилизатора у комбинацији са електрокинетичким третманом је у значајној мери допринео смањењу коефицијента водопрпусности. Испитивања спроведена у различитим временским интервалима након завршетка хемијског електрокинетичког третмана тла дала су потврду да су ефекти предложене технике стабилизације тла трајног карактера.

Поред XRF спектроскопије током третмана, спроведена је XRD спектроскопија са циљем праћења промена у минеролошкој структури тла након третмана. У испитним сандуцима са додатком креча и електрофилтерског пепела, промене у структури тла регистроване су у свим зонама, док је са додатком магнезијум-карбоната промена у зони катоде изостала.

Сагледавањем свих резултата, као најуспешнији стабилизатор истакао се раствор на бази креча, те су у **трећој фази** сагледани аспекти оптимизације предложене технике третирањем глиновитог тла овим стабилизатором у комбинацији са једносмерном струјом. У испитним сандуцима тло је третирано при различитим влажностима ($w = 30\%$ и $w = 45\%$), са различитим напонима струје ($U = 23 \text{ V}$, $U = 30 \text{ V}$ и $U = 50 \text{ V}$) и са различитим растојањима између аноде и катоде ($d = 22,5 \text{ cm}$ и $d = 45 \text{ cm}$).

На основу добијених резултата, може се закључити да је нешто израженији ефекат предложене технике у погледу дренарања тла био уочен у експерименталним моделима у којима је третирано тло било са већом почетном вредношћу влажности. Такође, истраживања су показала да је предложену технику стабилизације тла могуће применити како у тлу пластичне конзистенције, тако и у тлу течне конзистенције.

Више вредности напона једносмерне струје од 50 V у већини испитивања нису нужно допринеле бољим резултатима у односу на напоне од 30 V и 23 V . Такође, уочено је да су при већој вредности напона аноде значајно брже кородирале, те се може закључити да за успешност ове технике није неопходно користити напон већи од 30 V .

Распоред електрода (анодe и катоде) на мањем растојању, према очекивању, допринео је већој концентрацији калцијума из креча у зони катоде, али без неког значајнијег утицаја на испитивана геотехничка својства. Стога, као закључак ових истраживања, у којима су осовинска растојања између анода и катода износила $22,5 \text{ cm}$ и 45 cm (у трећој фази), односно 75 cm (у другој фази), произилази да мања растојања између електрода нису гаранција успешности примене предложене технике.

Поред свега наведеног, сагледана је и могућност различитих начина додавања раствора стабилизатора у тло – ручним досипањем на одређени временски период од неколико сати и аутоматизованим дозирањем раствора применом пумпи. Резултати добијени овим испитивањем су готово идентични, те се може закључити да начин дозирања раствора није имао неког значајнијег утицаја на резултате у погледу испитиваних својстава тла.

8.2. Препоруке за будућа истраживања

Иако су резултати спроведених експерименталних истраживања указали на значајне потенцијале хемијског електрокинетичког третмана као ефикасне технике стабилизације глиновитог тла, ова област оставља низ могућности за даља истраживања која би допринела још бољем разумевању механизма деловања, као и за додатну оптимизацију самог поступка. У оквиру будућих истраживања, а на основу изложених

резултата истраживања у оквиру ове дисертације, корисно би било сагледати ефекте примене ове технике и на другим врстама глиновитог тла, сходно разликама у њиховом (пре свега) минералошком саставу. Такође, спектар истраживања се може проширити и на аспекте комбиновања различитих типова реагенса, као и коришћења нових материјала, укључујући наноматеријале, као еколошки прихватљивих стабилизатора, како би се побољшала реактивност раствора стабилизатора са тлом и смањио негативан утицај на животну средину.

Такође, постоје бројне могућности у погледу додатне оптимизације предложене технике, пре свега у погледу временског трајања третмана. На основу добијених резултата, препорука за будућа истраживања је да се у експерименталним истраживањима користе електроде од материјала отпорнијих на утицај корозије. Поред тога, будућа истраживања могу се фокусирати и на испитивања различитих концентрација хемијских стабилизатора у комбинацији са електрокинетичким третманом. На крају, додатна истраживања, пре свега у погледу већих растојања електрода, њиховог међусобног просторног распореда, као и односа у броју анода и катода (1:1, 1:2, 1:3, 1:4), умногоме би допринела свеобухватнијем сагледавању ефеката предложене технике стабилизације тла.

Препоруке у смислу будућих истраживања односе се и на унапређење истраживања са нивоа лабораторијских експеримената на ниво теренских експеримената, како би се ефекти предложене технике стабилизације тла сагледали и у реалним условима на терену, са циљем постизања дугорочне стабилности тла и подизања његове отпорности на утицај спољних фактора попут падавина, температурних промена и динамичког оптерећења.

Литература

- Abbas, Z. H., & Majdi, H. S. (2017). Study of heat of hydration of Portland cement used in Iraq. *Case studies in construction materials*, 7, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.001>
- Abdullah, W. S., & Al–Abadi, A. M. (2010). Cationic–electrokinetic improvement of an expansive soil. *Applied Clay Science*, 47(3–4), 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.11.046>
- Abiodun, A. A., & Nalbantoglu, Z. (2022). Effect of ionic solutions on the performance of electrokinetic treatment of soft soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(7), 2704–2721. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1765201>
- ACAA 2022 CCP Survey Results and Production & Use Charts. Available online: www.aaa-usa.org (accessed on 25.04.2024)
- Addison, M. B., & Petry, T. M. (1998). Optimizing and multi–agent, multi–injected swell modifier. *Transportation Research Record*, 1611, 38–45.
- Ahnberg, H., Johansson, S. E., Pihl, H., & Carlsson, T. (2003). Stabilising effects of different binders in some Swedish soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Ground Improvement*, 7(1), 9–23.
- Allison, G. E., Kefauver, M., & Roller, E. M. (1953). Ammonium fixation in soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 17, 107–110.
- Anderson, S. J., & Sposito, G. (1991). Cesium adsorption method for measuring accessible structural surface charge. *Soil Science Society of America Journal*, 55(6), 1569–1576. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500060011x>
- Andrus, R. D., & Chung, R. M. (1995). Ground Improvement Techniques for Liquefaction Remediation Near Existing Lifelines. *Proceedings from the Sixth Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction*, 457–476.
- Asadollahfardi, G., & Rezaee, M. (2019). Electrokinetic remediation of diesel–contaminated silty sand under continuous and periodic voltage application. *Environmental Engineering Research*, 24(3), 456–462. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.301>
- Asadi, A., Huat, B. B., Nahazanan, H., & Keykhah, H. A. (2013). Theory of electroosmosis in soil. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(1), 1016–1025. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)14076-4](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14076-4)
- Asavadorndeja, P., & Glawe, U. (2005). Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(3), 237–245. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0276-7>
- Asuri, S., & Keshavamurthy, P. (2016). Expansive Soil Characterisation: an Appraisal. *INAE Letters*, 1(1), 29–33. <https://doi.org/10.1007/s41403-016-0001-9>
- Azhar, A. T. S., Azim, M. A. M., Syakeera, N. N., Jefferson, I. F., & Rogers, C. D. F. (2017). Application of Electrokinetic Stabilisation (EKS) method for soft soil: a review. *In IOP conference series: materials science and engineering*, 226(1), 012075. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/226/1/012075>
- Barker, J. E., Rogers, C. D. F., Boardman, D. I., & Peterson, J. (2004). Electrokinetic stabilisation: an overview and case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 8(2), 47–58. <https://doi.org/10.1680/grim.2004.8.2.47>
- Barshad, I. (1950). The effect of interlayer cations on the expansion of mica type crystal lattice. *American Mineralogist*, 35, 225–238.
- Bell, F. G. (1993). *Engineering Treatment of Soils*. CRC Press, Boca Raton.

- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (Eds.) (2013). *Handbook of Clay Science* (Vol. 5). Newnes.
- Bergaya, F., Lagaly, G., & Vayer, M. (2006). Cation and Anion Exchange. *Developments in Clay Science*, 1(1), 1224.
- Bhattacharja, S., & Bhatta, J. (2003). Comparative performance of Portland cement and lime stabilization of moderate to high plasticity clay soils. *Portland Cement Association*, 2066, 60–67.
- Boardman, D. I., Glendinning, S., & Rogers, C. D. F. (2001). Development of stabilisation and solidification in lime–clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), 533–543.
- Bredenkamp, S., & Lytton, R. L. (1995). Reduction of sulfate swell in expansive clay subgrades in the Dallas district. *Research Report 1994–5, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station*.
- Brigatti, M. F., Galan, E., & Theng, B. K. G. (2006). Structure and mineralogy of clay minerals. In *Developments in Clay Science*, 1, 19–86.
- Brigatti, M. F., Galán, E. & Theng, B. K. G. (2013). Structure and mineralogy of clay minerals. In *Developments in Clay Science*, 5, 21–81.
- Bukhary, A., & Azam, S. (2023). A review of physicochemical stabilization for improved engineering properties of clays. *Geotechnics*, 3(3), 744–759. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3030041>
- Carran, D., Hughes, J., Leslie, A., & Kennedy, C. (2013). A short history of the use of lime as a building material beyond Europe and North America. *International Journal of Architectural Heritage*, 6(2), 117–146.
- Carroll, D., & Starkey, H. C. (1971). Reactivity of clay minerals with acids and alkalines. *Clays and Clay Minerals*, 19, 321–333.
- Casagrande, A. (1932). The structure of clay and its importance in foundation engineering. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 19(4), 168–209.
- Casagrande, L. (1983). Stabilization of soils by means of electro-osmosis-state of the art. *American Society of Civil Engineers*, 69, 255–302.
- Chen, F. H. (1973). The basic physical property of expansive soils. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, 1, 17–25.
- Chien, S. C., Ou, C. Y., & Lee, Y. C. (2010). A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement. *Applied Clay Science*, 50, 481–492. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.014>
- Chien, S. C., Ou, C. Y., & Wang, M. K. (2009). Injection of saline solutions to improve the electro-osmotic pressure and consolidation of foundation soil. *Applied clay science*, 44(3-4), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.02.006>
- Chien, S.-C., & Lee, T.-Y. (2013). Development of a suitable operation procedure for electroosmotic chemical soil improvement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 993–1000.
- Chittoori, B. C. S. (2008). Clay mineralogy effects on long-term performance of chemically treated expansive clays, *Doctoral dissertation*, The University of Texas at Arlington.
- Chittoori, B., & Puppala, A. J. (2011). Quantitative estimation of clay mineralogy in fine–grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 997–1008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000521](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000521)
- Churchman, G. J., Gates, W. P., Theng, B. K. G., & Yuan, G. (2006). Clays and clay minerals for pollution control. In *Developments in Clay Science*, 1, 625–675.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., & Pinto, A.T. (2012). Effect of calcium content on soil stabilization with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 29, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.046>

- Dash, S. K., & Hussain, M. (2012). Lime stabilization of soils: reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 707–714. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000431](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000431)
- Dash, S. K., & Hussain, M. (2015). Influence of lime on shrinkage behavior of soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001312)
- Dorđević, V., Dorđević, P., i Milovanović, D. (1991). *Osnovi petrologije*. Beograd: Nauka.
- Eades, J. E., Nichols, F. P., & Grim, R. E. (1963). Formation of new minerals with lime stabilization as proven by field experiments in Virginia. *Highway Research Bulletin*, 335, 31–39.
- Eisazadeh, A., Kassim, K. A., & Nur, H. (2012). Stabilization of tropical kaolin soil with phosphoric acid and lime. *Natural Hazards*, 61, 931–942. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9943-2>
- Elkhebu, A. G., Zainorabidin, A., Bujang, H. B., Bakar, I. H., Abdeljouad, L. A., & Dheyab, W. K. (2018). Alkaline activation of clayey soil using potassium hydroxide & fly ash. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(9). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.09.016>
- Elias, V., Welsh, J., Warren, J., Lukas, R., Collin, J. G., & Berg, R. R. (2004). Ground improvement methods (FHWA–NHI–04–001). *Federal Highway Administration*. 1022 pp.
- Elkady, T.Y. (2016). The effect of curing conditions on the unconfined compression strength of lime-treated expansive soils. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 52–69. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1107321>
- Ene, E., & Okagbue, C. (2009). Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust. *Engineering Geology*, 107(1–2), 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.007>
- Estabragh, A. R., Kazemi, A., Javadi, A. A., & Moghadas, M. (2022). Stabilisation of a clay soil by injection of different ions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 175(4), 261–276.
- Estabragh, A. R., Namdar, P., & Javadi, A. A. (2012). Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber. *Geosynthetics International*, 19(1), 85–92. <https://doi.org/10.1680/gein.11.00038>
- Estabragh, A. R., Rafatjo, H., & Javadi, A. A. (2014). Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. *Geosynthetics International*, 21(3), 233–243. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00025>
- Federico, A., Vitone, C., & Murianni, A. (2015). On the mechanical behaviour of dredged submarine clayey sediments stabilized with lime or cement. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(12), 2030–2040. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0413>
- Feijoo, J., Ottosen, L. M., Nóvoa, X. R., Rivas, T., & De Rosario, I. (2017). An improved electrokinetic method to consolidate porous materials. *Materials and Structures*, 50(3), 1-16. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1063-1>
- Ferguson, G. (1993). Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent. *In Geotechnical Special Publication*, 36, 1-14. ASCE.
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Gao, J., Faheem, M., & Yu, X. (2022). Global research on contaminated soil remediation: a bibliometric network analysis. *Land*, 11(9), 1581. <https://doi.org/10.3390/land11091581>
- Gbadamosi, O.S. (2021). Improvement of Bearing Capacity of Lateritic Soil for Pavement Subgrade by Addition of Rock Flour. *Doctoral Dissertation*, Federal University of Technology, Minna.
- Ghobadi, R., Altaee, A., Zhou, J. L., Karbassiyazdi, E., & Ganbat, N. (2021). Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive filter media. *Science of The Total Environment*, 794, 148668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148668>

- Gillott, J. E. (1984). Clay, engineering geology. *In Applied Geology*, 45-59.
- Gingine, V., Shah, R., Rao, P. V. K., & Krishna, P. H. (2013). A review on study of electrokinetic stabilization of expansive soil. *In Proceedings of the National Conference on New Trends in Civil Engineering and Earth Sciences*, 391–399.
- Glendinning, S., Jones, C. J., & Lamont–Black, J. (2005). The use of electrokinetic geosynthetics (EKG) to improve soft soils. *In Elsevier Geo–Engineering Book Series*, 3, 997–1043. [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80038-2](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80038-2)
- Gobinath, I., Akinwumi, O., Afolayan, S., Karthikeyan, M., Manojkumar, S., Gowtham S., & Manikandan. A. (2020). Banana fibre–reinforcement of a soil stabilized with sodium silicate, *Silicon*, 12(2), 357–363. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00124-6>
- Goodarzi, A. R., Akbari, H. R., & Salimi, M. J. A. C. S. (2016). Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science*, 132, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.014>
- Grim, R. E. (1953). Clay mineralogy. *LWW. McGraw Hill, New York*, 76(4), 317.
- Gu, K., Jin, F., Al-Tabbaa, A., Shi, B., & Liu, J. (2014). Mechanical and hydration properties of ground granulated blastfurnace slag pastes activated with MgO–CaO mixtures. *Construction and Building Materials*, 69, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.032>
- Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. *Clay Minerals*, 30, 257–259.
- Guthrie, J. M., & Ferguson, J. R. (2012). Overview of XRF. *The Archaeometry Laboratory at the University of Missouri Research Reactor*. Retrieved August 2012, from https://archaeometry.missouri.edu/xrf_overview.html
- Han, S., Wang, B., Wang, Y., Liu, W., Chen, C., & Zhang, Y. (2024). Experimental study on soil improvement by electrochemical injection of calcium chloride solutions with time interval. *Scientific Reports*, 14(1), 15748. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66508-w>
- Hilt, G. H., & Davidson, D. T. (1960). Lime fixation in clayey soils. *Highway Research Board, National Research Council*, HRB Bulletin No. 262, Washington, D.C., 20–32.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., & Suddeepong, A. (2010). Analysis of strength development in cement–stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011–2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>
- Hosseini, A., Haeri, S. M., Mahvelati, S., & Fathi, A. (2019). Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), 1055–1065. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.004>
- Huat B. B., Kazemian., S., & Kuang., W. L. (2011) Effect of cement–sodium silicate grout and kaolinite on undrained shear strength of reinforced peat, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16(8), 1221–1228.
- Hunter, D. (1988). Lime induced heave in sulfate bearing clay soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(2), 150–167.
- Hussain, M., & Dash, S. K. (2015). The influence of lime on the compaction behaviour of soils. *Environmental Geotechnics*, 3(5), 346–352. <https://doi.org/10.1680/envgeo.14.00015>
- Ingles, O. H. (1987). *Soil Stabilisation. Chapter 38. Ground Engineer's Reference Book. Butterworths*, London, 38, 1-38.
- Iyer, R. (2001). Electrokinetic remediation. *Particulate Science and Technology*, 19(3), 219–228.
- Jafer, H. M. (2013). Stabilization of soft soils using salts of chloride. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 21(5), 1546–1554.
- Jennings, J. E. B., & Knight, K. (1957). The prediction of total heave from the double oedometer test. *Transactions of the South African Institute of Civil Engineers*, 7, 285–291.

- Johnson, A. M. (1949). Laboratory Experiments with Lime–Soil Mixtures. *Purdue University, Engineering Experiment Station, Joint Highway Research Project, Report No. 24.*
- Johnston, I. W. (1977). Soil drainage by electro-osmosis. *Paper presented at the International commission on irrigation and drainage (ICID), Tenth Congress, New Delhi.*
- Jones Jr, D. E., & Holtz, W. G. (1973). Expansive soils-the hidden disaster. *Civil engineering*, 43(8), 49–51.
- Jones, C. W. (1958). Stabilization of expansive cla with hydrated lime and with Portland cement. *Highway Research Bulletin 193, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*, 40–47.
- Keraouti, R., Mostefa, F., Mekhatria, D., Laredj, N., Bensoula, M., & Missoum, H. (2024). Effect analysis of copper and brass electrodes on the electroosmotic flow in high saline soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(9), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12046-8>
- Kolay, P. K., Sii, H. Y., & Taib, S. N. L. (2011). Tropical peat soil stabilization using class F pond ash from coal fired power plant. *International Journal of Civil Engineering*, 5(2), 79–83.
- Kulkarni, S., & Ranadive, M. (2022). Effect of soil stabilization on design of conventional and perpetual pavement in India. *Grādevinar*, 74(9), 779–787. <https://doi.org/10.14256/jce.3337.2021>
- Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay Clay Miner*, 24(1), 1-29. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97672>
- Lamont-Black, J., Jones, C. J., & White, C. (2015). Electrokinetic geosynthetic dewatering of nuclear contaminated waste. *Geotextiles and Geomembranes Journal*, 43(4), 359e362.
- Larsson, S. (2001). Binder distribution in lime–cement columns. *Ground Improvement*. 5(3), 111-122.
- Latifi, N., Eisazadeh, A., & Marto, A. (2013). Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate–based liquid stabilizer. *Environmental Earth Sciences*, 72(1), 91–98. <http://doi.org/10.1007/s12665-013-2939-1>
- Latifi, N., Marto, A., & Eisazadeh, A. (2016). Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilized with non–traditional additive. *Acta Geotechnica*, 11(2), 433-443. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0370-3>
- Latifi, N., Eisazadeh, A., & Marto, A. (2014). Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate–based liquid stabilizer. *Environmental Earth Sciences*, 72, 91–98. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2939-1>
- Lees, G., Abdelkater, M. O., & Hamdani, S. K. (1982). Effect of the clay fraction on some mechanical properties of lime–soil mixtures. *Highway Engineer*, 29(11), 2–9.
- Liaki, C. (2006). *Physicochemical study of electrokinetically treated clay using carbon and steel electrodes*, Doctoral dissertation. University of Birmingham.
- Liaki, C., Rogers, C. D. F., & Boardman, D. I. (2008). Physicochemical effects on uncontaminated kaolinite due to electrokinetic treatment using inert electrodes. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43, 810–822. <https://doi.org/10.1080/10934520801973972>
- Liaki, C., Rogers, C. D. F., & Boardman, D. I. (2010). Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes. *Journal of applied electrochemistry*, 40, 1225-1237.
- Lin, Y.–S., Ou, C.–Y., & Chien, S.–C. (2018). Cohesive strength improvement mechanism of kaolinite near the anode during electroosmotic chemical treatment. *Clays and Clay Minerals*, 66(5), 438–448. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2018.064110>
- Lindh, P. (2001). Optimising binder blends for shallow stabilisation of fine–grained soils. *Ground Improvement*, 5(1), 23–34.
- Little, D. N., & Nair, S. (2009). Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials. *National Cooperative Highway Research Program.*

- Little, D. N., Nair, S., & Herbert, B. (2010). Addressing sulfate-induced heave in lime treated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 110–118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000192](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000192)
- Liu, Y., Xie, X., Zheng, L., & Li, J. (2018). Electroosmotic stabilization on soft soil: Experimental studies and analytical models (A historical review). *International Journal of Electrochemical Science*, 13(9), 9051–9068. <https://doi.org/10.20964/2018.09.40>
- Lytton, R. L. (1997). Engineering structures in expansive soils. *Solos Não Saturados*, Rio de Janeiro.
- Ma, C., Chen, B., & Chen, L. (2018). Experimental feasibility research on a high-efficiency cement-based clay stabilizer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 62–72. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0161-0>
- Maaitah, O. N. (2012) Soil stabilization by chemical agent, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 1345–1356. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9549-7>
- Mackiewicz, S. M., & Ferguson, E. G. (2005). Stabilization of soil with self-cementing coal ashes. *World of Coal Ash (WOCA)*, Lexington.
- Malekzadeh, M., & Sivakugan, N. (2017). Double drain electrokinetic stabilization of dredged mud using stainless steel electrodes and application of surcharge. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 2615-2621. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0975-1>
- Marto, A., Latifi, N., & Eisazadeh, A. (2014). Effect of non-traditional additives on engineering and microstructural characteristics of laterite soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 6949–6958. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1286-1>
- McDowell, C. (1959). The relation of laboratory testing to design for pavements and structures on expansive soils. *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 54(4), 127–153.
- Meunier, A. (2005). *Clays*. Springer Science, Berlin.
- Micić, S., Shang, J., Lo, K., Lee, Y., & Lee, S. (2001). Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), 287-302.
- Milošević, M. (2016). *Efikasnost različitih tipova glina srbije za adsorpciju metilen plavog*, Doktorska disertacija. Rudarsko geološki fakultet: Beograd.
- Mitchell, I. V. (Ed.) (1990). *Pillared Layered Structures, Current Trends and Applications*. Elsevier Applied Science, London.
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behaviour (2nd ed.)*. John Wiley & Sons Inc.
- Mitchell, J. K., & Hooper, D. R. (1961). *Influence of time between mixing and compaction on the properties of a lime stabilized expansive clay*. Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 14–31.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behaviour (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Moayedi, H., Huat, B.B., Kazemian, S., & Daneshmand, S. (2012). Stabilization of organic soil using sodium silicate system grout. *International Journal of Physical Sciences*, 7(9), 1395–1402, <https://doi:10.5897/ijps11.1509>
- Mohammed, M. Z. (2018). *Electroosmosis treatment on composite soils*. Doctoral dissertation. University of Leeds.
- Morris, D. V., Hillis, S. F., & Caldwell, J. A. (1985). Improvement of sensitive silty clay by electroosmosis. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(1), 17-24
- Mosavat, N., Abedini, A., & Torabi, F. (2014). Phase behaviour of CO₂-brine and CO₂-oil systems for CO₂ storage and enhanced oil recovery: experimental studies. *Energy Procedia*, 63, 5631-5645.
- Mosavat, N., Oh, E., & Chai, G. (2012). A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils. *Geomate Journal*, 2(4), 266–272. <https://doi.org/10.21660/2012.4.3i>
- Mutaz, E., Shamrani, M. A., Puppala, A. J., & Dafalla, M. A. (2011). Evaluation of chemical stabilization of a highly expansive clayey soil. *Transportation Research Record*, 2204(1), 148–157.

- Nelson, J., & Miller, D. J. (1997). *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons.
- Nelson, J. D., Chao, K. C., Overton, D. D., & Nelson, E. J. (2015). *Foundation Engineering for Expansive Soils*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Nordin, N., Hussin, K., Ismail, M. A. M., & Yahya, A. (2013). Stabilisation of soft soil using electrokinetic stabilisation method. *International Journal of Zero Waste Generation*, 1(1), 5–12.
- O'Bannon, D., Morris, G. R., & Mancini, F. P. (1976). Electrochemical hardening of expansive clays. *Transportation Research Record*, 593, 46–50.
- Omowumi, A. (2017) Engineering evaluation of lateritic soils of failed highway sections in Southwestern Nigeria. *Geosciences Research*, 2(3), 210–218. <https://doi.org/10.22606/gr.2017.23006>
- Ou, C. Y., Chien, S. C., & Chang, H. H. (2009). *Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions*. Field test. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(6), 727–733. <https://doi.org/10.1139/T09-012>
- Ou, C.-Y., Chien, S.-C., & Wang, Y.-G. (2009). On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions. *Applied Clay Science*, 44(1–2), 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.014>
- Ou, C.-Y., Chien, S.-C., Syue, Y.-T., & Chen, C.-T. (2018). A novel electroosmotic chemical treatment for improving the clay strength throughout the entire region. *Applied Clay Science*, 153, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.014>
- Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Amiri, M., & Ouhadi, M. H. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Applied Clay Science*, 95, 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.007>
- Pakir, F., Marto, A., Yunus, N. Z. M., Tajudin, S. A. A., & Tan, C. S. (2015). Effect of sodium silicate as liquid based stabilizer on shear strength of marine clay. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 76(2), 45–50.
- Petry, T. M., & Little, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 447–460. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)014:6\(447\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)014:6(447))
- Petry, T. M., Armstrong, J. C., & Chang, D. (1982). Short term active soil property changes caused by injection of lime and fly ash. *Transportation Research Record*, 830, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 25–32.
- Phear, A. G., & Harris, S. J. (2008). Contributions to Géotechnique 1948–2008: Ground improvement. *Géotechnique*, 58(5), 399–404. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.5.399>
- Por, S., Nishimura, S., & Likitlersuang, S. (2017). Deformation characteristics and stress responses of cement-treated expansive clay under confined one-dimensional swelling. *Applied Clay Science*, 146, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.004>
- Prusinski, J. R., & Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation research record*, 1652(1), 215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-27>
- Rahmat, M. N., & Ismail, N. (2018). Effect of optimum compaction moisture content formulations on the strength and durability of sustainable stabilised materials. *Applied Clay Science*, 157, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.02.036>
- Rahmat, M. N., & Kinuthia, J. M. (2011). Compaction of fills involving stabilisation of expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, 164(2), 113–126. <https://doi.org/10.1680/geng.2011.164.2.113>
- Ramadas, T.L., Kumar, N.D., & Yesuratnam, G. (2012). A study on strength and swelling characteristics of three expansive soils treated with fly ash. *In International Symposium on Ground Improvement (IS GI Brussels 2012)*.
- Randelović, M. (2012). *Interakcija elektrohemijski aktivnih, mikrolegiranih i strukturno modifikovanih*

- kompozita, na bazi alumosilikatne matrice, sa jonskim i koloidnim vrstama pojedinih štetnih sastojaka u sintetičkim vodama. Doktorska disertacija, Prirodno–matematički fakultet, Niš.*
- Ranjitha, K., & Manjari Blessing, B. V. (2017). Soil stabilization by electrokinetic method. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 6(2), 1316–1320.
- Reddy, C. S. (2022). *Ground Improvement and Reinforced Soil Structures*. S. Saride, & A. M. Krishna (Eds.). Springer Singapore.
- Reddy, K. R., & Chinthamreddy, S. (2004). Enhanced electrokinetic remediation of heavy metals in glacial till soils using different electrolyte solutions. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 130(4), 442-455.
- Renjith, R., Robert, D. J., Gunasekara, C., Setunge, S., & O'Donnell, B. (2020). Optimization of enzyme-based soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020091.
- Rogers, C. D. F., & Glendinning, S. (2000). Lime requirement for stabilization. *Transportation Research Record*, 1721(1), 9–18. <https://doi.org/10.3141/1721-02>
- Rosone, M., Celauro, C., & Ferrari, A. (2020). Microstructure and shear strength evolution of a lime–treated clay for use in road construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(9), 1147–1158. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1524144>
- Sadeghian, F., Jahandari, S., Haddad, A., Rasekh, H., & Li, J. (2022). Effects of variations of voltage and pH value on the shear strength of soil and durability of different electrodes and piles during electrokinetic phenomenon. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2), 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.017>
- Sakr, M. A., Shahin, M. A., & Metwally, Y. M. (2009). Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27, 105–113. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9206-7>
- Salehi, M., & Sivakugan, N. (2009). Effects of lime-clay modification on the consolidation behavior of the dredged mud. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 135(6), 251-258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000000](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000000)
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering Geology*, 104(1–2), 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.003>
- Sasanian, S., & Newson, T. A. (2014). Basic parameters governing the behaviour of cement–treated clays. *Soils and Foundations*, 54(2), 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.02.005>
- Saygili, G., Yildirim, Y., & Sahin, H. (2018). Stabilization of high sulfate soils with nontraditional additives. In *PanAm Unsaturated Soils2017: Swell-Shrink and Tropical Soils; American Society of Civil Engineers*, Washington, DC, USA. 236–245.
- Seco, A., Del Castillo, J. M., Espuelas, S., Marcelino, S., & García, B. (2020). Sulphate soil stabilisation with magnesium binders for road subgrade construction. *International Journal of Pavement Engineering* 22(6), 1840–1850. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1825711>
- Shang, J. (1998). Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drains. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 491-499.
- Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., & Singh, T. N. (2018). Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.012>
- Shon, C. S., Saylak, D., & Mishra, S. K. (2010). Combined Use of Calcium Chloride and Fly Ash in Road Base Stabilization. *Transportation Research Record*, 2186(1), 120–129. <https://doi.org/10.3141/2186-13>
- Simpson, W. E. (1934). *Foundation experiences with clay in Texas*. Civil Engineering, ASCE.
- Singh, J., Singh, U. K., & Singh, R. K. (2020). Stabilization of clayey soil using gypsum and calcium chloride. *The International Journal of Recent Technology and Engineering*, 9(2), 668–673.

- <https://doi.org/10.35940/ijrte.B3828.079220>
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., & Bhaskar Raju, K. V. (2000). Role of amount and type of clay in the lime stabilization of soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 4(1), 37–45. <https://doi.org/10.1680/grim.2000.4.1.37>
- Sridharan, A., Rao, S. M., & Murthy, N. S. (1986). A rapid method to identify clay type in soils by the free–swell technique. *Geotechnical Testing Journal*, 9(4), 198–203. <https://doi.org/10.1520/GTJ10693J>
- Tajudin, S. A. A., Marto, A., Azmi, M. A. M., Madun, A., & Abidin, M. H. Z. (2015). Utilization of sugarcane bagasse ash for stabilization/solidification of lead–contaminated soils. *Jurnal Teknologi*, 77(11), 119–125. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6430>
- Teng, F., Chien, S.–C., & Sie, Y.–C. (2022). Electroosmotic treatment of soft clays through the injection of microorganism solutions. *Journal of GeoEngineering*, 17(2), 113–121. [https://doi.org/10.6310/jog.202206_17\(2\).5](https://doi.org/10.6310/jog.202206_17(2).5)
- Tiwari, S. K., & Kumawat, N. K. (2014). Recent developments in ground improvement techniques – A review. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2, 67–77.
- Turkoz, M., Savas, H., Acaz, A., & Tosun, H. (2014). The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. *Applied Clay Science*, 101, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.08.007>
- Uo, M., Wada, T., & Sugiyama, T. (2015). Applications of X–ray fluorescence analysis (XRF) to dental and medical specimens. *Japanese Dental Science Review*, 51(1), 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2014.07.001>
- Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *Open Geosciences*, 13(1), 197–218. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0145>
- Vakili, M. V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., & Keramatikerman, M. (2016). Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag. *Applied Clay Science*, 124, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Vinod, B. R., Shobha, R., Varun Purad, A. T., & Mansi, S. (2021). Analysis of engineering properties of expansive soil treated with ferric chloride and bagasse ash. *International Journal of Contemporary Architecture The– New Arch*, 8(2), 460–467.
- Vukićević, M., Marjanović, M., Pujević, V., & Jocković, S. (2019). The alternatives to traditional materials for subsoil stabilization and embankments. *Materials*, 12(18), 3018. <https://doi.org/10.3390/ma12183018>
- Vukićević, M., Pujević, V., Marjanović, M., Jocković, S., & Maraš Dragojević, S. (2015). Stabilization of fine-grained soils with fly ash. *Građevinar*, 67(8), 761–770. <https://doi.org/10.14256/JCE.1281.2014>
- Yi, Y., Liska, M., Unluer, C., & Al–Tabbaa, A. (2013). Carbonating magnesia for soil stabilization, *Canadian Geotechnical Journal*, 50, 899–905. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0286>
- Yuan, J., & Hicks, M. A. (2013). Large deformation elastic electro–osmosis consolidation of clays. *Computers and Geotechnics*, 54, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.05.012>
- Zafirovski, Z., Markovski, M., Ognjenović, S., Gacevski, V., Nedevska, I., & Ristov, R. (2024). Subbase stabilization with fly ash. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering*, 22(1), 79–88. <https://doi.org/10.2298/FUACE230630033Z>
- Zhao, G., Yan, H., Yan, Y., Gao, S., Fan, D., He, Y., & Wang, Y. (2020). Experimental study on the dynamic properties of lime–solidified soft soil under cyclic loading. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05215-7>
- Zhang, H., Ma, Q., Su, W., & Hu, H. (2021). On the dewatering of electroosmotic soil using intermittent current incorporated with calcium chloride. *Environmental Technology*, 42(3), 468–478.

<https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1634154>

Zumrawi, M. M., Mahjoub, A. M., & Alnour, I. M. (2016). Effect of some chloride salts on swelling properties of expansive soil. *The University of Khartoum Engineering Journal*, 6(2), 35–41. <https://doi.org/10.53332/kuej.v6i2.1005>

Институт за стандардизацију Србије - SRPS EN ISO 17892-3:2016. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 3: Одређивање запреминске масе чврстих честица.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 17892-4:2017. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 4: Određivanje granulometrijskog sastava.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 14688-2:2018. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 2: Принципи класификације.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN 13286-2:2012/AC:2013 Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине — Део 2: Методе испитивања за лабораторијску референтну запреминску масу и садржај воде – Збијање по Проктору .

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 17892-12:2018/A1:2022. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 12: Одређивање граница течења и пластичности тла.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 17892-5:2017. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 5: Едометарско испитивање степенастим оптерћењем.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN 13286-47:2022. Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине – Део 47: Методе испитивања за одређивање калифорнијског индекса носивости, непосредног индекса носивости и линеарног бубрења.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 17892-7:2018. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 7: Испитивање једнооксијалне чврстоће при притиску.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 17892-11:2019. Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 11: Испитивање пропустљивости.

Институт за стандардизацију Србије – SRPS EN ISO 17892-10:2019 Геотехничко истраживање и испитивање – Лабораторијско испитивање тла – Део 10: Испитивање директног смицања.

Технички услови за грађење путева у Републици Србији, ЈП „Путеви Србије“, 2012. год. Доступни на: <http://www.putevi-srbije.rs> (Ажурирана верзија 2018 године).

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

"Прилог развоју методе побољшања геотехничких карактеристика тла применом хемијског електрокинетичког третмана"

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивала на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредила ауторска права, нити злоупотребила интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 27.06 2025

Потпис аутора дисертације:

Немања М. Маринковић

(Име, средње слово и презиме)

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

"Прилог развоју методе побољшања геотехничких карактеристика тла применом хемијског електрокинетичког третмана"

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предала за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 27.06.2025

Потпис аутора дисертације:

Немања М. Маринковић

(Име, средње слово и презиме)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

"Прилог развоју методе побољшања геотехничких карактеристика тла применом хемијског електрокинетичког третмана"

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 27.06.2025

Потпис аутора дисертације:

Немања М. Маринковић

(Име, средње слово и презиме)