

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Ksenija S. Đoković

**GEOMEHANIČKA SVOJSTVA  
ERODIBILNOG I DISPERZIVNOG  
FINOZRNOG TLA**

doktorska disertacija

Beograd, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Ksenija S. Đoković

**GEOMECHANICAL PROPERTIES OF  
ERODIBLE AND DISPERSIVE  
FINE-GRAINED SOILS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

**Mentor:** dr Dragan Milovanović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
uža naučna oblast: petrologija

**Članovi komisije:** dr Laslo Čaki, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
uža naučna oblast: inženjerska geologija, geomehanika i  
geotehničko inženjerstvo

dr Gordana Hadži-Niković, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
uža naučna oblast: inženjerska geologija, geomehanika i  
geotehničko inženjerstvo

dr Nenad Šušić, naučni savetnik  
Institut za ispitivanje materijala IMS, Beograd  
uža naučna oblast: geotehnika i fundiranje

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

## **ZAHVALNOST**

*Ova teza urađena je na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu pod rukovodstvom dr Dragana Milovanovića, redovnog profesora RGF. Profesoru Milovanoviću zahvaljujem na korisnim savetima i sugestijama tokom izrade doktorske disertacije.*

*Ogromnu zahvalnost dugujem dr Laslo Čakiju, vanrednom profesoru RGF, koji je bio uključen u sve faze izrade disertacije od primarne ideje, izrade eksperimentalne opreme, definisanja uslova izvođenja eksperimenta i interpretaciji rezultata, čime je značajno doprineo izradi i konačnom izgledu rada. Njegovo znanje, stručnost i bezrezerna podrška umnogome su doprineli kvalitetu ove teze.*

*Zahvalnost dugujem i dr Gordani Hadži-Niković vanrednom profesoru RGF i dr Slobodanu Ćoriću rednom profesoru u penziji, na korisnim savetima pri konačnom formiranju ove teze; dr Nenadu Šušić, naučnom savetniku Instituta IMS na dugogodišnjoj stručnoj i naučnoj saradnji i prijateljskoj podršci.*

*Celokupna eksperimentalna istraživanja urađena su u Laboratoriji za puteve i geotehniku, Instituta IMS i ovom prilikom se zahvaljujem svim svojim kolegama na pomoći u toku izrade doktorske disertacije. Posebnu zahvalnost dugujem kolegi Željku Mirčetiću, građ.inž. na velikoj pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dela doktorske disertacije. Njegovo veliko stručno iskustvo i zapažanja prilikom izvođenja eksperimentalnih ispitivanja bili su mi od velike koristi. Zahvaljujem se i kolegi Zlatomiru Ivanoviću, geologu koji mi je svojim prebogatim iskustvom i stručnim sugestijama ukazao na značaj ispitivane problematike. Takođe se zahvaljujem i kolegama iz Radionice Instituta IMS koji su mi pomogli pri izradi i modifikaciji pinhole aparata.*

*Posebnu zahvalnost dugujem Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, koje je finansirajući projekat tehnološkog razvoja TR 36014, značajno pomoglo izradu ove doktorske disertacije.*

*Ogromnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima što su sve ove godine verovali u mene. I na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj porodici Katarini, Mihailu i Vladi na ljubavi, strpljenju i razumevanju kojom su mi olakšali izradu ove doktorske disertacije.*

*“Otkrivanje je važnije od otkrića. Trenutak otkrića prvog odgovora nije ni blizu toliko važan koliko put do njega.”*

*Uroš Petrović*

## **GEOMEHANIČKA SVOJSTVA ERODIBILNOG I DISPERZIVNOG FINOZRNOG TLA**

### **Rezime:**

Disperzivna tla su posebna vrsta finozrnog tla, kod kojih usled njihovog hemijskog i mineraloškog sastava, kao i prirode fluida koji ispunjava porni prostor, dolazi do slabljenja strukturalnih veza i odvajanja pojedinih čestica iz strukture, koje disperguju i deflokulišu. Ispiranjem i iznošenjem čestica iz strukture, disperzija se sa mikro nivoa postepeno razvija na makro nivo što za posledicu ima formiranje posebnih pora u tlu, formiranje erozioni kanali i pojave unutrašnje erozije u tlu.

Primena finozrnog disperzivnog tla za izgradnju nasutih geotehničkih objekata: nasutih zemljanih brana i nasipa (hidrotehničkih ili u putogradnji), može prouzrokovati ozbiljne inženjerske probleme, ukoliko ovakvo tlo nije identifikованo ili je neogovarajuće upotrebljeno tj. ugrađeno. Disperzivne gline se ne mogu jednoznačno prepoznati vizuelno identifikacionim opitima na terenu, ili uobičajenim standardnim metodama koje se koriste za identifikaciju tla u geomehaničkoj praksi.

U disertaciji su prikazani rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja identifikacije i klasifikacije erodibilnog disperzivnog finozrnog tla. Ispitivanja su sprovedena metodama: grudvice tla (crumb test), duplog hidrometrisanja - (SCS opit) i strujanja vode kroz formiranu cilindričnu poru (pinhole opit), na uzorcima: prašinastih glina iz jezgra nasute brane "Rovni", lesa sa različitim lokacija (Zemun, Bežanijska kosa, Titel, Kelebija, Srbobran, Slankamen, Ruma, Mali Iđoš) i kaolinitske peskovite gline ležišta Grabež-Arandelovac.

Ispitivanja pinhole opitom daju vrlo jasne rezultate pri klasifikaciji disperzivnog tla klase D1 i D2 i nedisperzivnog tla klase ND1 i ND2. Kod tla klase srednje disperzivnosti ND3 i ND4 mogu se javiti nedoumice u klasifikaciji.

U cilju poboljšanja svojstva tla razmatran je uticaj zbijenosti tla na disperzivnost. Ispitivanja disperzivnosti pinhole metodom, na uzorcima pripremljenim sa različitim

stepenom zbijenosti Sz=90, 92, 95, 98, 100 i 102%, su pokazala da stepen zbijenosti nema značajnijeg uticaja na ponašanje - klasu disperzivnosti.

Kako disperzivna tla predstavljaju nepovoljna tla za ugradnju/izgradnju nasutih objekata analizirana je i mogućnost poboljšanja tla dodavanjem elektrofilterskog pepela. Ispitivanjima sprovedenim pinhole opitom na uzorcima disperzivnog tla dodavanjem 10, 30 i 50% pepela, postignuto je željeno ponašanje, ona su postala nedisperzivan.

**Ključne reči:** disperzivne gline, erozija glina, opiti disperzivnosti, opit grudvice, opit duplog hidrometrisanja, pinhole opit, hemijska ispitivanja, nasute brane.

**Naučna oblast:** Geološko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Inženjerska geologija, geomehanika i geotehničko inženjerstvo

**UDK broj:** 624.131.22/.37:55(043.3)

## **GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ERODIBLE AND DISPERSIVE FINE-GRAINED SOILS**

### **Abstract:**

Dispersive soils are considered as a special type of fine - grained soils, in which, due to their chemical and mineralogical composition, and the nature of the fluid that fills the pore space, the structural bonds may weaken and separation of the particles from the structure, i.e dispersing and deflocculating, may occur. With leakage of particles from the structure, the dispersion from the micro level gradually spreads to the macro level, which results in the formation of special pores in the soil, the formation of erosion channels and the development of internal erosion in the soil.

Using a fine-grained dispersive soil for building geotechnical earth objects, e.g. earthfill dams and embankments (in the field of hydro-engineering or road construction) may cause serious engineering problems, if such soils have not been identified or have been used inappropriately during construction. Dispersive clay can not be unambiguously recognized using visual identification experiments on the field, or with the standard methods typically used for the identification of soil in geomechanical practice.

The thesis presents the results of geomechanical laboratory tests of identification and classification of erodible dispersive fine-grained soils. Tests were conducted using the following methods: the crumb test, the double hydrometer test (SCS test), and the flow of water through the formed cylindrical pore - the pinhole test.

Tests were conducted on samples: sandy clay embankment dams of "Rovni", loess from different locations (Zemun, Novi Beograd, Titel, Kelebija, Srbobran, Slankamen, Ruma, Mali Iđoš) and kaolinite sandy clay deposits Grabež - Arandželovac.

Pinhole test gives very clear results in terms of the classification of dispersive soils class D1 and D2, as well as of non-dispersive soil classes ND1 and ND2. However, tests have shown that in the class of medium-dispersible soil ND3 and ND4 misleading conclusions may arise in terms of classification.

In order to improve soil properties, special consideration was given to the influence of soil compaction to dispersion properties. However, dispersion tests obtained with the use of the pinhole method at different degrees of compaction Sz = 90, 92, 95, 98, 100 and 102%, showed that the degree of compaction has no significant effect on the soil behavior, i.e. its class of dispersion. As dispersive soils are unfavorable soils for construction of earth objects, the ability to improve the soil by adding fly ash was also analyzed. Tests conducted on samples of dispersive soils in course of pinhole experiment by adding 10, 30 and 50% fly ash, led to reaching the desired behavior of soil, i.e. the soil became un-dispersive.

**Keywords:** dispersive clays, erosion of clay, dispersible test, crumb test, double hydrometer test, pinhole test, chemical tests.

**Scientific field:** Geological Engineering

**Narrower scientific field:** Engineering Geology, Geomechanics and Geotechnical Engineering

**UDC:** 624.131.22/.37:55(043.3)

**S A D R Ž A J****SPISAK SLIKA**

x-xviii

**SPISAK TABELA**

xix-xxv

**POGLAVLJE 1. UVOD****1**

1.1	Predmet i cilj istraživanja	4
1.2	Metode istraživanja	5
1.3	Primena rezultata istraživanja	6
1.4	Organizacija disertacije	7

**POGLAVLJE 2. MINERALOŠKA I STRUKTURNΑ SVOJSTVA****FINOZRNOG I DISPERZIVNOG TLA** **9**

2.1	Osnovni elementi strukture minerala glina	9
2.2	Osnovni minerali glina	11
2.2.1	Kaolinit $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	12
2.2.2	Monmorijonit $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	13
2.2.3	Ilit $(\text{K},\text{H}_2\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$	15
2.3	Ponašanje minerala glina u prisustvu vode	16
2.3.1	Adsorbcija vode	16
2.3.2	Katjonska izmena	19
2.3.3	Formiranje dvojnog difuznog sloja	21
2.4	Mehanizam disperzije glinovitog finozrnog tla	24
2.5	Struktura finozrnog tla	27
2.5.1	Struktura glinovitog tla	27
2.5.1.1	Struktura glinovitog tla po Bergaya-i i Lagaly-i (2013)	27
2.5.1.2	Struktura glinovitog tla po van Olphen-u (1963)	29

2.5.2 Struktura drugog finozrnog kohezivnog tla	31
2.5.2.1 Strukture finozrnog kohezivnog tla	
prema Yong-u i Sheeran-u (1973) i Pusch-u (1973)	31
2.5.2.2 Strukture finozrnog kohezivnog tla prema	
Collins-u i McGown-u (1974)	33
2.5.3 Struktura lesa	35
2.6 Zaključak	36

**POGLAVLJE 3. UNUTRAŠNJA EROZIJA U NASUTIM  
HIDROTEHNIČKIM OBJEKTIMA** 38

3.1 Podela unutrašnje erozije u nasutim branama	
prema mestu nastanka	39
3.2 Podela unutrašnje erozije u nasutim branama	
prema mehanizmu nastanka	41
3.2.1 Koncentrisana erozija	41
3.2.2 Regresiona erozija	42
3.2.3 Kontaktna erozija	42
3.2.4 Sufozija	43
3.3 Mehanizmi razvoja procesa unutrašnje erozije u	
nasutim branama	44
3.3.1 Model nastanka unutrašnje erozije kroz nasip brane	44
3.3.2 Model nastanka unutrašnje erozije kroz podlogu brane	45
3.4 Vidovi unutrašnje erozije u nasutim branama	48
3.4.1 Fluidizacija	49
3.4.2 Sufozija	49
3.4.3 Unutrašnja sufozija	51
3.4.4 Regresiona erozija	51
3.4.5 Erozija i ispiranje čestica tla iz pukotina i kaverni	52
3.4.6 "Progresivna" erozija	52

3.4.7	Rastvaranje	52
3.4.8	Disperzivnost	53
3.5	Zaključak	53
<b>POGLAVLJE 4. OPITI ZA IDENTIFIKACIJU I KLASIFIKACIJU DISPERZIVNOG FINOZRNOG TLA</b>		<b>55</b>
4.1	Opit grudvice	55
4.2	Opit duplog hidrometrisanje (SCS - <i>Soil Conservation Service</i> opit)	58
4.3	Hemiske metode odredivanja disperzivnosti finozrnog tla	60
4.4	Pinhole opit - opit veštački formirane pore	61
4.5	Zaključak	66
<b>POGLAVLJE 5. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA</b>		<b>67</b>
5.1	Opit grudvice tla	67
5.2	Opit duplog hidrometrisanja	70
5.3	Ispitivanja u pinhole aparatu	70
5.3.1	Priprema, formiranje i ugradnja uzorka	77
5.3.2	Konstrukcija modifikovanog pinhole aparata	79
5.3.3	Izvođenje opita i interpretacija rezultata ispitivanja	81
5.4	Ispitivanje mineraloškog sastava	86
5.5	Ispitivanje pH vrednosti	87
<b>POGLAVLJE 6. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA ISPITIVANJA</b>		<b>88</b>
6.1	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak U-1 Rovni	90
6.2	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak U-2 Rovni	98
6.3	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak R-1 Ruma	106

6.4	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak T-1 Titel	114
6.5	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorka K-1 Kelebija	122
6.6	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak ZGG-1 Zemun	130
6.7	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorka MI-1 Mali Iđoš	138
6.8	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak KG-A-1 Aranđelovac	146
6.9	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SV-1 Slankamen	154
6.10	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SV-6 Slankamen	162
6.11	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SJ-1 Srbobran	170
6.12	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SJ-2 Srbobran	176
6.13	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SJ-4 Srbobran	182
6.14	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak BK-1 Bežanijska kosa	190
<b>POGLAVLJE 7. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA</b>		<b>198</b>
7.1	XRD mineraloška ispitivanja	199
7.2	Geochemijska ispitivanja	199
7.3	Identifikaciono – klasifikaciona ispitivanja sa aspekta geomehanike	203
7.4	Određivanje disperzivnosti finozrnog tla	206
7.4.1	Indirektne metode ispitivanja	206
7.4.1.1	Rezultati opita grudvice	206
7.4.1.2	Rezultati opita duplog hidrometrisanja	209
7.4.1.3	Zaključak	211
7.5	Direktne metode ispitivanja	212
7.5.1	Rezultati dobijeni pinhole opitom	212
7.5.2	Zaključak	217

**POGLAVLJE 8. MELIORATIVNE MERE ZA  
POBOLJŠANJE DISPERZIVNIH  
SVOJSTAVA TLA** **218**

8.1	Poboljšanje disperzivnog tla primenom elektrofilterskog pepela	221
8.2	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 90:10 uzorak LP-10	227
8.3	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30 uzorak LP-30	234
8.4	Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 50:50 uzorak LP-50	241
8.5	Zaključna razmatranja dobijenih rezultata poboljšanja disperzivnog tla pepelom	248

**POGLAVLJE 9. ZAKLJUČAK** **254**

**LITERATURA** **258**

**BIOGRAFIJA AUTORA**

**PRILOZI**

Prilog 1	Izjava o autorstvu
Prilog 2	Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada
Prilog 3	Izjava o korišćenju

## **SPISAK SLIKA**

---

### **Poglavlje 1. UVOD**

---

- Slika 1.1. Disperzni sistem
- Slika 1.2. Oštećenja kosine nasute brane izgrađene od disperzivnih glina (Fell.R, Soil Conservation Service of NSW)
- Slika 1.3. Lom u kosini nasute brane izgrađene od disperzivnih glina  
Ramsgate, Natal, Južna Afrika
- Slika 1.4. Procurivanje u nasutoj brani Blackman Creek – Tunbridge izgrađenoj od disperzivnih glina (Kim Eiszele, State of the Environment Tasmania 2009, The Mercury)

---

### **Poglavlje 2. MINERALOŠKA I STRUKTURNΑ SVOJSTVA FINOZRNOG I DISPERZIVNOG TLA**

---

- Slika 2.1. Si tetraedar i T - sloj (Mitchell, 1976)
- Slika 2.2. Al oktaedat i O – sloj (Mitchell, 1976)
- Slika 2.3. Mineral kaolinit a) struktura, b) šematski dijagram strukture kaolinita (Mitchell, 1976)
- Slika 2.4. SEM izgled kristala kaolinita  
([http://www.jevel.ru/stone/kamen\\_kaolinit.html](http://www.jevel.ru/stone/kamen_kaolinit.html))
- Slika 2.5. Mineral monmorijonita a) struktura, b) šematski dijagram strukture monmorijonita (Mitchell, 1976)
- Slika 2.6. SEM izgled kristala monmorijonita ([www.webmineral.com](http://www.webmineral.com))
- Slika 2.7. Mineral ilita a) struktura, b) šematski dijagram strukture ilita (Mitchell, 1976)
- Slika 2.8. SEM izgled kristala ilita ([webmineral.com](http://www.webmineral.com))

- Slika 2.9. Različiti mogući mehanizmi adsorbcije vode glinenom česticom  
a) vodonične veze, b) jonska hidratacija, c) osmoza, d) dipolno privlačenje (Mitchell, 1976)
- Slika 2.10. Adsorcija vode na površini glinene čestice – vodonične veze  
(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)
- Slika 2.11. Adsorcija vode na površini glinene čestice – jonska hidratacija  
(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)
- Slika 2.12. Relativna veličina sloja adsorbovane vode (vezane vode) na primeru Na monmorijonita i Na kaolinita (Holtz i Kovacs, 1981; Lamb, 1958)
- Slika 2.13. Raspored jona na površini glinene čestice prema konceptu dvojnog difuznog sloja (Mitchell, 1976)
- Slika 2.14. Odnos mineralne čestice i porne vode: difuzni dvojni sloj  
(Lamb i Whitman, 1969; Čaki 1996)
- Slika 2.15. Tipične debljine dvojnog difuznog sloja kaolinita i monmorijonita  
(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)
- Slika 2.16. Zavisnost elektičnog potencijala sa udaljenošću od površine glinene čestice (Mitchell, 1976)
- Slika 2.17. Šematski prikaz sila u dvojnom difuznom sloju
- Slika 2.18. Međusobni uticaj odbojnih i privlačnih sila između dve čestice  
a) odbojne sile, b) privlačne sile, c) zbir sila; (Mitchell, 1976)
- Slika 2.19. Uticaj karakteristika sistema na dvojni difuzni sloj a) koncentracija elektrolita, b) valentnost jona i c) dielektirična konstanta (Lambe i Whitman, 1969)
- Slika 2.20. Prikaz morfologije glina i formiranja pora: a) sloj b) čestica c) agregat d) skupina agregata( Bergaya, Lagaly 2013)
- Slika 2.21. Izgled glinene čestice
- Slika 2.22. Šematski prikaz slaganja čestica: a) agregatna struktura površina-površina, b) flokulisana struktura ivica-ivica, c) flokulisana struktura površina – ivica, d) disperzna struktura

- Slika 2.23. Modeli skupina čestica u glinenoj suspenziji (van Olphen, 1963)
- Slika 2.24. Šematski dijagram mikrostrukture i makro strukture tla prema Yong-u i Sheeran-u (1973) i Pusch-u (1973) (preuzeto iz Holtz-a i Kovacs-a, 1981)
- Slika 2.25. Šematski prikaz rasporeda elementarnih čestica (Collins i McGown, 1974; preuzeto iz Holtz-a i Kovacs-a, 1981)
- Slika 2.26. Šematski prikaz grupacija čestica po Collins-u i McGown-u, 1974, (preuzeto iz Holtz-a i Kovacs-a, 1981)
- Slika 2.27. Šematski prikaz idealizovane strukture lesa po Dudley-u 1970 (preuzeto od G. Marković, 1987): a) glinena komponenta kao omotač krupnozrnijih čestica, b) glinena komponenta kao grozd (most) na mestu spajanja sa krupnozrnijim česticama, c) kombinacija a i b
- Slika 2.28. Algoritam nastanka disperzivne strukture tla

---

### **Poglavlje 3. UNUTRAŠNJA EROZIJA U NASUTIM HIDROTEHNIČKIM OBJEKTIMA**

---

- Slika 3.1. Unutrašnja erozija kroz nasip nasute brane (USBR, 2012)
- Slika 3.2. Unutrašnja erozija kroz podlogu brane (USBR, 2012)
- Slika 3.3. Unutrašnja erozija duž cevovoda (Richards, 2012)
- Slika 3.4. Unutrašnja erozija nasipa (ispiranje čestica u podlogu) (USBR, 2012)
- Slika 3.5. Unutrašnja erozija duž kontakta nasip - tlo (USBR, 2012)
- Slika 3.6. Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledica ispiranja čestica iz jezgra usled koncentrisanog curenja  
(Foster 1999; Fell i dr. 2005)
- Slika 3.7. Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledice ispiranja čestica iz jezgra usled pojave regresione erozije  
(Foster 1999; Fell i dr. 2005)
- Slika 3.8. Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledice ispiranja

- čestica iz podloge usled regresione erozije (Foster 1999; Fell i dr. 2005)
- Slika 3.9. Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani prouzrokovanih ispiranjem čestica iz jezgra u podlogu usled regresione erozije (Foster 1999; Fell i dr. 2005.)
- Slika 3.10. Šema mogućih vidova pojave unutrašnje erozije u nasutoj brani (Schuler i Brauns 1997, preuzeto iz Blais-a, 2005)
- Slika 3.11. Fluidizacija (Richards, 2012)
- Slika 3.12. Sufozija (Richards, 2012)
- Slika 3.13. Tipovi sufozije (Kezdi, 1979)
- Slika 3.14. Regresiona erozija kroz nasip brane (Richards, 2012)
- Slika 3.15. Ispiranje čestica tla iz pukotina i kaverni (Pham, 2008)
- Slika 3.16. Pojava disperzivnosti u nasipu brane (Richards, 2012)

---

#### **Poglavlje 4. OPITI ZA IDENTIFIKACIJU I KLASIFIKACIJU DISPERZIVNOG FINOZRNOG TLA**

- Slika 4.1. Klase disperzivnosti tla (Emerson, 1967)
- Slika 4.2. Fotografija reakcija tla za određene klase disperzivnosti ([http://www.agric.wa.gov.au/PC\\_93842.html](http://www.agric.wa.gov.au/PC_93842.html))
- Slika 4.3. Procenat disperzivnosti određen opitom duplog hidrometrisanja
- Slika 4.4. Disperzioni potencijal (Sherard i dr. 1976a)
- Slika 4.5. Klasifikacija disperzivnog tla prema SAR, TDS i sadržaju natrijuma (US Bureau of Reclamation, 1991)
- Slika 4.6. Original skica Sherad-ovog aparata (1976a)
- Slika 4.7. Kriterijumi klasifikacije disperzivnog tla prema postupku C (ASTM D 4647-93)

---

#### **Poglavlje 5. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA**

- 
- Slika 5.1. Pripremljeni uzorci za opit grudvice

- 
- Slika 5.2. Ispitivanje opitom grudvice
  - Slika 5.3. Zapisnik rezultata ispitivanja opitom grudvice
  - Slika 5.4. Klase disperzivnosti tla prema opitu grudvice
  - Slika 5.5. Izgled pinhole aparata
  - Slika 5.6. Presek 1-1 pihole aparata
  - Slika 5.7. Ulazni poklopac pinhole aparata
  - Slika 5.8. Ulazni poklopac pinhole aparata, presek 1-1
  - Slika 5.9. Izlazni poklopaca pinhole aparata
  - Slika 5.10. Delovi opreme za zbijanje uzorka
  - Slika 5.11. Priprema uzorka za zbijanje i zbijanje uzorka
  - Slika 5.12. Cilindar sa ugrađenim uzorkom i detaljima
  - Slika 5.13. Izgled pinhole aparata sa pratećom opremom
  - Slika 5.14. Detalj aparat sa ugrađenim uzorkom
  - Slika 5.15. Delovi pinhole aparata
  - Slika 5.16. Izgled ugradenog uzorkom sa pripremljenom iglom za formiranje pore
  - Slika 5.17. Algoritam ispitivanja disperzivnosti u pinhole aparatu (BS 1377-5:1990)
  - Slika 5.18. Obrada uzorka nakon ispitivanja
  - Slika 5.19. Zapisnik rezultata ispitivanja pinhole opitom

---

## Poglavlje 6. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA ISPITIVANJA

---

- Slika 6.1. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-1 Rovni
- Slika 6.2. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak U-1 Rovni
- Slika 6.3. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak U-1 Rovni
- Slika 6.4. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak U-1 Rovni
- Slika 6.5. Rezultati XRD analize za uzorak U-1 Rovni
- Slika 6.6. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-2 Rovni

- 
- Slika 6.7. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak U-2 Rovni
  - Slika 6.8. Opit duplog hidrometrisanja tla za uzorak U-2 Rovni
  - Slika 6.9. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak U-2 Rovni
  - Slika 6.10. Rezultati XRD analize za uzorak U-2 Rovni
  - Slika 6.11. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka R-1 Ruma
  - Slika 6.12. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak R-1 Ruma
  - Slika 6.13. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak R-1 Ruma
  - Slika 6.14. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak R-1 Ruma
  - Slika 6.15. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka T-1 Titel
  - Slika 6.16. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak T-1 Titel
  - Slika 6.17. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak T-1 Titel
  - Slika 6.18. Rezultati XRD analize za uzorak T-1 Titel
  - Slika 6.19. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka K-1 Kelebija
  - Slika 6.20. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak K-1 Kelebija
  - Slika 6.21. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak K-1 Kelebija
  - Slika 6.22. Rezultati XRD analize za uzorak K-1 Kelebija
  - Slika 6.23. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka ZGG-1 Zemun Gornji grad
  - Slika 6.24. Granulometrijski sastav opita duplog hidrometrisanja tla za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji grad
  - Slika 6.25. Rezultati XRD analize za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji grad
  - Slika 6.26. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka MI-1 Mali Iđoš

- Slika 6.27. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak MI-1 Mali Iđoš
- Slika 6.28. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak MI-1 Mali Iđoš
- Slika 6.29. Rezultati XRD analize za uzorak MI-1 Mali Iđoš
- Slika 6.30. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka KGA-1 Aranđelovac
- Slika 6.31. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak KGA-1 Aranđelovac
- Slika 6.32. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak KGA-1 Aranđelovac
- Slika 6.33. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak KGA-1 Aranđelovac
- Slika 6.34. Rezultati XRD analize za uzorak KGA-1 Aranđelovac
- Slika 6.35. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-1 Slankamen
- Slika 6.36. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SV-1 Slankamen
- Slika 6.37. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak SV-1 Slankamen
- Slika 6.38. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak SV-1 Slankamen
- Slika 6.39. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-6 Slankamen
- Slika 6.40. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SV-6 Slankamen
- Slika 6.41. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak SV-6 Slankamen
- Slika 6.42. Zavisnosti protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak SV-6 Slankamen
- Slika 6.43. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-1 Srbobran
- Slika 6.44. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-1 Srbobran

- Slika 6.45. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-2 Srbobran
- Slika 6.46. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-2 Srbobran
- Slika 6.47. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-4 Srbobran
- Slika 6.48. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-4 Srbobran
- Slika 6.49. Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak SJ-4 Srbobran
- Slika 6.50. Rezultati XRD analize za uzorak SJ-4 Srbobran
- Slika 6.51. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka BK-1 Bežanijska kosa
- Slika 6.52. Dijagram granulometrijskog sastava za opit DHT za uzorak BK-1 Bežanijska kosa
- Slika 6.53. Zavisnosti protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak BK-1 Bežanijska kosa
- Slika 6.54. Rezultati XRD analize za uzorak BK-1 Bežanijska kosa

## **Poglavlje 7. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA**

---

- Slika 7.1. Plastičnost sa okvirnim podacima o koloidnoj aktivnosti glinenih minerala (dopunjeno prema Holtz-u i Kovacs- u, 1981.) i prikazom ispitivanih uzoraka
- Slika 7.2. Opit grudvice - reakcija uzorka U-1 nakon 60 min, pri prirodnoj vlažnosti i zbijenosti
- Slika 7.3. Odnosa sadržaja glinovite frakcije i procenta disperzivnosti
- Slika 7.4. Zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND1
- Slika 7.5. Zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla

klase ND 2 i ND2/ND3

- Slika 7.6 Zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND3
- Slika 7.7. Zavisnosti zapremine protekle vode u vremenu ispitivanja za disperzivno tlo klase D1, pri hidrauličkom nivu H=50 mm

#### **Poglavlje 8. MELIORATIVNE MERE ZA POBOLJŠANJE DISPERZIVNIH SVOJSTAVA TLA**

- 
- Slika 8.1. Granulometrijski sastav uzorka deponijskog pepela TENT A
- Slika 8.2. Odnos suve gustine i vlažnosti za uzorak deponijskog pepela TENT A
- Slika 8.3 Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10
- Slika 8.4. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja, uzorak LP-10
- Slika 8.5. Opit duplog hidrometrisanje tla uzorak LP-10
- Slika 8.6. Granulometrijski sastav mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak PL-30
- Slika 8.7. Granulometrijskog sastava za opit duplog hidrometrisanja, uzorak LP-30
- Slika 8.8. Opit duplog hidrometrisanje tla, uzorak LP-30
- Slika 8.9. Granulometrijski sastav mešavine lesa i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50
- Slika 8.10. Granulometrijskog sastava za opit duplog hidrometrisanja, uzorak LP-50
- Slika 8.11. Opit duplog hidrometrisanje tla, uzorak LP-50
- Slika 8.12. Zavisnosti protoka i hidrauličkog nivoa za stepen zbijenosti Sz=100%
- Slika 8.13. Procenat disperzivnost (PD) u zavisnosti od količine korišćenog pepela na osnovu opita duplog hidrometrisanja
- Slika 8.14. Granulometrijski sastav uzorka pepela, lesa i mešavina lesa i pepela
- Slika 8.15. Uticaj % pepela na smanjenje klase disperzivnosti određene pinhole opitom

## **SPISAK TABELA**

---

### **Poglavlje 2. MINERALOŠKA I STRUKTURNA SVOJSTVA FINOZRNOG I DISPERZIVNOG TLA**

---

Tabela 2.1. Važnije osobine najčešćih minerala gline  
(Čaki, 1996; prema Mitchell-u, 1976))

---

### **Poglavlje 4. OPITI ZA IDENTIFIKACIJU I KLASIFIKACIJU DISPERZIVNOG FINOZRNOG TLA**

---

Tabela 4.1. Klasifikacija tla na osnovu rezultata pinhole opita, postupak A i B  
(ASTM D 4647-93)

---

### **Poglavlje 6. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA ISPITIVANJA**

---

- Tabela 6.1. Spisak ispitivanih uzoraka tla
- Tabela 6.2. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-1 Rovni
- Tabela 6.3. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka U-1 Rovni
- Tabela 6.4. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzorak U-1 Rovni
- Tabela 6.5. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak U-1 Rovni
- Tabela 6.6. Izgled uzorka U-1 Rovni nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.7. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka U-1 Rovni
- Tabela 6.8. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-2 Rovni

- Tabela 6.9. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka U-2 Rovni
- Tabela 6.10. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak U-2 Rovni
- Tabela 6.11. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak U-2 Rovni
- Tabela 6.12. Izgled uzorka U-2 Rovni nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.13. Rezultati ispitivanja mineraloški sastav uzorka U-2 Rovni
- Tabela 6.14. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka R-1 Ruma
- Tabela 6.15. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka R-1 Ruma
- Tabela 6.16. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak R-1 Ruma
- Tabela 6.17. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak R-1 Ruma
- Tabela 6.18. Izgled uzorka R-1 Ruma nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.19. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka T-1 Titel
- Tabela 6.20. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka T-1 Titel
- Tabela 6.21. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak T-1 Titel
- Tabela 6.22. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak T-1 Titel
- Tabela 6.23. Izgled uzorka T-1 Titel nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.24. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka T-1 Titel
- Tabela 6.25. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka K-1 Kelebija
- Tabela 6.26. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka K-1 Kelebija
- Tabela 6.27. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak K-1 Kelebija
- Tabela 6.28. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak K-1 Kelebija
- Tabela 6.29. Izgled uzorka K-1 Kelebija, nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.30. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava K-1 Kelebija
- Tabela 6.31. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad

- Tabela 6.32. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad
- Tabela 6.33. Rezultati opita duplog hidrometrisanja tla za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad
- Tabela 6.34. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad
- Tabela 6.35. Izgled uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad, nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.36. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad
- Tabela 6.37. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka MI-1 Mali Iđoš
- Tabela 6.38. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka MI-1 Mali Iđoš
- Tabela 6.39. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak MI-1 Mali Iđoš
- Tabela 6.40. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak MI-1 Mali Iđoš
- Tabela 6.41. Izgled uzorka MI-1 Mali Iđoš nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.42. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka MI-1 Mali Iđoš
- Tabela 6.43. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka KGA-1 Aranđelovac
- Tabela 6.44. Rezutati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka KGA-1 Aranđelovac
- Tabela 6.45. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak KGA-1 Aranđelovac
- Tabela 6.46. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak KGA-1 Aranđelovac
- Tabela 6.47. Izgled uzorka KGA-1 Aranđelovac nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.48. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka KGA-1 Aranđelovac

- Tabela 6.49. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-1 Slankamen
- Tabela 6.50. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka SV-1 Slankamen
- Tabela 6.51. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SV-1 Slankamen
- Tabela 6.52. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak SV-1 Slankamen
- Tabela 6.53. Izgled uzorka SV-1 Slankamen nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.54. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-6 Slankamen
- Tabela 6.55. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka SV-6 Slankamen
- Tabela 6.56. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SV-6 Slankamen
- Tabela 6.57. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak SV-6 Slankamen
- Tabela 6.58. Izgled uzorka SV-6 Slankamen nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.59. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-1 Srbobran
- Tabela 6.60. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka SJ-1 Srbobran
- Tabela 6.61. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-1 Srbobran
- Tabela 6.62. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak SJ-1 Srbobran
- Tabela 6.63. Izgled uzorka SJ-1 Srbobran nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.64. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-2 Srbobran
- Tabela 6.65. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka SJ-2 Srbobran

- Tabela 6.66. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-2 Srbobran
- Tabela 6.67. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom uzorak SJ-2 Srbobran
- Tabela 6.68. Izgled uzoraka SJ-2 Srbobran nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.69. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-4 Srbobran
- Tabela 6.70. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka SJ-4 Srbobran
- Tabela 6.71. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-4 Srbobran
- Tabela 6.72. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za uzorak SJ-4 Srbobran
- Tabela 6.73. Izgled uzoraka SJ-4 Srbobran nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.74. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka SJ-4 Srbobran
- Tabela 6.75. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka BK-1 Bežanijska kosa
- Tabela 6.76. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice uzorka BK-1 Bežanijska kosa
- Tabela 6.77. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak BK-1 Bežanijska kosa
- Tabela 6.78. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom uzorak BK-1 Bežanijska kosa
- Tabela 6.79. Izgled uzoraka BK-1 Bežanijska kosa nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti
- Tabela 6.80. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka BK-1 Bežanijska kosa

---

## **Poglavlje 7. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA**

---

- Tabela 7.1. Rezultati XRD analize ispitivanih uzoraka tla
- Tabela 7.2. Rezultati ispitivanja pH vrednosti ispitivanih uzoraka tla
- Tabela 7.3. Klase disperzivnosti ispitivanih uzoraka tla

Tabela 7.4. Rezultati opita grudvice za uzorke U-1 i U-2

---

**Poglavlje 8. MELIORATIVNE MERE ZA POBOLJŠANJE DISPERZIVNIH SVOJSTAVA TLA**

---

- Tabela 8.1. Prikaz optimalnog sadržaja pepela (modifikovan po Mallikarjuna i Rama Subbarao, 2012.)
- Tabela 8.2. Hemijski sastav uzorka pepela sa deponije TENT A
- Tabela 8.3. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10
- Tabela 8.4. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice mešavine lesa i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10
- Tabela 8.5. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzorak LP-10
- Tabela 8.6. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za mešavinu lesa i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10
- Tabela 8.7. Izgled uzorka nakon izvedenog pinhole opita za mešavinu lesa i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10
- Tabela 8.8. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30
- Tabela 8.9. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30
- Tabela 8.10. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzorak LP-30
- Tabela 8.11. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za mešavinu lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30
- Tabela 8.12. Izgled uzorka nakon izvedenog pinhole opita za mešavinu lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30
- Tabela 8.13. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50
- Tabela 8.14. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice mešavine lesa

i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Tabela 8.15. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzorak LP-50

Tabela 8.16. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za mešavinu lesa  
i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Tabela 8.17. Izgled uzorka nakon izvedenog pinhole opita za mešavinu lesa  
i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Tabela 8.18. Klasa disperzivnosti ispitivanih uzoraka mešavine lesa K-1  
i pepela "TENT A"

Tabela 8.19. Rezultati ispitivanja disperzivnosti opitom grudvice za uzorke mešavine  
lesa K-1 i pepela "TENT A"

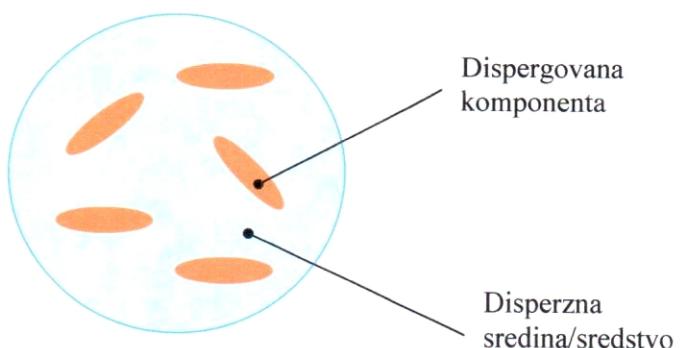
## POGLAVLJE 1. UVOD

Sa pojmom disperzivnosti svakodnevno se susrećemo u fizici, matematici, hemiji, geologiji i sl. Pojam potiče od latinske reči *disperzus* što znači rasipanje, rasejavanje, razdvajanje, raspršavanje.

U fizici pojam disperzije usko je vezan za optičke osobine svetlosti pr. razlaganje belog zraka svetlosti u spektar boja prilikom prolaska kroz prizmu. Jedan primer iz prirode predstavlja duga. U statistici – teoriji verovatnoće pod disperzijom se definiše matematičko odstupanje slučajno promenljive od njene srednje vrednosti. U hemiji smeša jedne ili više materija raspršenih u drugoj materiji u obliku veoma sitnih čestica naziva se disperzni sistem pr. boje za krečenje ili primer iz prirode magla. U hidrogeologiji oticanje vode iz podzemne reke ili ponornice kroz mnogobrojne manje kanale i šupljine u karstu naziva se disperzivnost. Sa fizičko-hemijskog aspekta posmatranja glinovito tlo takođe predstavlja disperzni sistem.

Disperzni sistemi predstavljaju heterogene složene sisteme koji se sastoje od dve faze:

1. dispergovana komponenta je faza čije čestice disperguju u kontinualnoj masi druge faze,
2. disperzno sredstvo ili disperzna sredina je faza u kojoj čestice dispergovane komponente vrše disperziju (Slika 1.1).



**Slika 1.1.** Disperzni sistem

Dispergovana komponenta je supstanca koja disperguje, a disperzno sredstvo supstanca u kojoj se vrši disperzija. U slučaju sistema glinovito tlo – voda, glinene čestice predstavljaju dispergovanu komponentu, a voda disperzno sredstvo. Usled toga glinovita tla imaju svojstva koloidnih disperznih sistema.

Disperzivna finozrna tla su tla kod kojih kao posledica mineraloškog i hemijskog sastava, usled strujanja vode dolazi do slabljenja strukturnih veza i odvajanja pojedinih čestica (podložnijih ispiranju i eroziji) iz strukture tj. deflokulacije. Ispiranjem i iznošenjem čestica iz strukture, disperzija se sa mikro nivoa postepeno razvija na makro nivo što za posledicu ima formiranje posebnih pora u tlu. Voda koja struji kroz ovaj porni prostor ispira pojedine finozrne čestice, pore se vremenom proširuju, poroznost se povećava, struktura tla se rastresa, i za relativno kratko vreme stvaraju se erozioni kanali i dolazi do pojava unutrašnje erozije u tlu. Dakle, disperzivnost tla je posledica fizičko-hemijskih promena u strukturi tla na nivou kristalne rešetke i često se naziva i "koloidnom erozijom" (Sherard i dr. 1976a).

Glinovita tla se smatraju izuzetno otporna na eroziju izazvanu filtracionom silom, odnosno proticanjem vode kroz porni prostor. Međutim, iz navedenih razloga disperzivne gline predstavljaju nepovoljnu sredinu za ugradnju/izgradnju nasutih objekata, posebno jezga nasutih brana, hidrotehničkih nasipa ali i nasipa za puteve. Primena ovih materijala kao posledicu može imati pojavu različitih vrsta oštećenja, pa čak i rušenja nasutih objekata.

Disperzivnost tla, treba jasno razlikovati od drugih vidova unutrašnje erozije. Različiti vidovi unutrašnje erozije u tlu su direktno predodređeni fizičkim karakteristikama sredine prvenstveno granulometrijskim sastavom tla (veličina i oblik čestica) i hidrauličkim gradijentom odnosno režimom strujanja vode. Međutim, dokazano je da pored ovih fizičkih karakteristika na degradaciju zapremine utiče i mineraloški sastav, priroda veza i hemizam vode u strukturi tla. U tome je razlika između drugih vidova

unutrašnje erozije i disperzivnosti. Dakle, pojava unutrašnje erozije u tlu je direktno predodređena fizičkom-mehaničkim, a disperzivnost fizičko-hemijskim svojstvima tla.

Disperzivnost finozrnog tla zavisi od mineraloškog i hemijskog sastava glina, koncentracije jona u pornoj vodi, kao i hemizma vode koja se proceduje. Ove sredine podložnije su eroziji i pri malim brzinama strujanja odnosno hidrauličkim gradijentima, u odnosu na prašine i peskove. Osnovna razlika između nedisperzivnih i disperzivnih glina je u načinu vezivanja izmenljivih katjona u strukturi gline. Disperzivne gline imaju dominantne katjone natrijuma, dok nedisperzivne gline imaju dominantne katjone kalcijuma, kalijuma i magnezijuma (Sherard i dr. 1976a).

Ovakvo ponašanje disperzivnog finozrnog tla prvo je uočeno u poljoprivredi pre više od 100 godina, i njihova osnovna priroda je proučena i od strane agroinženjera (Volk 1937, Richard 1954). U građevinskoj praksi ovaj fenomen nije uočen sve do 60-tih godina prošloga veka. Tada su Aitchison i Wood (1965) mnogobrojnim ispitivanjima dokazali da je uzrok oštećenja i procurivanja malih nasutih brana u Australiji posledica prirode disperzivnih glina.

Na slikama 1.2 i 1.3 dati su primeri oštećenja nasutih brana izgrađenih od disperzivnih glina.



**Slika 1.2.** Oštećenja kosine nasute brane izgrađene od disperzivnih glina (Fell.R, Soil Conservation Service of NSW)



**Slika 1.3.** Lom u kosini nasute brane izgrađene od disperzivnih glina Ramsgate, Natal, Južna Afrika

Noviji primer pojave procurivanja i oštećenja na objektu izgrađenom od disperzivne gline, prikazan je na slici 1.4. Usled rušenja brane Blackman Creek, oktobra 2005. godine evakuisano je stanovništvo grada Tunbridge, pri tome je došlo do gubitka oko 3.000 miliona m<sup>3</sup> vode namenjene za navodnjavanje.



**Slika 1.4.** Procurivanje u nasutoj brani Blackman Creek – Tunbridge  
izgrađenoj od disperzivnih glina

(Kim Eiszele, State of the Environment Tasmania 2009, The Mercury)

Osim istraživanja Nikolića i dr. (1978), koji su ispitivali disperzivnost glina koje su se koristile za ugradnju u jezgra nasutih brana Boranje, Pesača i Ćelije, u našoj zemlji ispitivanju disperzivnih finozrnih tla do sada nije posvećivano dovoljno pažnje. Uvreženo je mišljenje da tla naših prostora nisu disperzivna.

## 1.1 Predmet i cilj istraživanja

Primena disperzivnih glina za izgradnju nasutih geotehničkih objekata: nasutih zemljanih brana, hidrotehničkih nasipa ili nasipa u putarstvu, može prouzrokovati inženjerske probleme, ukoliko ovakvo tlo nije identifikованo ili je neogovarajuće upotrebljeno tj. ugrađeno. Kako su disperzivne gline rasprostranjene u prirodi, i često

nisu prepoznate, problem nestabilnosti nasutih objekata se javlja kao direktna posledica ne prepoznavanja osobina ovih materijala. Iz tog razloga, kao i zbog posledica koje se mogu javiti neodgovarajućim korišćenjem odnosno ugradnjom disperzivnih materijala, ovaj problem se nametnuo kao predmet istraživanja.

Osnovni cilj doktorske disertacije je kvalifikacija i kvantifikacija ponašanja disperzivnih sredina naših prostora i nastanka pojava nestabilnosti u nasutim geotehničkim objektima, na osnovu empirijskih i eksperimentalnih rezultata.

Neposredni ciljevi, ali ne manje značajni su:

- definisanje uslova ugradnje disperzivnih glina tj. verifikovanje modela ponašanja disperzivnih glina.
- uvođenje u praksu postojećih metoda ispitivanja disperzivnosti tla, kao i razvoj ili dopuna odgovarajućih eksperimentata u laboratoriji
- ispitivanje uslova nastanka fenomena unutrašnje erozije disperzivnih glina koji dovodi do loma
- identifikovanje ključnih parametara koji utiču na nastanak pojave unutrašnje nestabilnosti tla, i kvantifikovanje njihovog uticaja.

Sprovedena eksperimentalna laboratorijska ispitivanja imala su za cilj i iznalaženje rešenja i mogućnosti melorativnih zahvata tj. poboljšanja disperzivnih svojstava dodavanjem pepela sa deponije termoelektrane „Nikola Tesla A“ Obrenovac. Pored drugih hemijskih dodataka, pepeo se nametnuo kao mogući dodatak iz prvenstveno ekonomskih razloga: primenom pepela smanjuju se (i) utrošak prirodnih materijala i (ii) troškovi odlaganja pepela na deponijama.

## **1.2 Metode istraživanja**

Disperzivna glinovita tla ne mogu se jednoznačno odrediti vizuelno ili identifikacionim opitima na terenu, kao ni uobičajenim standardnim metodama koje se koriste za

identifikaciju i klasifikaciju tla u laboratorijskoj geomehaničkoj praksi: granulometrijskom analizom i opitom plastičnosti (Sherardi dr. 1976b). Za to se koriste posebni opiti: opit grudvice (crumb test), opit duplog areometrisanje (SCS), hemijski opiti za određivanje sadržaja natrijuma (ESP i SAR) i opit veštački formiranje pore (pinhole test).

Uvreženo je mišljenje da se disperzivne gline generalno javljaju u morskim sedimentima (prisustvo soli natrijuma u pornoj vodi), neka istraživanja su pokazala da njihova pojava nije direktno vezana za geološko poreklo sedimenata, i da se one mogu javiti i u aluvijalnim, proluvijalnim i jezerskim glinovitim sedimentima, pa i lesnim naslagama (Clark, 1986; Knodel, 1991; Nadal-Romero i dr. 2011a, 2011b). Pojave disperzivnih glina vezuju se i za oblasti sa aridnim ili poluaridnim klimatskim uslovima. Međutim, novija istraživanja pokazala su da se problemi erodibilnosti i disperzivnosti glina mogu javiti i na prostorima sa vlažnim klimatskim uslovima i na različitim geografskim lokacijama (Velasco, 2013).

Iz tih razloga, ispitivanja su izvedena na uzorcima različitog finozrnog tla:

- prašinastim glinama jezgra nasute brane "Rovni"
- lesu sa različitih lokacija: Bežanijska kosa, Zemun Gornji grad, Ruma, Titel, Kelebija, Mali Iđoš, Srbobran, Slankamen. Ukoliko nije drugačije naglašeno uzorci lesa potiču iz prvog lesnog horizonta.
- kaolinitskoj peskovitoj glini ležišta "Grabež" Aranđelovac

### **1.3 Primena rezultata istraživanja**

Dobijeni rezultati istraživanja ove doktorske disertacije se prevashodno mogu primeniti pri:

- projektovanju nasutih objekata (nasutih brana, hidrotehničkih nasipa i sl.): izbor geometrije, izbor materijala za ugradnju i nasipanje.

- definisanju uslova ugradnje: stepen zbijenosti, debљina sloja i sl.
- definisanju geotehničke stabilnosti nasutog objekta
- definisanju meliorativnih mera disperzivnog tla

#### **1.4 Organizacija disertacije**

Doktorska disertacija prikazana je kroz devet poglavlja.

U uvodnom Poglavlju 1. dat je kratak prikaz izvedenih istraživanja, predmet, cilj istraživanja i primenjene metode. Posebno je ukazano na značaj i mogućnost primene dobijenih rezultata u geotehničkoj praksi.

U Poglavlju 2. ukazuje se na značaj uticaja hemijskog i mineraloškog sastava i strukture finoznog glinovitog tla na pojavu disperzivnosti. Izložen je nastanka disperzivnosti na mikro nivou primenom koncepta dvostrukog difuznog sloja.

U Poglavlju 3. prikazan je mehanizam nastanka i manifestacije unutrašnje erozije u nasutim branama. Data je klasifikacija unutrašnje erozije tla zavisno od mesta i mehanizma nastanka; podela unutrašnje erozije sa osvrtom na tipove unutrašnje erozije koji se mogu javiti u nasutim branama, posebno na disperzivnost kao specifični vid unutrašnje erozije u tlu.

U Poglavlju 4. detaljno su prikazane metode koje se koriste za identifikaciju i klasifikaciju disperzivnog finozrnog tla (i) fizički opiti: opit grudvice, opit duplog hidrometrisanja tla i pinhole opit (opit veštački formirane cilindrične pore); (ii) hemijski opiti: procenat rastvorenog natrijuma (ESP) i koeficijent absorcije natrijuma (SAR). Prikazani su osnovni elementi i zahtevi opreme i uslovi izvođenja opita. Na kraju su dati detaljni kriterijumi koji se koriste za identifikaciju i klasifikaciju disperzivnog finozrnog tla.

U Poglavlju 5. izložene su specifičnosti primjenjenih standardnih i modifikovanih metoda ispitivanja. Naime, tokom eksperimentalnih ispitivanja javila se potreba za izvesnim modifikacijama u pripremi i ugradnji uzorka i opreme za ispitivanje disperzivnosti. Detaljno su obrazložene prednosti konstruktivnih izmena opreme za izvođenje pinhole opita.

U Poglavlju 6. dat je prikaz dobijenih rezultata izvedenih ispitivanja. Za svaki ispitivani uzorak određene sredine prikazani su rezultati za sve tri primenjene metode ispitivanja disperzivnosti: opit grudvice, opit duplog hidrometrisanja i pinhole opit. Takođe su prikazani i rezultati XRD ispitivanja mineraloškog sastava i ispitivanja pH vrednosti.

U Poglavlju 7. izvršena je analiza dobijenih rezultata ispitivanja i klasifikacija disperzivnog tla na osnovu izvedenih metoda. Dobijeni rezultati su upoređeni, međusobno a i sa rezultatima drugih istraživača. Ukazano je na prednosti, ali i nedostatke primjenjenih metoda, koje su uočene prilikom izvođena eksperimenta.

U Poglavlju 8. analizirana je mogućnost primene meliorativnih mera za poboljšanje svojstava disperzivnog tla. Naime, primenom odgovarajućih meliorativnih mera disperzivno tlo se može izmeniti u nedisperzivno tlo, koje se zatim može koristiti za nasipanje. Polazeći od toga, razmatrano je poboljšanje disperzivnog tla dodavanjem elektrofilterskog, odnosno letećeg pepela.

U Poglavlju 9. sumirana su zaključci i doprinosi, koji su proizašli iz istraživanja u okviru ove disertacije. Takođe je ukazano na novootvorena pitanja, sa preporukama za buduće pravce istraživanja.

Na kraju disertacije dati su spisak korišćene naučne i stručne literature i kraća biografija autora.

## **POGLAVLJE 2. MINERALOŠKA I STRUKTURNA SVOJSTVA FINOZRNOG I DISPERZIVNOG TLA**

Geomehanička svojstva i ponašanje tla zavise od strukture tla, mineraloškog sastava, prirode veza i količine vode u tlu. Priroda strukture disperzivnog finozrnog tla je takva da, u prisustvu vode, najsitnije čestice glinenih minerala nisu međusobno čvrsto vezane u krupnije aglomerate nego disperguju u vodi. Voda koja struji kroz takvo tlo može slobodno odnositi pojedine najsitnije čestice i slabiti strukturu, pa za relativno kratko vreme dolazi do narušavanja stabilnosti strukture tla. U finozrnom tlu disperzivnost se javlja samo kada je fizičko-hemijski sastav i strukturni skop takav da elektrostatičke sile odbijanja, nadvladaju van der Waals-ove sile privlačenja, koje su prisutne između čestica koje grade glineni minerali (Heinzen i Arulanandan, 1977). Ova pojava je rezultat povećanog sadržaja katjona natrijuma vezanih za površine glinenih minerala.

### **2.1 Osnovni elementi strukture minerala glina**

Fizičko-mehanička svojstva ponašanja glinenih minerala, direktna su posledica njihovog sastava i posebne strukturne građe. Glineni minerali su hidratisani alumosilikati koji pripadaju grupi filosilikata (*phyllo* grč. list).

U grupu filosilikata ubrajaju se:

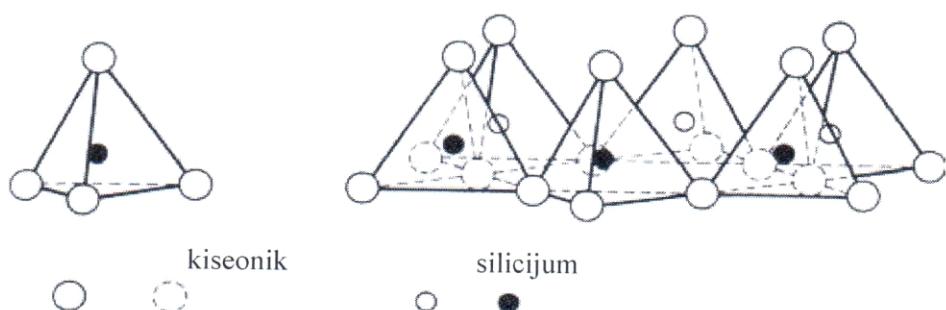
- grupa liskuna: muskovit, biotit
- grupa serpentinita: antigorit, krizotil
- grupa glina: kaolinit, halozit, smektit (monmorijonit), ilit
- grupa talka i pirofilita
- grupa hlorita

Sa aspekta proučavanja diperzivnosti finozrnog tla najvažnija je grupa glina: kaolinit, halozit, smektit (montmorilonit), ilit.

U strukturi glinenih minerala razlikujemo dve osnovne atomske grupacije:

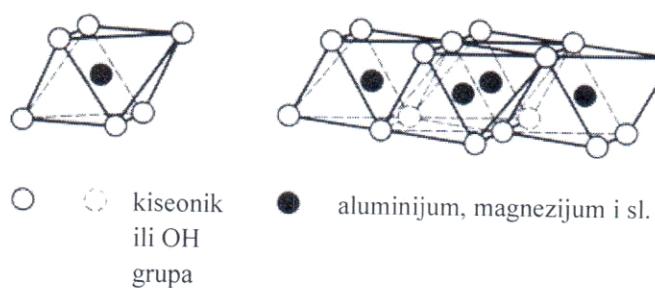
- Silicijumsku grupu, koju izgrađuju atomi kiseonika raspoređeni oko katjona silicijuma  $\text{Si}^{4+}$  u obliku tetraedra - *silicijumski tetraedar*
- Oktaedarsku grupu koju izgrađuju atomi aluminijuma ili magnezijuma oko kojih su raspoređeni OH joni, formirajući tako *aluminijumski oktaedar*

Na slici 2.1 dat je prikaz silicijumskog tetraeda, a na slici 2.2 i aluminijumskog oktaedra.



**Slika 2.1.** Si tetraedar i T-sloj (Mitchell, 1976)

Silicijumski tetredar i aluminijuski oktaedar predstavljaju osnovne elemente čijim povezivanjem se dobija tzv. slojevita struktura (eng. *sheet structure*).



**Slika 2.2.** Al oktaedar i O-sloj (Mitchell, 1976)

Međusobnim povezivanjem silicijumskih tetraedara preko tri od ukupno četiri jona kiseonika u heksagonalnu mrežu nastaje silicijumski sloj ili T-sloj. Osnove svih tetraedara su u jednoj ravni međusobno povezani, a vrhovi tetraedara su slobodni. Oktaedri su u oktaedarskom sloju međusobno povezani preko jona kiseonika formirajući tzv. O-sloj.

Različite kombinacije slojeva daju različite minerale glina. Tako se kombinacijom T i O slojeva dobijaju:

- i. Dvoslojne gline (T-O) pr. kaolinit, haloxit
- ii. Troslojne gline (T-O-T) pr. monmorijonit, ilit, vermiculit
- iii. Gline sa mešovitim tipovima slojeva pr. hlorit

Svojstva glina, naročito u prisustvu vode, određuje priroda veza između struktturnih elemenata koji izgrađuju T i O slojeve gline, kao i veza između T i O slojeva.

Kod minerala glina ravnii između tetraedarskog i oktaedarskog sloja obično su zajedničke i zbog toga su ove veze vrlo čvrste. Za razliku od veza između slojeva, veze između više slojeva mogu biti vrlo slabe. Od jačine i tipa ovih veza zavisiće i hemijsko, fizičko i mehaničko ponašanje glina.

Veze između više slojeva u glinenom mineralu mogu biti (Feeh i dr. 2005): van der Waals-ove veze, vodonične veze, katjonska izmena i katjonske veze.

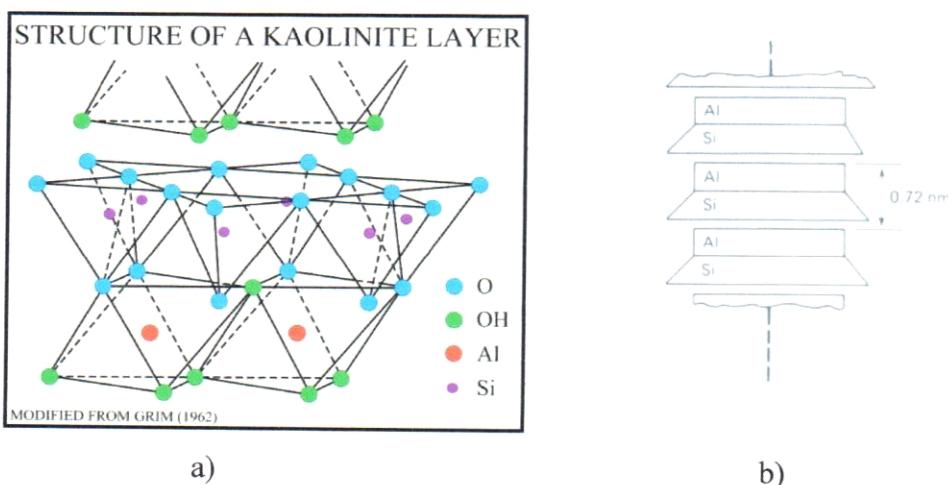
## **2.2 Osnovni minerali glina**

Različitom kombinacijom osnovnih struktturnih jedinica, odnosno zavisno od hemijskog sastava slojeva, struktturnog uređenja slojeva i tipa hemijske veze između slojeva nastaju različiti minerali glina. U prirodi se glineni minerali ne nalaze čisti, već najčešće grade glinovita tla zajedno sa pratećim mineralima: kvarcom, kalcitom, feldspatima, oksidima gvožđa, rastvorljivim solima i organskim materijama. Najpoznatiji minerali

glina su kaolinit, ilit i monmorijonit. Bell i Walker (2000) su ustanovili da kapacitet disperzivnosti zavisi od tipa prisutnog glinenog minerala u tlu, odnosno sadržaja natrijumovih katjona u pornoj vodi (ESP). Visoka vrednost ESP i disperzivnost su posledica preovlađujućeg minerala monmorijonita ili nekog drugog 2:1 minerala. Potencijalno disperzivno može biti i glinovito tlo u kome preovlađuje glineni mineral ilit. Međutim, visoka vrednost ESP i visoka disperzivnost retko se javljaju u glinama koje sadrže kaolinit.

### 2.2.1 Kaolinit $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$

Kaolinit pripada grupi dvoslojnih glinenih minerala kod kojih osnovu čini jedan tetraedarski sloj i jedan oktaedarski sloj. Zbog ovakvog pakovanja slojeva kaolinit se naziva 1:1 glinenim mineralom čiji je šematski prikaz dat na slici 2.3b. Slojevi (T i O) su međusobno povezana vrhovima Si tetraeda i Al oktaedra.

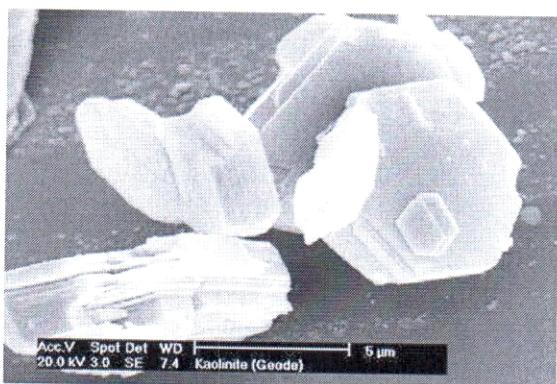


**Slika 2.3.** Mineral kaolinit

- struktura (<http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/kaogr.htm>),
- šematski dijagram strukture kaolinita (Mitchell, 1976)

Kao što je pikazano na slici 2.3.b debljina ovog sloja iznosi oko 0.72 nm. Kristal kaolinita sadrži nekoliko ovakvih slojeva koji su međusobno spojeni vodoničnim

vezama između OH grupe oktaedra i kiseonika tetradra. Kako su vodonične veze vrlo jake one sprečavaju hidrataciju, i dozvoljavaju povezivanje više slojeva i formiranje većih kristala. Tipičan kristal kaolinita može da sadrži od 70 do 100 slojeva. Na slici 2.4 je prikazan kristal kaolinita načinjen elekronskim mikroskopom (SEM).

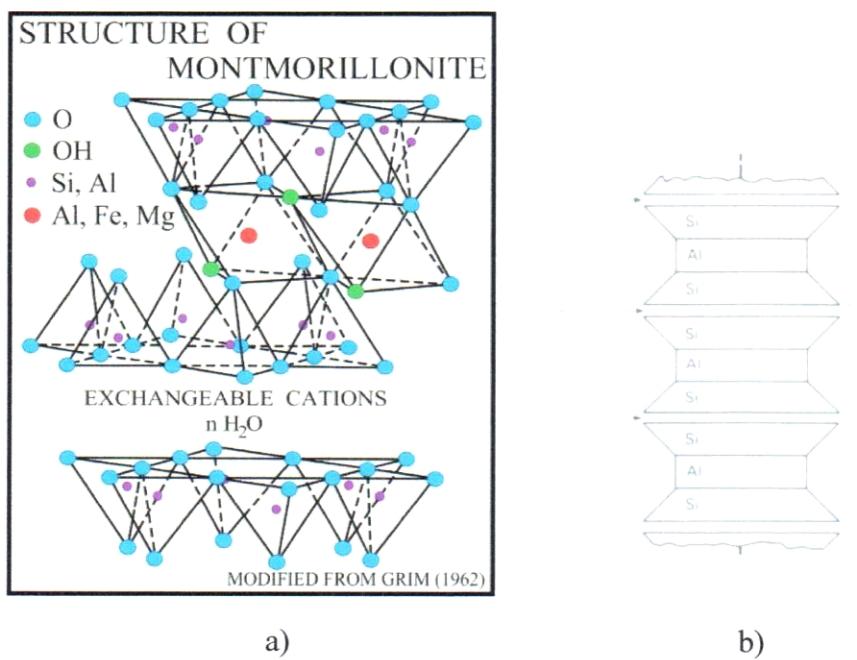


**Slika 2.4.** SEM izgled kristala kaolinita  
([http://www.jevel.ru/stone/kamen\\_kaolinit.html](http://www.jevel.ru/stone/kamen_kaolinit.html))

### 2.2.2 Monmorijonit $\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Monmorijonit se sastoji od dva T sloja i jednog O sloja (TOT sloj). Zato ga i nazivaju 2:1 glinenim mineralom. Oktaedarski sloj se nalazi između dva tetraedarska sloja, gde su veze uspostavljene sa atomom O na vrhovima tetraedara i OH grupom iz oktaedra (slika 2.5.a). Debljina ovako formiranog sloja iznosi 0.96 nm. Veze uspostavljene između susednih T slojeva van der Waals-ove su vrlo slabe tako da voda i joni mogu prođeti u ovaj prostor i razdvojiti slojeve. Kristali monmorijonita su vrlo mali, ali u isto vreme imaju vrlo jaku reakciju sa vodom. TOT kristalna struktura je negativno nanelektrisana. Nanelektrisanje se javlja kao posledica izomorfne zamene  $\text{Si}^{4+}$  katjona u tetraedarskom, i  $\text{Al}^{3+}$  katjona u oktaedarskom sloju. Zbog toga su tla, koja sadrže monmorijonit skloni bubrenju sa povećanjem sadržaja vode, a pritisak bubrenja koji nastaje tom prilikom može imati vrlo visoke vrednosti. Takode, u slučaju povećanog

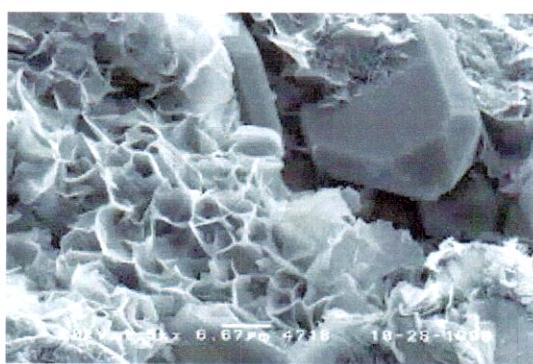
sadržaja natrijuma, monmorijonitske gline pokazuju visok stepen disperzivnosti (Velasco, 2013). SEM izled kristala monmorijonita prikazan je na slici 2.6.



**Slika 2.5.** Mineral monmorijonita

a) struktura (<http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/kaogr.htm>)

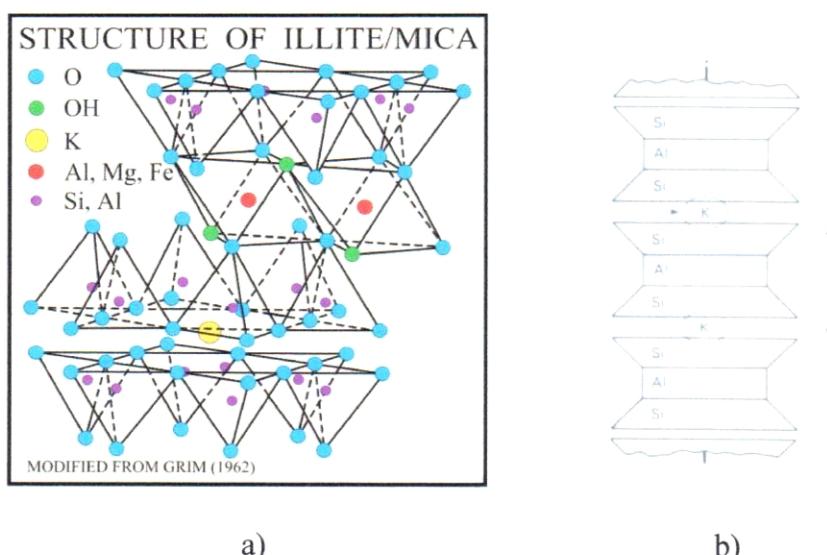
b) šematski dijagram strukture montmorionita (Mitchell, 1976)



**Slika 2.6.** SEM izgled kristala monmorijonit ([www.webmineral.com](http://www.webmineral.com))

### 2.2.3 Ilit ( $K_2O(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$ )

Ilit je čest mineral glina. Kao i kod monmorijonita odnos T i O sloja u strukturi kristala je 2:1. Između slojeva se nalazi atom kalijuma. Heksagonalna praznina ("hexagonal hole") u silikatnom sloju (sl.2.7a) je dovoljan da se u njega smesti atom kalijuma i formiraju jake veze (sl.2.7b). Kod ilita se javlja i izomorfna izmena aluminijuma sa silicijumom u silikatnom tetraedarskom sloju. Izgled kristala ilita načinjen elektronskim mikroskopom (SEM) prikazan je na slici 2.8.



**Slika 2.7. Mineral ilita**

- struktura (<http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays/illite.htm>),
- šematski dijagram strukture ilita (Mitchell, 1976)

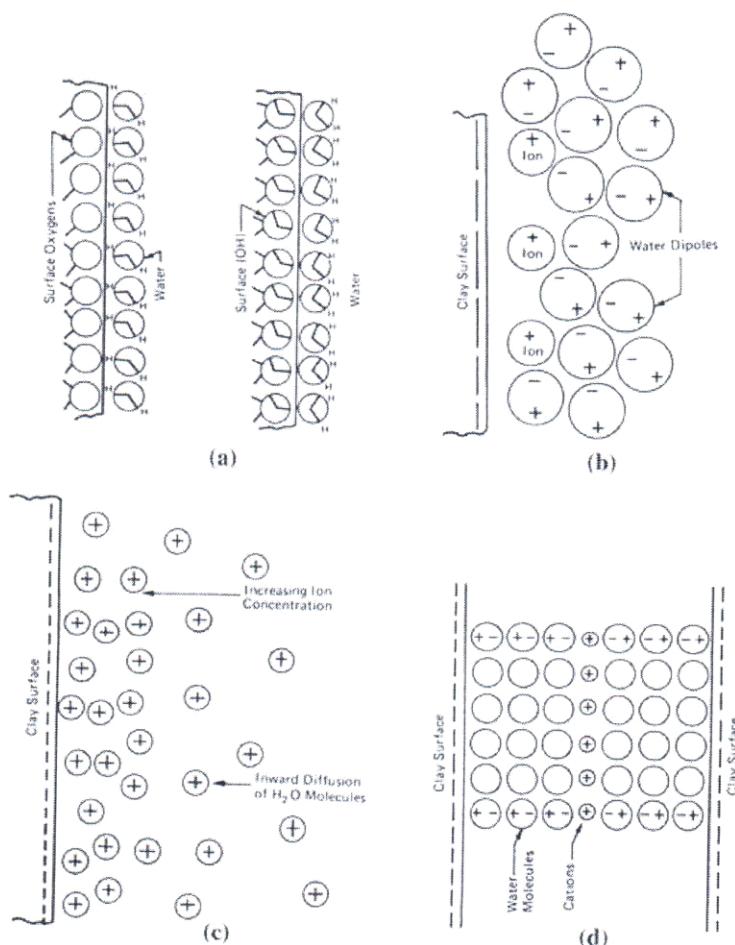


**Slika 2.8. SEM izgled kristala ilita (webmineral.com)**

## 2.3 Ponašanje minerala glina u prisustvu vode

### 2.3.1 Adsorbcija vode

Minerali glina poseduju sposobnost vezivanja vode na svojim površinama. Međutim, minerali monmorijonitske grupe, zahvaljujući strukturi kristalne rešetke, imaju sposobnost vezivanja znatno veće količine vode.



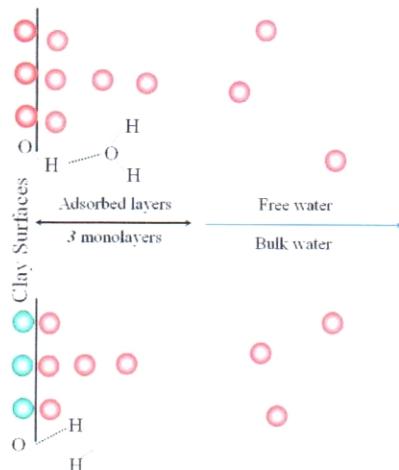
**Slika 2.9.** Različiti mehanizmi adsorbcije vode glinenom česticom

- a) vodonične veze, b) jonska hidratacija, c) osmoza, d) dipolno privlačenje  
(Mitchell, 1976)

Do adsorpcije dolazi usled privlačenja dipola vode i pozitivnog deficit-a nanelektrisanje površine glinenih minerala, kao posledica izomorfne izmene.

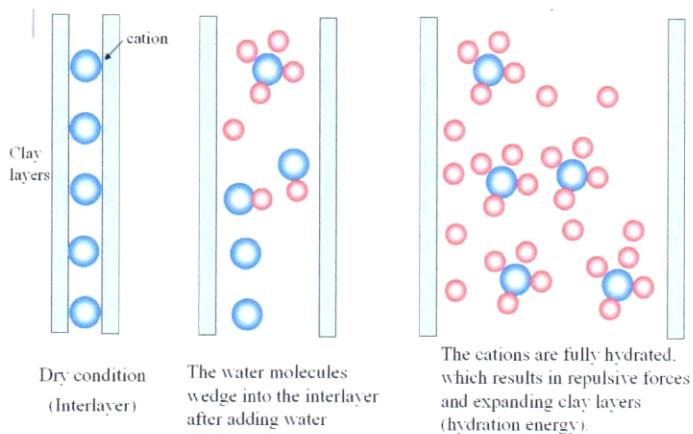
Prema Mitchell -u postoji nekoliko mogućih mehanizama adsorpcije vode na površini glinene čestice, kao što je prikazano na slici 2.9.

- (i) Vodonične odnosno hidrogenske veze, gde kiseonik na površini glinenog sloja (T sloj) privlači pozitivnu stranu H dipola vode, ili hidroksilnu grupu OH (O sloj) ili negativnu stranu O dipola vode pr.kaolinit (slika 2.10)



**Slika 2.10.** Adsorpcija vode na površini glinene čestice – vodonične veze  
(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)

- (ii) Hidratacija nastaje kao rezultat adsorpcije dipola vode i izmenjivih katjona, na negativno nanelektrisanim površinama glinenih kristala (slika 2.11).
- (iii) Osmoza se javlja kada postoji veća koncentracija katjona blizu površine glinene čestice u rastvoru. Usled toga molekuli vode imaju tendenciju difuzije ka površini i izjednačavanju koncentracije. Pri tome molekuli vode prodiru u međuslojni prostor i kao rezultat toga uvećava se rastojanje između različitih slojeva molekula glina i javlja se bubreњe.

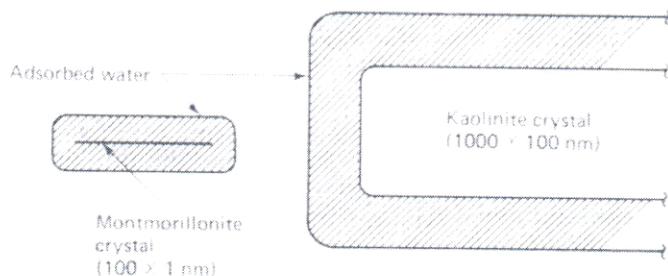


Slika 2.11. Adsorcija vode na površini glinene čestice – jonska hidratacija

(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)

- (iv) Dipolarno privlačenje nastaje kada se dipoli vode orijentisu i formiraju međuslojeve vode kao što je prikazano na slici 2.9.d), sa centralni katjonima koji teže da izjednače nanelektrisanje.

Neki glineni minerali, kao npr. monmorijonitske grupe, koji su pretrpeli zнатне izomorfne promene imaju veliko negativno nanelektrisanje na površini. Veličina električnog nanelektrisanja direktno je proporcionalna površini čestica. Glineni minerali monmorijonitske grupe imaju tendenciju da formiraju čestice koje su veoma tanke i imaju veliku specifičnu površinu. Kao rezultat toga, ovi glineni minerali privlače vodu više od onih koje nemaju veliko negativno nanelektrisanje, i formiraju deblje čestice, odnosno debji sloj adsorbovane vode (Sl. 2.12).



**Slika 2.12.** Relativna veličina sloja adsorbovane vode (vezane vode) na primeru Na monmorijonita i Na kaolinita (Holtz i Kovacs, 1981; prema Lamb-u, 1958)

### 2.3.2 Katjonska izmena

Električno nanelektrisanje na površini glinene čestice može nastati kao posledica jedog ili više sledećih faktora:

- izomorfne izmene
- prisustvo hidroksilnih jona na površini
- odsustvo katjona u kristalnoj rešetci
- adsorpcije anjona
- prisustvo organskih materija

Od nabrojanih faktora, električno nanelektrisanje najčešće nastaje usled izomorfne izmene. Finozrne glinene čestice teže da neutrališu električno nanelektrisanje formirano na površini, i to postižu privlačem drugih jona - katjona. Ovi joni su vezani relativno slabim vezama pa se mogu zameniti drugim jonima. Ovaj proces naziva se katjonskom izmenom.

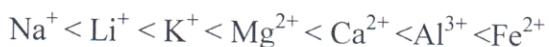
Katjonska izmena je jedan od najznačajnijih načina uspostavljanje veza u strukturi glinenih minerala. Katjoni koji se nalaze u prostoru između slojeva minerala gline, mogu biti zamenjeni drugim katjonima, i u tom procesu svojstva gline se mogu menjati. Tako npr. u strukturi montmorilonita aluminijum u okaedarskom sloju može biti

zamenjen magnezijumom ili gvožđem, a silicijum u tetraedaskom sloju aluminijumom. Nastali deficit naelektrisanja najčešće se neutrališe katjonima, a i dipolima vode.

Najčešće prisutni izmenjivi katjoni su  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  i  $\text{K}^+$ . Mogućnost izmene zavisi od:

- Valence npr. dvovalentni katjoni ( $^{2+}$ ) lako se menjaju jednovalentnim ( $^+$ ) npr.  $\text{Ca}^{2+}$  menja  $\text{Na}^+$ ;
- Relativnog viška ili koncentracije jona;
- Veličine jona ili gustine naelektrisanja

Uobičajen redosled izmene katjona je (svaki desni jon iz niza ima tendenciju zamene prethodnog jona u nizu):



Brzina katjonske izmene zavisi od:

- vrste glinenog minerala – npr. izmena će biti gotovo trenutna u kaolinitu, nekoliko časova u ilitu, a iziskuje duže vreme u monmorijonitu;
- koncentracija katjona u pornoj vodi
- temperature

Količina izmenjivih katjona potrebnih da se uravnoveži deficit naelektrisanja glinene čestice je poznata kao kapacitet katjonske izmene (eng. cation exchange capacity CEC) i izražava se u miliekvivalentima po 100 grama suvog materijala (gline). Kapacitet katjonske izmene je različit među glinenim mineralima, najveći je kod monmorijonita, srednji kod ilita a najmanji kod kaolinita (tabela 2.1).

Tabela 2.1 Važnije osobine najčešćih minerala gline  
(Čaki, 1996; prema Mitchell, 1976)

Vrsta minerala	Specifična povšina	Stvarni kapacitet katjonske izmene CEC	Prečnik D	Debljina	Oblik
	$\text{m}^2/\text{g}$	meq/100 g	$\times 10^{-3} \text{ mm}$		
Kaolinit	10-20	3	0.3-3	D/3-D/10	pločast
Ilit	8-100	25	0.1-2	D/10	pločast
Montmorilonit	800	100	0.1-1	D/100	pločast

Katjonska izmena je izuzetno značajna prilikom objašnjenja načina formiranja dvojno difuznog sloja i mehanizma disperzivnosti finozrnog tla. Ustanovljena je direktna veza između kapacitet katjonske izmene i disperzivnosti. Tako da je najviše disperzivan monmorijonit koji ima najveći kapacitet katjonske izmene, a najmanje disperzivan kaolinit koji ima najmanji kapacitet katjonske izmene (Velasco, 2013).

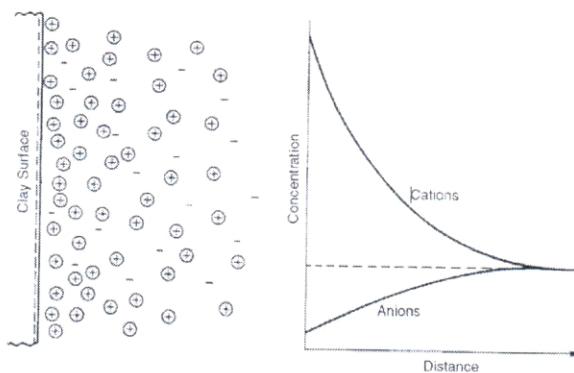
### **2.3.3 Formiranje dvojnog difuznog sloja**

U suvom tlu, izmenljivi katjoni se čvrsto drže za negativno nanelektrisanu povšinu glinene čestice. Višak katjona i njihovi povezani odgovarajući anjoni istaloženi su kao soli.

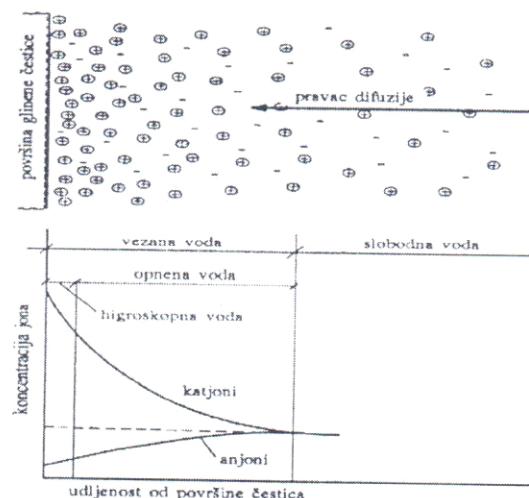
U vodi, soli formiraju rastvor i usled visoke koncentracije izmenljivih katjona na negativno nanelektrisanim površinama glinenih čestica dolazi do vezivanja vode odnosno hidratacije same glinene čestice, a takođe i izmenljivih katjona. Usled hidratacije katjoni nisu ustanju da se održe na površini glinene čestice jer zauzimaju više mesta (veći katjoni “izguravaju” manje), već se manje ili više udaljavaju od nje do jednog ravnotežnog stanja. Anjoni u rastvoru se odbijaju od površini negativnog nanelektrisane gline.

Ukupan efekat ima za rezultat haotičan raspored jona kao što je prikazano na slici 2.13.

Negativna površina i raspoređeni joni formiraju tzv. dvojni difuzni sloj Mitchell (1976, 1993). Sa udaljenošću od površine čestice opada koncentracija katjona, a raste koncentracija anjona.



**Slika 2.13.** Raspored jona na površini glinene čestice prema konceptu dvojnog difuznog sloja (Mitchell, 1976)



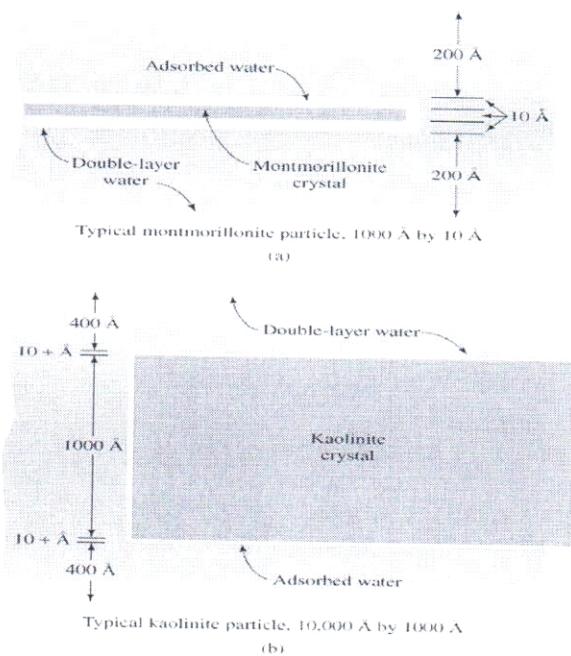
**Slika 2.14.** Odnos mineralne čestice i porne vode: dvojni difuzni sloj (Lamb i Whitman, 1969; Čaki, 1996.)

Voda u dvojnom difuznom sloju je pod dejstvom privlačnih sila koje se nalaze na katjonima. Voda je vezana i drugim silama za površinu čestice kao što su sile između

polarne vode i zalatalih električnih nanelektrisanja, hidrogenske veze i van der Waalsove sile (Čaki, 1996.). Neposredno na površni čestice vezano je i nekoliko molekularnih slojeva vode to je čvrsto vezana voda.

Udaljavanjem od glinene čestice, smanjuju se privaćne sile i koncentracija jona u dvojnom difuznom sloju a njihova pokreljivost povećava. Prelaz adsorbovane vode u slobodnu pornu vodu je postupan (slika 2.14.).

Debljina i gustina difuzog sloja varira. Isto kao i sloj adsorbowane vode, najdeblji difuzni sloj imaju strukturno labilni sistemi poput minerala iz grupe smektrita pr. montmorionita (slika 2.15.).

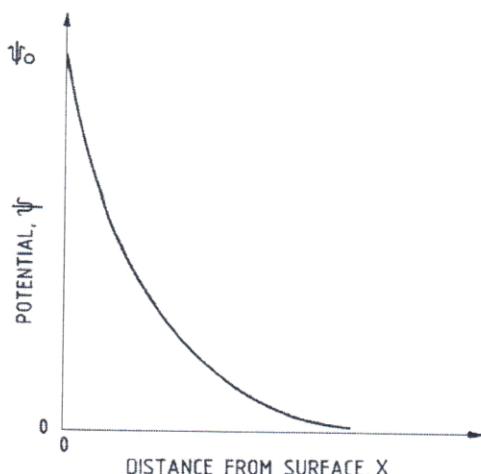


**Slika 2.15.** Tipične debljine dvojnog difuznog sloja kaolinita i monmorijonita  
(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)

## 2.4 Mehanizam disperzije glinovitog finozrnog tla

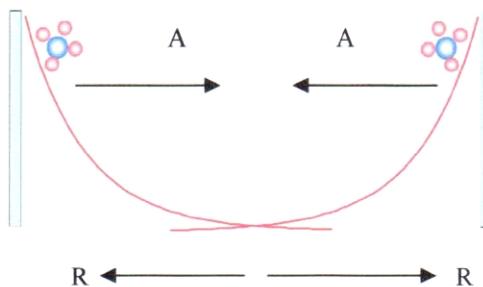
Mehanizam nastanka disperzije glinovitog tla direktna je posledica odnosa sila koje se javljaju u dvojnom difuznom sloju oko glinene čestice: van der Waals-ove sile privlačenja (A) i elektrostatičke sile odbijanja (R).

Sa udaljenošću od površine glinene čestice električni potencijal varira kako je prikazano na slici 2.16. Potencijal je negativan, što odražava veliko negativno naelektrisanje na površini gline.



**Slika 2.16.** Zavisnost elektičnog potencijala sa udaljenošću od površine glinene čestice (Mitchell, 1976).

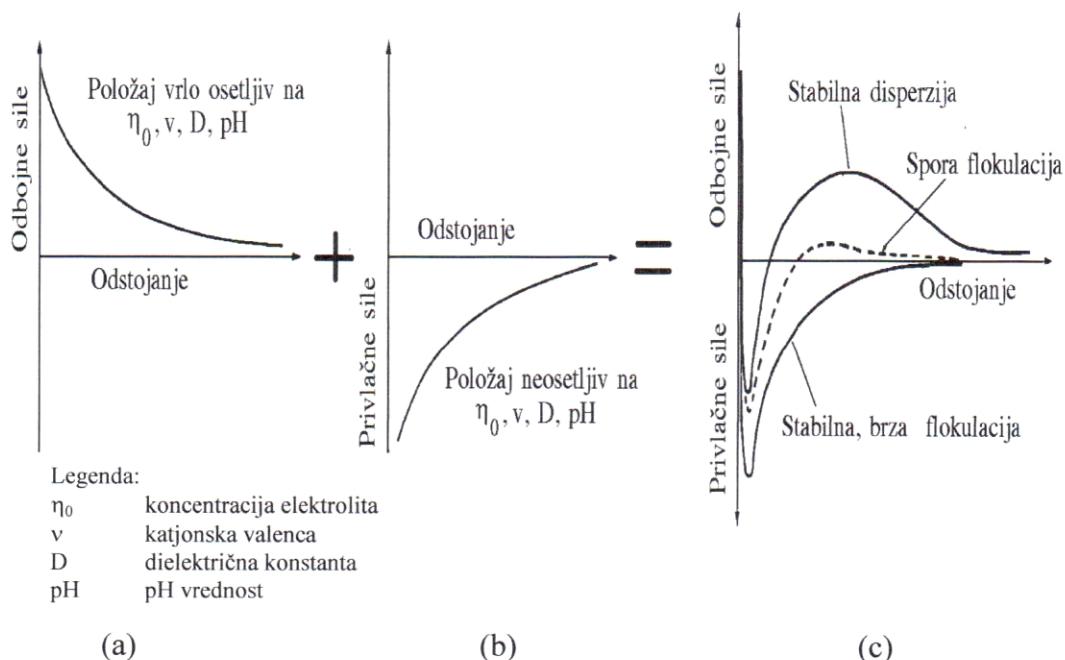
Kada se dve glinene čestice koje se nalaze jedna pored druge u vodi postupno približavaju u jednom trenutku polja elektičnog potencijala tj. dvojni difuzni sloj će se preklopiti/dodirnuti. Pošto sve čestice nose negativano naelektrisanje njihovim približavanjem dolazi do pojave elektrostatičkih odbojnih sila (R) između čestica istog naelektrisanja. Do odbijanja dve čestice dolazi u trenutku kada se dvojni difuzni slojevi naslove jedan na drugi (Mitchell, 1976). Ove odbojne sile R su nasuprot van der Waals-ovim silama privlačenja (A), kao što je prikazano na slici 2.17.



**Slika 2.17.** Šematski prikaz sila u dvojnom difuznom sloju

(<http://www.slideshare.net/lwolberg/clay-minerals-and-soil-structure>)

Kada su sile odbijanja (R) veće od van der Waals-ovih sila privlačenja (A) tlo disperguje. U slučajevima gde su odbojni sile male, van der Waals-ove sile privlačenja dominiraju i dolazi do flokulisanja (slika 2.18).



**Slika 2.18.** Međusobni uticaj odbojnih i privlačnih sila između dve čestice

(a) odbojne sile, (b) privlačne sile, (c) zbir sila; (Mitchell, 1976)

Veličina odbojnih sila, za isto međusobno rastojanje čestica, zavisi od debljine dvojnog difuznog sloja. Debljina dvojnog difuznog sloja jednaka je:

$$t = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot k \cdot T}{n \cdot e \cdot v}} \quad (2.1)$$

Gde je:

$t$  – debljina dvojnog difuznog sloja

$\varepsilon$  - dielektrična konstanta

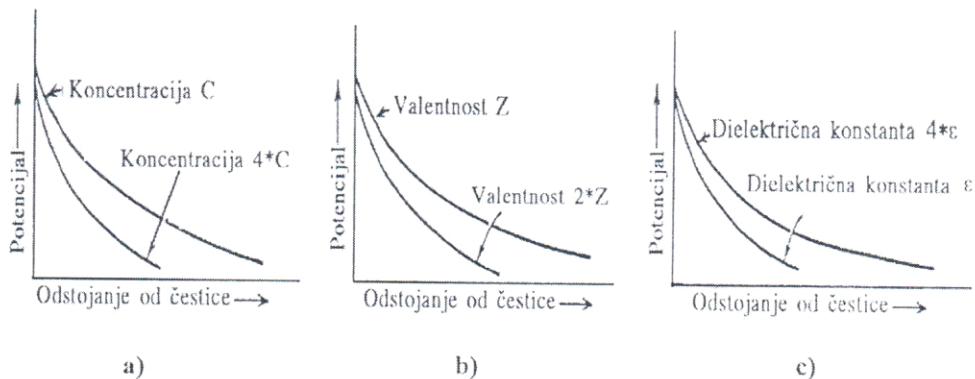
$k$  – Boltzmanova konstanta

$T$  – temperatura

$n$  – koncentracija eletrolita

$e$  – elemenarno nanelektrisanje

$v$  - jonska valenca



**Slika 2.19.** Uticaj karakteristika sistema na dvojni difuzni sloj a) koncentracija eletrolita, b) valentnost jona i c) dielektrična konstanta (Lambe i Whitman, 1969)

Kao što se iz jednačine vidi na debljinu dvojnog difuznog sloja utiču svojstava sistema voda-tlo: koncentracija katjona, valentnost katjona, dielektrična konstanta, temperature i pH vrednost sistema. Debljina dvojnog difuznog sloja ima neposredni uticaj na veličinu odbojnih sila. Slika 2.19. pokazuje uticaje nekih od navedenih svojstava sistema na

električni potencijal ( $\psi$ ), stoga i na veličinu odbojne sile zavisno od udaljenosti (x) od površine čestice.

Koncentracija elektrolita: usled visoke koncentracije rastvorljivih soli u vodi u tlu, formira se tanji dvojni difuzni sloj (visoka koncentracija katjona  $\text{Na}^+$  nadvladava negativno nanelektrisanje na površini glinene čestice) te su odbojne sile manje (Sl. 2.19a) i flokulisanje raste.

Katjonska valenca: zamena  $\text{Na}^+$  katjona  $\text{Ca}^{2+}$  katjonima dovodi do formiranja tanjeg, ali veće gustine električnog naboja dvojnog difuznog sloja i stoga su odbojne sile manje (slika 2.19b).

Sa povećanjem temperature raste i tendencija čestica ka flokulisanju, tj. odbojne sile su manje.

Sa povećanjem dielektrične konstante, veličine hidratisanih jona, pH vrednosti i anjonske adsorbcije raste i veličina odbojnih sila.

Za razliku od odbojnih sila, sile privlačenja ne zavise od osobina sredine.

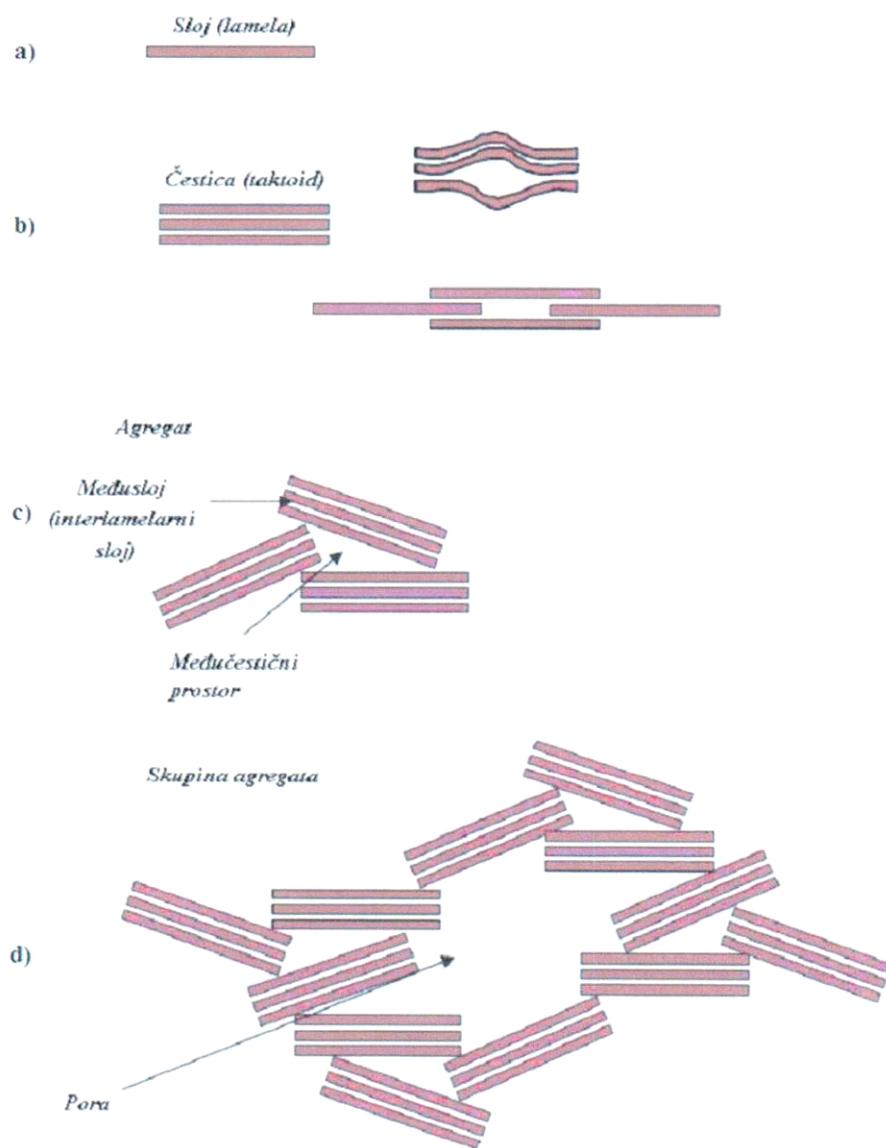
## **2.5 Struktura finozrnog tla**

### **2.5.1 Struktura glinovitog tla**

#### **2.5.1.1 Struktura glinovitog tla po Bergaya-i i Lagaly-i (2013)**

Struktura glina u suvom stanju može se opisati sa četiri nivoa strukturnih jedinica koje imaju svoj karakterističan raspored u prostoru (Bergaya i Lagaly, 2013). Najjednostavnija jedinica je sloj koju čine jedan oktaedarski sloj i jedan tetraedarski sloj

ili jedan oktaedarski sloj između dva tetraedarska sloja. Druga strukturalna jedinica je čestica koji sadrži veći broj slojeva. Treća strukturalna jedinica je agregat koji nastaje od česticice koje se slažu na različite načine (anizotropno), a isto važi i za slaganje agregata. Ilustracija ove podele je prikazana na slici 2.20.

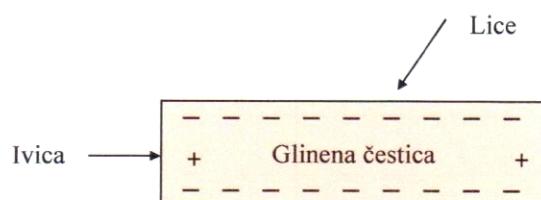


**Slika 2.20.** Prikaz morfologije glina i formiranja pora: a) sloj, b) čestica, c) agregat, d) skupina agregata( Bergaya i Lagaly, 2013)

Kao posledica raznovrsnosti u načinima slaganja slojeva, čestica i agregata javlja se poroznost koja se karakteriše širokim rasponom prečnika pora. Prisustvo pora karakterišemo kroz tri nivoa veličina pora. Mikro pore označavaju prostor između samih slojeva unutar čestice, u sledećem nivou dolazi do slaganja čestica unutar agregata i nastaju mezo pore, dok slaganjem agregata nastaju makro pore.

### 2.5.1.2 Struktura glinovitog tla po van Olphen-u (1963)

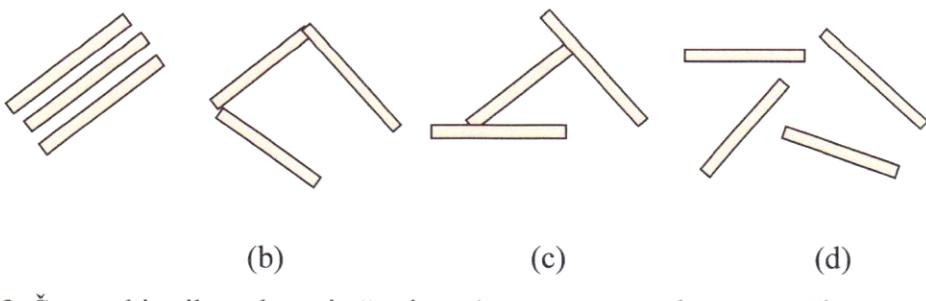
Kao što je već rečeno glinene čestice su tanke pločice koje obično sadrže (6–10) naslaganih slojeva. Pločice su povezane van der Waals-ovim privlačnim silama koje su dovoljno jake da sprečavaju razdvajanje slojeva.



Slika 2.21. Izgled glinene čestice

Individualne glinene čestice imaju dve različite površine: bazne površine (tzv. lica) koje su sa negativnim nanelektrisanjem, i površine ivica koje su sa pozitivnim nanelektrisanjem (Slika 2.21). Različita nanelektrisanja i izmenljivi katjoni ili suprotni joni iz rastvora stvaraju električno polje oko glinenih čestica, koje određuju kako će ove čestice delovati jedne na druge. Ako se suprotni joni odvoje od površine gline, odbojne sile između ravnih listića sa negativnim nanelektrisanjem su velike i listići će se odvajati jedni od drugih i formira se dispergovana struktura (van Olphen, 1963).

Čestice u glinenoj suspenziji mogu slagati još na tri načina. Prvi način je kada bazne površine čestice naležu jedna na drugu (eng. *face-to-face*) formirajući agregatnu strukturu. Slaganje ivica prema ivici (eng. *edge-to-edge*) i površina ka ivici (eng. *face-to edge*) nastaje flokulisana struktura. Strukture su prikazane na slici 2.22.

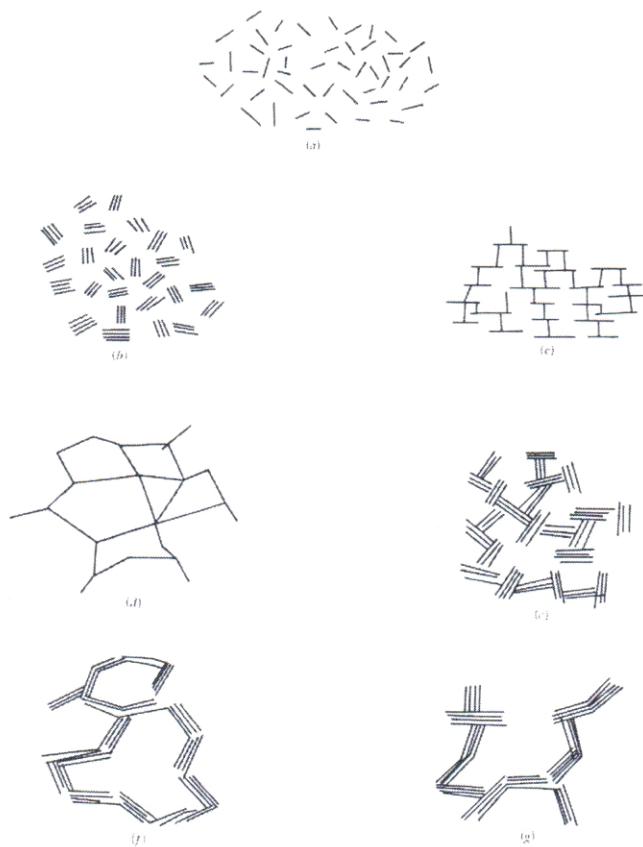


**Slika 2.22.** Šematski prikaz slaganja čestica: a) agregatna struktura površina- površina  
b) flokulisana struktura ivica-ivica, c) flokulisana struktura površina- ivica,  
d) disperzna struktura

Deflokulisana struktura nastaje kada nepostoje nikakve veze između agregata gline. Neki od modela povezivanja glinenih čestica i agregata dati su na slici. 2.23 (van Olphen,1963; preuzeto od Mitchell-a, 1976).

Težnja čestica da flokulišu povećavaće se sa porastom koncentracije elekrolita, valence jona i temperature, ili sa smanjenjem dielektrične konstante pornog fluida, veličine hidratisanih jona, veličinom pH i anjonskom adsorbcijom (Lambe,1958).

Većina glina u prirodi ima flokulisanu strukturu. Samo mali broj glina pri određenim uslovima formira dispergovanu strukturu.



**Slika 2.23.** Modeli skupina čestica u glinenoj suspenziji (po van Olphen-u, 1963)

- (a) Dispergovana, deflokulisana, (b) agregatna, deflokulisana, (c) flokulisani tip "ivica-površina", dispergovana, (d) flokulisani tip "ivica-ivica", dispergovana, (e) flokulisani tip "ivica-površina", agregatna, (f) flokulisani tip "ivica-ivica", agregatna, (g) flokulisani tip "ivica-površina" i "ivica-ivica", agregatna

## 2.5.2 Struktura drugog finozrnog kohezivnog tla

### 2.5.2.1 Strukture finozrnog kohezivnog tla prema Yong-u i Sheeran-u (1973) i Pusch-u (1973)

Prema Yong i Sheeranu osnovnu strukturalnu jedinicu na submikro nivou predstavlja tzv. *domains* (eng.) odnosno grupacija više pojedinačnih glinenih čestica. Više takvih

čestica sačinjavaju *clusters* (eng.) koji su dovoljno vidljivi mikroskopski i ustvari predstavljaju aggregate. Više klastera sačinjavaju *peds* (eng.) tj. grupacije agregata, koje su vidjive i golim okom, kao i ostali elementi makrostrukture/teksture kao što su pukotine, prsline i sl.

Način vezivanja čestica i formiranje mikrostrukture odnosno makrostrukture finozrnog tla prema Yong i Sheeranu (1973) prikazan je na slici 2.24.

Legenda:

1. *domain*, grupacija glinenih čestica
2. *klaster*, agregati
3. *ped*, grupacija agregata
4. čestica prašine
5. mikropora
6. makropora



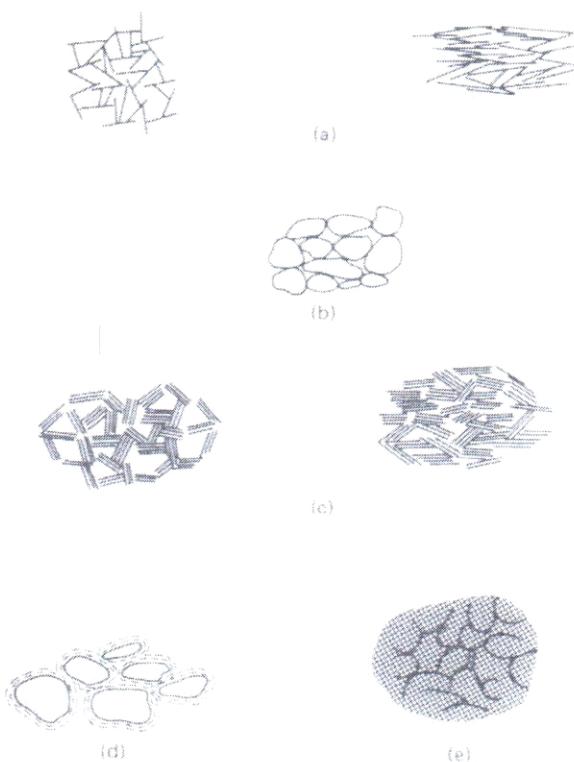
**Slika 2.24.** Šematski dijagram mikrostrukture i makro strukture tla prema Yong-u i Sheeran-u i Pusch-u, (1973) (preuzeto od Holtz-a i Kovacs-a, 1981)

### **2.5.2.2 Strukture finozrnog kohezivnog tla prema Collins-u i McGown-u (1974)**

Collins i McGown (1974) su predložili nešto složeniji sistem za opis mikrostrukture prirodnih tla.

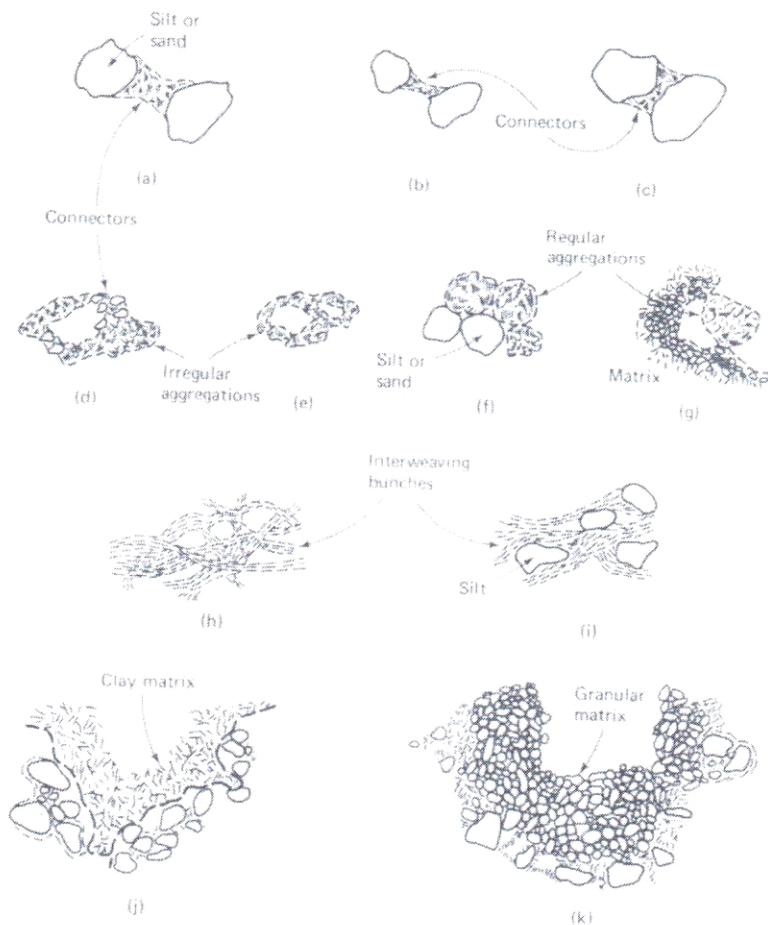
Oni predlažu tri tipa:

1. Osnovna grupacija česica, koje sadrži pojedinačne forme čestica gline, praštine ili peska (Sl. 2.25.a i b) koje s međusobno povezane ili interakcija među malih skupina glinenih pločica (Sl. 2.25.c) ili obavijene čestice praštine ili peska (sl.2.25.d i e).



**Slika 2.25.** Šematski prikaz rasporeda elementarnih čestica (Collins and McGown, 1974; preuzeto od Holtz-a i Kovacs-a, 1981)

(a) čestice gline, (b) čestice praštine ili peska, (c) skupine glinenih čestica, (d) skupine obavijenih čestica praštine ili peska, (e) čestice praštine ili peska obavijen glinom



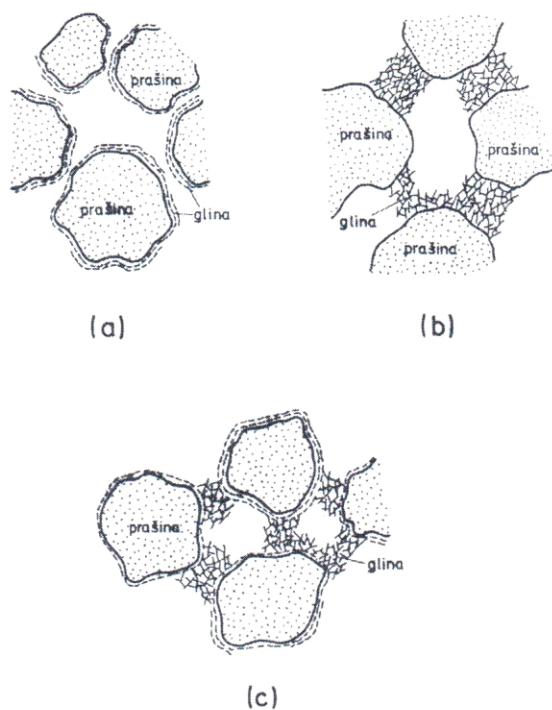
**Slika 2.26.** Šematski prikaz grupacija čestica po Collins-u i McGown-u, 1974.  
(preuzeto od Holtz-a i Kovacs-a, 1981.)

(a), (b), (c) povezivanje čestica; (d) nepravilna agregatna struktura; (e) pravilna agregatna struktura fomirana kao sače; (f) pravilna agregatna struktura između čestica prašine ili peska; (g) pravilna agregatna struktura (h) preklapanje skupina glinenih čestica; (i) preklapanje skupina glinenih čestica sa pojedinačnim česticama prašine; (j) matriks glinenih čestica; (k) matriks zrnastih čestica

### 2.5.3 Struktura lesa

Od mesta i uslova pri kojima je došlo do taloženja lesa: klima, vlažnost i sl. direktno će zavisiti struktura lesnog tla. Zbog toga se i razlikuju strukturi barskog i padinskog lesa. Padinski les nastao je laganim odlaganje čestica prašine u uslovima relativno suve klime, relativno male vlažnosti pri čemu je došlo do očvršćavanja unutrašnjih veza pre prirodne konsolidacije pod sopstvenom težinom.

Na slici 2.27 dat je šematski prikaz idealizovane strukture lesa (Dudley, 1970).



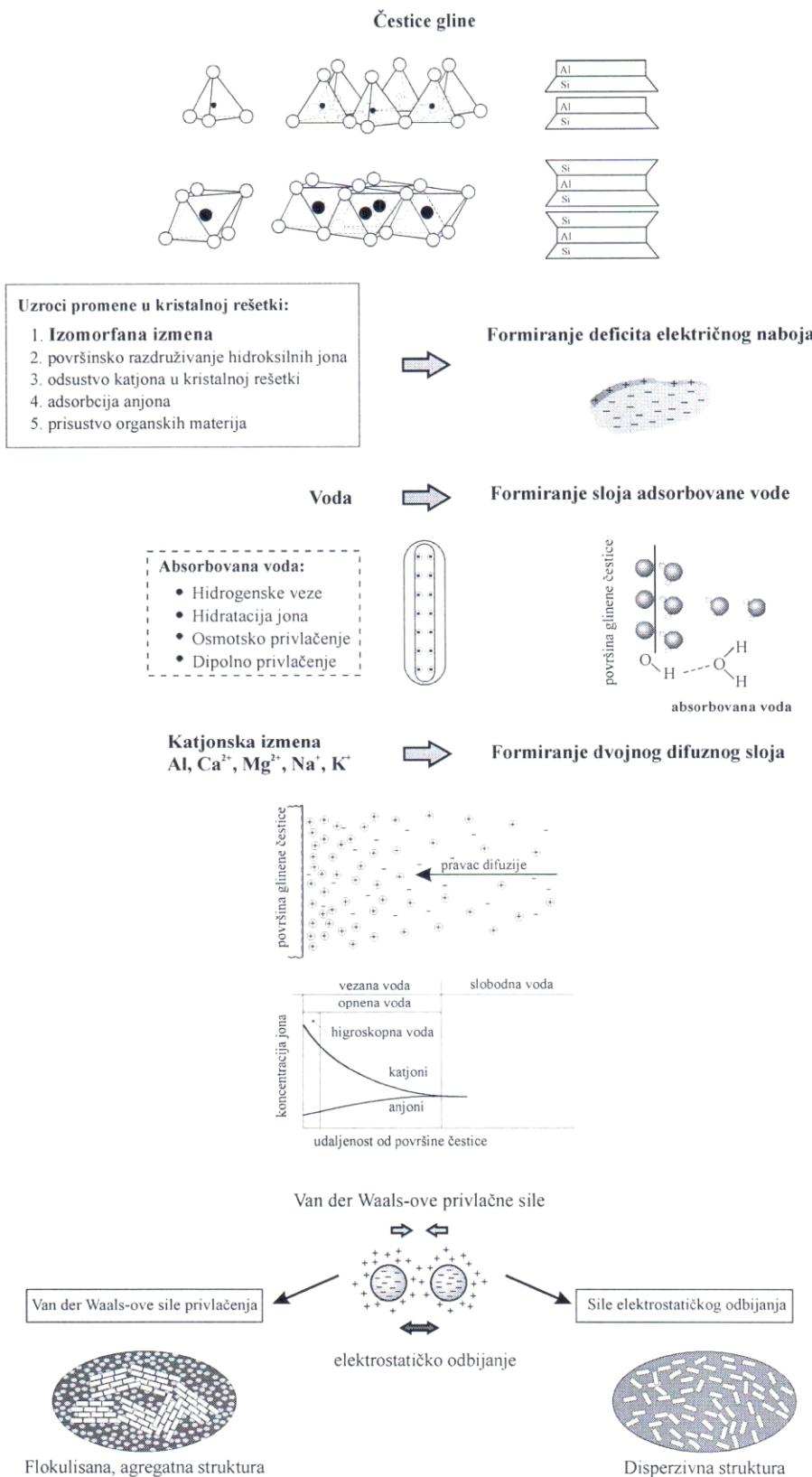
**Slika 2.27** Šematski prikaz idealizovane strukture lesa po Dudley-u 1970 (preuzeto od G. Marković, 1987): a) glinena komponenta kao omotač krupnozrnijih čestica, b) glinena komponenta kao grozd (most) na mestu spajanja sa krupnozrnijim česticama, c) kombinacija a i b

”Očvršćavanje cemenacionih veza obavlja se lepljenjem zrna praštine i peska glinom u karakteristične lesne mikroaggregate. Proces je potpomognut vlagom iz vazduha, raznim hemizmima vezanim posebno za kalcijum karbonat ispran iz gornjih delova naslaga. Karbonat se taloži na već formirane mikroaggregate, oblaže ih u vidu fine mreže i dalje učvršćuje njihovu strukturu. U procesu očvršćavanja lesne strukture ne treba isključiti ni mogućnost prekristalizacije minerala gline. Tipičan les sadrži 50-80% nekonsolidovane praštine. Ovak razvoj omogućava formiranje karakteristične makroporozne strukture lesnih naslaga. Formirana struktura poroznosti je intergranularna i ineragregatna. Pore imaju kapilarnu do superkapilarnu krupnoću” (Marković, 1987).

## **2.6 Zaključak**

Disperzivne gline predstavljaju koloidne disperzne sisteme, koji imaju povećani sadržaj rastvorenih natrijumovih jona u pornoj vodi. Natrijum povećava debljinu dvojnog difuznog sloja koji okružuje pojedinačne glinene čestice. Ovo za posledicu ima da su odbojni sile veće od privlačnih sila, usled čega čestice gline u prisustvu vode disperguju u suspenziji. Dakle, disperzivnost je direktna posledica promene u formiranju strukture finozrnog glinovitog tla.

Algoritam nastanka disperzivne strukture glinovitog tla dat je na slici 2.28.



Slika 2.28. Algoritam nastanka disperzivne strukture tla

### **POGLAVLJE 3. UNUTRAŠNJA EROZIJA U NASUTIM HIDROTEHNIČKIM OBJEKTIMA**

Pojave unutrašnje erozije (eng. *internal erosion*) kod hidrotehničkih objekata su glavni uzroci oštećenja tokom njihove eksploatacije. Slične pojave se mogu javljati i u prirodnim sredinama kao posledica uslova strujanja vode.

Prema rezultatima istraživanja sprovedenih za potrebe ERINOH baze, uz podršku RAI - Risk Assessment International - Austrija (Fry J.J. i dr., 2012), koja su se bavila utvrđivanjem uzroka nastanka oštećenja na branama i nasipima, kao najčešći uzrok oštećenja u slučaju malih nasutih brana<sup>1</sup>, navodi se unutrašnja erozija tla. Kod visokih brana<sup>1</sup> osnovni uzrok oštećenja predstavlja prelivanje preko krune brane. Prikupljeni su podaci o uzrocima oštećenja velikog broja brana u svetu za period od 2010-2012. Cilj formiranja ove baze bio je iznalaženje pouzdanih rešenja za poboljšanje bezbednosti i sigurnosti brana. Ukupno je analizirano 47 objekata (u periodu od februara 2010 do aprila 2012). Od 47 oštećenja na branama, erozija je uzrok oštećenja na 44 objekta odnosno 97%. Od toga na 23 objekta uzrok pojave oštećenja je unutrašnja erozija; na 20 objekata spoljašnja erozija (prelivanje preko krune brane) i 1 slučaj klizanja kosine brane prozrokovani dejstvom zemljotresa. Za preostala tri slučaja kao uzrok pojave oštećenja navode se problemi konstruktivne prirode objekta.

Nešto malo starija analiza Richards-a i Reddy-ja iz 2007. godine sprovedena na većem broju uzorka tj. 267 objekata (podaci preuzetih od Jones (1981), Lane (1934) i National Performance of Dams Program Stanford University, <http://www.npdp.stanford.edu/index.html>) pokazala je da do oštećenja na branama došlo usled:

- |  |        |               |
|--|--------|---------------|
| • Procurivanja ispod temelja brane       | 15 %   | (40 objekata) |
| • Unutrašnje erozije                     | 49.8 % | (133 objekta) |
| • Regresione erozije i sufozije          | 31.1 % | (83 objekta)  |
| • Bioloških uticaja (biljke i životinje) | 4.1 %  | (11 objekta)  |

<sup>1</sup> podela prema definiciji ICOLD, 1973

Foster i dr.(2000) su na osnovu sprovedene statističke analize oštećenja na branama preuzetih iz ICOLD-ove baze incidenata na branama (za brane izgrađene u periodu od 1800 - 1986 godine), zaključili da u 46% svih oštećenja na branama uzrok predstavlja procurivanja usled unutrašnje erozije, 48 % usled dejstva spoljašnje erozije odnosno prelivanja preko krune brane, 4% usled statičke nestabilnosti i 2% usled seizmičke nestabilnosti.

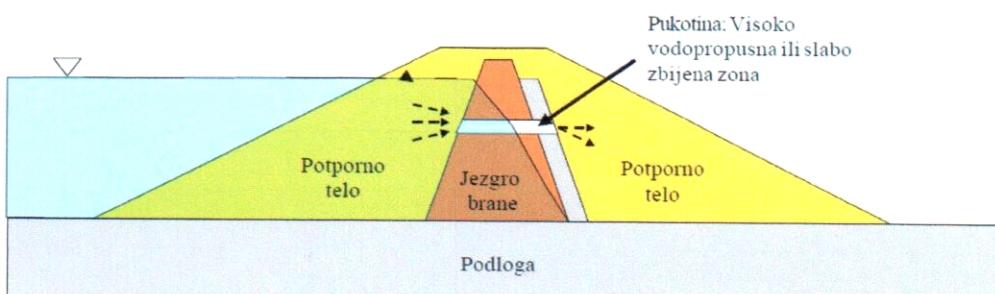
Dakle sve tri statističke analize oštećenja na nasutim branama, sprovedene u različitim vremenskim periodima, ukazuju da u oko 50 % slučajeva unutrašnja erozija predstavlja osnovni uzrok nestabilnosti brane.

Unutrašnja erozija nastaje usled ispiranja i iznošenja čestica tla pod dejstvom hidrodinamičkih sila proticanjem vode. Unutrašnja erozija kod finozrnog tla je posledica slabljenja sila kohezije i nepovoljnih fizičko-hemijskih reakcija (disperzivnost). Spoljna erozija (prelivanje preko krune brane, rad talasa i sl.) je problem koji se najčešće razmatra sa hidrauličkog aspekta, dok se unutrašnja erozija više razmatra kao geomehanički problem.

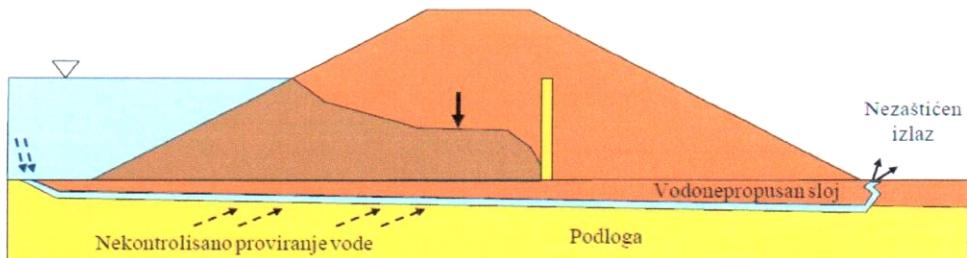
### 3.1 Podela unutrašnje erozije u nasutim branama prema mestu nastanka

Fell i Fry (2013) su prema mestu nastanka podelili unutrašnju eroziju na:

- Unutrašnja erozija kroz nasip brane (slika 3.1)
- Unutrašnja erozija kroz podlogu brane (slika 3.2)

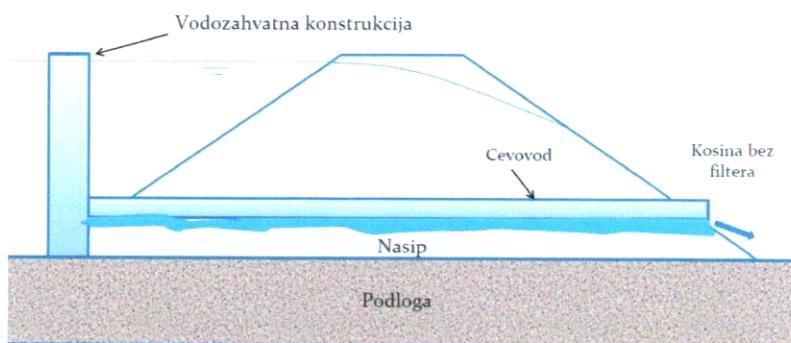


Slika 3.1. Unutrašnja erozija kroz nasip nasute brane (USBR, 2012)



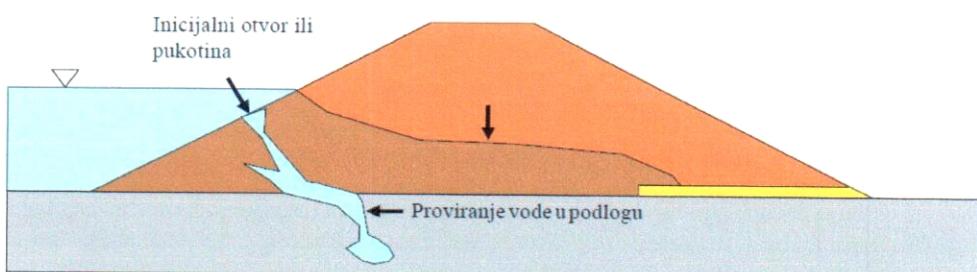
**Slika 3.2.** Unutrašnja erozija kroz podlogu brane (USBR, 2012)

- Unutrašnju eroziju duž kontakta objekata u brani i tela brane (slika 3.3)  
Objekti u brani su različiti kanali, cevovodi, prelivni objekti i drugi slični objekti.



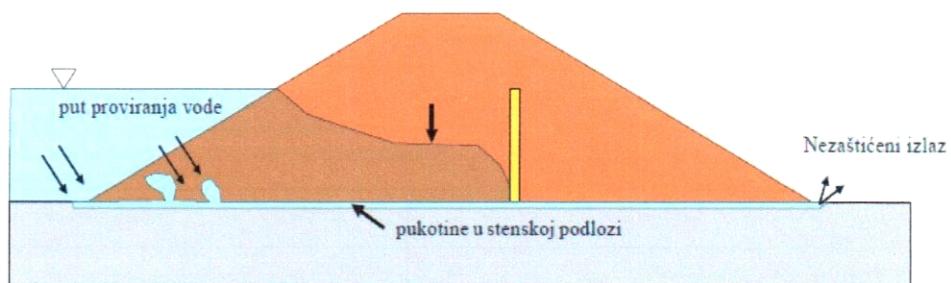
**Slika 3.3.** Unutrašnja erozija duž cevovoda (Richards, 2012)

- Unutrašnja erozija duž kontakta nasipa brane i podloge (usled erodovanja čestica iz nasipa i ispiranja materijala u podlogu) prikazana je na slici 3.4.



**Slika 3.4.** Unutrašnja erozija nasipa (ispiranje čestica u podlogu) (USBR, 2012)

- Unutrašnja erozija duž kontakta nasipa brane i podloge (usled erodovanja čestica iz podloge na kontaktu sa nasipom i ispiranje materijala u nasip) prikazana je na slici 3.5.



Slika 3.5. Unutrašnja erozija duž kontakta nasip-tlo (USBR, 2012)

### 3.2 Podela unutrašnje erozije u nasutim branama prema mehanizmu nastanka

Prema Fell i Fry (2013) osnovni vidovi unutrašnje erozije u nasutim branama su :

- Koncentrisana erozija nastaje na mestima gde postoji inicialni otvor npr. pukotina, kaverna i sl. Usled dejstva filtracionog toka dolazi do odvajanja čestica od zidova pukotine, njihovog iznošenja/ispiranja, proširivanja pukotine i formiranja erozionih kanala.
- Regresiona erozija, kod koje prvo dolazi do curenja i iznošenja čestice na nizvodnoj površini kosine nasipa, erozija se dalje regresiono širi ka uzvodnoj kosini u vidu kanala i tunela.
- Kontaktna erozija nastaje na kontaktu grubozrnog i finozrnog tla, kada se filtracija odvija paralelno duž kontakta tako da dolazi do erodovanja finih čestica.
- Sufozija nastaje pod uticajem filtracionog toka iznošenjem finozrnih čestica iz mase tla.

#### 3.2.1 Koncentrisana erozija

Koncentrisana erozija u brani, nasipu ili njenom temelju se može javiti u pukotinama nastalim usled: diferencijalnog sleganja tokom izgradnje brane ili nasipa; sušenja,

zamrzavanja i odmrzavanja na površini nasipa; posebnih uslova procedivanja oko cevovoda. Pukotine i drugi potencijalni putevi za proticanje vode mogu nastati i usled sleganja lošije zbijenih delova nasipa. Mogući inicijani izvori koncentrisane erozije su i kanali ili otvor i koji su nastali usled dejstva životinja (krtice, zečevi, lisice) koje oni kopaju za svoje skloništa. Nije zanemarljiv ni uticaj korenja drveća čijim truljenjem se takođe formiraju otvor i nasipima ili čak branama.

Ako postoji pukotina, i geometrijski i hidraulični uslovi u pukotini, rezultat su hidrodinamičke sile koje deluju na zidove pukotine, i koje iniciraju dalju eroziju.

Proces unutrašnje erozije biće zaustavljen ili usporen samo u slučaju ako (Bonelli S. 2013):

- 1) dođe do obrušavanja pukotine
- 2) postoji uzvodno ili u nekim slučajevima i nizvodno zona koja će ograničiti hidraulički gradijent
- 3) postoje filterskih slojeva koji su efikasni u zaustavljanju erozije
- 4) voda koja teče kroz pukotinu izaziva bubrenje zidova, dolazi do zatvaranja i smanjenja prečnika, a samim tim i protoka što je nedovoljno za dalji razvoj erozije.

### **3.2.2 Regresiona erozija**

Regresiona erozija se najčešće inicijalno javlja u tlu u podlozi, ali se može javiti i u nasipu brane. Proces erozije počinje na slobodnoj površini nizvodne kosine brane ili nasipa i razvija se dalje kroz telo brane „unazad“ prema uzvodnoj strani.

### **3.2.3 Kontaktna erozija**

Kontaktna erozija nastaje kao posledica strujanja duž kontakta grubozrnog i finozrnog tla. Finozrne čestice bivaju erodovane u porni prostor grubozrnog tla formirajući novi sloj drugaćijih geomehaničkih svojstava (Vuković i Pušić, 1986).

### **3.2.4 Sufozija**

Sufozija nastaje pod uticajem filtracije iznošenjem finozrnih čestica iz strukture tla. Ovaj vid unutrašnje erozije javlja se u poroznoj sredini sa neujednačenim granulometrijskim sastavom tj. sa velikim vrednostima koeficijenta neravnomernosti (Vuković i Pušić, 1986), i sredinama sa nedostatkom određenih frakcija u granulometrijskom sastavu. Finozrne čestice tla bivaju transportovane filtracionim silama kroz strukturu tla. Čestice grubozrnog tla koje čine skelet porozne sredine, ne transporuju se već ostaju na mestu.

Razlikujemo (Blais, 2005):

- unutrašnju sufoziju koja se javlja unutar porozne sredine
- spoljnu (površinska) sufoziju koja se javlja duž linije kontakta porozne sredine sa slobodnom atmosferom ili površinskom vodom
- kontaktnu sufoziju, koja se slično kao i kontaktna erozija javlja duž kontakta grubozrnog i finozrnog tla

Za pojavu sufozije potrebno je da bude zadovoljen jedan od tri kriterijuma:

- geometrijski
- naponski
- hidraulički

Geometrijski kriterijum: veličina finih čestica treba da bude u određenom odnosu prema veličini otvora pora između grubozrnih čestica koje čine skelet.

Kriterijum napona: količina finozrnih čestica mora da bude dovoljna da ispuni pore osnovnog skeleta formiranog od grubozrnog materijala. U takvom slučaju efektivni naponi se prenose samo preko neposrednih kontakata čvrstih čestica. Kao posledica toga neke fine čestice su zarobljene i ne mogu da se pokreću.

Hidraulički kriterijum: Brzina tečenja kroz strukturu tla mora da omogući dovoljno visoku hidrodinamičku silu da ona nadvlada težinu i otpor trenju finozrnih čestica, i da omogući njihovo kretanje između krupnijih čestica.

### **3.3 Mehanizmi razvoja procesa unutrašnje erozije u nasutim branama**

Za nastanak unutrašnje erozije i iznošenje čestica neophodno je da budu ispunjeni sledeći uslovi (Fell i dr. 2005; a prema Thun-u 1996):

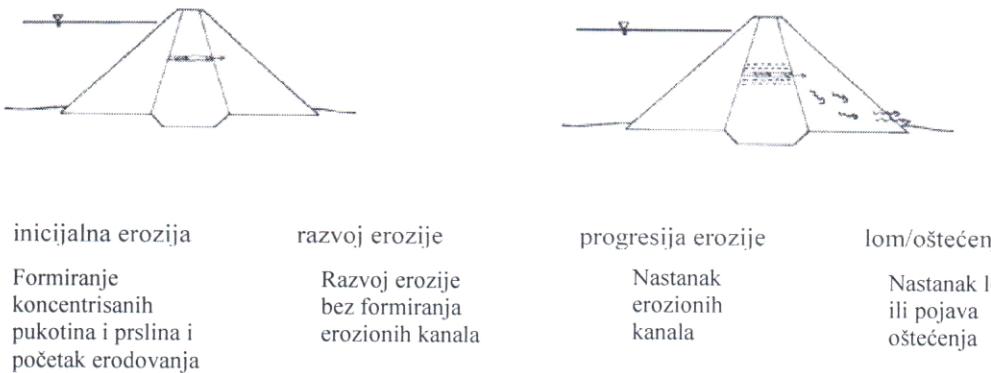
- 1) postojanje putanje tečenja
- 2) prisustvo erodibilnog materijala
- 3) nesprečeno isticanje vode na nizvodnom delu brane ili nasipa tj. ne postojanje odgovarajućih filtera ili drena
- 4) da bi se formirali erozioni "kanali" tečenja , materijal iznad ili ispod "kanala" mora da bude odgovarajućih karakteristika, kako ne bi došlo do zarušavanja istih.

Do pojave unutrašnje erozije i iznošenja čestica može doći u nasipu brane, u podlozi brane, ili iz nasipa u podlogu brane. Prema Foster (1999) u razvoju procesa unutrašnje erozije razlikujemo četiri faze:

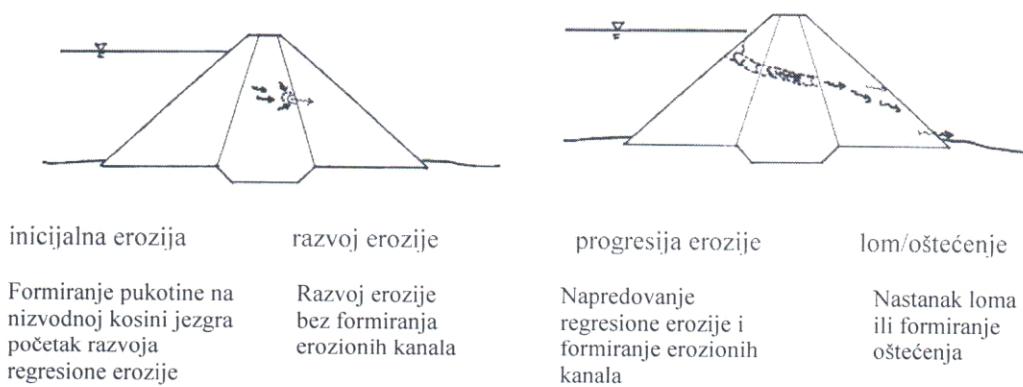
- 1) inicijalna (početna) erozija,
- 2) razvoj erozije, početak iznošenje čestica materija bez formiranja jasnih erozionih puteva
- 3) progresija erozije uz formiranje kanala (tj. puteva erodovanja)
- 4) pojave oštećenja i/ili loma u objektu

#### **3.3.1 Model nastanka unutrašnje erozije kroz nasip brane**

Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledice erodovanja čestica iz jezgra nasute brane usled koncentrisanog curenja je prikazan na slici 3.6, a usled pojave regresione erozije na slici 3.7.



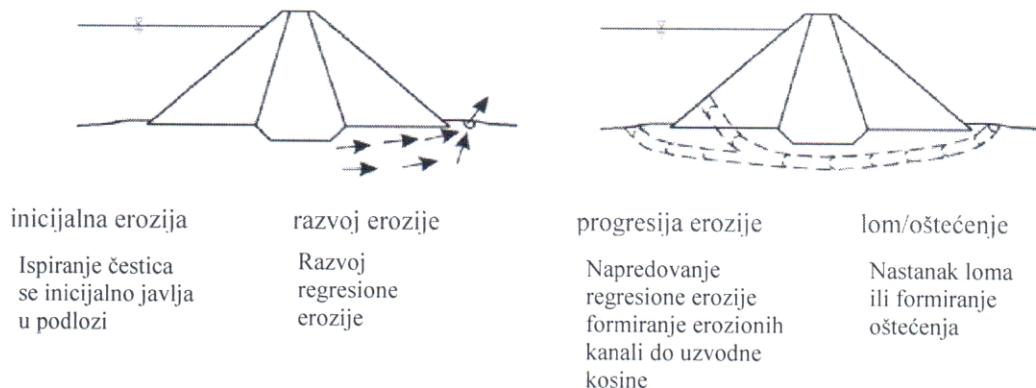
**Slika 3.6.** Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledica ispiranja čestica iz jezgra usled koncentrisanog curenja (Foster 1999; Fell i dr. 2005)



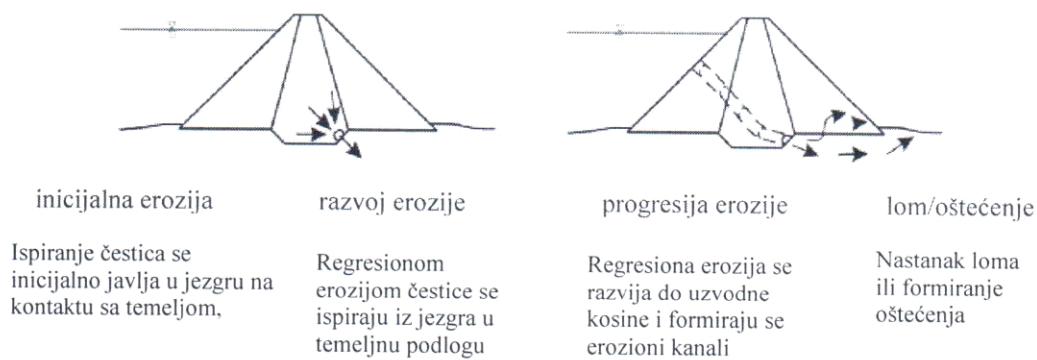
**Slika 3.7.** Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledice ispiranja čestica iz jezgra usled pojave regresione erozije (Foster 1999, Fell i dr. 2005)

### 3.3.2 Model nastanka unutrašnje erozije kroz podlogu brane

Slični procesi javljaju se i u podlozi ili duž kontakta nasipa i podloge nasute brane kao posledica regresione erozije, što je prikazano na slikama 3.8 i 3.9.



**Slika 3.8.** Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani kao posledice ispiranja čestica iz podloge usled regresione erozije (Foster 1999; Fell i dr. 2005)



**Slika 3.9.** Model nastanka oštećenja/loma u nasutoj brani prouzrokovanih ispiranjem čestica iz jezgra u podlogu usled regresione erozije (Foster 1999; Fell i dr. 2005)

U svim navedenim slučajevima iznošenje čestica je progresivna faza razvoja unutrašnje erozije koja nastaje kao posledica erozije nizvodne strane, erozije pukotine ili oslabljenih visoko propusnih zona, čiji je krajnji rezultat formiranje kontinuiranog

erozionog „kanala“ između nizvodne i uzvodne strane nasipa ili njegove podloge, proticanja znatnih količina vode i nastanka oštećenja.

Pojava problema procurivanja (Fry i dr., 2012) kroz nasip je tri do četiri puta češća nego procurivanje (gubitak vode) kroz podlogu. Procurivanje duž kontakta nasipa i podloge je ređe dva puta od prethodno navedenih. Oko 1/5 do 1/4 od oštećenja nastaju kao posledica erozije kroz podlogu. Oko polovina oštećenja nastaje duž kontakta objekata npr. kanala, preliva, zidova, hidrotehničkih tunela i sl. objekta i brana.

Kod zasićenih grubozrnh sredina (prašina, pesak, prašinasti pesak i peskovito šljunkovita tla) prilikom poplava relativno lako dolazi do urušavanja erozionih kanala“. Kako se veličina čestica grubozrnog tla povećava, ona progresivno zahtevaju više energije za nastanak erozije. Otpornost na eroziju je u direktnoj vezi sa veličinom i težinom čestica. U grubozrnom tlu se može javiti regresiona erozije, kontaktna erozije ili sufozija, zavisno od njihovog granulometrijskog sastava.

Finozrni materijali, npr. kao što su glina, glinoviti pesak i glinovito peskoviti šljunak, su generalno otpornija na eroziju nego grubozrni materijali. U ovim sredinama najčešće se javlja koncentrisana erozija i kontaktna erozija.

Regresiona erozija i sufozija se ne mogu javiti u finozrnim sedinama pod uobičajenim hidrauličkim gradijentima za brane i nasipe. Međutim, ima zabeleženih pojava u slučajevima kada su lokalni hidraulički gradijenti veoma visoki.

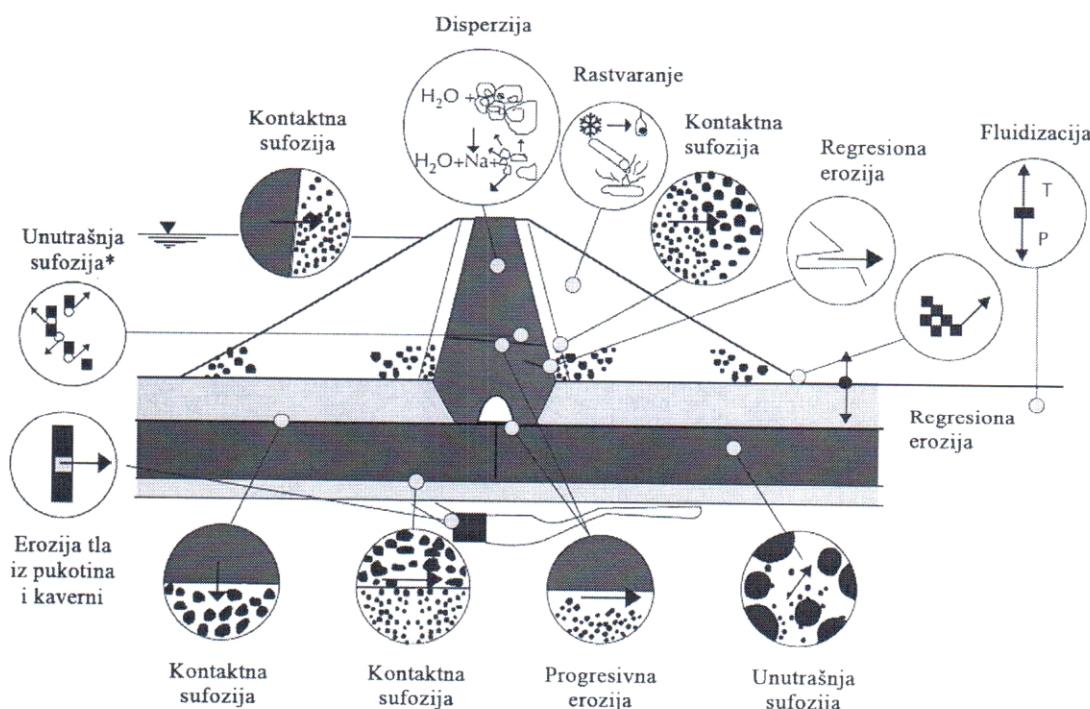
U disperzivnom tlu inicijalna erozija se javlja pri veoma niskom hidrauličkom gradijentu.

Najčešći vid unutrašnje erozije oko 2/3 slučajeva (Fry i dr., 2012) predstavlja, koncentrisana erozija. Iznošenje i ispiranje čestica tla u nasipu usled koncentrisane

erozije je češće kod malih brana, a uzrok tome je nedovolja zaštita malih brana. Naime, one se najčešće izgrađuju bez filtera ili sa neadekvatnim filterima.

### 3.4 Vidovi unutrašnje erozije u nasutim branama

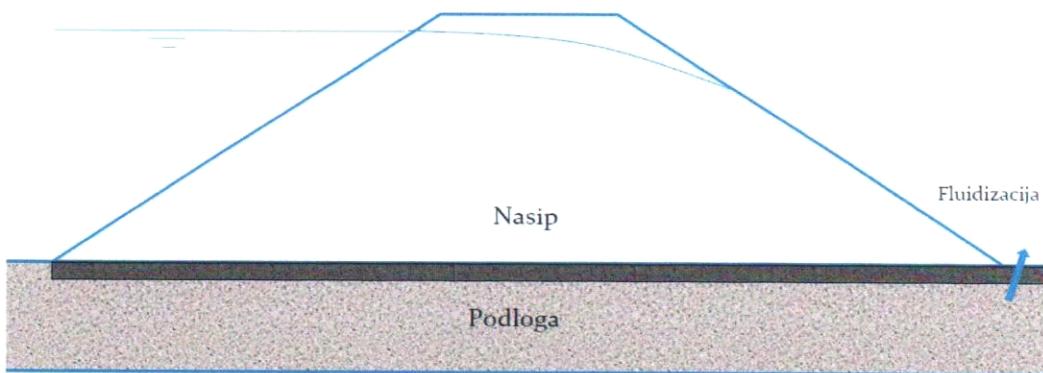
Nehomogene nasute brane predstavljaju složene građevinske objekte izgrađene od različitih vrsta materijala: jezgro od glinovitih-prašinastih materijala, filteri od peska ili finozrnog šljunka, potporno telo od šljunkovitog ili kamenitog drobinskog materijala. U tom sadejstvu materijala moguća je pojava različitih vidova unutrašnje erozije. Moguće pojave date su na slici 3.10. Neki od tipova unutrašnje erozije, već su prikazani u poglavlju 3.3.



**Slika 3.10.** Šema mogućih vidova pojave unutrašnje erozije u nasutoj brani  
(Schuler i Brauns 1997, preuzeto od Blais-a, 2005)

### 3.4.1 Fluidizacija (eng. piping by heave, fluidization, blow out, bulk erosion)

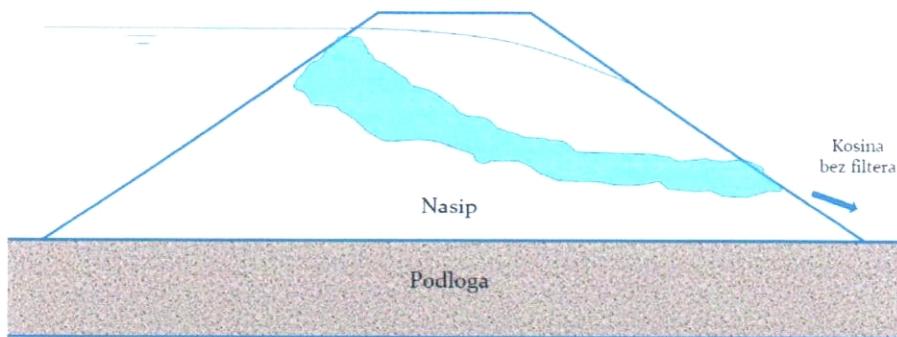
Fluidizacija je vid unutrašnje erozije koja nastaje pod uticajem strujanja naviše, pri čemu dolazi do iznošenja finih čestica iz osnovne strukture mase tla. Kao posledica strujanja vertikalno naviše dolazi do smanjenja efektivnih napona, prema tome do rastresanije strukture sredine i pokretanja sitinijih čestica. Razlikujemo fluidizaciju finozrnih čestica i fluidizaciju tzv. "klučanje" npr. peska.



Slika 3.11. Fluidizacija (Richards, 2012)

### 3.4.2 Sufozija (eng. suffusion, segregation piping)

Sufozija predstavlja vid unutrašnje erozije kod koje dolazi do pojave iznošenja finih čestica iz mase tla pod dejstvom hidrodinamičkih sila, pri čemu ostaje struktura formirana samo od grubozrnih čestica. Ukupna poroznost se povećava. Nastaje uglavnom kod loše granulisanih grubozrnih materijala kod kojih obično nedostaju određene frakcije čestica.



**Slika 3.12.** Sufozija (Richards, 2012)

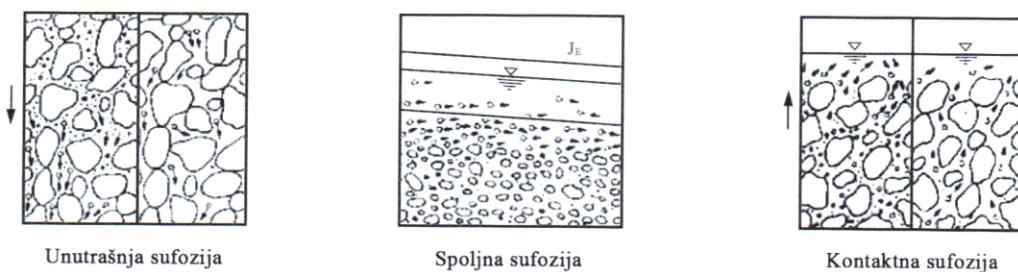
Razlikujemo tri tipa sufozije (slika 3.13):

- spoljnu (površinska) sufoziju
- unutrašnju sufoziju
- kontaktnu sufoziju

Spoljna sufozija nastaje duž kontakta tla (kao porozne sredine) i slobodne površine pr. atmosfere ili rečnog toka.

Unutrašnja sufozija javlja se unutar mase iste porozne sredine. Naziva se još i zapreminska sufozija.

Kontaktna sufozija se javlja na kontaktu dve porozne sredine npr. jezgra i filtera, filtera i potpornog tela nasute brane ili na kontaktu potpornog tela brane i temelja npr. aluvijon, i sl.



**Slika 3.13.** Tipovi sufozije (Kezdi, 1979)

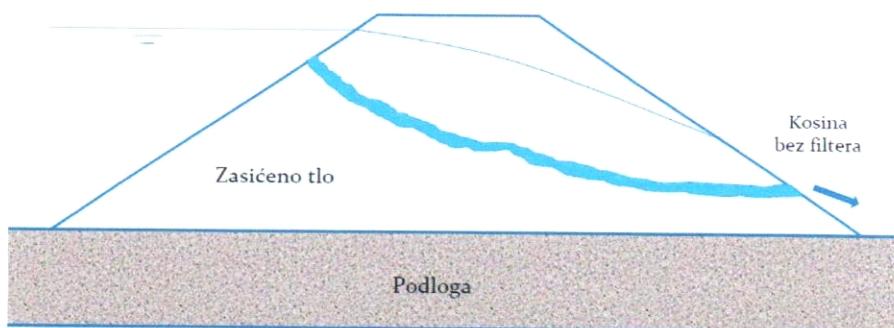
### 3.4.3 Unutrašnja sufozija\* (eng. suffosion by exsolution)

Ovaj specifičan vid sufozije se javlja u zonama jezgra nasute brane sa ekstremno malom vodopropustljivošću i visokim vrednostima hidrauličkog gradijenta (Garner i Sobkowicz, 2002). Prema Garneru do ovoga dolazi kada fine čestice tla migriraju na vrlo kratkom rastojanju pre formiranja kolminirajućeg (zapunjene) sloja, usled čega dolazi do smanjenja vodopropustljivosti i porasta pornog pritiska (gradijent), što sa vremenom dovodi do unutrašnje sufozije. Neočekivano visok porni pritisak (gradijent) u jezgru može nastati i usled zarobljavanja i rastvaranja vazduha tokom punjenja akumulacije (Sobkowicz i dr., 2000).

### 3.4.4 Regresiona erozija (eng. regressive erosion, backward erosion)

Regresiona erozija predstavlja vid unutrašnje erozije koji inicijalno nastaje na nizvodnoj kosini i razvija se ka uzvodnoj kosini. Regresiona erozija može da se javi i u temeljima

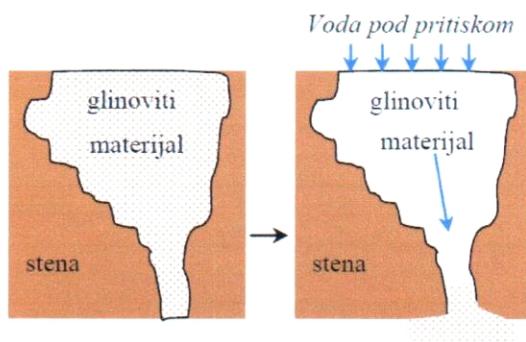
brane i unutar tela brana (slika 3.14). Razlikujemo regresionu eroziju koja inicijalno nastaje u nožici nizvodne kosine brane ili nasipa (eng. *ravelling, sloughing, sapping, flow-through erosion*) i regresionu eroziju koja inicijalno nastaje usled formiranja pukotine u nasipu ili u telu brane, pri čemu erozija napreduje uzvodno formirajući kanale, tunele kao puteve procurivanja (eng. *piping, warmholes*).



Slika 3.14. Regresiona erozija kroz nasip brane (Richards, 2012)

### 3.4.5 Erozija i ispiranje čestica tla iz pukotina i kaverni (eng. stripping)

Ovaj vid unutrašnje erozije nastaje ispiranjem čestica tla pod hidrodinamičkim silama vode iz pukotina ili kaverni unutar stenske mase, koje su ispunjene glinovitim materijalom.



Slika 3.15. Ispiranje čestica tla iz pukotina i kaverni (Pham, 2008)

### 3.4.6 "Progresivna" erozija

(eng. entrainment, bed-load transport, progressive erosion, seepage erosion, piping)

Progresivna erozija je tip unutrašnje erozije koja nastaje iznošenjem čestica tla duž privilegovanih kontura: cevovoda, kanala i dr. objekata u brani ili kanala koji su nastali radom životinja ili trulenjem korenja biljaka i sl. Ispiranje čestica tla može biti na površini terena u vodenim tok ili u određene pukotine ili kaverne.

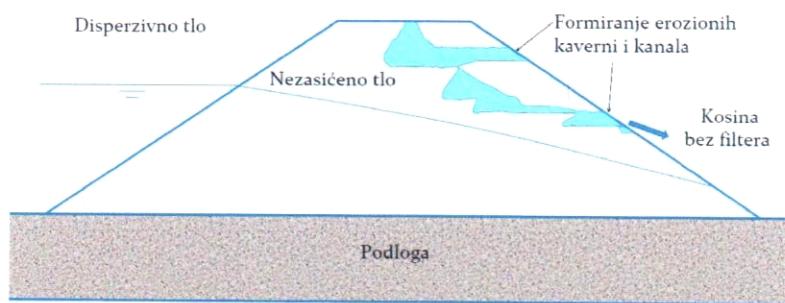
### 3.4.7 Rastvaranje (eng. dissolution)

Za razliku od prethodnih vidova unutrašnje erozije, rastvaranje nije mehanički fenomen. Dešava se pod uticajem rasvorljivosti kao i hemijskih ili termičkih agenasa na čestice tla. Promena u sastavu zrna dovodi do izmene mehaničkih i fizičkih karakteristika tla, i pokretanja unutrašnje erozije.

### 3.4.8 Disperzivnost

Disperzivnost je vid unutrašnje erozije, koji nastaje kao posledica fizičko-hemijskih promena u tlu. Javlja se kod posebne vrste tla tzv. disperzivnog finozrnog tla, u kom pod uticajem vode i strujanja pri hidrauličkim gradijentima dolazi do strukturalnih promena tj. odvajanja i deflokulisanja čestica, slabljenja intergranularnih veza. Usled

toga dolazi do ispiranja i iznošenja čestica i formiranja "erozionih kanala", što za posledicu ima pojave različitih vidova oštećena u nasutim branama.



**Slika 3.16.** Pojava disperzivnosti u nasipu brane (Richards, 2012)

### 3.5 Zaključak

Unutrašnja erozija u tlu je složeni fenomen koji za posledicu može imati ozbiljna oštećenja, pa i rušenja nasutih. U ovom prikazu izloženi su osnovni mehanizmi nastanka unutrašnje erozije koji su dali Foster i Fell, (2007). Međutim, u prirodi mehanizam unutrašnje erozije je daleko složeniji. Vrlo često postoji više uzroka nastanka unutrašnje erozije, što prouzrokuje i složenije mehanizme unutrašnje erozije. Postoji i više podela vidova unutrašnje erozije. Sa aspekta ovog rada vrlo je bitna podela koja jasno izdvaja vidove unutrašnje erozije u nasutim branama. Ova podela razmatra i kriterijum mesta i mehanizma nastanka. Bitno je istaći da ostale podele ne razmatraju rastvorljivost i

disperzivnost kao izuzetno važne uticaje na unutrašnju eroziju. Ova dva fenomena su fizičko-hemijske prirode, i vrlo su bitni kod finozrnog tla. Dok kod grubozrnih materija dominiraju mehanički uticaji npr. granulometrijski sastav tla. Disperzivnost kao vid unutrašnje erozije tla, je direktna posledica mineralnog sastava, strukture finozrnog tla i promena koje nastaju u njima.

## **POGLAVLJE 4. OPITI ZA IDENTIFIKACIJU I KLASIFIKACIJU DISPERZIVNOG FINOZRNOG TLA**

U proučavanju disperzivnog tla jedan od osnovnih problema predstavlja identifikovanje i klasifikovanje ovakvog tla. Disperzivna tla se ne mogu prepoznati uobičajenim identifikaciono – klasifikacionim opitima koji se primenjuju pri identifikaciji i klasifikaciji tla sa gomehaničkog stanovišta, kao što su granulometrijska analiza, opit plastičnosti i dr. Osnovne metode koje se koriste za ispitivanje disperzivnosti su:

- metoda grudvice tla - (Crumb test: ASTM<sup>1</sup> D6572-06; BS<sup>2</sup> 1377-5:1990, tačka 6.3; USBR<sup>3</sup> 5400-89)
- metoda duplog hidrometrisanja - (SCS opit: ASTM D4221-99; BS 1377-5:1990, tačka 6.4; USBR 5405-89)
- metoda veštački formirane pore (pin-hole opit: ASTM D 4647-93; BS 1377-5:1990, tačka 6.2; USBR 5410-89)
- hemijski opiti za određivanje sadržaja natrijuma (ESP i SAR)

### **4.1 Opit grudvice**

Opit grudvice (eng.*crumb test*), koji se još i po autoru naziva Emersonov test (Emerson 1967), predstavlja brz terenski opit, koji se može koristiti i u laboratoriji za prepoznavanje diperzivnih glina. Posmatranjem ponašanja nekoliko grudvica tla potopljenih u laboratorijsku čašu sa destilovanom vodom (ASTM D6572-06) ili sa rastvorom 0.001M<sup>4</sup> natrijum hidroksida (BS 1377-5:1990, tačka 6.3) definiše se klasa uzorka.

Grudvica tla je oblika kocke stranica približno od 10-15 mm. Vizuelnim opažanjem u određenim vremenskim intervalima prati se reakcija uzorka: oblik uzorka, promena

<sup>1</sup> American Standard for Testing and Materials

<sup>2</sup> British Standards: Soil for Civil Engineering Purposes

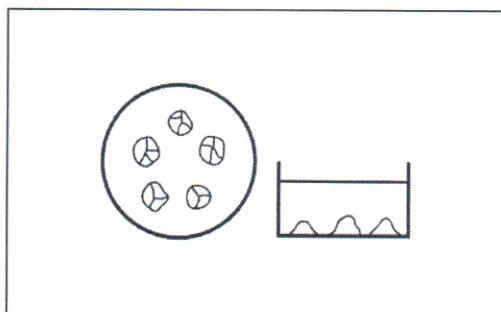
<sup>3</sup> United States Bureau of Reclamation

<sup>4</sup> 0.04g NaOH/1 l destilovane vode

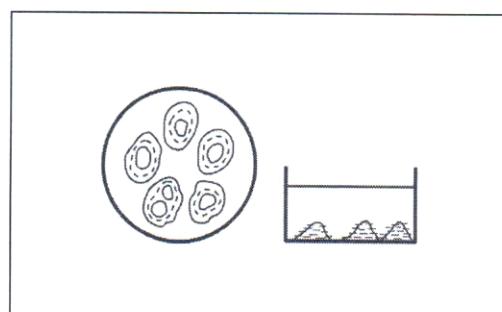
strukture, boja i zamućenost vode, formiranje koloidnih „oblaka“ ili grupisanja koloidnih čestica. Prema BS 1377-5:1990 opažanje se vrše na 5 min, 10 min a prema ASTM D6572-06 na 2 min, 1 h i 6 h. Za klasifikaciju tla merodavno je čitanje nakon 1h. Međutim ako se klasa menja iz 2 u 3 ili iz 3 u 4 za čitanja između 1 i 6 časova, usvaja se čitanje na 6 h.

U zavisnosti od reakcije razlikujemo četiri klase disperzivnosti:

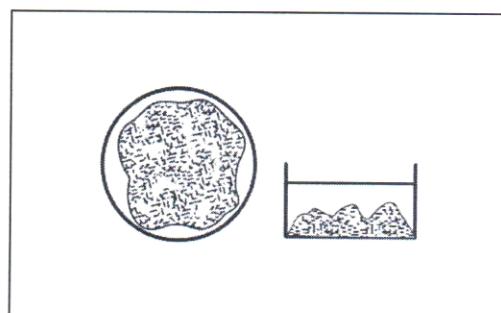
1. klasa: **Nedisperzivna tla ND** - tla bez ikakve reakcije: grudvice tla se mogu drobiti, mrviti, izgubiti oblik, formirati gomilice na dnu čaše, ali nema znakova promene boje tj. voda je bistra, nema zamućenosta.
2. klasa: **Slabo disperzivna tla SD** - tla sa blagom do slabom reakcijom: fini jedva vidljivi tragovi zamućenja, blago koloidno zamućenje oko površine uzorka ili fini koloidni sloj na dnu čaše.



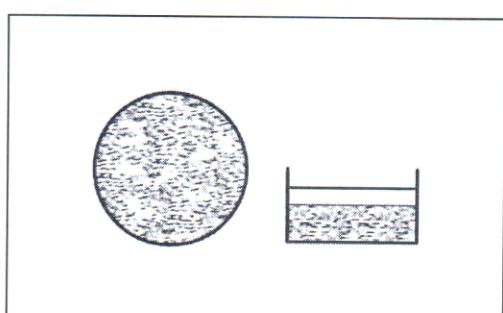
klasa 1. Ne disperzivno tlo ND



klasa 2. Slabo disperzivno tlo SD



klasa 3. Srednje disperzivno tlo MD



klasa 4. Izrazito disperzivno tlo HD

**Slika 4.1.** Klase disperzivnosti tla (Emerson, 1967)

3. klasa: **Srednje disperzivna tl MD** -jasno vidljiv oblak koloidnog zamućenja oko grudvice tla.
4. klasa: **Izrazito disperzivno tlo HD** - jaka reakcija u vidu gustog zamućenja, koloidno zamućenje pokriva čitavo dno čaše, a vrlo često se javlja i na zidovima. U ekstremnim slučajevima destilovana voda ili rastvor 0.001M NaOH su u potpunosti zamućeni.

Opit grudvice je vrlo jednostavan, lako ponovljiv i brz opit za određivanje disperzivnosti glina. Izvođenje opita nije skupo, ne zahteva kompleksnu opremu i može se koristiti i u laboratoriji i na terenu.

Opit grudvice uglavnom daje dobre rezultate u pogledu identifikovanja disperzivnog finozrnog tla. Ponekad se može desiti da neka diperzivna tla ne pokažu reakciju, koja se kasnije dokaže drugim opitima (pr. pinhole opit). Tako npr. finozrna tla koja sadrže kaolinit mogu da ne pokazuju disperzivnu reakciju u opitu grudvice, a na terenu su se pojavili problemi usled disperzivnosti ovog tla (Kinney, 1979). Rezultati ispitivanja opitom grudvice, u velikoj meri zavisi od pH vrednosti porne vode kao i vrste glinenog minerala prisutnog u tlu. Međutim, ukoliko je opit grudvice pokazao da je tlo diperzivno ono je uglavnom pokazuje disperzivnu reakciju i u drugim opitima (Sherard 1976).



**Slika 4.2.** Fotografija reakcija tla za određene klase disperzivnosti  
([http://www.agric.wa.gov.au/PC\\_93842.html](http://www.agric.wa.gov.au/PC_93842.html))

Metoda nije primenjiva za tla sa manje od 12% čestica sitnijih od 0,005 mm i sa indeksom plastičnosti  $Ip \leq 8$  (ASTM D 6572-00). Naime, ova tla ne sadrže dovoljno glinenih koloidnih čestica da bi pokazivala disperzivno ponašanje.

#### **4.2 Opit duplog hidrometrisanje (SCS - Soil Conservation Service opit)**

Laboratorijsko ispitivanje disperzivnih glina duplim hidrometrisanjem predstavlja najstariju metodu za ocenu disperzivnosti koju je razvio Volk 1937. Naime, granulometrijski sastav se ispituje na dva ista uzorka. Na prvom uzorku sprovodi se standardno hidrometrisanje sa destilovanom vodom, uz primenu hemijskog disperziva tj. antikoagulansa i sa mehaničkim mućanjem, u skladu sa postupkom definisanom u standardu ASTM D 4221-99 ili BS 1377-5:1990. Paralelno na drugom uzorku sprovodi se ispitivanje u destilovanoj vodi, bez mućanja i antikoagulansa. Procenat disperzivnosti PD određuje se prema relaciji:

$$PD = \frac{A}{B} \quad (4.1)$$

Gde je

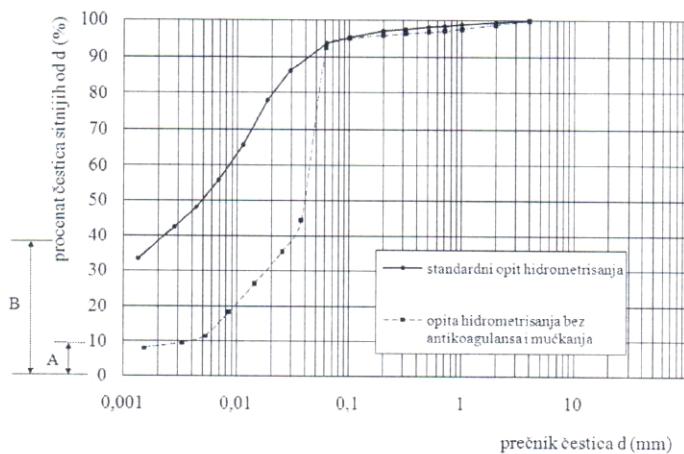
A - % čestica sitnijih od 0.005/0.002 mm bez antikoagulansa

B - % čestica sitnijih od 0.005/0.002 mm sa antikoagulansom i mehaničkim mućanjem

Prema ASTM D 4221-99 standardu očitava se procentualno učešća čestica sitnijih od 0.005 mm, a prema BS 1377-5:1990 standardu procentualno učešća čestica sitnijih od 0.002 mm.

U zavisnosti od procenta disperzivnosti tla (PD) se mogu klasifikovati (Kinney, 1979):

- $PD < 35\%$  nema disperzivnosti
- $35 < PD < 50\%$  srednje disperzivna tla
- $PD > 50\%$  disperzivna tla



**Slika 4.3.** Procenat disperzivnosti određen opitom duplog hidrometrisanja

Prema Decker 1971 (preuzeto od Hazena i dr. 1976.) vrednost kritičnog procenta disperzivnosti zavisi od tipa tla. Tako on navodi da je neorganska glina (CL-CH) disperzivna ukoliko je procenat disperzivnosti  $PD > 40\%$ , dok za neorganske prašine niske plastičnosti, glinoviti pesak i prašinasti pesak (ML, SC, SM) kritični procenat disperzivnosti varira u rasponu od 25-30%.

Prema Decker-u i Dinnigan-u (1977), opit duplog hidrometrisanja je u oko 85% slučajeva pouzdan u određivanju disperzivnih tla ( $PD > 30\%$ ). Međutim, rezultati ispitivanja disperzivnosti mogu varirati zavisno od uslova pod kojima se opit sprovodi. U vreme verifikacije ove metode 50-tih i 60-tih godina, kada je ova metoda bila veoma popularna kao metoda klasifikacije disperzivnog tla, utvrđeno je da ispitivanja izvedena u različitim laboratorijama na uzorcima istog tla donose različite rezultate. Istraživanja Sherarda pokazuju da rezultati variraju usled razlike u kvalitetu vode i vlažnosti uzorka u trenutku ispitivanja. Tako se uporednim ispitivanjima sa različitim vrstama vode i različitim tretmanom uzorka (uzorci prirodne vlažnosti, uzorci osušeni na vazduhu i uzoraci osušeni u sušnici) došlo do zaključka da se najbolji rezultati dobijaju korišćenjem destilovane vode i uzorka tla sa prirodnom vlažnošću.

#### 4.3 Hemiske metode određivanja disperzivnosti finozrnog tla

Hemiske metode određivanja disperzivnosti glina zasnivaju se na sadržaju natrijumovih katjona u pornoj vodi. Jedan od parametara za identifikaciju dispezivnog finozrnog tla je procenat izmenljivog natrijuma ESP (*Exchangeable sodium percent*) koji predstavlja odnos natrijumovih i ukupnih katjona (natrijumovih, magnezijumovih, kalijumovih i kalcijumovih katjona):

$$ESP = \frac{Na^+}{Na^+ + Mg^+ + K^+ + Ca^{2+}} \quad (4.2)$$

U zavisnosti od vrednosti ESP-a finozrna tla se klasikuju u sledeće klase:

- |          |                           |
|----------|---------------------------|
| ESP<7    | – nedisperzivna tla       |
| 7<ESP<10 | – srednje disperzivna tla |
| ESP>10   | – disperzivna tla         |

Drugi parametar koji se najčešće primenjuje za identifikaciju diperzivnog finozrnog tla je koeficijent absorcije natrijuma tj. SAR (*Sodium absorption ratio*):

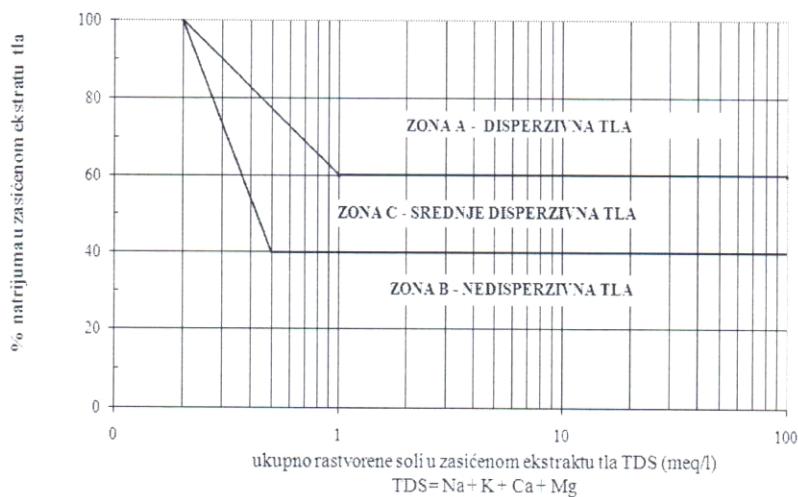
$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{0.5(Mg^+ + Ca^{2+})}} \quad (4.3)$$

Tla kod kojih vrednost SAR-a veća od 2 predstavljaju disperzivna tla (Aitchison i Wood, 1965).

Još jedan vrlo bitan pokazatelj disperzivnosti je vrsta i sadržaj ukupno rastvorljivih soli u pornoj vodi TDS (*Total dissolved salts*)

$$TDS = Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} \quad (4.4)$$

Dispezioni potencijal tla predstavlja odnos između količine natrijuma i ukupnih soli. Na osnovu sadržaja natrijuma i TDS, prikazanom na dijagramu na slici 4.4 Sherard je svrstao tla u tri zone: A - disperzivna tla, B - nedisperzivna tla i C - srednje disperzivna tla (Sherard i dr. 1976a).



Napomena: % natrijuma u zasićenom ekstratu tla

$$= \frac{\text{Na}(\%)}{\text{Na} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Ca}}$$

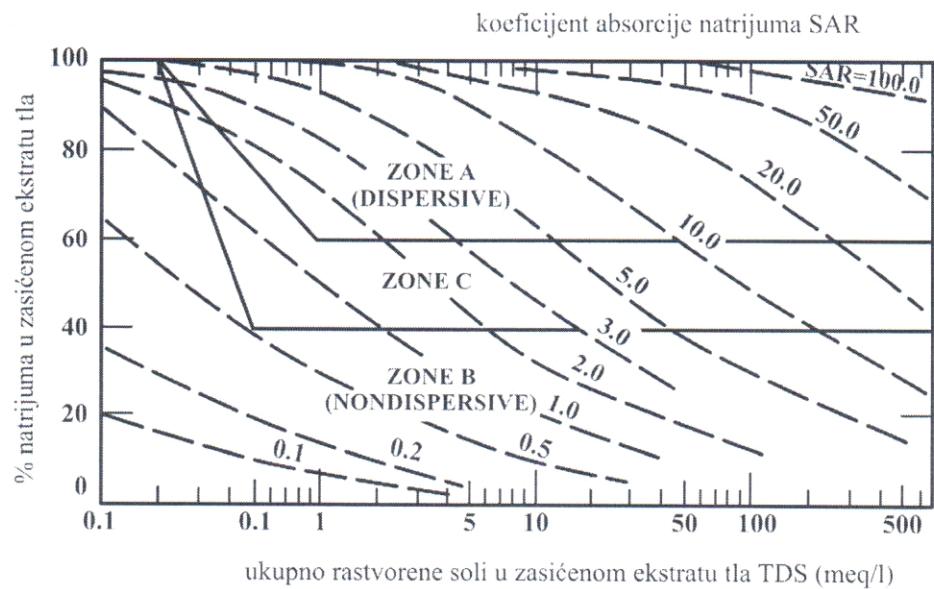
**Slika 4.4.** Disperzionalni potencijal (Sherard i dr. 1976a)

Grafik prikazan na slici 4.4, (US Bureau of Reclamation, 1991) proširen je krivama koeficijenta absorcije natrijuma SAR (slika 4.5).

#### 4.4 Pinhole opit - opit veštački formirane pore

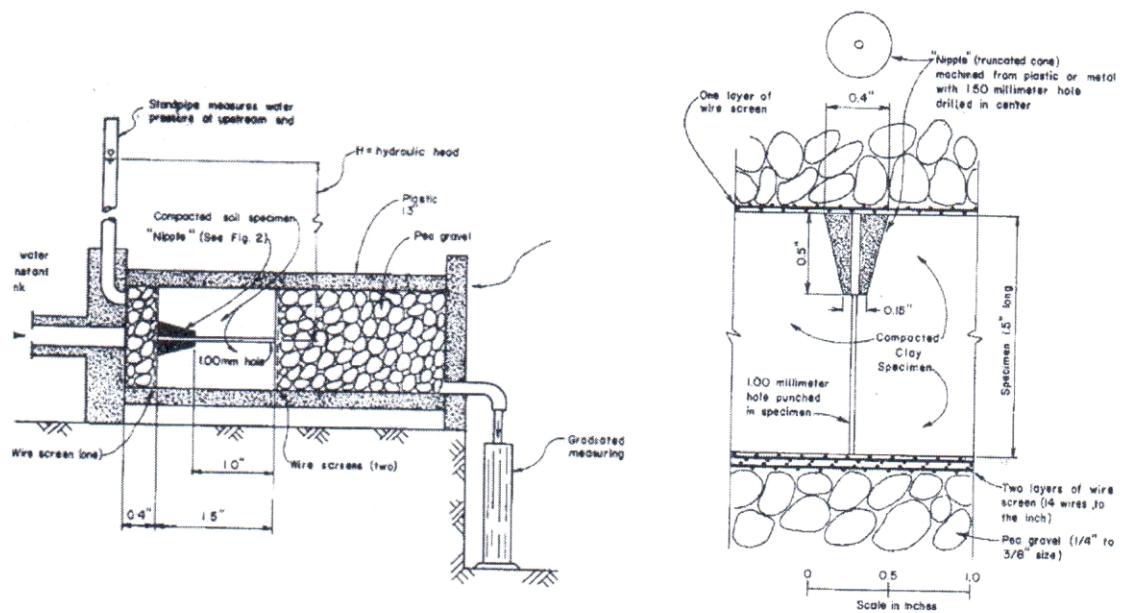
Pinhole opit je fizička metoda za direktno određivanje otpornosti na eroziju zidova veštački formirane cilindrične pore ( $\varnothing 1\text{mm}$ ) kao posledica strujanja vode.

Metodu je razvio Sherard 1976. nakon velikog broja (nekoliko stotina) ispitivanja sprovedenih u laboratoriji na uzorcima uzetih iz zona oštećenja nasutih brana, nasipa i kanala. Dobijene rezultate uporedio je sa rezultatima hemijskih opita i na taj način izvršio verifikaciju metode koja je kasnije standardizovana. Na slici 4.6 data je skica originalnog pinhole aparata.



**Slika 4.5.** Klasifikacija disperzivnog tla prema SAR, TDS i sadržaju natrijuma  
(US Bureau of Reclamation, 1991)

U pinhole aparat ugrađuje se cilindrični uzorak prečnika D=32,5 mm i visine h=40 mm u kome se formira centrična cilindrična pora ("cevčica") Ø 1mm, kroz koju se propušta



**Slika 4.6.** Original skica Sherard-ovog aparata (1976a)

destilovana voda pri različitim hidrauličkim nivoima H: 50, 180, 380 i 1020 mm (hidraulički gradijent približno 2, 7, 15 i 41) simulirajući tečenje vode kroz porni prostor. Pri tome se registruje protok vode  $q$  (ml/s), boja i koloidno zamućenje, veličina pore u uzorku nakon izvedenog opita. Na osnovu ovih podataka se vrši klasifikacija disperzivnosti finozrnog tla. Ako je tlo disperzivno destilovana voda koja prolazi kroz poru formiranu u uzorku je koloidno mutna, a prečnik pore nakon ispitivanja u uzorku je proširen  $d>1\text{mm}$ . Originalna skica Sherard-ovog pinhole aparata data je na slici 4.6.

U metodi razlikujemo tri postupka za klasifikaciju disperzivnog finozrnog tla A, B i C. Klase disperzivnosti prema postupku A i B date su u tabeli 4.1. Tla sa oznakom klase D1 i D2 su disperzivna tla, ND1 i ND2 su nedisperzivna tla, a tla sa oznako ND3 i ND4 su srednje disperzivna tla (Sherard i dr., 1976a). Postupak B, koji je takođe prikazan u tabeli 4.1, klasificuje tla u tri kategorije: disperzivna tla D (odgovaraju klase D1, D2 i ND4 iz postupka A), slabo disperzivna tla SD (odgovara klasi ND3 iz postupka A) i nedisperzivna tla ND (odgovaraju klase ND2 i ND1 postupka A). Kriterijumi klasifikacije prema postupku C prikazani su na slici 4.7.

**Tabela 4.1.** Klasifikacija tla na osnovu rezultata pinhole opita, postupak A i B  
(ASTM D 4647-93)

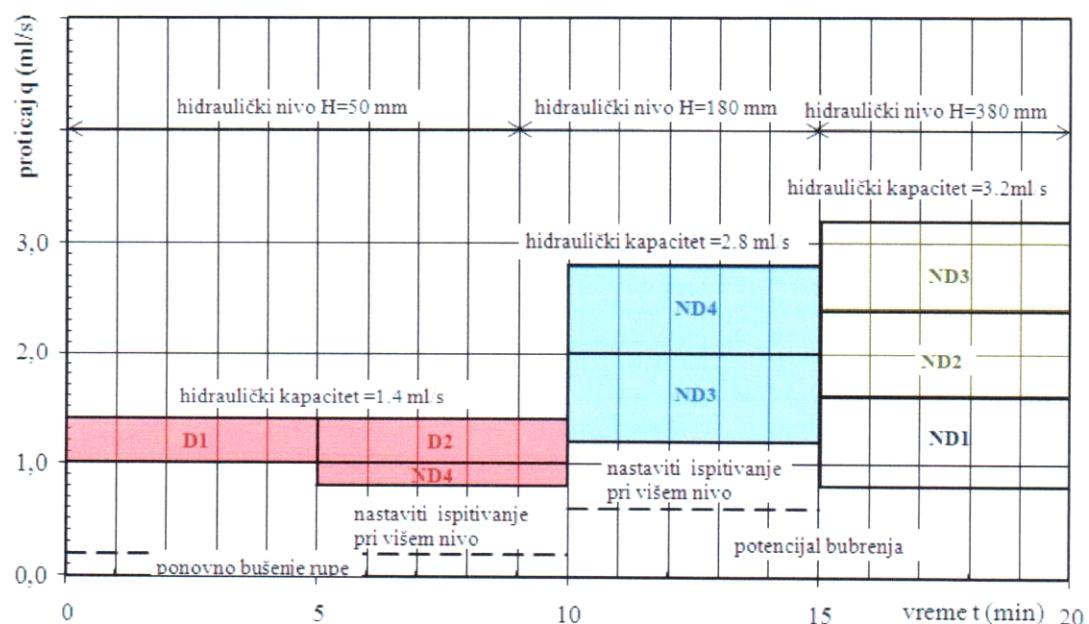
Klasa disperzivnosti	Hidraulički nivo H (mm)	Protekle vremenske (min)	Proticaj q (ml/s)	Zamućenost na kraju ispitivanja		Veličina pore nakon ispitivanja d (mm)
				sa strane	od vrha	
<b>Postupak A:</b>						
D1	50	5	1.0-1.4	tamna	vrlo tamna	$\geq 2.0$
D2	50	10	1.0-1.4	srednje tamna	tamna	$> 1.5$
ND4	50	10	0.8-1.0	svetlo tamna	srednje tamna	$\leq 1.5$
ND3	180 380	5 5	1.4-2.7 1.8-3.2	jedva vidljivo	svetlo tamna	$\geq 1.5$
ND2	1020	5	$>3.0$	bistro	jedva vidljivo	$< 1.5$
ND1	1020	5	$\leq 3.0$	potpuno bistro	potpuno bistro	1.0
<b>Postupak B:</b>						
D	50	10	/	svetlo tamna do tamna	vrlo tamna do srednje tamna	$\geq 1.5$
SD	180-380	5	/	jedva vidljiva	svetlo tamna	$\geq 1.5$
ND	380	5	/	bistra	jedva vidljiva do bistra	$< 1.5$

Klasifikacije prema postupak A i C su slične, a razlike između njih se odnose na veličine protoka.

- Tla kod kojih je protekla voda (suspenzija) srednje mutna a protok od 2.0-2,8 ml/s, pri hidrauličkom nivou ispitivanja 180 mm u toku 5 min, se klasificuju kao klasa ND4.
- Tla kod kojih je protekla voda (suspenzija) svetlo mutna do bistra, a protok od 2.4-3.2 ml/s, pri hidrauličkom nivou ispitivanja H=380 mm u toku 5 min, se klasificuju kao klasa ND3
- Tla kod kojih je protekla voda (suspenzija) svetlo mutna do bistra, a protok od 1.6-2.4 ml/s, pri hidrauličkom nivou ispitivanja H=380 mm u toku 5 min, se klasificuju kao klasa ND2.

- Tla kod kojih je protekla voda (suspenzija) bistra, a protok od 0.8-1.6 ml/s, pri hidrauličkom nivou ispitivanja  $H=380$  mm u toku 5 min, se klasificuju kao klasa ND1.

D1	D2	ND4	ND3	ND2	ND1
disperzivno tlo		srednje		nedisperzivno tlo	
disperzivno tlo					



**Legenda:**

- [Red Box] tamno mutna boja rastvora destilovane vode
- [Light Blue Box] mutna do svetlo mutna boja rastvora destilovane vode
- [Yellow Box] svetlo mutna ili bistra boja rastvora destilovane vode
- [White Box] bistra boja rastvora destilovane vode

Napomena: Kriterijumi se odnose na poru prečnika  $d=1$  mm

**Slika 4.7.** Kriterijumi klasifikacije disperzivnog tla prema postupku C  
(ASTM D 4647-93)

Iz tabele 4.1 i slike 4.7 jasno je da postupci A i C kao kriterijume za klasifikaciju disperzivnih tla koriste zamućenje protekle vode (suspenzije), prečnik cilindrične pore nakon izvedenog opita i količinu vode koja u određenom vremenskom intervalu protekne kroz poru tj. proticaj q. Nasuprot tome, postupak B pri klasifikaciji ne uključuje protok. Protok u metodi A i C primarno služi kao pokazatelj ispravnosti opreme, ponašanja uzorka tokom opita i uopšte uslova izvođenja opita. Svi postupci daju približno slične rezultate i bilo koji postupak se može koristiti u identifikaciji disperzivnog tla (prema ASTM D 4647-93). Koji postupak klasifikacije disperzivnog tla će se primeniti zavisi od značaja objekta, cene koštanja i nivoa projekta.

Slično kao i opit grudvice pinhole metoda nije primenjiva za tla sa manje od 12% čestica sitnijih od 0,005 mm i sa indeksom plastičnosti  $Ip \leq 4$  (ASTM D 4647-93).

#### **4.5 Zaključak**

Pinhole opit je metoda identifikacije i klasifikacije disperzivnog finozrnog tla koja se primjenjuje za izgradnju nasutih zemljanih objekata. Ispiranje i iznošenje finozrnih čestica, i pojava oštećenja u nasutim zemljanim objektima, u većini slučajeva se dešava duž formiranih pukotina i kanala. Pinhole opit modelira uticaj tečenja vode duž pora u zemljanim nasutim objektima. Opit grudvice i duplog hidrometrisanja kao pokazatelj diperzivnosti koristi koloidnu zamućenost suspendovanih koloidnih čestica. Dok se identifikacija pomoću hemijski opiti bazira na sadržaju natrijuma u ukupnom sadržaju rastvorenih soli u tlu. Prema dosadašnjim istraživanjima, rezultati dobijeni ispitivanjima u pinhole testu pokazuju najbolju korelaciju sa erozionim ponašanjem disperzivnog finozrnog tla u prirodi.

## POGLAVLJE 5. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Sprovedena eksperimentalna laboratorijska ispitivanja imala su za cilj:

- identifikaciju i klasifikaciju disperzivnog tla različitim metodama
- uticaj stepena zbijenosti tla na disperzivnost tla
- mogućnost stabilizacija disperzivnog tla pepelom

Ispitivanjima su obuhvaćeni: opit grudvice tla, opit duplog hidrometrisanja i pinhole opit. U ovom poglavlju su prikazani detalji vezani za izvođenje pojedinih metoda ispitivanja kako standardnih tako i modifikovanih standardnih metoda, kao i rezultati ovih istraživanja. Detaljno su obrazložene prednosti primenjenih metoda, sa konstruktivnim izmenama opreme, što se posebno odnosi na pinhole opit.

### 5.1 Opit grudvice tla

Opit grudvice izведен je prema standardu ASTM D 6572-00 (*Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test*), i prema standardu BS 1377-5:1990, tačka 6.3. (*British Standard: Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 5: Compressibility, permeability and durability tests; It.6.3 – Crumb method*) Ispitivanja su sprovedena na veštački pripremljenim uzorcima tla, pri optimalnoj vlažnosti (wopt) i maksimalnoj suvoj gustini tla (pdmax), odnosno stepenu zbijenosti Sz=100%.

*Oprema:*

Opit grudvice predstavlja jednostavan opit za izvođenje i ne zahteva specijalnu opremu. Za izvođenje opita koristi se: sito otvora 2mm, laboratorijska staklena čaša zapremine ne manje od 250 ml, termometar mernog opsega 0-50°C, tačnosti 0,5 °C i štoperica.

*Priprema uzorka:*

Prethodno osušen i usitnjen uzorak tla, proseje se kroz sito sa otvorom 2mm. Tako pripremljen materijal ugrađen je u cilindar koji se koristi za ispitivanja u pinhole aparatu, sa sadržajem vode i gustinom koja odgovara podacima dobijenim standardnim Proktorovim opitom. Uzorak je zbijan u tri sloja statičkim zbijanjem. Nakon zbijanja uzorak je istisnut iz cilindara, i iz njega su formirani uzorci oblika kocke stranica oko 15 mm. Po tri uzorka su postavljena u laboratorijsku čašu i potopljena zavisno od metode, u destilovanu vodu i/ili rastvor 0.001 M natrijum hidroksida.



**Slika 5.1.** Pripremljeni uzorci za opit grudvice



**Slika 5.2.** Ispitivanje opitom grudvice

Dalja ispitivanja i interpretacija rezultata sprovedeni su prema postupku opisanom u poglavlju 4.2. Izgled uzoraka nakon zbijanja i pripremljenih za ispitivanje je dat na slici 5.1, a na slici 5.2 izvođenje opita. Pri svakom opažanju pored boje i koloidnog zamućenja suspenzije, stepena degradacije (destrukcije) uzorka, merena je temperatura suspenzije, i svi prikupljeni podaci su beleženi u zapisnik koji je prikazan na slici 5.3.

Na slici 5.4 dati su primeri tipičnih klasa.

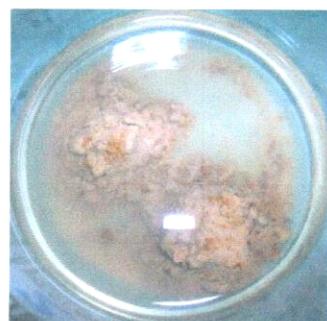
TEST DISPERZIVNOSTI TLA CRUMB TEST-TEST GRUDVICE												
Oznaka uzorka	Standard i sl.	Broj posude	Vreme osmatranja/temperatura									
			2 min t (°C)	20 min t (°C)	60 min t (°C)	1 h t (°C)	4 h t (°C)	8 h t (°C)	24 h t (°C)	48 h t (°C)	72 h t (°C)	96 h t (°C)
	Uzorak sa destilovanom vodom ASTM D 6572-00											
	Uzorak sa NaOH BS 1377-5:1990											

NAPOMENA:  
U kolone vreme upisuju se oznake klase

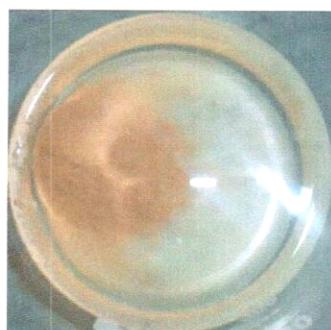
Slika 5.3. Zapisnik rezultata ispitivanja opitom grudvice



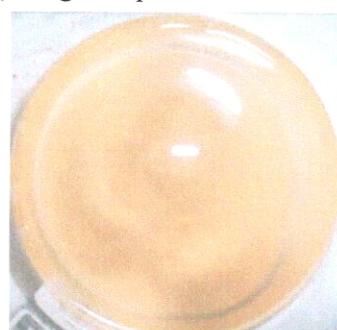
a) nedisperzivno tlo ND



b) blago disperzivno tlo SD



c) srednje disperzivno tlo MD



c) izrazito disperzivno tlo HD

Slika 5.4. Klase disperzivnosti tla prema opitu grudvice

## **5.2 Opit duplog hidrometrisanja**

Određivanje disperzivnosti tla opitom duplog hidrometrisanja izvedeno je prema standardu ASTM D 4221-99 (*Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer*) i BS 1377-5:1990, tačka 6.4 ((*British Standard: Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 5: Compressibility, permeability and durability tests; It.6.4 - Dispersion method*). Osnovna razlika u standardima je u čitanju veličine čestica sitnijih od 0.002 ili 0.005 mm izražene procentualno, koja se koristi za izračunavanje procenta disperzivnosti.

Prema ASTM D 4221-99, čitanje procentualnog učešća čestica sitnijih od  $d=0.005$  mm, a prema BS 1377-5:1990 standardu sitnijih od  $d=0.002$  mm.

Oprema koja se koristi je standardna oprema za ispitivanje granulometrijskog sastava. Spovedena su po dva ispitivanja: (i) ispitivanje granulometrijskog sastava sa antikoagulansom i (ii) ispitivanje granulometrijskog sastava bez antikoagulansa i mehaničkog mučkanja. Kao antikoagulans korišćen je natrijumheksametafosfat, prema zahtevima predmetnog standarda. Klasifikacija disperzivnog tla na osnovu procenta disperzivnosti sproveden je prema Kinney-u, (1979).

## **5.3 Ispitivanja u pinhole aparatu**

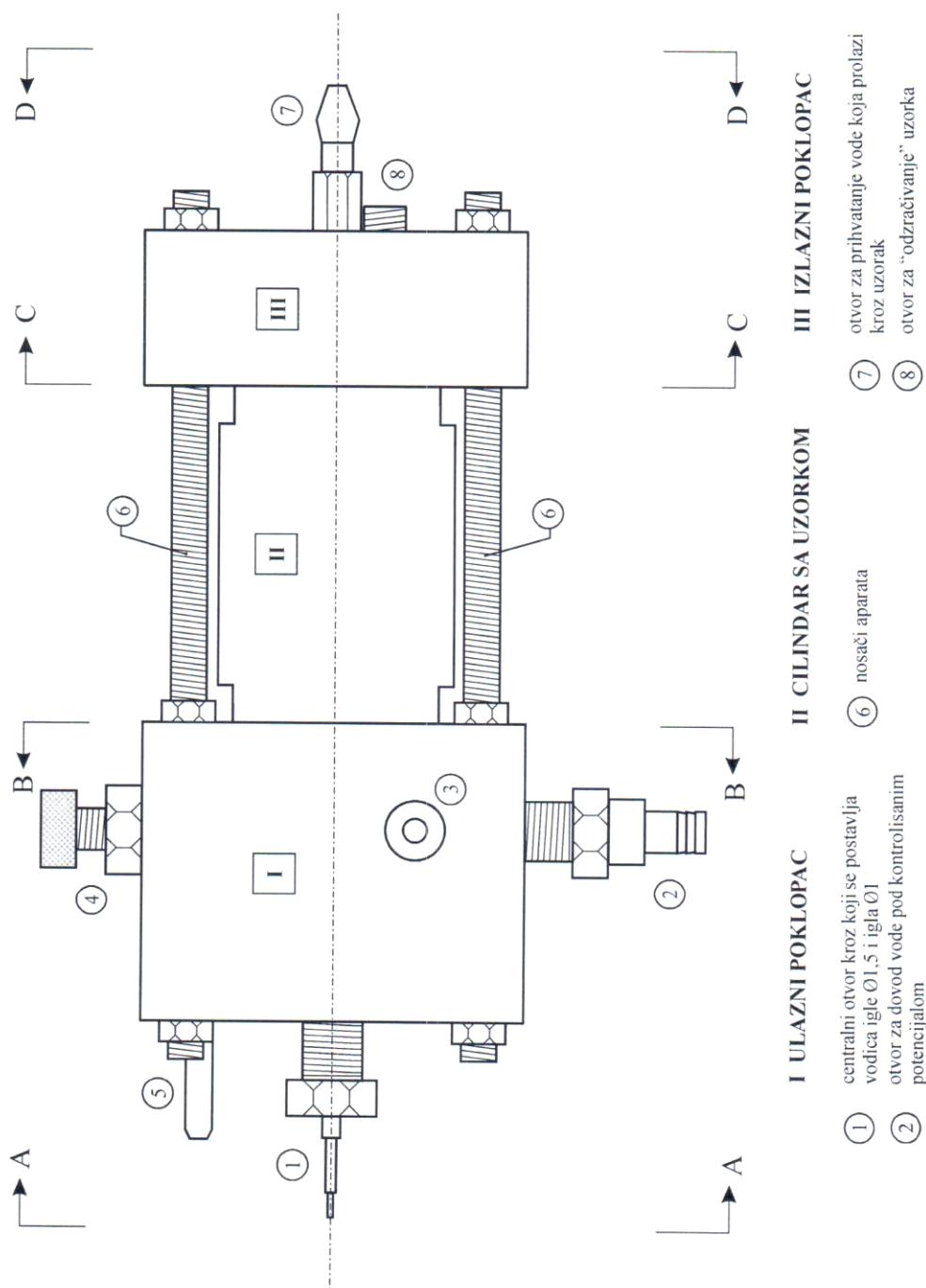
Određivanje disperzivnosti u pinhole aparatu, uz određene modifikacije, je izvršeno prema metodi opisanoj u standardu ASTM D 4647-06 (*Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test*). Laboratorijska aparatura kojom su vršena ispitivanja, u odnosu na onu koja je predložena od strane Sherard-a, odnosno navedenog standarda, pretrpela je određene izmene.

Osnovne razlike između postupka ispitivanja koji je predložio Sherard i izvedenog ispitivanja odnose se na: (i) pripremu i formiranje uzorka, (ii) ugradnju uzorka u cilindar i (iii) konstrukciju aparata.

Ispitivanja disperzivnosti pinhole opitom sprovedena su na opremi modifikovanoj u Mašinskoj radionici Instituta IMS. Konstruktivne izmene, prema nacrtima, imale su zadatak da poboljšavaju opremu, a time i uslove izvođenja ispitivanja, u odnosu na opremu specificiranu u standardima BS 1377:1990 i ASTM D 4221-99. Ova modifikacija je priznata kao tehničko unapređenje od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja R Srbije, i Načnog veća Instituta IMS rešenjem br. 3-15670 od 31.12.2014. pod nazivom: "Modifikovani PIN-HOLE aparat za određivanje disperzivnosti finozrnih tla", autora mr Ksenija Doković sa koautorima. Izmene u aparatu priznate su kao kategorija bitno poboljšan postojeći proizvod (M 84) u oblasti tehnoloških nauka u skladu sa Pravilnikom-Vrsta i kvantifikacija individualnih naučno-istraživačkih rezultata .

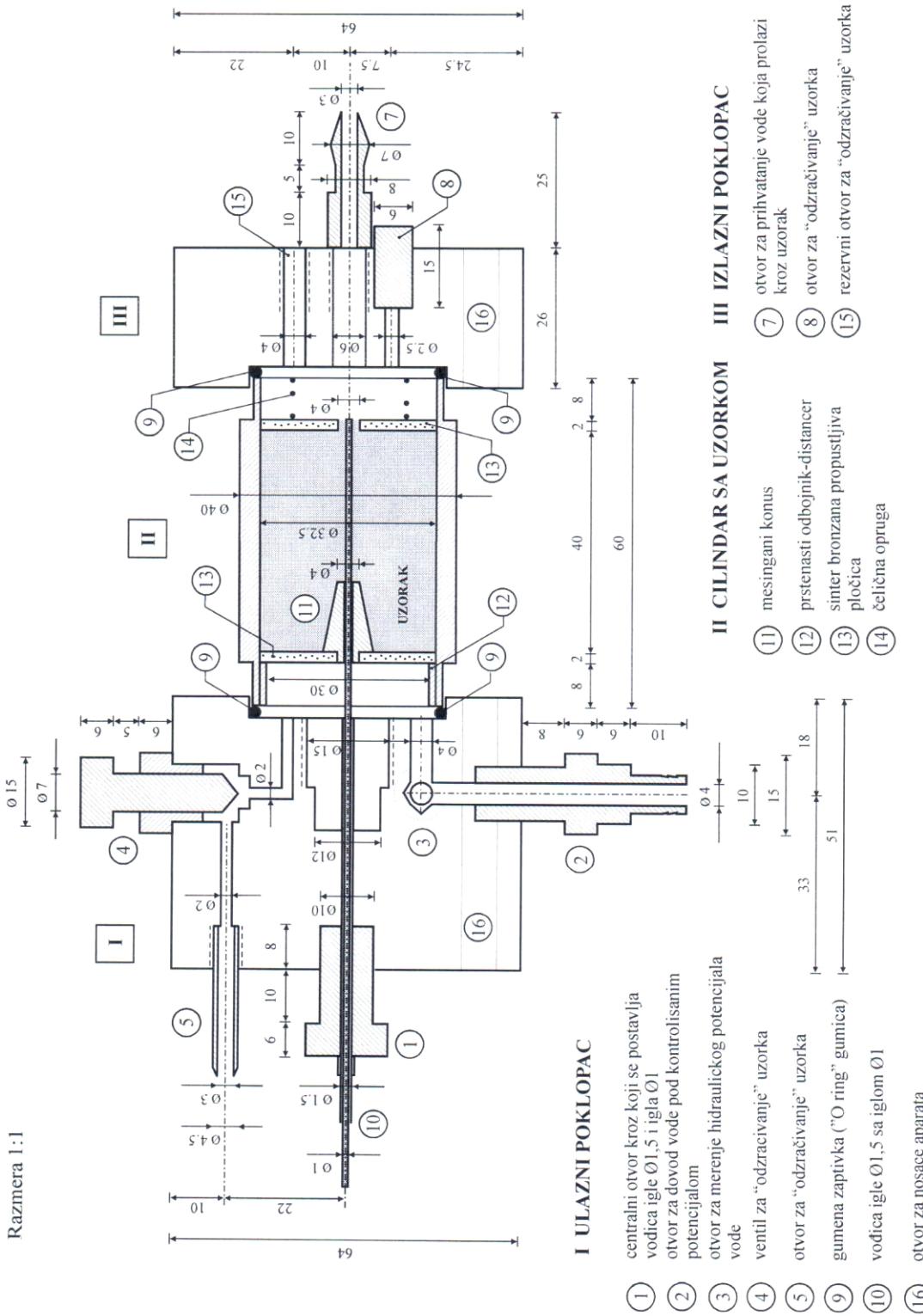
Tehničko rešenje je rezultat istraživanja na projektu "Geotehnički aspekti istraživanja i razvoja savremenih tehnologija građenja i sanacija deponija komunalnog otpada" evidencijski broj TR 36014, finansiranom od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Prikaz pinhole aparata sa prihvaćenim izmenama dat je na preglednim skicama 5.5 – 5.9.

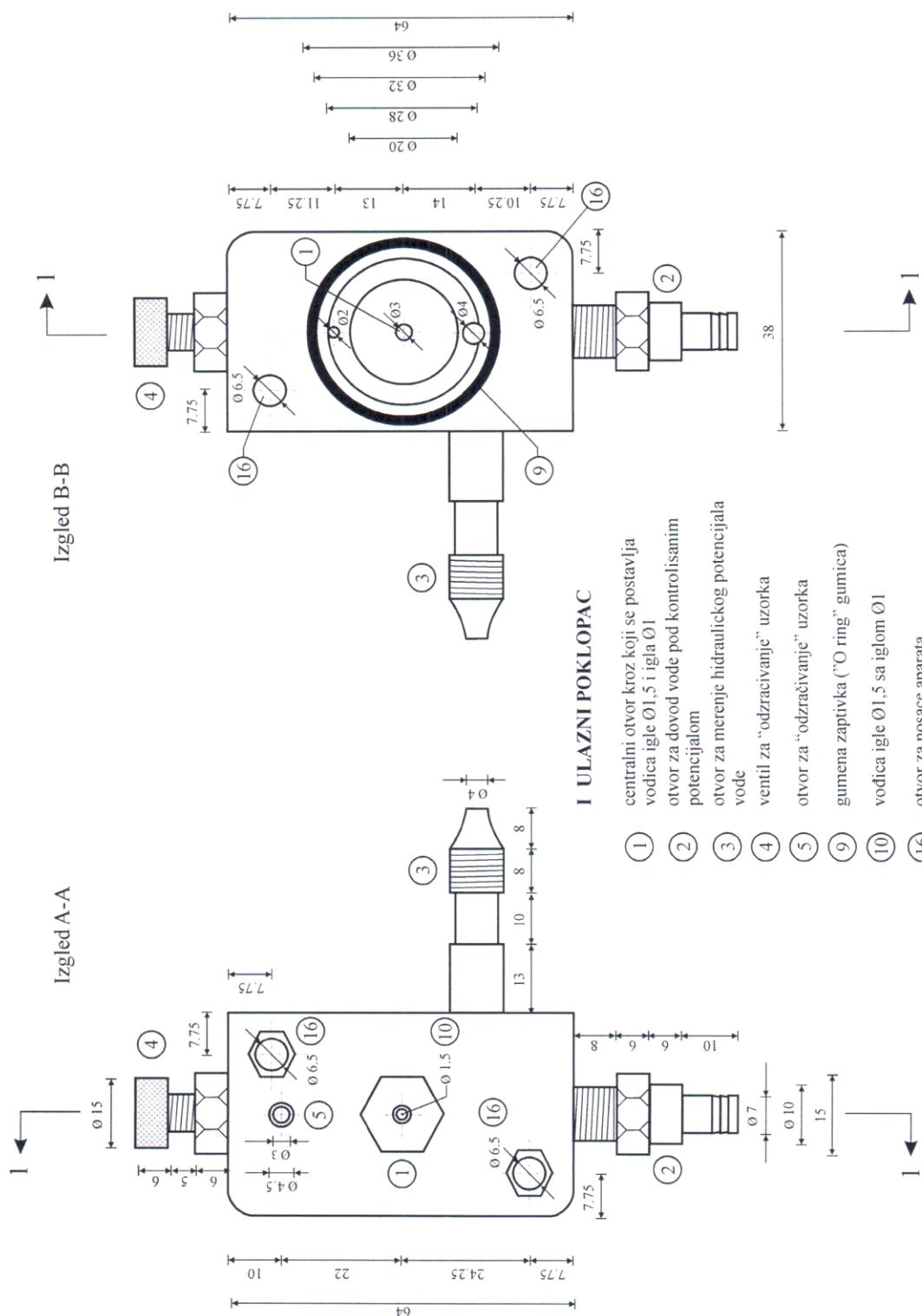


Slika 5.5. Izgled pin-hole aparata

Razmara 1:1

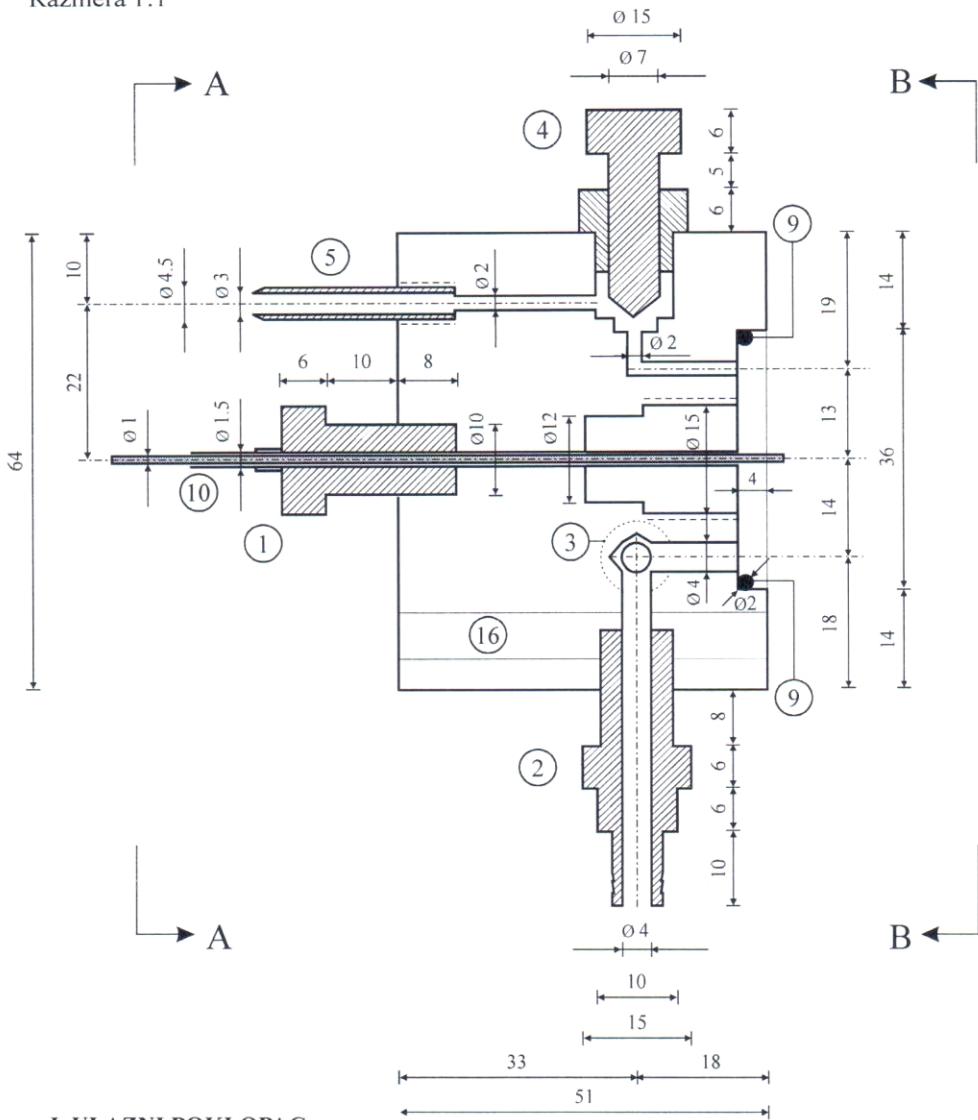


Slika 5.6. Presek 1-1 pin-hole aparata



Slika 5.7. Ulažni poklopac pin-hole aparata

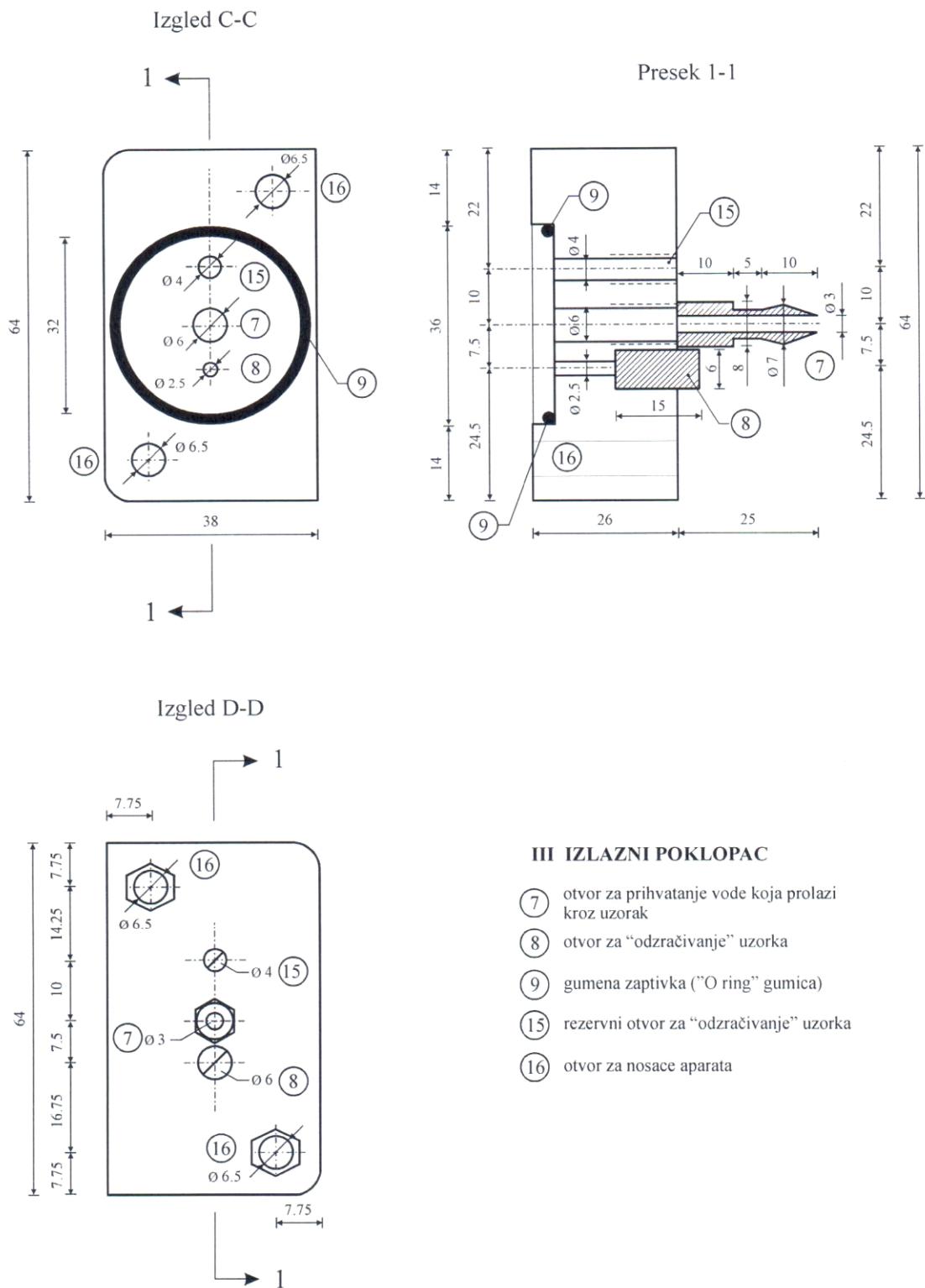
Razmera 1:1



#### I ULAZNI POKLOPAC

- (1) centralni otvor kroz koji se postavlja vodica igle Ø1,5 i igla Ø1
- (2) otvor za dovod vode pod kontrolisanim potencijalom
- (3) otvor za merenje hidraulickog potencijala vode
- (4) ventil za "odzracivanje" uzorka
- (5) otvor za "odzračivanje" uzorka
- (9) gumena zaptivka ("O ring" gumica)
- (10) vođica igle Ø1,5 sa iglom Ø1
- (16) otvor za nosace aparata

**Slika 5.8.** Ulazni poklopac pin-hole aparata - presek 1-1



Slika 5.9. Izlazni poklopac pin-hole aparata

### **5.3.1 Priprema, formiranje i ugradnja uzorka**

U postupku koji je primenio Sherard u svojim ispitivanjima, uzorak za ispitivanje se formira u cilindru zbijanjem u pet slojeva minijaturnim Harvard-ovim nabijačem, nakon čega se utiskuje uvodni konus. Nakon početnih ispitivanja javili su se problemi vezani za postizanje zahtevane zbijenosti. Naime, došlo je do velikih odstupanja (čak i preko 50%) u vrednostima zahtevanih zbijenosti dobijenih Proctor-ovim opitom i opitom zbijanja pomoću minijaturnog Harvard-ovog nabijača. Zbog toga je za formiranje uzorka usvojena metoda statičkog zbijanja direktno u cilindru za ispitivanje u tri sloja. Kako je cilj ispitivanja bio uspostavljanje zavisnosti između različitih stepena zbijenosti i klase disperzivnosti tla ovaj način se pokazao potpuno opravdanim.

Do poteškoća pri primeni standardne procedure dolazilo je i prilikom utiskivanja uvodnog konusa (Sherard koristi plastični) u zbijeni uzorak. Uvodni konus ima vrlo bitnu ulogu jer sprečava zapunjavanje i zatvaranje veštački formirane cilindrične pore (cevčice) i služi za centrično usmeravanje igle  $\varnothing 1$  mm kojom se formira cilindrična pora u uzorku. Sherard nakon formiranja uzorka u cilindru, vrši naknadno utiskivanje konusa. Ovo se pokazalo kao nepraktično, naime, vrlo teško je utisnuti konus u uzorak naročito pri stepenu zbijenosti Sz=100 ili 102%. Posledica toga je začepljenje otvora konusa prečnika  $d_1=1.5$  mm. Utiskivanje uvodnog konusa direktno u već zbijen uzorak, vrlo često je dovodilo i do oštećenja okolnog tla. Ovaj problem je prevaziđen, tako što se pri formiranju uzorka koristilo specijalno postolje sa iglom za centriranje. Postolje je sa graničnikom koji obezbeđuje potreban međuprostor na ulaznom delu uzorka i obezbeđuje centrično postavljanje uvodnog konusa. Igla za centriranje je do same visine konusa. Nakon toga se vršilo zbijanje prvog sloja. Po završetku zbijanja, u tri sloja, postolje sa iglom za centriranje se uklanjalo pažljivo, kako ne bi za sobom „povuklo” i konus. Na ovaj način, bez naknadnog utiskivanja, znatno je olakšana ugradnja uvodnog konusa. Na slici 5.10 su dati delovi opreme za zbijanje, a na slici 5.11 zbijanje uzorka.

Na ulasku i izlasku cilindra Sherard postavlja žičane mrežice i to jednu na ulasku, a dve na izlasku. Otvori mrežica su 0.18 mm (14 otvora po inču). Umesto toga, po modifikovanom postupku ispitivanjima, su se koristile sinter bronzane pločice debljine  $h=2.5$  mm, i prečnika  $d=32.5$  mm sa veličinom granulata od 0.75 mm.



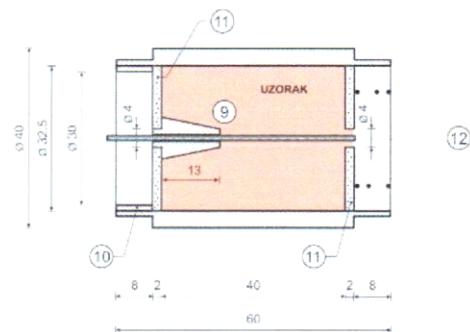
**Slika 5.10.** Delovi opreme za zbijanje uzorka



**Slika 5.11.** Priprema uzorka za zbijanje i zbijanje uzorka

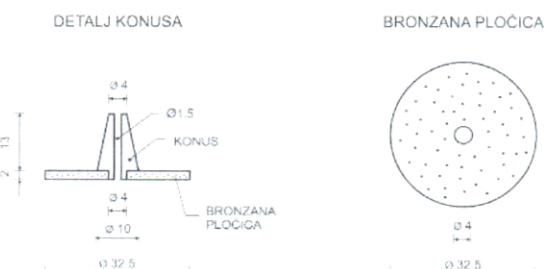


U delu cilindra pre uzorka i posle uzorka Sherard ugrađuje uniformni granulat veličine zrna 6.35-9.52 mm (1/4" do 3/8"). Tokom izvedenih ispitivanja, po autoru, dešavalo se da prilikom dovoda vode granulat nalegne na ulazni otvor, zatvori ga i smanji protok uprkos prisustvu mrežica. Kako je ovaj podatak izuzetno važan za interpretaciju toka ispitivanja granulat nije korišćen. Umesto granulata na izlaznom delu, korišćena je takođe sinter bronzana pločica, kao i na ulaznom delu uzorka, sa centričnim otvorom prečnika 4 mm. Ova ploča je držana u kontaktu sa uzorkom posredstvom spiralne opruge naslonjene na izlazni poklopac aparata (Slika 5.12).



II CILINDAR SA UZORKOM

- (9) Mesingani konus
- (10) Plastični obvojnici (prston)
- (11) Bronzane pločice
- (12) Čeličana opruga



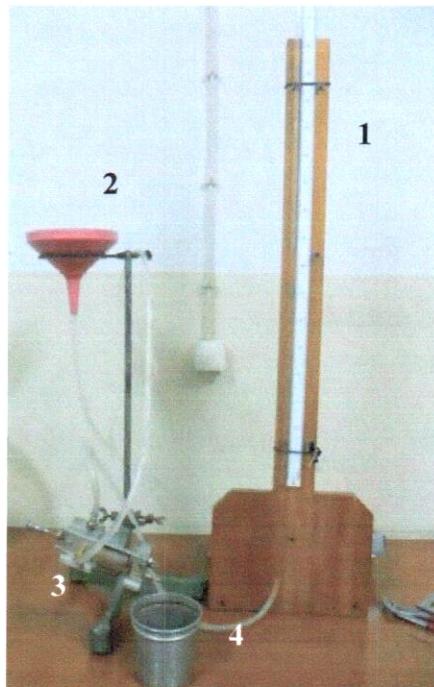
Slika 5.12. Cilindar sa ugrađenim uzorkom i detaljima

### 5.3.2 Konstrukcija modifikovanog pinhole aparata

Na slici 5.13 je dat prikaz modifikovanog pinhole aparata za ispitivanje disperzivnosti finozrnog tla sa osnovnim elementima i pratećom opremom:

1. Stalak na kome se nalazi graduisana staklena cev (piezometar) prečnika 6 mm i merna traka mm podele, mernog opsega do 110 mm, za merenje hidrauličkog potencijala na ulaznom delu uzorka
2. Stalak sa levkom i prelivom koji obezbeđuje stalni potencijal vode tokom ispitivanja
3. Aparat sa ugrađenim uzorkom
4. Posuda za prikupljanje vode (menzura  $V=100$  ml)

Detalj aparat sa ugrađenim uzorkom dat je na slici 5.14.

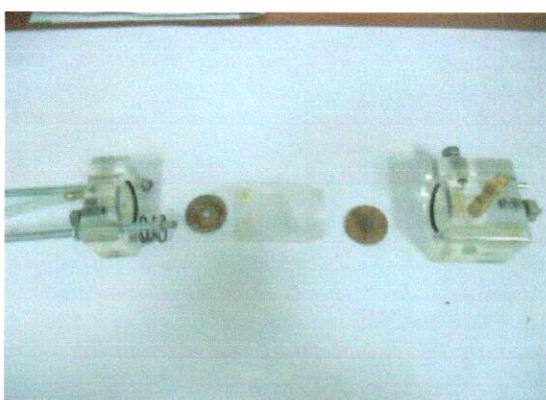


**Slika 5.13.** Izgled pin-hole aparata sa pratećom opremom



**Slika 5.14.** Detalj aparat sa ugrađenim uzorkom

Delovi pinhole aparata i izgled ugrađenog uzorkom sa utisnutom iglom Ø1 mm (i vodicom Ø1.5 mm) za formiranje cilindrične pore pre početka ispitivanja prikazani su na slikama 5.15 i 5.16.



Slika 5.15. Delovi pinhole aparata



Slika 5.16. Izgled ugrađenog uzorkom sa pripremljenom iglom za formiranje pore

### 5.3.3 Izvođenje opita i interpretacija rezultata ispitivanja

Aparat se postavlja na metalni tronožac na odgovarajućoj visini pomoću laboratorijskih štipaljki. Povezuju se svi vodovi posredstvom plastičnih cevi. Pripreme se tri menzure  $V \approx 100 \text{ cm}^3$  za merenje količine na izlaznom delu i štoperica za merenje proteklog vremena.

Nakon sastavljanja aparata i "odzračivanja" uzorka, kako na ulaznom delu tako i na izlaznom delu, formira se "cevčica" tj. veštačka cilindrična pora. Cilindrična pora se formira utiskivanjem metalne igla prečnika Ø1 mm duž ose uzorka kroz vodicu koja je postavljena u konusu na ulaznom delu uzorka. Utiskivanje igle vrši se sve dok se ne konstatiše izlazak igle kroz centrični otvor na propustljivoj pločici na izlaznom delu. Postavi se posuda sa prelivom koji obezbeđuje potrebnii hidraulički gradijent. Visina pritiska se meri na piezometru povezanom sa ulaznim poklopcom aparata. Izvlači se igla i vodica igle iz uzorka i ispitivanje može da se započe. Ako se konstatiše pad

piezometarskog nivoa u kontrolnom piezometru potrebno je izvršti korekciju promenom visine preliva.

Nakon ugradnje uzorka, odzračivanja kako na ulaznom takođe i na izlaznom delu, i merenja hidrauličkog nivoa otvara se dovodni ventil i pušta destilovana voda da protiče kroz uzorak do ustaljenja protoka. Ako ne postoji protok vode, isključiti aparat (zatvoriti dovodni ventil). Ponovi se postupak formiranja pore sa iglom u uzorku i nastaviti ispitivanje.

Ispitivanje i interpretacija rezultata se sprovodi u svemu prema BS 1377-5:1990 tač.6.2, odnosno ASTM D 4647-06. Klase disperzivnosti definisane su prema algoritmu koji je sastavni deo navedenog standarda, a koji je prikazan na slici 5.17.

#### *Ispitivanje pri hidrauličkom nivou H=50 mm*

- Ukoliko je voda nakon ispitivanja od 5 min bistra ispitivanje se nastavlja pri hidrauličkom nivou H=180 mm.
- Ukoliko voda nije bistra tj. zamućena je, u zavisnosti od protoka razlikujemo:
  - Ukoliko je protok je između 1.00 - 1.40 ml/s ispitivanje je završeno, potrebno je isključiti dovod vode, demontirati cilindar, malo prosušiti uzorak, preseći po sredini i izmeriti prečnik pore. Veličinu prečnika pore porediti se sa etalonskom iglom od 1 mm ili dr. Za poređenje se koristi set medicinskih igala različitih prečnika. U zavisnosti od prečnika pore razlikujem sledeće slučajeve:
    - ako je prečnik pore  $d \geq 2$  mm tlo je klasa disperzivnosti D1- disperzivno tlo klase 1.
    - ako je prečnik pore  $d < 2$  mm ponoviti ispitivanje pri hidrauličkom nivou od H=50 mm
  - Ukoliko je protok  $q < 1.0$  ml/s nastaviti ispitivanje još 5 minuta.
    - ako je tada voda bistra a protok između 0.4-0.8 ml/s nastaviti ispitivanje pri hidrauličkom nivou H=180 mm

- ako je voda izrazito mutna ispitivanje je završeno. Zavisno od veličine protoka i prečnika pore razlikujemo:

- $1.0 < q < 1.4 \text{ ml/s}$  i  $d > 1.5 \text{ mm}$  klasu disperzivnosti D2-disperzivno tlo klase 2
- $0.8 < q < 1.0 \text{ ml/s}$  i  $d \leq 1.5 \text{ mm}$  klasu disperzivnosti ND4-srednje disperzivno tlo klase 4

Rezultati ispitivanja pri hidrauličkom nivou  $H=50\text{mm}$ , daju uvid u ponašanje ispitivanih materijala u pogledu disperzivnosti.

#### *Ispitivanje pri hidrauličkom nivou $H=180 \text{ mm}$*

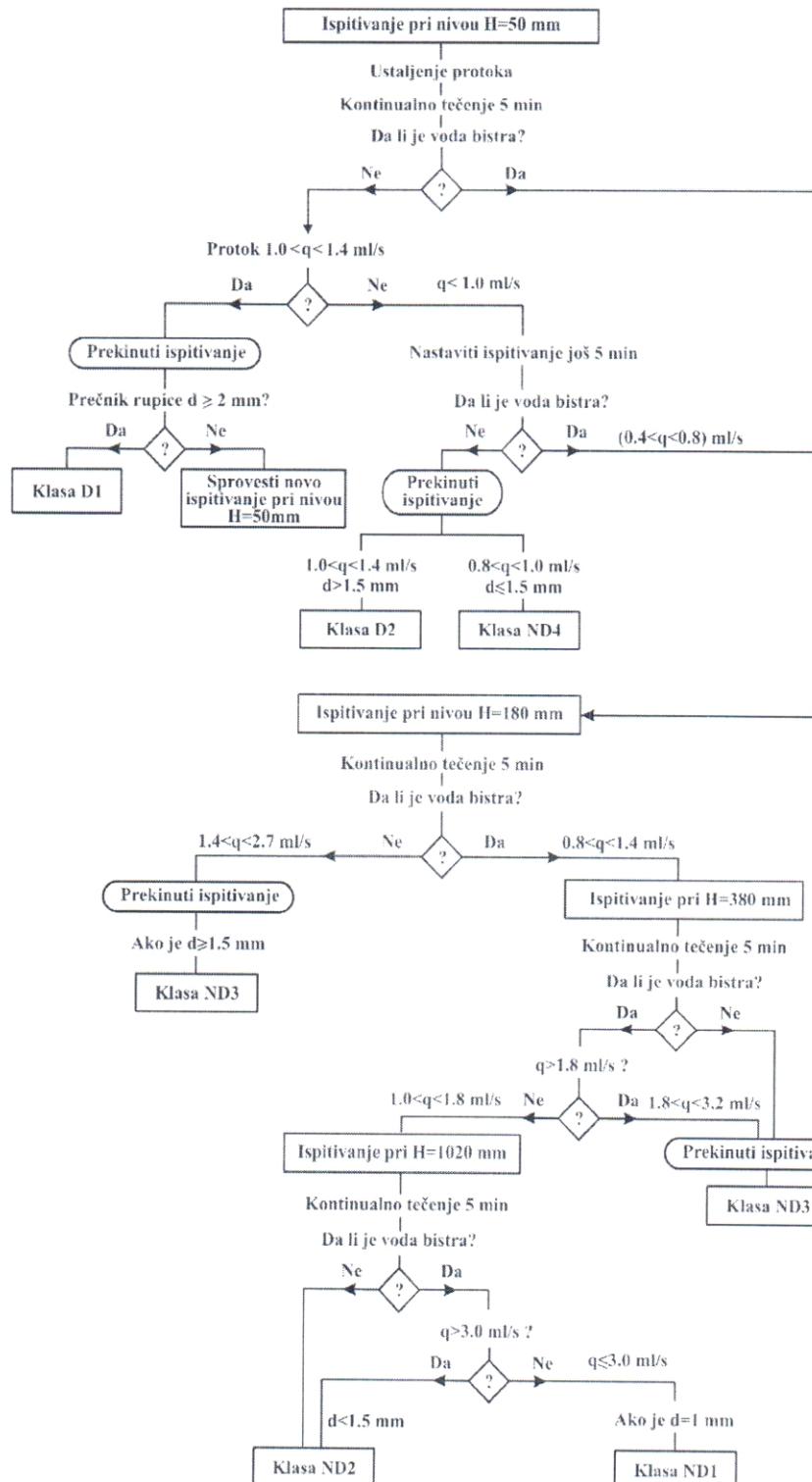
Nakon ispitivanjanja od 5 min, izmerenog protoka, registrovane zamućenosti i boje rastvora vrši se klasifikacija:

- Ako je prikupljena voda bistra a protok je između  $0.8-1.4 \text{ ml/s}$  nastaviti ispitivanje pri hidrauličkom nivou od  $H=380\text{mm}$ .
- Ako voda nije bistra i protok je između  $1.4-2.7 \text{ ml/s}$  (povećan do limitirajuće vrednosti  $2.7 \text{ ml/s}$ ) prekinuti ispitivanje i izmeriti veličinu prečnika pore. Ukoliko je  $d \geq 1.5 \text{ mm}$  ispitivano tlo pripada klasi diperzivnosti ND3- srednje disperzivno tlo klase 3.

#### *Ispitivanje pri hidrauličkom nivou $H=380 \text{ mm}$*

Nakon ispitivanjanja od 5 min, izmerenog protoka i registrovane zamućenosti i boje rastvora vrši se klasifikacija:

- Ako voda nije bistra tj. mutna je, prekinuti ispitivanje, tlo je klase disperzivnosti ND3 - srednje disperzivno tlo klase 3.
- Ako je prikupljena voda bistra, a protok je između  $1.0-1.8 \text{ ml/s}$  nastaviti ispitivanje pri hidrauličkom nivou od  $H=1020\text{mm}$ .
- Ako je prikupljena voda bistra a protok je između  $1.8-3.2 \text{ ml/s}$  prekinuti ispitivanje, tlo je klase disperzivnosti ND3- srednje disperzivno tlo klase 3.



**Slika 5.17.** Algoritam ispitivanja disperzivnosti u pinhole aparatu (BS 1377-5:1990)

*Ispitivanje pri hidrauličkom nivou H=1020 mm*

Nakon ispitivanjanja od 5 min, izmerenog protoka i registrovane zamućenosti i boje rastvora vrši se klasifikacija:

- Ako je voda izrazito bistra, bez tragova zamućenosti i ako je protok  $q \leq 3.0 \text{ ml/s}$ , a prečnik pore  $d = 1.0 \text{ mm}$ , tlo je klase disperzivnosti ND1 - nedisperzivno tlo klase 1.
- Ako je voda bistra, a protok je  $q > 3.0 \text{ ml/s}$ , a prečnik pore  $d < 1.5 \text{ mm}$  tlo je klase disperzivnosti ND2 - nedisperzivno tlo klase 2.
- Ako je voda mutna tlo je klase disperzivnosti ND2 - nedisperzivno tlo klase 2.

Nakon završetka ispitivanja, zatvori se dovodni ventil, uzorak se izgrađuje iz aparata, pažljivo istiskuje iz cilindra, i ostavi da se prosuši na vazduhu radi lakše obrade. Polu prosušeni uzorak stavlja se u "koritancete" od pleksiglasa i postepeno se ručno obrađuje do približno polovine visine (slika 5.18), kada se izmeri prečnik cilindrične pore. Kako veličina pore, kod nekih tla, nije ista duž cele dužine uzorka, mereni su najveći i najmanji prečnik. Veličina prečnika pore nakon ispitivanja je vrlo bitna prilikom klasifikacije i identifikacije disperzivnog tla. Vizuelno je jako teško proceniti veličinu prečnika pore, zato se radi preciznijeg određivanja koristio set medicinskih igala različitog prečnika.



**Slika 5.18.** Obrada uzorka nakon ispitivanja

Interpretacija i klasifikacija rezultata opita izvršena je prema kriterijumima definisanim prema BS 1377-5:1990. Dobijeni rezultati beleženi su u zapisnik prikazan na slici 5.19.

 <b>IMC-IMS</b> Institut IMS Bulevar Vojvode Mićića 43 Beograd		<b>Laboratorijski za puteve i geotekniku</b> <b>OPIT DISPERZIVNOSTI TLA - PINHOLE TEST</b> BS 1377:Part 5:1990			Datum:  R. b. z.										
OBJEKAT: _____															
LOKACIJA: _____															
UZORAK: _____															
OPIS UZORKA:					SKICA UZORKA										
<b>PRIPREMA UZORKA:</b> <table border="1"> <tr> <th>Vlažnost uzorka w (%)</th> <th>Zapreminska masa (<math>\text{g N m}^{-2}</math>)</th> <th>Prečnik rupe pre ispitivanja d (mm)</th> <th>Prečnik rupe naron ispitivanja d' (mm)</th> <th>Klasa disperzivnosti</th> </tr> <tr> <td>prirodna suva</td> <td>suva</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>						Vlažnost uzorka w (%)	Zapreminska masa ( $\text{g N m}^{-2}$ )	Prečnik rupe pre ispitivanja d (mm)	Prečnik rupe naron ispitivanja d' (mm)	Klasa disperzivnosti	prirodna suva	suva			
Vlažnost uzorka w (%)	Zapreminska masa ( $\text{g N m}^{-2}$ )	Prečnik rupe pre ispitivanja d (mm)	Prečnik rupe naron ispitivanja d' (mm)	Klasa disperzivnosti											
prirodna suva	suva														
Hidraulički tluvo H (mm)	Vreme početka ispitivanja t (min)	Vreme t (min)	Zapremina istekle vode V (ml)	Protok o (ml/s)	Boja	zamućenost	Iznosjenje česica	Nepomena							
					tamna	besivo do svetlo zelene vijuga	bezna	ne nekoliko značio mnogo							

Slika 5.19. Zapisnik rezultata ispitivanja pinhole opitom

#### 5.4 Ispitivanje mineraloškog sastava

Mineraloški sastav ispitivanih finozrnih materijala određen je metodom rendgenske difrakcije, na sobnoj temperaturi na automatskom difraktometru za prah PHILIPS PW 1050, gde je upotrebljeno zračenje sa antikatode bakra talasne dužine  $\text{CuK}\alpha_1 = 1,54178 \text{ \AA}$ , sa Ni filterom. Merenja su rađena u  $2\theta$ , a intenziteti difrakcionih maksimuma prikupljeni su u intervalu od  $10$  do  $70^\circ$ , sa korakom od  $0.05^\circ$  i vremenom zadržavanja od  $3\text{s}$  na svakom koraku. Na osnovu položaja difrakcionih maksimima, vrednosti međuplosnih rastojanja i intenziteta definisane su prisutni minerali. Ispitivanja su izvedena u Institutu tehničkih nauka, SANU.

## 5.5 Ispitivanje pH vrednosti

Na uzorcima tla, na kojima su sprovedena ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom, takođe su izvedena i ispitivanja pH vrednosti. Ispitivanja su izvedena prema standardu BS 1377-3:1990 tač. 9 (*British Standard: Methods of test for Soils for civil engineering purposes - Part 3: Chemical and electro-chemical tests; Ch. 9 determination of the pH value*). Prethodno osušeni materijal (na vazduhu) prosejan je kroz sito otvora 2 mm. Izmereno je 30 g materijala i potopljeno u laboratorijsku čašu sa oko 100 ml destilovane vode. Nakon 8 h izvršena su čitanja pH vrednosti i odgovarajuće temperature na pehametru.

## **POGLAVLJE 6. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA ISPITIVANJA**

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja disperzivnosti finozrnog tla. Ispitivanja su izvedena na uzorcima finozrnog tla različitog porekla, koji su se koristili za potrebe nasipanja različitih objekata:

- prašinastim glinama jezgra nasute brane "Rovni"
- lesu sa različitim lokacijama: Bežanijska kosa, Zemun Gornji grad, Ruma, Titel, Kelebija, Mali Iđoš, Srbobran, Slankamen. Uzorci lesa potiču iz prvog lesnog horizonta.
- kaolinitskoj peskovitoj glini ležišta "Grabež" Aranđelovac

Spisak ispitivanih uzoraka sa podacima o poreklu i istražnom radu dat je u tabeli 6.1. U daljem tekstu teze koristiće se oznake uzoraka kao što je navedeno u ovoj tabeli.

Izvedeni su opiti ispitivanja disperzivnosti: opit grudvice, duplog hidrometrisanja i pinhole opit. Prethodno su izvedena identifikaciono - klasifikaciona ispitivanja: određivanje vlažnosti, granulometrijskog sastava, plastičnosti i Proctor-ov opit zbijanja. Pored toga određene su i pH vrednost za sve uzorce, kao i mineraloški sastav pomoću XRD analize.

Na osnovu rezultata sprovedenih ispitivanja urađena je identifikacija i klasifikacija uzoraka finozrnog tla u pogledu disperzivnosti. U cilju uspostavljanja zavisnosti između disperzivnosti i stepena zbijenosti, ispitivanja u pinhole aparatu izvedena su na uzorcima sa različitim stepenom zbijenosti Sz: 90, 92, 95, 98, 100 i 102 % u odnosu na zbijenost dobijenu standardnom energijom zbijanja po Proctoru.

Na uzorcima visoke disperzivnosti (K-1) sprovedene su mere poboljšanja tla, dodavanjem elektrofilterskog pepela sa deponije termoelektrane "Nikola Tesla A" iz Obrenovca (TENT A). U cilju iznalaženja optimalnog sadržaja dodatka pepela, uzorci su pripremani sa različitim procentom pepela (10, 30 i 50%) i nakon toga su ispitivani

parametri kojima se definiše disperzivnost. Cilj istraživanja je bio da se definiše uticaj primenjene meliorativne mere na smanjenje disperzivnosti dobijenih materijala.

**Tabela 6.1.** Spisak ispitivanih uzoraka tla

Red.br.	Oznaka uzorak	Vrsta tla	USCS klasif.	Lokacija/Objekat	Istražni rad/ dubina
1	2	3	4	5	
1	U-1	praš.glina	CL	Pozajmište gline D nasute brane "Rovni"	IR-1/0.00-1.80
2	U-2	praš.glina	CL/CH	Pozajmište gline D nasute brane "Rovni"	IR-2/0.00-1.80
3	R-1	les I	CL	Ruma - Orlovićeva ulica	IJ-1/0.00-2.00
4	T-1	les I	CL	Titel, Pozajmište A	IJ-1/0.00-1.80
5	K-1	les I	CL	Autoput E-75, deonica Kelebija-Petlja jug, pozajmište km 10+000	
6	ZGG-1	les I	CL	Zemun Gornj grad	IJ-1/0.00-1.80
7	MI-1	les I	CL	Železnička pruga Novi sad-granica sa Mađarskom km 131+908.52	P-45/0.00-2.00
8	KGA-1	pesk.glina	CL	Arandželovac ležište Grabež	IJ-1/0.00-1.80
9	SV-1	les I	CL	Objekat Hladnjača Novi Slankamen	IJ-1/0.50-2.00
10	SV-6	les I	CL	Objekat Hladnjača Novi Slankamen	IJ-6/0.50-2.00
11	SJ-1	les I	CL	Pozajmište materijala za branu * Srbobran	SJ-1/0.60-3.00
12	SJ-2	les I	CL	Pozajmište materijala za branu * Srbobran	SJ-2/0.70-3.00
13	SJ-4	pogrebena zemlja I	CL	Pozajmište materijala za branu * Srbobran	SJ-4/0.00-1.70
14	BK-1	les I	CL	Ikea - Bežanijska kosa	TP-1/2.10-2.60

Legenda: IR istražni raskop; IJ istražna jama

\*Uzorci preuzeti od DTD Hidrozavoda Novi Sad

## 6.1 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak U-1 Rovni

Uzorak U-1 predstavlja žutu prašinastu glinu niske plastičnosti CL (prema USCS klasifikaciji). Uzorak je uzet sa pozajmišta gline D, koje se koristilo prilikom nasipanja jezgra, tokom izgradnje nasute brane Rovni kod Valjeva. Dobijeni rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 6.2, i na dijagramima na slici 6.1.

U tabeli 6.3 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice. Vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u određenim vremenskim intervalima određena je klasa disperzivnosti. Za svaki vremenski interval opažanja data je klasa disperzivnosti, izmerena temperatura rastvora i odgovarajuća fotografija.

Uzorak žutih prašinastih glina U-1 potopljen u destilovanu vodu ne pokazuje disperzivnost i klasifikovan je kao nedisperzivano tlo klase ND. Uzorak U-1 potopljen u rastvor 0.001M NaOH pokazuje blago koloidno zamućenje koje se javlja već nakon 2 min, i koje se blago intenzivira do kraja opita. Uzorak je klasifikovan kao klasa SD tj. slabo disperzivno tlo.

Na slici 6.2 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu oba standarda (ASTM D 4221-99 i BS 1377-5:1990), je manji od 30% što ispitivano tlo klasificuje kao nedisperzivno klase ND (Tabela 6.4). Slika 6.3 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

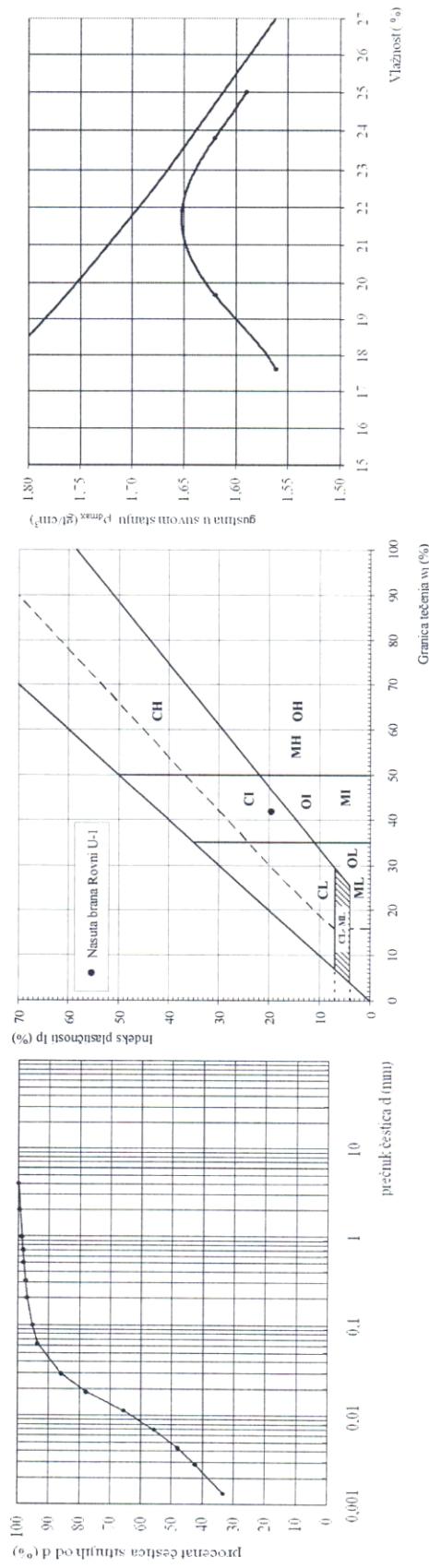
U tabelama 6.5 i 6.6 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorak U-1 žuto mrke prašinaste gline, niske plastičnosti, koji je ugrađivan u jezgro nasute brane "Rovni" kod Valjeva, ispitivanjem u pinhole aparatu pri različitim stepenima zbijenosti u rasponu od 90-105% pokazuje klasu disperzivnosti ND1 – nedisperzivno tlo.

Voda je tokom izvođena opita bistra, bez ispiranja i iznošenja čestica pri nižim nivoima, dok pri hidrauličkom nivou od  $H=1020\text{mm}$  dolazi do pojave iznošenja nekoliko sitnijih čestica veličine do 1 mm. Protok  $q$  prilikim ispitivanja je ravnomeran, i na završetku ispitivanja je manji od 3 ml/s. Dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti tla prikazan je na slici 6.4. Prečnik cilindrične pore na kraju ispitivanja iznosi  $d=1\text{mm}$  duž čitave dužine uzorka. Na izlaznom delu cilindrične pore uzoraka niže zbijenosti (90, 92 i 100%), javlja se kupasto proširenje prečnika do 5 mm. Kako je voda sve vreme ispitivanja bistra, i protok manji od 3 ml/s ovo kupasto proširenje je posledica erodovanja uzorka, i ne može se tretirati kao disperzivnost.

Na slici 6.5 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.7.

**Tabela 6.2.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-1 Rovni

Granulometrijski sastav tla				Vlaznost	Aterbergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )	USCS klasifikacija tla
glina	prašina	pesak	šljunak		w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>		
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	2,00 mm	60,0 mm	w	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	CL
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
38	56	6	0	26.9	42	22	20	0.76	1.653	21.8



**a)** Granulometrijski sastav

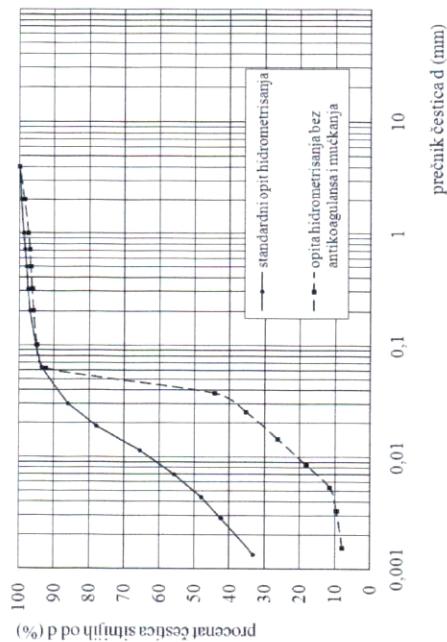
**b)** Plastičnost

**c)** Proktorov optit

**Slika 6.1** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-1 Rovni

Tabela 6.3. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optiom grudvice uzorka U-1 Rovni

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
ASTM D 6572-00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Destilovana voda	20.3 (°C)	20.3	19.5	20.5	20.5	19.0	
Izgled uzorka							
BS 1377- 5:1990 tač.6.3	Klasa disperzivnosti tla	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Rastvor	Temperatura (°C)	20.0	20.0	20.0	20.5	20.5	19.0
0.001 M NaOH	Izgled uzorka						



Slika 6.2. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak U-1 Rovni

Tabela 6.4. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzorak U-1 Rovni

Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tac.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućkanja	9	11
Standardni opit hidrometrisanja	38	50
Procenat disperzivnosti PD (%)	24	21,5
Klasa disperzivnosti tla	ND	ND

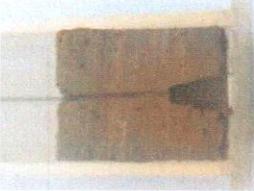
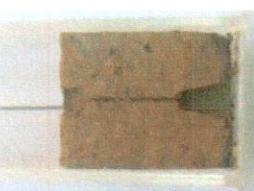
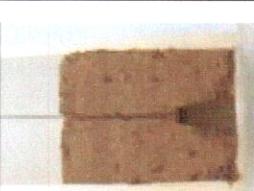
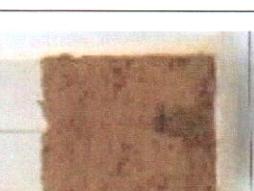
a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućkanja

Slika 6.3. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak U-1 Rovni

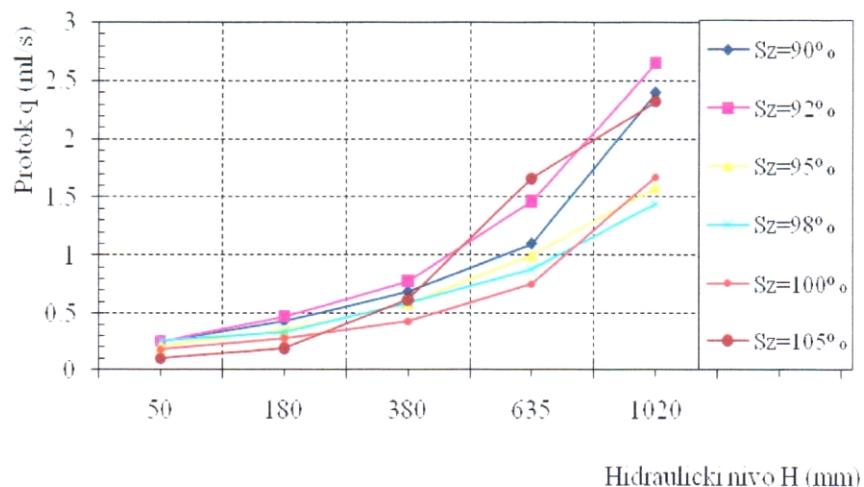
Tabela 6.5. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optitom za uzorak U-1 Rovni

UZORAK: ROVNI U-1									
Stepen zbijenosti (%)	Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)								
	50	180	380	1020	Protok q (ml/s)	Zamućenje Bojza/cesnica	Protok q (ml/s)	Zamućenje Bojza/cesnica	Velika pore (mm)
90	0.25	bistra	ne	0.43	bistra	ne	0.69	bistra	nekoliko veličine do 1 mm (5x3 mm) ND1
92	0.25	bistra	ne	0.47	bistra	ne	0.78	bistra	nekoliko veličine do 1 mm (3x2 mm) ND1
95	0.21	bistra	ne	0.35	bistra	ne	0.59	bistra	nekoliko veličine do 1 mm (3x2 mm) ND1
98	0.26	bistra	ne	0.34	bistra	ne	0.59	bistra	nekoliko veličine do 1 mm (2x1 mm) ND1
100	0.18	bistra	ne	0.28	bistra	ne	0.42	bistra	nekoliko veličine do 1 mm (5x4mm) ND1
105	0.095	bistra	ne	0.19	bistra	ne	0.62	bistra	nekoliko veličine do 1 mm ND1

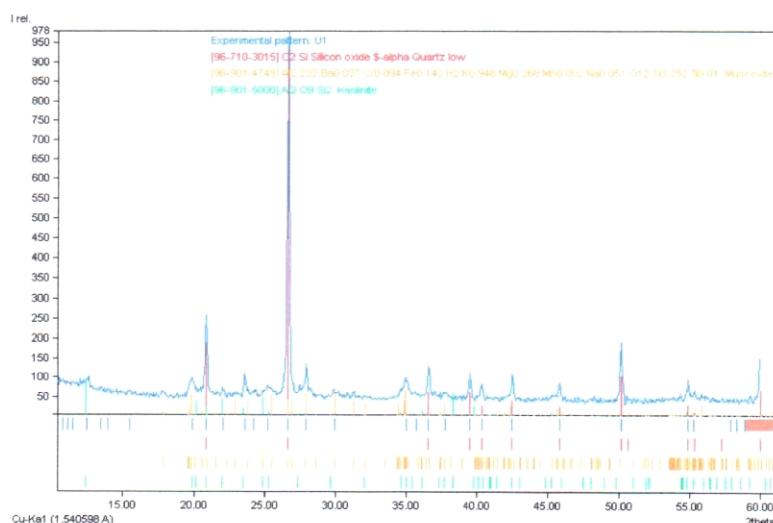
Tabela 6.6. Izgled uzorka U-1 Rovni nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Uzorak	ROVNI U-1				
	Stepen zbijenost Sz (%)	90	92	95	98
Izlazna povšina					
Podužni presek					
Prečnik pore <b>d</b> (mm)	1 (5x3)*	1 (3x2)*	1 (3x2)*	1 (2x1)*	1 (5x4)*
Klasa disperzivnosti	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1

\* veličina kupastog otvora na izlazu ŠxD u mm



**Slika 6.4.** Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak U-1 Rovni



**Slika 6.5.** Rezultati XRD analize za uzorak U-1 Rovni

**Tabela 6.7.** Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka U-1 Rovni

Uzorak	Mineraloški sastav		
	Kvarc	Kaolinit	Muskovit
U-1 Rovni	46.3	17.6	36.1

## 6.2 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak U-2 Rovni

Uzorak U-2 predstavlja crveno mrku prašinastu glinu niske plastičnosti (prema USCS klasifikaciji). Isto kao i uzorak U-1, uzorak je uzet sa pozajmišta gline D, koje se koristilo prilikom nasipanja jezgra, tokom izgradnje nasute brane Rovni kod Valjeva. Dobijeni rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja prikazani su u tabeli 6.8, i na dijagramima na slici 6.6.

U tabeli 6.9 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice. Vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u destilovanoj vodi ili rastvoru 0.001 M NaOH, u određenim vremenskim intervalima određena je klasa disperzivnosti. Za svaki vremenski interval opažanja izmerena je temperatura suspenzije i data odgovarajuća fotografija.

Uzorak prašinastih glina U-2 u destilovanoj vodi i u rastvor 0,001M NaOH ne pokazuje disperzivnu reakciju tj. nije disperzivan – klasa ND.

Na slici 6.7 dat je dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu oba standarda (ASTM D 4221-99 i BS 1377-5:1990), je veći od 30%, a manji od 50% što ispitivano tlo klasificuje kao srednje disperzivno tlo (Tabela 6.10). Slika 6.8 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

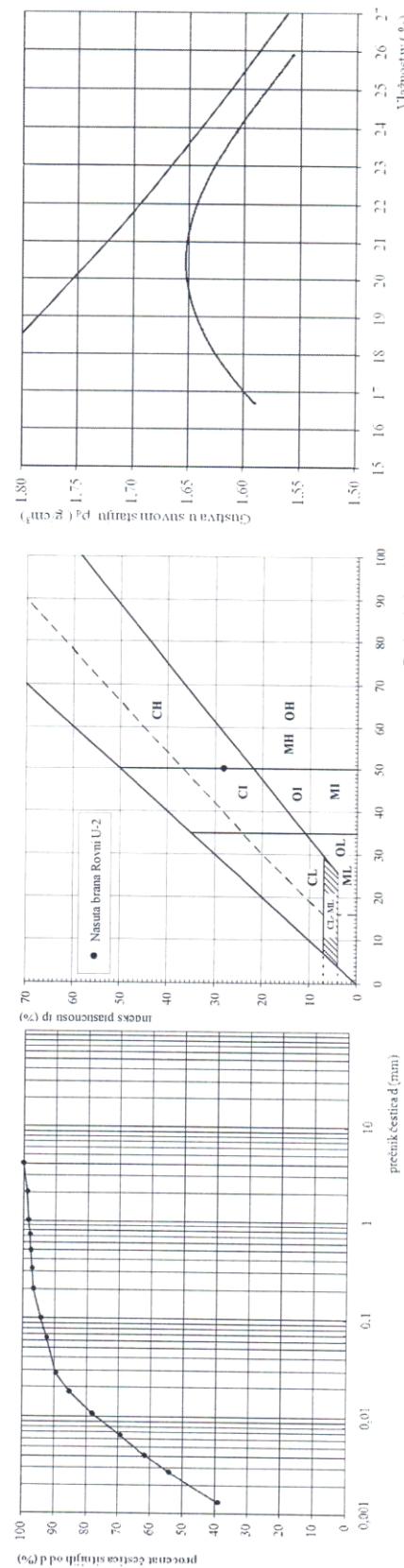
U tabelama 6.10 i 6.11 prikazani su rezultati određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom. Ispitivanja na uzorku U-2 pri hidrauličkom nivou od H=50mm nisu mogla da se započnu. Naime, pri svim stepenima zbijenosti dotok vode je bio jako mali pa je bilo potrebno izgraditi uzorak i ponovo probušiti veštačku poru d=1mm. Voda je sve vreme ispitivanja pri nižim hidrauličkim nivoima (H=50 mm i 180 mm) bistra i nema iznošenja čestica. Prilikom ispitivanja pri hidrauličkom nivou H=635 mm dolazilo je do naglog iznošenja čestica, veličine od 0.5 do 1 mm, u količini od nekoliko do mnogo (opis prema standardu, videti zapisnik slika 5.13). Za stepen zbijenosti uzorka Sz=90,

92, 95, 98 i 102 % nije bilo moguće sprovesti ispitivanje pri  $H=1020$  mm. Prilikom ispitivanja pri nivou  $H=1020$  mm i stepenu zbijenosti  $Sz=100\%$ , nakon 2 min od početka ispitivanja, opit je morao biti prekinut, jer je došlo do drastičnog pada hidrauličkog nivoa. Protok je bio daleko veći od dotoka vode tj. prevazilazio je kapacitet aparata  $q>3.7$  ml/s. Dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti tla prikazan je na slici 6.9. Zidovi cilindrične pore u uzorku su erodovani duž cele dužine  $d=2-15$  mm.

Na slici 6.10 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.13.

Tabela 6.8. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-2 Rovni

Granulometrijski sastav tla				Vlaznost frakcija	Aterbergove granice				$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	USCS klasifikacija tla
glina	prahiina	pesak	šljunak		$w_l$	$w_p$	$I_p$	$I_c$			
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	2,00 mm	60,0 mm	60,0 mm					
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)			
48	46	5	1	26,9	50	22	28	0,83	1,655	20,4	CL/CH



Slika 6.6. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka U-2 Rovni

- a) Granulometrijski sastav  
b) Plastičnost  
c) Prokotorov optit  
d) Klasifikacija tla  
e) USCS klasifikacija tla

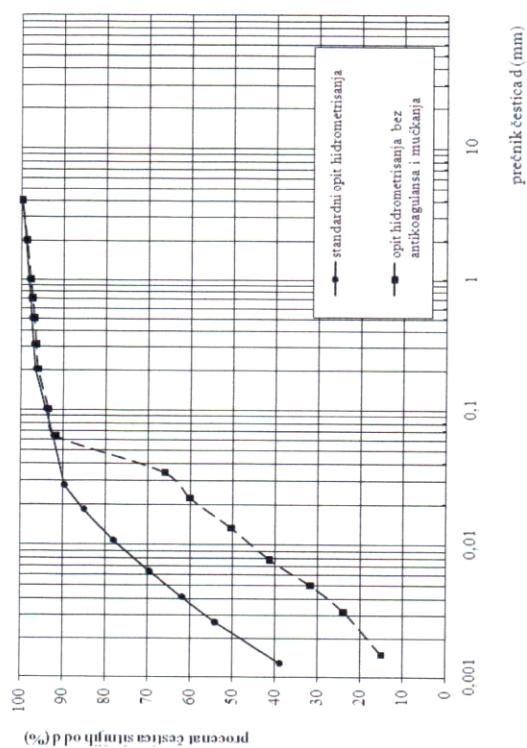
Tabela 6.9. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka U-2 Rovni

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)				
		2 min	20	1 h	4 h	6 h
ASTM D 6572-00	ND	/	ND	ND	ND	ND
Temperatura (°C)	20.0	/	20.0	20.0	20.0	20.0
Destilovana voda	Izgled uzorka	/	/	/	/	/
BS 1377- 5:1990 tac.6.3	Klasa disperzivnosti tla	ND	/	ND	ND	ND
Rastvor	0.001 M NaOH	Izgled uzorka	/	/	/	/



Slika 6.8. Opit duplog hidrometrisanja tla za uzorak U-2 Rovni

- a) standardni opit hidrometrisanja
- b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja



Slika 6.7. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak U-2 Rovni

Tabela 6.10. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak U-2 Rovni

Opit:	% čestica sitnijih od 0.002 mm (BS 1377-5:1990 tac.6.4)	% čestica sitnijih od 0.005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja	19	32
Standardni opit hidrometrisanja	48	65
Procenat disperzivnosti PD (%)	39.6	49
Klasa disperzivnosti tla	<b>SD</b>	<b>SD</b>

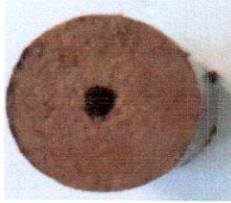
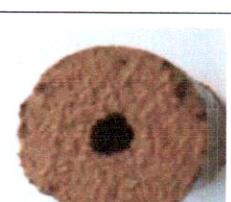
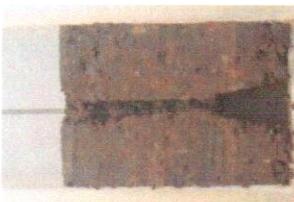
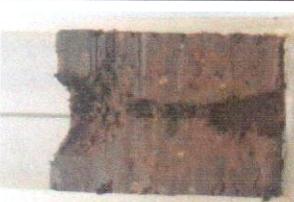
Tabela 6.11. Određivanje klase disperzivnosti pihole opitom za uzorak U-2 Rovni

Stepen zbijenosti (%)	UZORAK: ROVNI U-2									
	Ispitivanja pri hidrauličkom nivou									
	50		180		380	1020				
	Protok q (mL/s)	Zamučenje Boja/ čestica	Protok q (mL/s)	Zamučenje Boja/ čestica	Protok q (mL/s)	Zamučenje Boja/ čestica	Protok q (mL/s)	Iznosene je čestica Zamučenje Boja/ čestica	Veličina rupe (mm)	Klasa disperzivnosti
90	0.03	bistra	ne	0.45	bistra	nekoliko	1.0	bistra	nekoliko veličine do 1 mm	ND3
92	0.06	bistra	ne	0.64	bistra	ne	1.11	bistra	ne	2-7*
95	0.13	jedva vidljivo	ne	0.15	bistra	ne	0.79	bistra	nekoliko	ND3
98	0.21	jedva vidljivo	ne	0.31	bistra	nekoliko	0.82	bistra/jedva vidljiva	nekoliko	4-10*
100	0.08	bistra	ne	0.07	bistra	ne	0.27	bistra	ne	2-15*
105	0.06	bistra	ne	0.47	jedva vidljivo	nekoliko	0.98	bistra	nekoliko	ND2

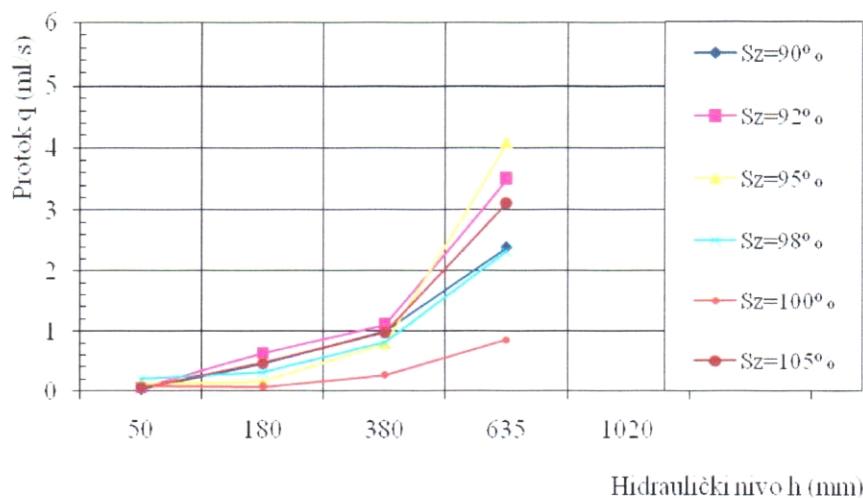
\* maksimalni prečnik d (mm)

\*\* opit nije izведен jer nije mogao da se održi nivo, veći protok od dotoka vode

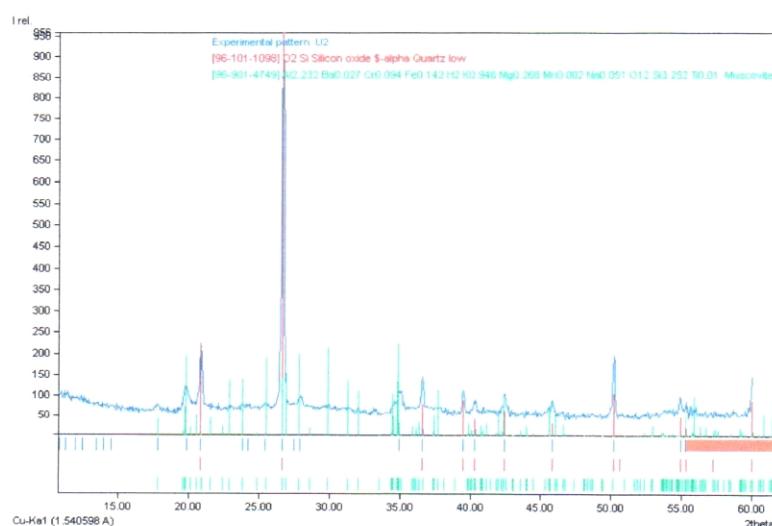
Tabela 6.12. Izgled uzorka U-2 Rovni, nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti

Uzorak	ROVNI U-2						
	Stepen zbijenost Sz (%)	90	92	95	98	100	105
Izlazna povšina							
Podružni presek							
Prečnik pore d (mm)	3-10*	2-7*	4-10*	2-15*	2-5*	2-5*	2-5*
Klasa disperzivnosti	ND3	ND3	ND3	ND2	ND2	ND2	ND2

\* maksimalni prečnik d (mm)



**Slika 6.9.** Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak U-2 Rovni



**Slika 6.10.** Rezultati XRD analize za uzorak U-2 Rovni

**Tabela 6.13.** Rezultati ispitivanja mineraloški sastav uzorka U-2 Rovni

Uzorak	Mineraloški sastav	
	Kvarc	Muskovit
U-2 Rovni	51.6	48.4

### 6.3 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak R-1 Ruma

Uzorak R-1 predstavlja prašinastu glinu niske plastičnosti (prema USCS klasifikaciji), odnosno les I lesnog horizonta. Uzorak je uzet iz pozajmišta materijala koje se koristio prilikom izgradnje nasipa za lokalni put. Dobijeni rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 6.14, i na dijagramima na slici 6.11.

U tabeli 6.15 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice, vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u destilovanoj vodi i rastvoru 0.001 M NaOH, u definisanim vremenskim intervalima uz merenje temperature rastvora. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Prilikom ispitivanju uzorka lesa R-1 potopljenog u destilovanu vodu i rastvor 0.001 M Na OH, već nakon 2 min došlo je do totalnog raspadanja uzorka do najfinijih čestica. Uzorak R-1 potopljen u destilovanu vodu pokazivao je jaču disperzivnu reakciju, blago intenzivnije zamućenje i formiranje koloidnog oblaka oko grudvice tla i na površini rastvora, pa je nakon prvih čitanja za 2, 20 minuta i 1 h, klasifikovan kao srednje disperzivan klase MD. Nakon 1 h reakcija se smirila i uzorak je do kraja ispitivanja pokazivao slabu reakciju SD. Kako je za klasifikaciju merodavno čitanje na 6 h ovaj uzorak je klasifikovan kao slabo disperzivno tlo SD. Uzorak R-1 potopljen u rastvor 0.001 M NaOH pokazao je blažu reakciju (osim prvih 2 min) i klasifikovan je kao slabo disperzivno tlo tokom svih čitanja SD.

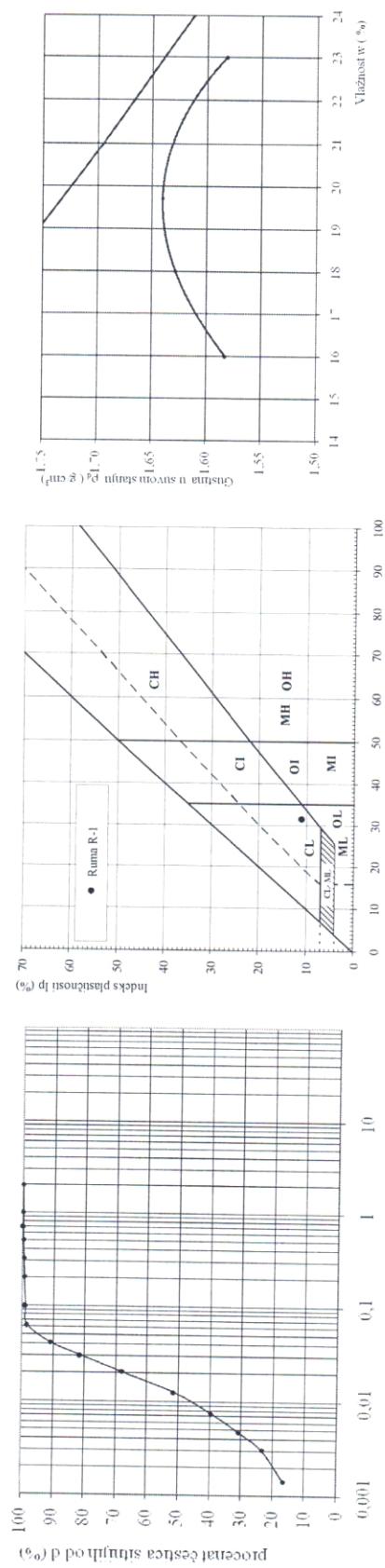
Na slici 6.12 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu oba standarda (ASTM D 4221-99 i BS 1377-5:1990), je neznatno veći od 30% (31% i 37,5%) što ispitivano tlo klasificuje kao srednje disperzivno (Tabela 6.16). Slika 6.13 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

U tabelama 6.17 i 6.18 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorak lesa R-1 ispitivanjima u pinhole aparatu, pri različitim stepenima zbijenosti u rasponu od  $Sz=90\text{-}105\%$ , pokazuje različite klase disperzivnosti. Naime, pri ispitivanjima na uzorcima sa nižim stepenom zbijenosti  $Sz=92$  i  $95\%$  tlo je klasifikovano kao srednje disperzivno klase ND3, a pri većim stepenima zbijenosti  $Sz=98$ ,  $100$  i  $102\%$  kao nedisperzivno tlo klase ND1. Uzorak  $Sz=90\%$  pri ispitivanju  $H=380$  mm ima protok  $q=1,84$  ml/s, što prema kriterijumima klasifikacije predstavlja klasu ND3. Međutim kako je ovo granična vrednost protoka (kao kriterijuma za klasifikaciju prema standardu ASTM D 4647-93), ispitivanje je nastavljeno i pri  $H=1020$  mm gde je dođen protok  $q>3$  ml/s, pa se uzorak može klasifikovati i kao tlo klase ND2. Voda je tokom izvođena opita sve vreme bistra, uz tek poneku ispranu finozrnu česticu, nezavisno od hidrauličkog nivoa ispitivanja.

Protok  $q$  prilikim ispitivanja je ravnomeran, i na završetku ispitivanja je manji od  $3.7$  ml/s (slika 6.14). Međutim, pri stepenu zbijenosti  $Sz=92\%$  i pri hidrauličkom nivou  $H=1020$  mm protok je nešto veći  $q=4.13$  ml/s, čime se može objasniti kolebanje i pada hidrauličkog nivoa prilikom ispitivanja. Prečnik cilindrične pore na kraju ispitivanja iznosi  $d=1$  mm duž čitave dužine uzorka. Na izlaznom delu cilindrične pore, javlja se kupasto proširenje prečnika u bazi do  $10$  mm, što je posledica erodovanja uzorka (tabela 6.18).

Tabela 6.14. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka R-1 Ruma

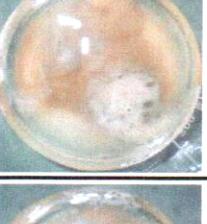
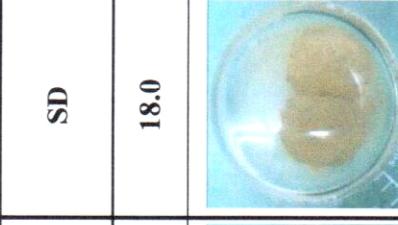
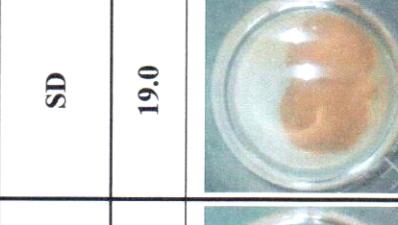
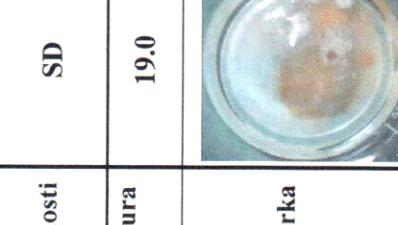
Granulometrijski sastav tla				Vlažnost frakcija	Aterebergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov opit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )	USCS klasifikacija tla
glina	pršina	pesak	šljunak		w	w <sub>f</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>		
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	0,06 (%)	2,00 (%)	60,0 (%)	/ (%)	/ (%)	ρ <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>opt</sub> (%)
(%)	(%)	(%)	(%)							
20	78	2	/				31,5	20,5	11,0 /	1,640 / 19,7

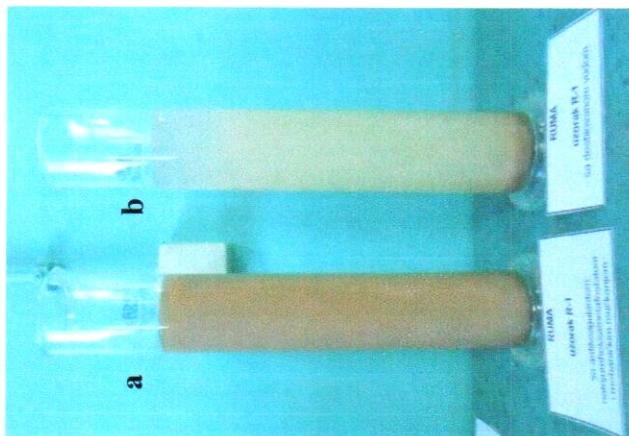


Slika 6.11. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka R-1 Ruma

- a) Granulometrijski sastav  
b) Plastičnost  
c) Proctorov opit

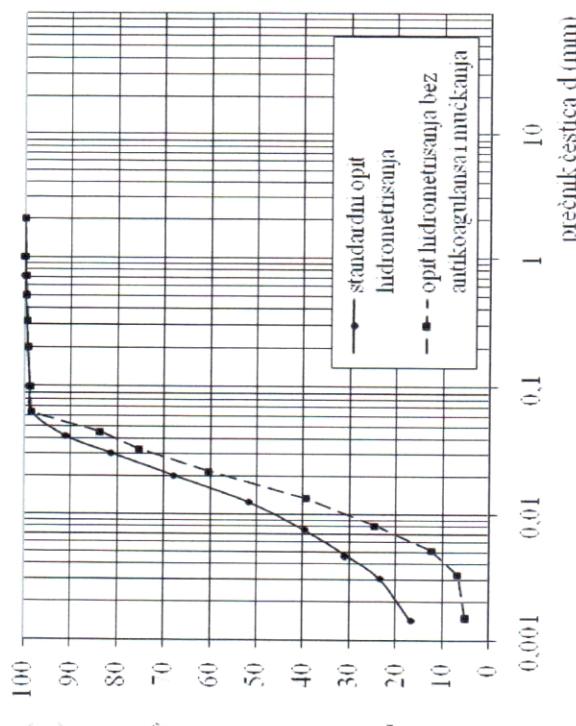
Tabela 6.15. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka R-1 Ruma

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
	MD	MD	MD	SD	SD	SD	SD
Temperatura (°C)	17.0	17.0	18.0	19.0	19.0	18.0	18.0
Izgled uzorka							
	Klasa disperzivnosti tla	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Temperatura (°C)	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	18.0
Izgled uzorka							
BS 1377-5:1990 tac.6.3	Rastvor	0.001 M NaOH	Destilovana voda	ASTM D 6572-00			



Slika 6.13. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak R-1 Ruma

a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoagulanса i mučkanja



Slika 6.12. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak R-1 Ruma

Tabela 6.16. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak R-1 Ruma

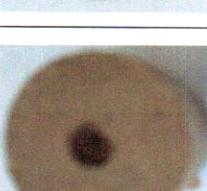
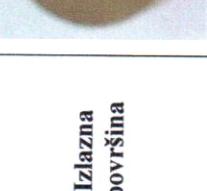
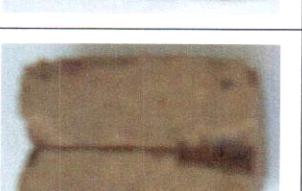
Opit:	% čestica sitnijih od 0.002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0.005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulanса i mučkanja	6	12
Standardni opit hidrometrisanja	19.5	32
Procenat disperzivnosti PD (%)	31	37.5
Klasa disperzivnosti tla	<b>SD</b>	<b>SD</b>

Tabela 6.17. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak R-1 Ruma

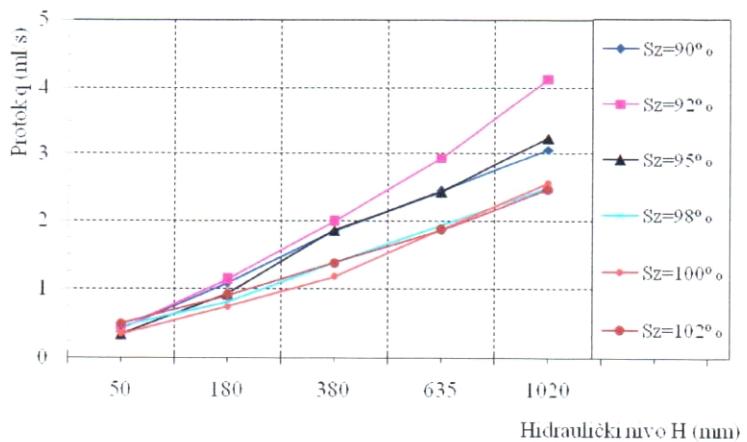
UZORAK: RUMA R-1														
Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)														
	50			180			380			1020				
Stepen zbijenosnosti (%)	Protok q (ml/s)	Bojza/ Zamugeanje	Cestica Iznosjenje											
Klase disperzivnosti	d (mm)													
90	0.42	bistra	ne	1.08	bistra	ne	1.84	bistra	ne	3.06	bistra	nekoliko	1 (6x2*)	ND2/ ND3
92	0.42	bistra	nekoliko	1.13	bistra	nekoliko	1.99	bistra	nekoliko	4.13	bistra	nekoliko	1 (9x5*)	ND3
95	0.35	bistra	ne	0.92	bistra	ne	1.85	bistra	ne	3.24	bistra	ne	1 (7x2*)	ND3
98	0.45	bistra	ne	0.81	bistra	ne	0.73	bistra	nekoliko	2.49	bistra	ne	1 (5x3*)	ND1
100	0.34	bistra	ne	0.74	bistra	nekoliko	1.17	bistra	nekoliko	2.56	bistra	nekoliko	1 (10x3*)	ND1
102	0.49	bistra	ne	0.90	bistra	ne	1.37	bistra	ne	2.46	bistra	ne	1 (4x3*)	ND1

\* veličina kupastog otvora na izlazu ŠxD u mm

Tabela 6.18. Izgled uzoraka R-1 Ruma nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti

Uzorak	RUMA R-1				
	90	92	95	98	100
Stepen zbijenosti Sz (%)					
Izlazna površina					
Poduzni presek					
Prečnik pore d (mm)	1 (6x2*)	1 (9x5*)	1 (7x2*)	1 (5x3*)	1 (10x3*)
Klasa disperzivnosti	ND2/ND3	ND3	ND3	ND1	ND1

\* veličina kupastog otvora na izlazu ŠxD u mm



**Slika 6.14.** Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak R-1 Ruma

#### 6.4 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak T-1 Titel

Uzorak T-1 predstavlja prašinastu glinu niske plastičnosti (prema USCS klasifikaciji), odnosno les iz I lesnog horizonta. Dobijeni rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 6.19, i na dijagramima na slici 6.15.

U tabeli 6.20 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice, vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u destilovanoj vodi i rastvoru 0.001 M NaOH, u definisanim vremenskim intervalima uz merenje temperature suspenzije. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorak lesa T-1 i u destilovana voda i u rastvor NaOH, pokazuje jaku disperzivnu reakciju – klasa HD. Neposredno nakon potapanja uzorka došlo je do potpune dezintegracije prvobitne strukture do najfinijih čestica, formiranja intenzivnog gustog koloidnog zamućenja oko uzorka koje je pokrivalo čitavo dno čaše. Reakcija je bila prisutna sve vreme trajanja opita. Opit je ponavljan još dva puta i svaki put reakcija je bila ista.

Na slici 6.16 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu standarda ASTM D 4221 je veći za oko približno 30% od procenta disperzivnosti sračunatog na osnovu BS 1377-5:1990 standarda. Na osnovu rezultata oba opita ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno klase D (Tabela 6.21). Slika 6.15 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

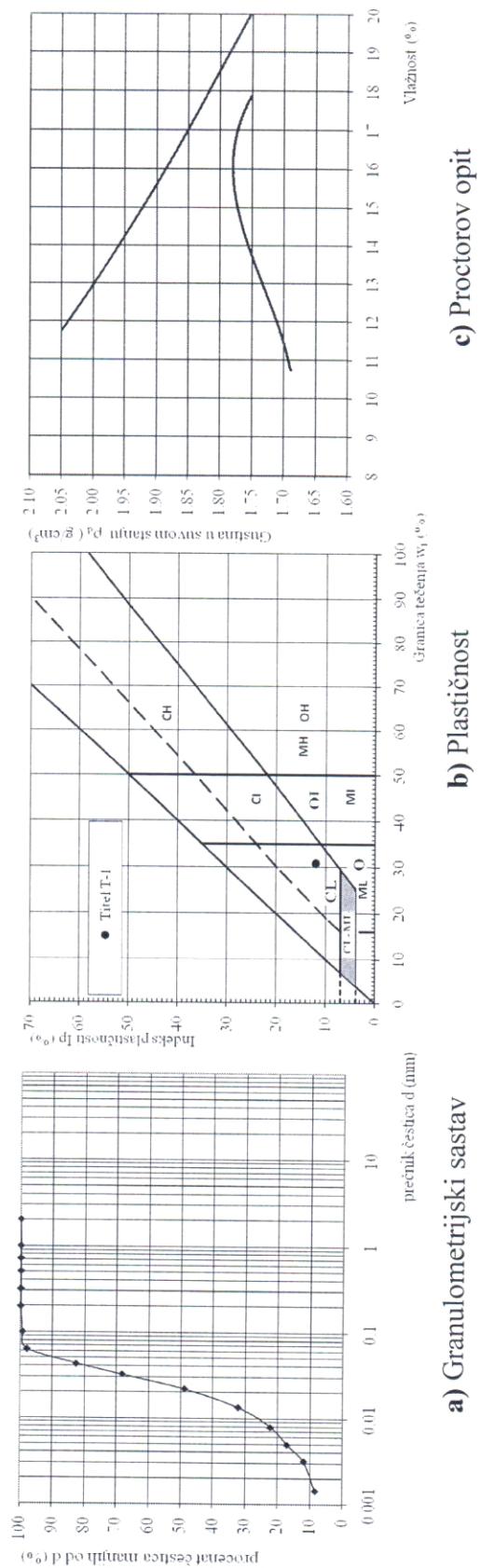
U tabelama 6.22 i 6.23 prikazani su rezultati određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci lesa T-1 ispitivanjem u pinhole aparatu, bez obzira na stepen zbijenosti, već pri hidrauličkom nivou H=50 mm i nakon ispitivanja od 5 min pokazuju intenzivnu disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao disperzivno tlo klase D1. Koloidno zamućenje destilovane vode koja je protekla kroz uzorak je intenzivno sa dosta iznetih

čestica. Veličina protoka je  $q>1\text{ml/s}$ , a prečnik cilindrične pore d nakon ispitivanja iznosio je od  $d=4\text{-}10\text{ mm}$ .

Na slici 6.17 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.24.

Tabela 6.19. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka T-1 Titel

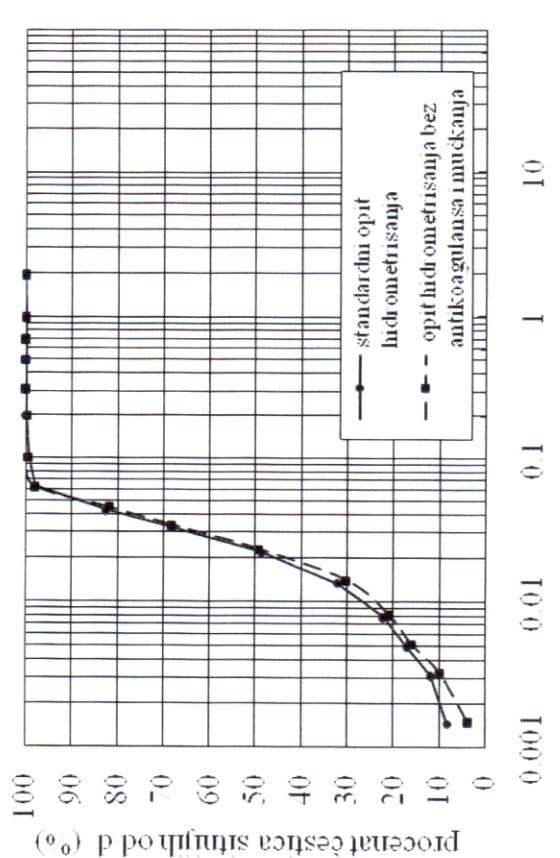
Granulometrijski sastav tla				Aterbergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )				USCS klasifikacija tla
gлина	prăšina	pesak	šljunak									
				frakcija								
<0,002 mm	0,002-0,06 mm	0,06-2,00 mm	2,00-60,0 mm									
(%)	(%)	(%)	(%)									
10	88	2	/									



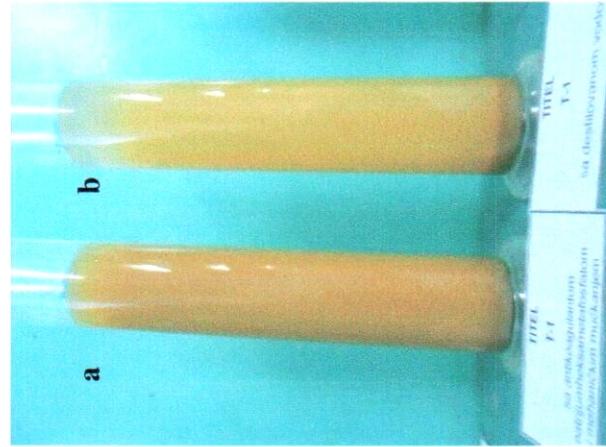
Slika 6.15. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka T-1 Titel

Tabela 6.20. Rezultati ispitivanje disperzivnosti tla optom grudvice uzorka T-1 Titel

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
Temperatura (°C)	18.0	18.0	18.0	18.0	19.0	19.0	18.0
Izgled uzorka							
ASTM D 6572-00		Destilovana voda					
BS 1377-5:1990 tač.6.3		Rastvor 0.001 M NaOH					
Metoda	Klasa disperzivnosti tla	HD	HD	HD	HD	HD	HD
Temperatura (°C)	17.0	17.0	17.0	17.0	18.0	19.0	17.5
Izgled uzorka							



Slika 6.16. Granulometrijski sastava za opit duplog hidrometrisanja za uzorak T-1 Titel za uzorak T-1 Titel



Slika 6.17. Opit duplog hidrometrisanje za uzorak T-1 Titel  
a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućkanja

Tabela 6.21. Rezultata opita duplog hidrometrisanja za uzorak T-1 Titel

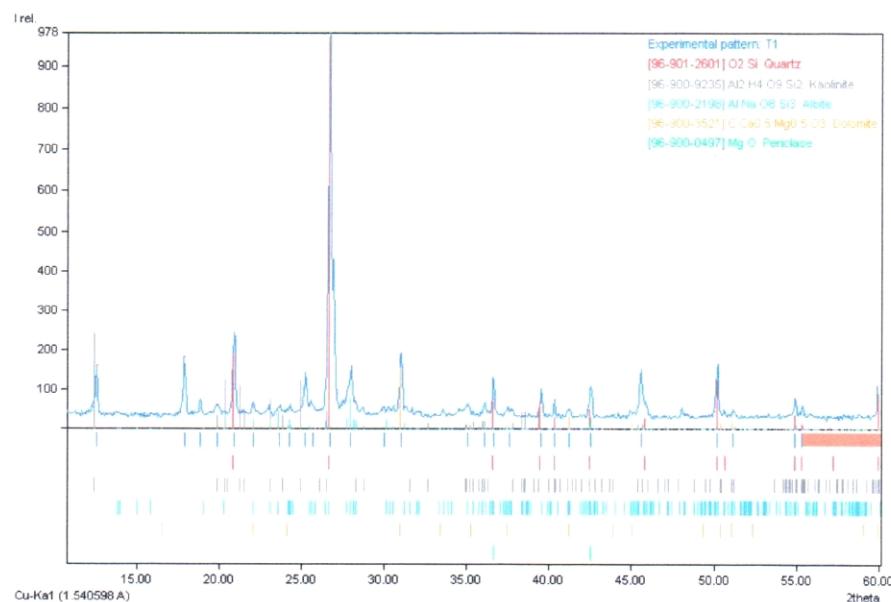
Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućkanja	7	16
standardni opit hidrometrisanja	10	17
% disperzivnosti	70	94
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	<b>D</b>

Tabela 6.22. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak T-1 Titel

UZORAK: TITEL T-1						
Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)						
	50	180	380	1020		
Stepen zbijenosnosti Sz (%)	Protok q (ml/s)	Boja/ Zamugeanje cestica	Iznosjenje cestica	Boja/ Zamugeanje cestica	Iznosjenje cestica	Protok q (ml/s)
90	1.67	tamna	mnogo			5 mm
92	1.80	tamna	mnogo			4 mm
95	1.56	tamna	mnogo			4 mm
98	1.51	tamna	mnogo			4 mm
100	1.62	tamna	mnogo			5 mm
102	1.65	tamna	mnogo			10 mm
				Klasa disperzivnosti		D1
				Velicina pore (mm)		

Tabela 6.23. Izgled uzorka T-1 Titel nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Uzorak		TITEL T-1				
Sz (%)	90	92	95	98	100	102
Zamućenje suspenzije						
Izlazna površina						
Podužni presek						
Prečnik d (mm)	5 mm	4 mm	4 mm	5 mm	5 mm	10 mm
Klasa disperzivnosti	D1	D1	D1	D1	D1	D1



**Slika 6.18.** Rezultati XRD analize za uzorak T-1 Titel

**Tabela 6.24.** Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka T-1 Titel

Uzorak	Mineraloški sastav				
	Kvarc	Kaolinit	Dolomit	Albit	Periklas
T-1 Titel	38.5	25.6	16	18.1	1.8

## **6.5 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorka K-1 Kelebija**

Uzorak K-1 predstavlja prašinastu glinu niske plastičnosti (prema USCS klasifikaciji), odnosno les I lesnog horizonta. Dobijeni rezultati labratorijskih geomehaničkih ispitivanja prikazani su u tabeli 6.25, i na dijagramima na slici 6.19.

U tabeli 6.26 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice, vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u definisanim vremenskim intervalima uz merenje temperature rastvora. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorak lesa K-1, i u destilovanoj vodi i rastvor NaOH, pokazuje jaku disperzivnu reakciju – klasa HD. Neposredno nakon potapanja uzorci su se potpuno raspali, formiralo se gustog koloidno zamućenja, koje je pokrivalo čitavo dno i zidove laboratorijske čaše. Reakcija je bila prisutna sve vreme trajanja opita.

Na slici 6.20 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja izvedenog na uzorku K-1. Procenat disperzivnosti PD iznosi 83 % (BS 1377-5:1990) odnosno 96 % (ASTM D 4221-99). Prema oba opita ispitivano tlo klasificuje se kao disperzivno klase D (Tabela 6.27). Slika 6.21 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

U tabeli 6.28 prikazani su rezultati određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci lesa K-1 ispitivanjem u pinhole aparatu, bez obzira na stepena zbijenosti, već pri hidrauličkom nivou H=50 mm i nakon ispitivanja od 5 min pokazuju intenzivnu disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao disperzivno tlo klase D1. Rastvor destilovane vode koja je protekla kroz uzorak je tamna, sa dosta iznetih čestica. Veličina protoka  $q > 1 \text{ mL/s}$ , a prečnik cilindrične pore d nakon ispitivanja iznosio je od 5-10 mm. Fotografije ispitivanja disperzivnosti pinhole opitom uzorak K-1 date su u tabeli 6.29.

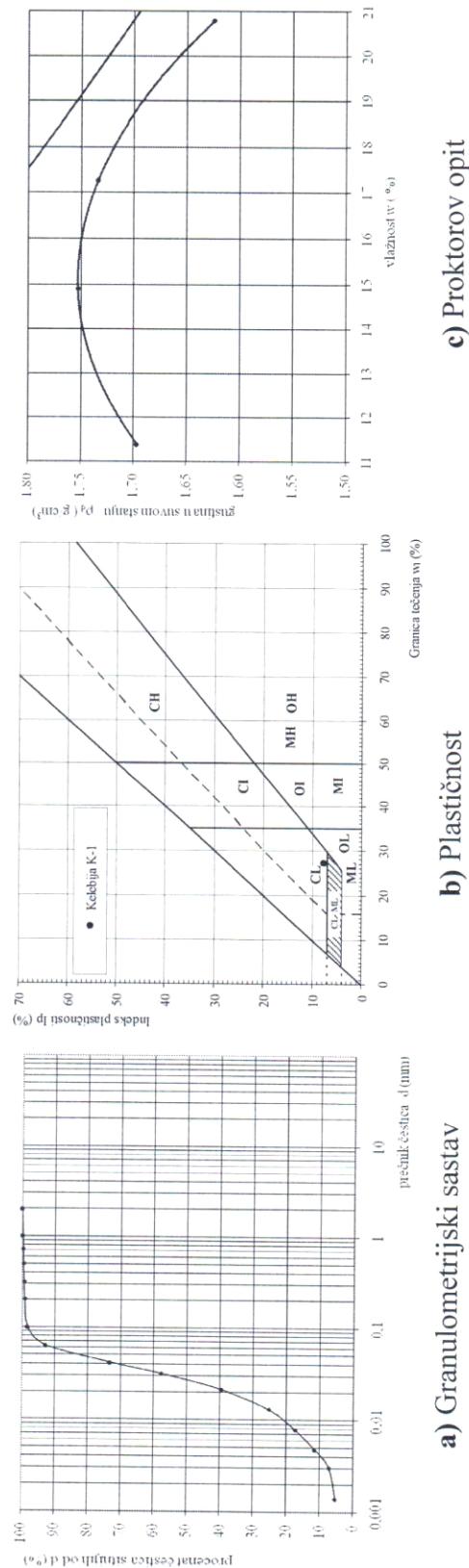
---

*Poglavlje 6. Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja*

Na slici 6.22 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Procentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.30.

Tabela 6.25. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka K-1 Kelebija

Granulometrijski sastav tla				Aterbergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )				USCS klasifikacija tla			
glina	prahina	pesak	šljunak					w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>		
frakcija				Vlažnost											
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	0,06 (%)	2,00 (%)	60,0 (%)	60,0 (%)	w	w <sub>l</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>		
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)					(g/cm <sup>3</sup> )	(%)		
6	86	8	/	/	14.5	27.3	19.6					1.753	15.1		



Slika 6.19. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka K-1 Kelebija

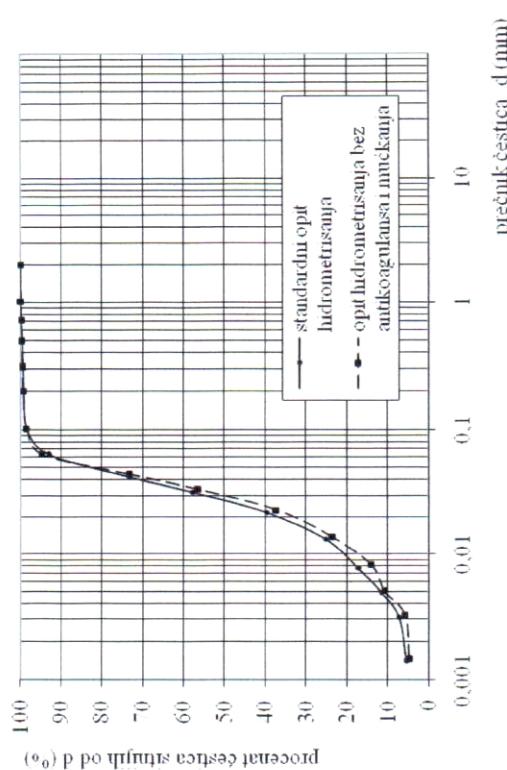
a) Granulometrijski sastav  
b) Plastičnost  
c) Proktorov optit

Tabela 6.26. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka K-1 Kelebija

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
Temperatura (°C)	22.0	HD	HD	HD	HD	HD	HD
Izgled uzorka							
0.001 M NaOH Rastvor	Klasa disperzivnosti tla	HD	HD	HD	HD	HD	HD
Destilovana voda	Temperatura (°C)	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	20.0
ASTM D 6572-00	Izgled uzorka						
BS 1377-5:1990 tac.6.3							



Slika 6.21. Opit duplog hidrometrisanja za uzorak K-1 Kelebija  
a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoaglansa i mučkanja



Slika 6.20. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja tla za uzorak K-1 Kelebija

Tabela 6.27. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak K-1 Kelebija

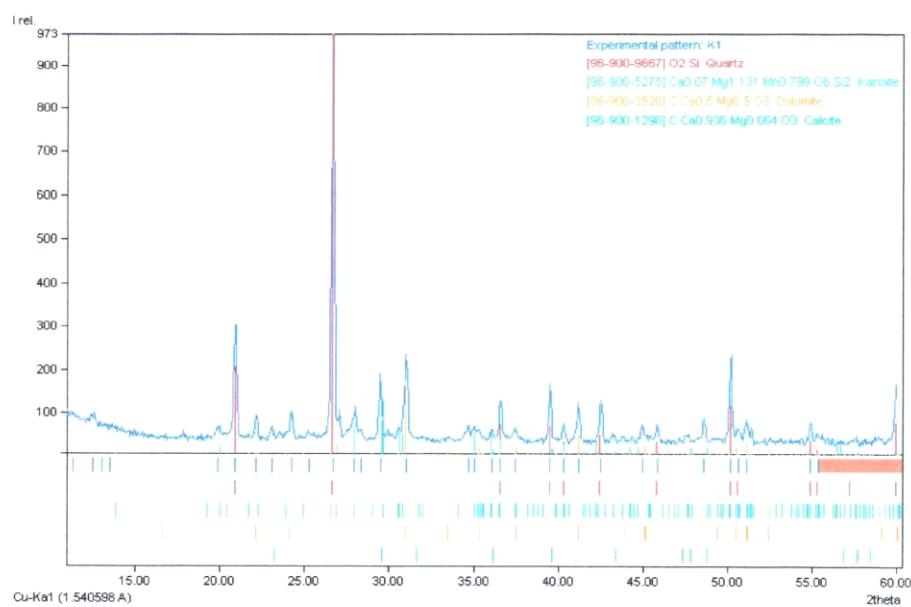
Opit	% čestica sitnijih od 0.002 mm (BS 1377-5:1990 tac.6.4)	% čestica sitnijih od 0.005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoaglansa i mučkanja	5	11
Standardni opit hidrometrisanja	6	11.5
Procenat disperzivnosti PD (%)	83	96
Klasa disperzivnosti tla	SD	SD

Tabela 6.28. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak K-1 Kelebija

UZORAK: KELEBIJA K-1							
Ispitanja pri hidrauličkom nivou H (mm)							
	50	180	380	1020			
Stepen zbijenosnosti (%)							
Protok q (ml/s)							
Zamugeanje							
Boja/ cestica							
Iznosjenje							
Protok q (ml/s)							
Zamugeanje							
Boja/ cestica							
Iznosjenje							
Protok q (ml/s)							
Zamugeanje							
Boja/ cestica							
Iznosjenje							
Protok q (ml/s)							
Zamugeanje							
Boja/ cestica							
Iznosjenje							
Protok q (ml/s)							
Zamugeanje							
Boja/ cestica							
Iznosjenje							
Klase disperzivnosti							
Velicina rupeice (mm)							

Tabela 6.29. Izgled uzorka K-1 Kelebija, nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Uzorak		KELEBIJA K-1					
Sz (%)	90	92	95	98	100	102	
Zamućenje suspenzije							
Izlazna površina							
Podužni presek							
Prečnik d (mm)	5 mm	8 mm	8 mm	5 mm	7 mm	10 mm	
Klasa disperzivnosti	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1



Slika 6.22. Rezultati XRD analize za uzorak K-1 Kelebija

Tabela 6.30. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava K-1 Kelebija

Uzorak	Mineraloški sastav			
	Kvarc	Kalcit	Kaolinit	Dolomit
K-1 Kelebija	49.8	5.2	26	19

## 6.6 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad

Uzorak lesa ZGG-1 uzet je iz iskopa na lokaciji Zemun Gornji Grad. Dobijeni rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja prikazani su u tabeli 6.31, i na dijagramima na slici 6.23.

U tabeli 6.32 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice, vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u definisanim vremenskim intervalima i merenju temperature rastvora. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorak lesa ZGG-1 potopljen u čašu sa destilovanom vodom ne pokazuje disperzivne promene tj. nije disperzivan – klasa ND. Neposredno nakon potapanja uzorka, već nakon 2 min došlo je do potpunog raspadanja uzorka do najsitnih čestica (okom vidljivih), a destilovana voda je do kraja ispitivanja ostala bistra. Za razliku od ovoga, uzorak ZGG-1 koji je potopljen u rastvor NaOH pokazivao je jaku disperzivnu reakciju klase HD sve vreme izvođenja opita.

Na slici 6.24 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Vrednost procenata disperzivnosti PD (prema BS 1377-5:1990) iznosi PD= 57%, odnosno (prema ASTM D 4221-99) PD=69%. Na osnovu procenta disperzivnosti ispitivano tlo klasificuje se kao disperzivno tlo (Tabela 6.33).

U tabelama 6.34 i 6.35 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Ispitivanja na uzorcima lesa ZGG-1, pri nižim stepenima zbijenosti ( $Sz=90, 92$  i  $95\%$ ) i pri hidrauličkom nivou  $H=50mm$ , usled malog protoka su izvedena u dva ciklusa od po 5min. Suspenzija protekle vode kroz uzorke je bio blagog do srednjeg zamućenja. Uzorak stepena zbijenosti  $Sz=90\%$  klasifikovan je kao D2. Uzorci zbijenosti  $Sz= 92$  i  $95\%$ , prema kriterijumima klasifikacije iz standarda, usled malog protoka  $q<0,8 \text{ ml/s}$ , ne

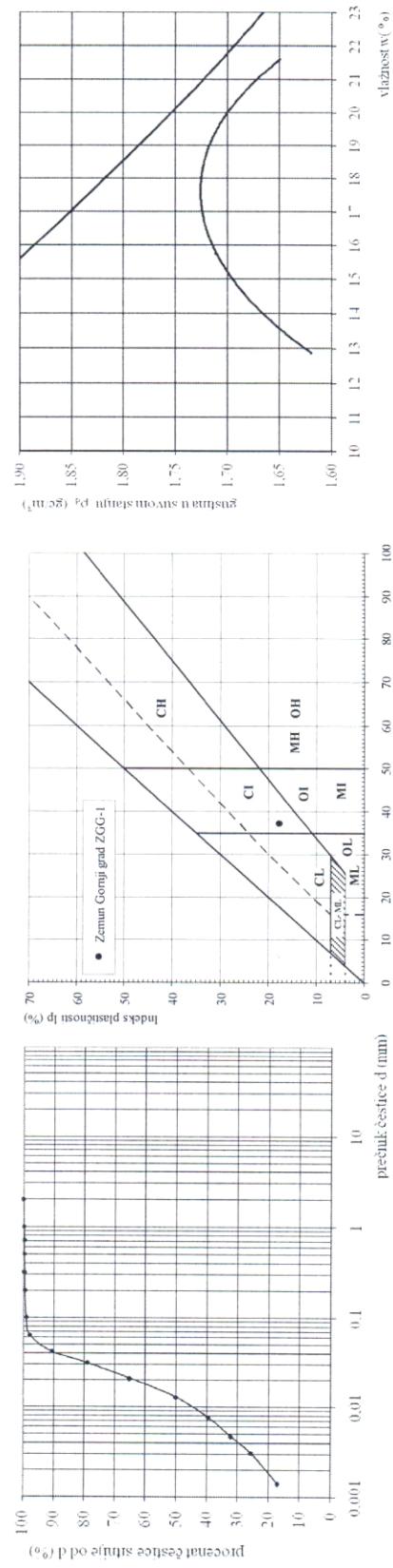
mogu se jasno izvojiti u određenu kategoriju, te su svrstani u prelaznu kategoriju D2/ND4 što ih klasificuje kao srednje disperzivna do disperzivna tla. Ispitivanja pri hidrauličkom nivou  $H= 180\text{mm}$ , za stepen zbijenosti 98 i 100% takođe su dala vrlo niske protoke  $q<0.8 \text{ ml/s}$ . Ovi uzorci su takođe, uslovno klasifikovani kao klasa ND3. Uzorak stepena zbijenosti  $Sz=102\%$  zadovoljio je sve kriterijume klasifikacije za klasu ND3.

Veštački formirana cilindrična pora u uzorku nakon ispitivanja ima prečnik  $d$  od 10-15 mm. Duž cele dužine uzorka formirani su erozioni kanali, što se vidi iz fotografija u tabeli 6.35.

Na slici 6.25 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.36.

**Tabela 6.31.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad

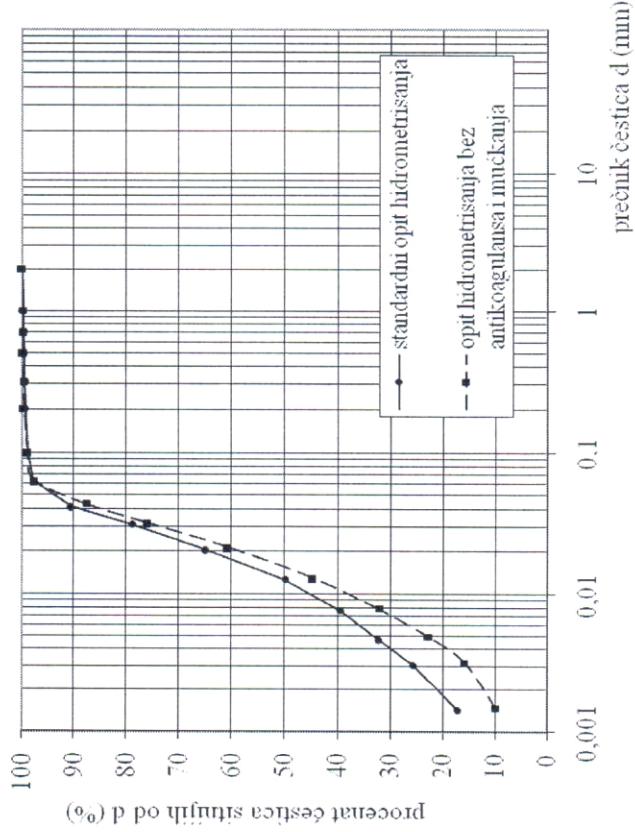
Granulometrijski sastav tla				Vlaznost Aterbergove granice	Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )				USCS klasifikacija tla
gлина	prăšina	pesak	šljunak		w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>		
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	2,00	w				
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		
21	79	3	/	/	37,4	19,7	17,7	/	1,726
									17,6



**Slika 6.23.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad

Tabela 6.32. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)				
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h
Temperatura (°C)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Izgled uzorka	19.0	19.0	18.0	17.0	17.0	19.0
<b>ASTM D 6572-00</b>		<b>Destilovana voda</b>				
<b>BS 1377-5:1990 tac.6.3</b>		<b>0.001 M NaOH</b>				
Rastvor	Klasa disperzivnosti tla	HD	HD	HD	HD	HD
Temperatura (°C)	18.0	18.0	17.0	16.0	16.0	19.0
Izgled uzorka						



Slika 6.24. Granulometrijski sastav opita duplog hidrometrisanja tla za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad  
Tabela 6.33. Rezultati opita duplog hidrometrisanja tla za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad

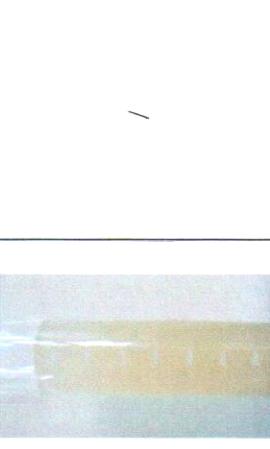
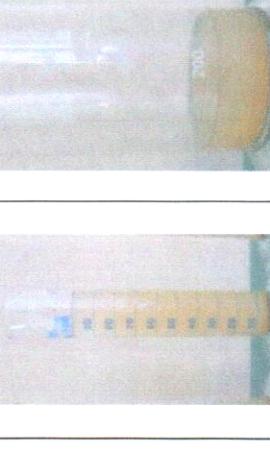
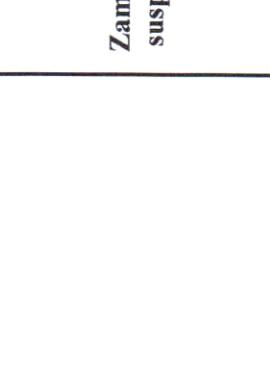
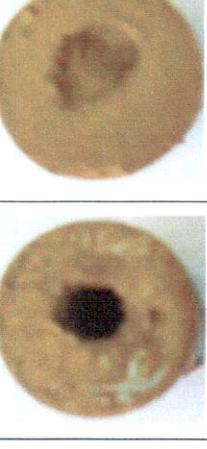
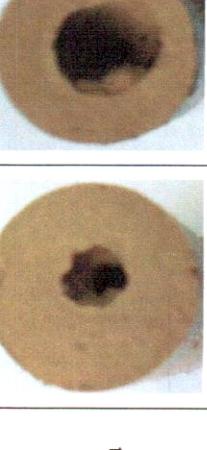
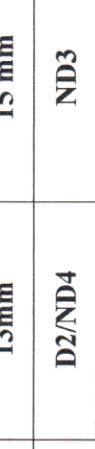
Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućanja	12	23
Standardni opit hidrometrisanja	21	33
Procenat disperzivnosti PD (%)	57	69
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	<b>D</b>

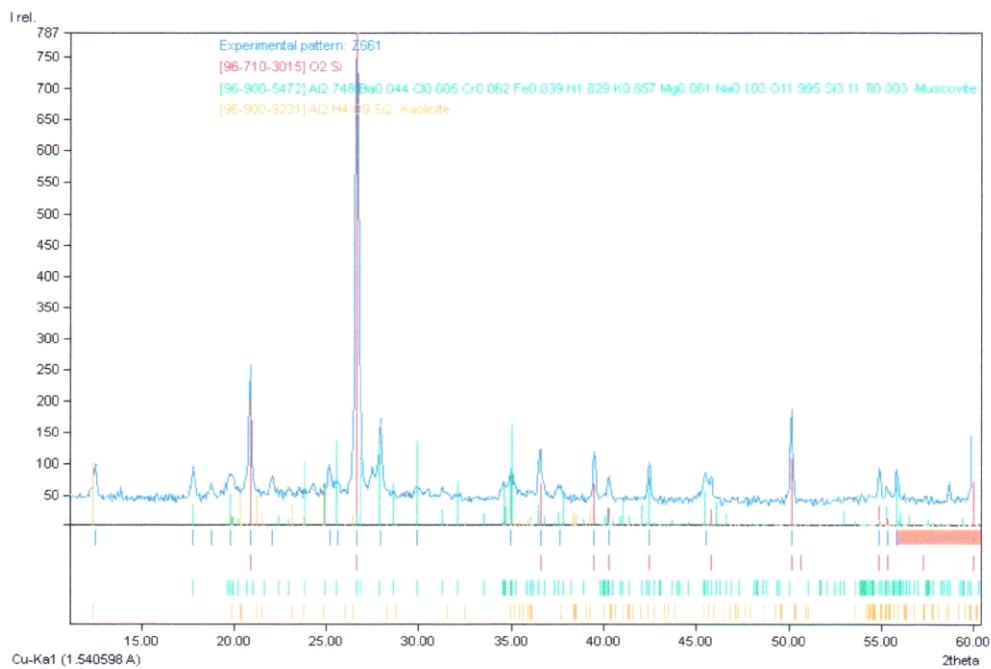
Tabela 6.34. Određivanje klase disperzivnosti pithole optom za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad

UZORAK: ZEMUN GORNJI GRAD ZGG-1													
Stepen zbijenosti Sz (%)	Protok q (ml/s)	Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)		50		180		380		1020		Velicina pore d (mm)	Klasa disperzivnosti
		Zamućenje Boja/	Iznosjenje čestica	Zamućenje Boja/	Iznosjenje čestica	Zamućenje Boja/	Iznosjenje čestica	Zamućenje Boja/	Iznosjenje čestica	Zamućenje Boja/	Iznosjenje čestica		
90 I	0.93	blago do srednje	malo									10 mm	D2
90 II	1.12	blago do srednje	mnogo										
92 I	0.21	jedva vidljivo	ne									15 mm	D2/ND4
92 II	0.24	blago do srednje	mnogo										
95 I	0.35	blaga do srednje	mnogo									13 mm	D2/ND4
95 II	0,76	tama	mnogo										
98	0.31	bistra	ne	0.54	tama	mnogo						15 mm	ND3
100	0.057	bistra	ne	0.30	blago	mnogo	0,67	blago do srednje	mnogo			15 mm	ND3
102	0.15	jedva vidljivo	ne	0.88	blago do srednje	мало	2.98	blaga do srednje	mnogo			15 mm	ND3

\*uslovna klasifikacija

Tabela 6.35. Izgled uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad, nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Uzorak		ZEMUN-GORNJI GRAD ZGG-1					
Sz (%)	90	92	95	98	100	102	
Zamućenje suspenzije	.						
Izlazna površina							/
Podružni presek							
Prečnik d (mm)	10 mm	15 mm	15 mm	13 mm	15 mm	15 mm	15 mm
Klasa disperzivnosti	D2	D2/ND4	D2/ND4	D2/ND4	ND3	ND3	ND3



**Slika 6.25.** Rezultati XRD analize za uzorak ZGG-1 Zemun Gornji Grad

**Tabela 6.36.** Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava  
uzorka ZGG-1 Zemun Gornji Grad

Uzorak	Mineraloški sastav		
	Kvarc	Kaolinit	Muskovit
ZGG-1 Zemun	47.7	18.1	34.2

## **6.7 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorka MI-1 Mali Idoš**

Dobijeni rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka lesa MI-1 prikazani su u tabeli 6.37, i na dijagramima na slici 6.26.

U tabeli 6.38 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice, vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u destilovanoj vodi i rastvoru 0.001 M NaOH, u definisanim vremenskim intervalima i izmerenoj temperaturi rastvora. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorak lesa MI-1, i u destilovanoj vodi i u rastvoru 0.001M NaOH, nakon potapanja u laboratorijsku čašu pokazuje slabe disperzivne promene klase SD. Nakon 1 h posmatranja reakcija tla je neznatno blaža, ali se tlo i dalje može klasifikovati kao slabo disperzivno tlo klase SD.

Na slici 6.27 prikazan je dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Vrednost procenata disperzivnosti PD (prema BS 1377-5:1990) iznosi PD= 61.5%, odnosno (prema ASTM D 4221-99) PD=86%. Na osnovu procenta disperzivnosti ispitivano tlo klasificuje se kao disperzivno tlo (Tabela 6.39).

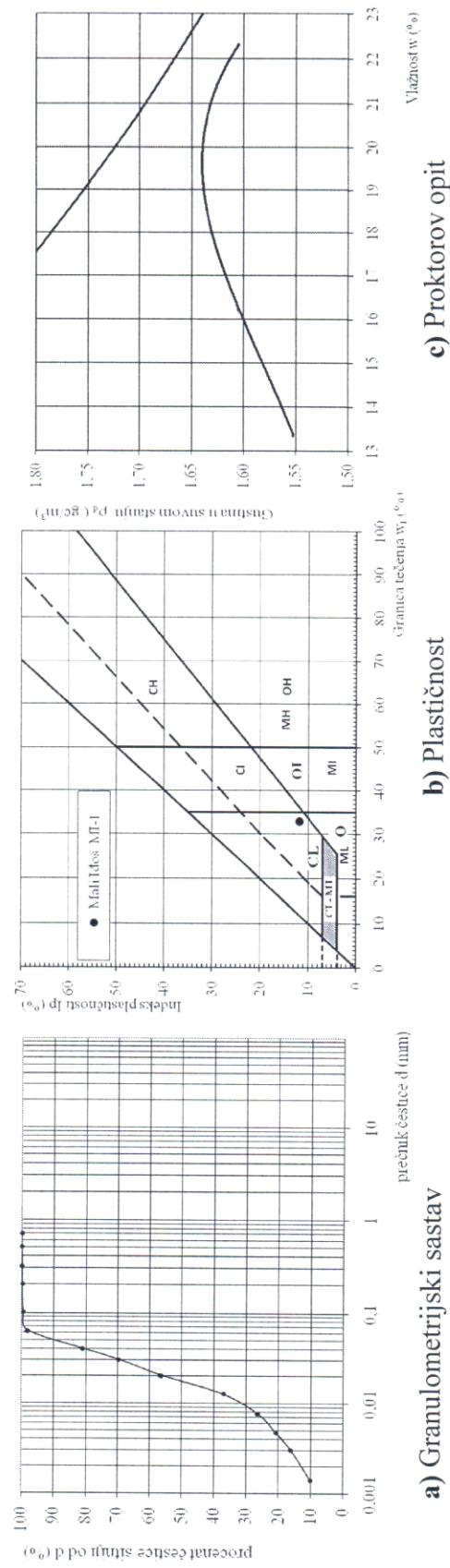
U tabelama 6.40 i 6.41 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Ispitivanja uzorka lesa MI-1 u pinhole aparatu, pri svim stepenima zbijenosti, pokazuju klasu disperzivnosti ND3. Destilovana voda, nakon proticanja kroz uzorak je bistra do blago mutna, a protok je  $q>1,8$  ml/s (kriterijumi za ND3). Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H=1020 mm nije bilo moguće izvesti jer su već pri H=380 mm dobijeni visoki proticaju  $q>3,0$  ml/s. Dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti tla prikazan je na slici 6.28. Pri nižim hidrauličkim nivoima ispitivanja (H=50 i 180 mm) iznošenje čestica je sporadično, dok pri hidrauličkom nivou H=380mm ima dosta

iznetih čestica iz uzorka. Veštački formirana cilindrična pora celom dužinom uzorka se ravnomerno proširila od 1.8-2.5 mm. Na izlazu iz uzorka formiralo se kupasto proširenje, usled erozije uzorka maksimalnog prečnika d=15 mm.

Na slici 6.29 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.42.

**Tabela 6.37.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka MI-1 Mali Iđoš

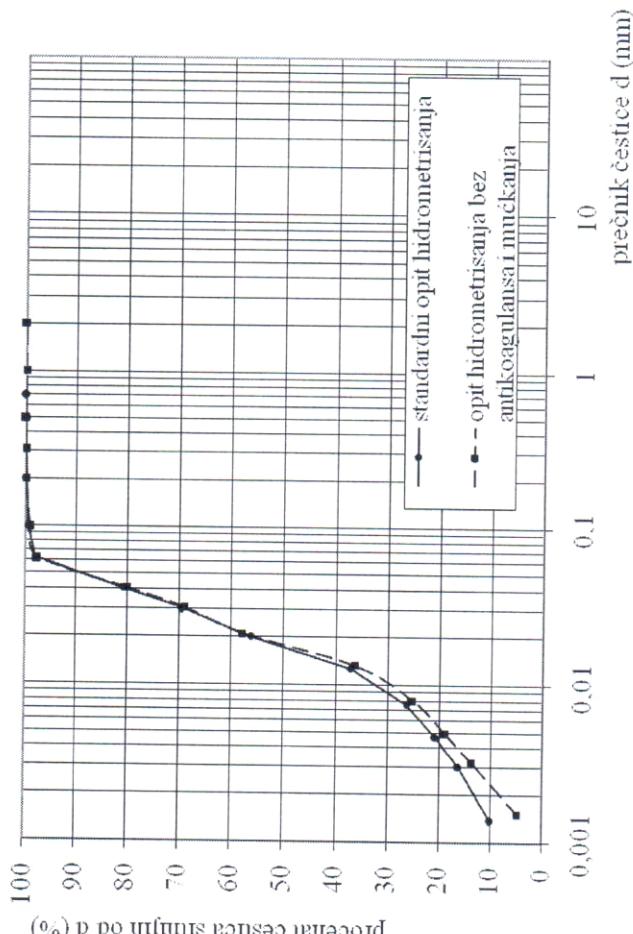
Granulometrijski sastav tla			Atereborgove granice			Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit ( $E=600 \text{ kJ/m}^3$ )			USCS klasifikacija tla				
glina	prašina	pesak	šljunak	frakcija	Vlajnost	w	$w_l$	$w_p$	$I_p$	$I_c$	$\rho_{dmax}$	$w_{opt}$	(%)
<0,002 mm	0,002 0,06 mm	0,06 2,00 mm	0,06 60,0 mm	2,00									
(%)	(%)	(%)	(%)			(%)	(%)	(%)					
13	84	3	/			14.7	33.0	21.3	11.7	1.6	1.638	19.6	



**Slika 6.26.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka MI-1 Mali Iđoš

Tabela 6.38. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka MI-1 Mali Idoš

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
Temperatura (°C)	19.0	19.0	18.0	SD	SD	SD	SD
Izgled uzorka							
ASTM D 6572-00							
Rastvor 0.001 M NaOH							
BS 1377-5:1990 tac.6.3							



Slika 6.27. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak MI-1 Mali Idoš

Tabela 6.39. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak MI-1 Mali Idoš

Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i muckanja	8	19
Standardni opit hidrometrisanja	13	22
Procenat disperzivnosti PD (%)	61,5	86
Klasa disperzivnosti tla	D	<b>D</b>

Tabela 6.40. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak MI-1 Mali Idoš

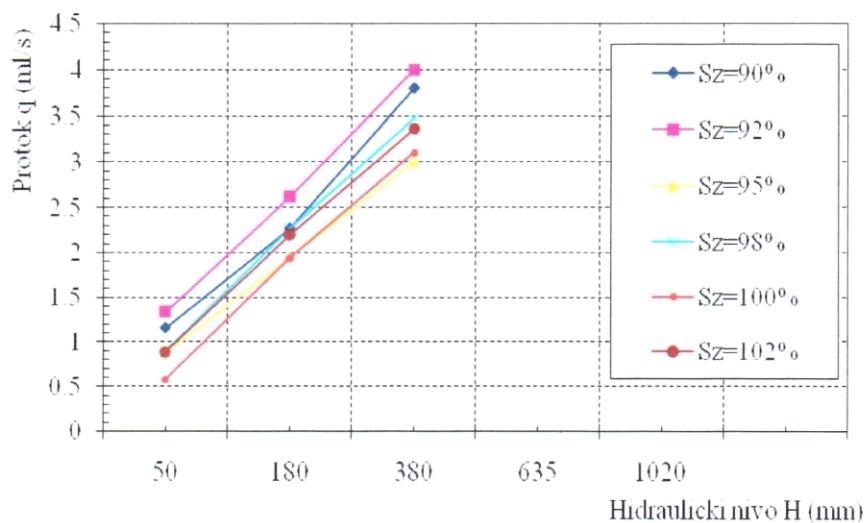
UZORAK: MALI IDOŠ MI-1									
Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)					1020				
50		180		380	1020		1020		1020
Stepen zbijenosti (%)	Protok q (ml/s)	Zamućenje Boja/čestica	Protok q (ml/s)						
Klasa disperzivnosti	d (mm)								
90	1.16	jedva vidljivo	malo	2.27	jedva vidljivo	malo	3.8	blago do srednje	nije mogao da se postigne nivo
92	1.34	jedva vidljivo	malo	2.61	bistro	malo	4.0	jedva vidljivo	nije mogao da se postigne nivo
95	0.86	bistro	ne	1.95	bistro	ne	3.0	bistro	nije mogao da se postigne nivo
98	0.73	jedva vidljivo	ne	2.27	jedva vidljivo	malo	3.48	jedva vidljivo	nije mogao da se postigne nivo
100	0.58	bistro	ne	1.94	bistro	ne	3.10	bistro	nije mogao da se postigne nivo
102	0.88	jedva vidljivo	malo	2.20	bistro	ne	3.36	bistro	nije mogao da se postigne nivo

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm

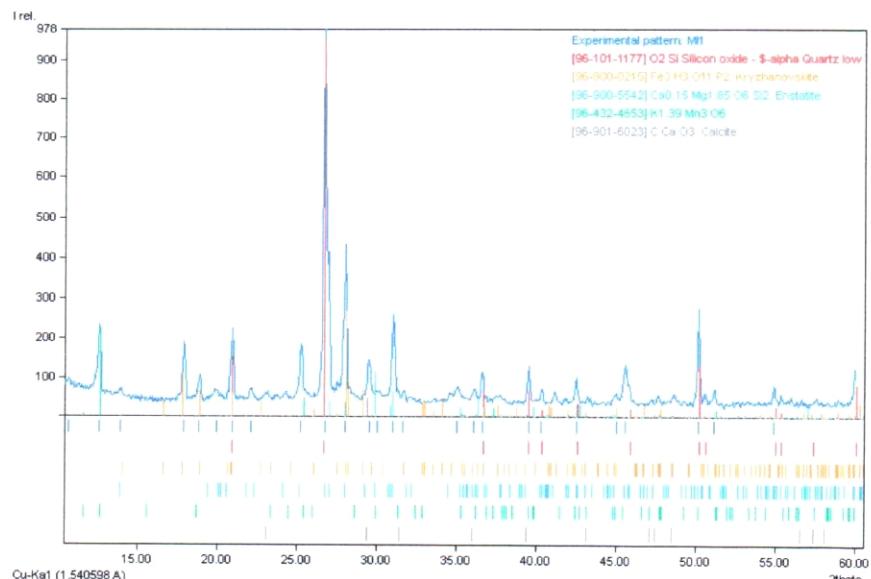
Tabela 6.41. Izgled uzoraka MI-1 Mali Idoš nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Uzorak	MALI IDOŠ MI-1					
	90	92	95	98	100	102
Izlazna povšina						
Podužni presek						
Podužni presek						
d (mm)	2.5/15*	2.5/10*		1.8/7*	1.8/12*	1.8/5*
Klasa disper.	ND3		ND3	ND3	ND3	ND3

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm



**Slika 6.28.** Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak MI-1 Mali Iđoš



**Slika 6.29.** Rezultati XRD analize za uzorak MI-1 Mali Iđoš

**Tabela 6.42.** Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka MI-1 Mali Iđoš

Uzorak	Mineraloški sastav				
	Kvarc	Kalcit	Kryzhanovskite	Enstatite	Ostalo
MI-1 Mali Iđoš	39.6	2.9	27.9	24	5.6

## 6.8 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak KGA-1 Aranđelovac

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka KGA-1 prikazani su u tabeli 6.43, i na dijagramima na slici 6.30.

U tabeli 6.44 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice, vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u definisanim vremenskim intervalima i izmerenoj temperaturu rastvora. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorak peskovite gline KGA-1, potopljen u desilovanu vodu i rastvor 0.001M NaOH, pokazuje visoku disperzivnost i klasifikovan je kao disperzivano tlo klase HD. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci su pokazivali slabu reakciju u vidu jedva vidljivog koloidnog zamućenja oko grudvice tla. Nakon 20 minuta reakcija je postala jako disperzivna, uzorci tla su se raspali i formiralo se belo koloidno zamućenje po dnu i po zidovima čaše. Za nijansu slabija reakcija uočena je na uzorku potopljenom u rastvor NaOH. Do kraja trajanja opita jaka disperzivna reakcija se nije menjala.

Na slici 6.31 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu oba standarda (BS 1377-5:1990 i ASTM D 4221-99), iznosi PD=111% odnosno 115% što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno (Tabela 6.45). Slika 6.32 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

U tabelama 6.46 i 6.47 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorak KGA-1 ispitivanjem u pinhole aparatu, pri različitim stepenima zbijenosti u rasponu od 90-102 % pokazuje klasu disperzivnosti ND3 – srednje disperzivno tlo. Destilovana voda je tokom izvođena opita jedva vidljivo zamućena pri nižim hidrauličkim nivoima ispitivanja ( $H=50, 180$  mm), do mlečno belog zamućenja pri hidrauličkom nivo  $H=380$  mm. Do iznošenja čestica iz uzorka dolazi samo pri hidrauličkom nivou od  $H=380$  mm, pri čemu se jasno uočavaju finozrne čestice

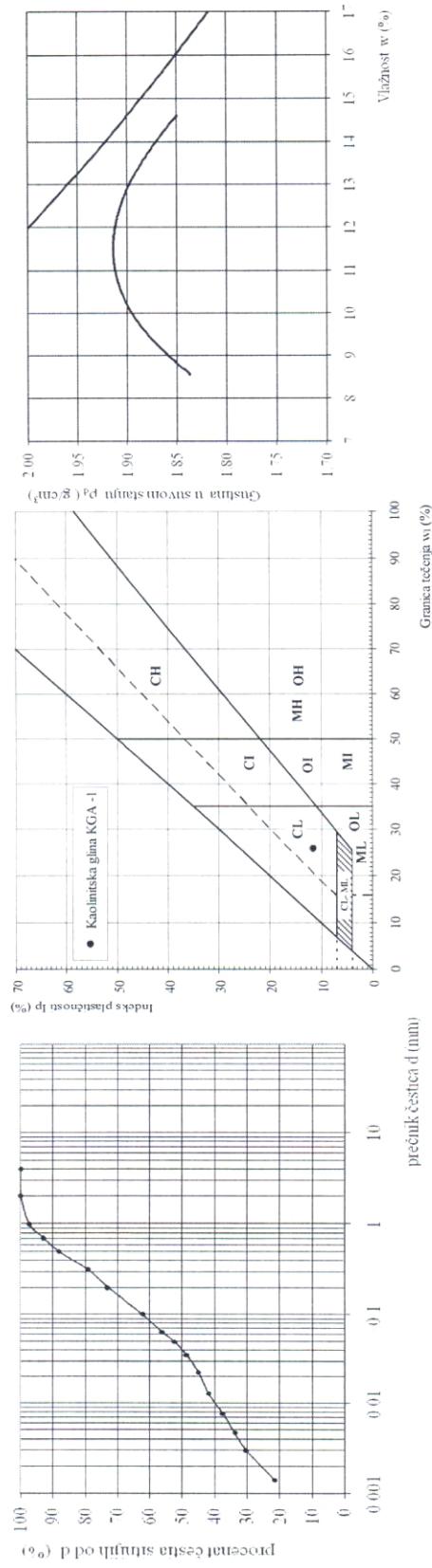
kvarcnog peska veličine do 1 mm. Protok q prilikim ispitivanja je ravnomeran, i na završetku ispitivanja je manji od 3 ml/s (osim za stepen zbijenost Sz=102%). Dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti tla prikazan je na slici 6.33.

Prečnik cilindrične pore na kraju ispitivanja iznosi d=2.5mm duž čitave dužine uzorka, što se može videti i na fotografijama u tabeli 6.47.

Na slici 6.34 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.48.

Tabela 6.43. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka KGA-1 Aranđelovac

Granulometrijski sastav tla				Vlažnost	Aterebergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )	USCS klasifikacija tla	
gлина	prăšina	pesak	šljunak		frakcija	W	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	2,00 mm	60,0 mm	W	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
26	30	44	/	14.0	26.0	14.0	26.0	14.5	11.5	1.04	1.912
											11.7



Slika 6.30. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka KGA-1 Aranđelovac

Tabela 6.44. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka KGA-1 Arandelovac

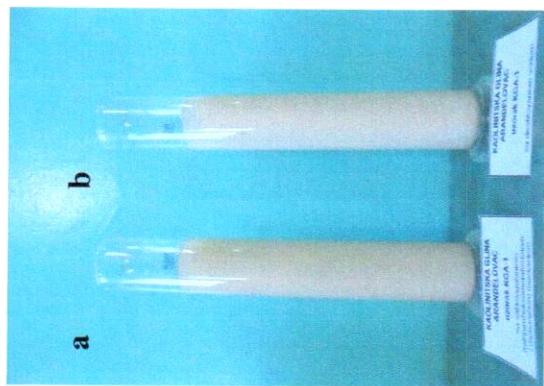
Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
	SD	HD	HD	HD	HD	HD	HD
Temperatura (°C)	19.0	19.0	19.0	18.0	17.0	19.0	
Izgled uzorka							
	Klasa disperzivnosti tla	SD	HD	HD	HD	HD	HD
Temperatura (°C)	18.0	18.0	18.0	18.0	17.0	19.0	
Izgled uzorka							

BS 1377-5:1990 tac.6.3

Rastvor 0,001 M NaOH

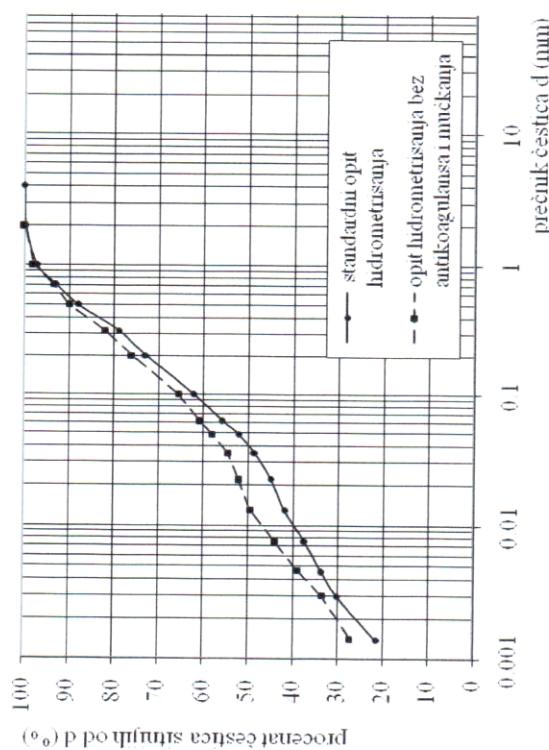
Destilovana voda

ASTM D 6572-00



Slika 6.32. Opit duplog hidrometrisanja  
za uzorak KGA-1 Arandelovac

a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja



Slika 6.31. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja  
za uzorak KGA-1 Arandelovac

Tabela 6.45. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak KGA-1 Arandelovac

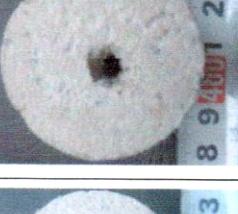
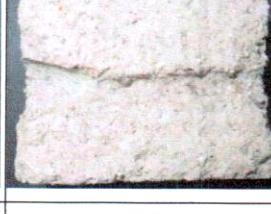
Opit	% čestica sitnijih od 0.002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0.005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja	30	40
Standardni opit hidrometrisanja	27	35
Procenat disperzivnosti PD (%)	111	115
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	<b>D</b>

Tabela 6.46. Određivanje klase disperzivnosti pithole opitom za uzorak KGA-1 Arandelovac

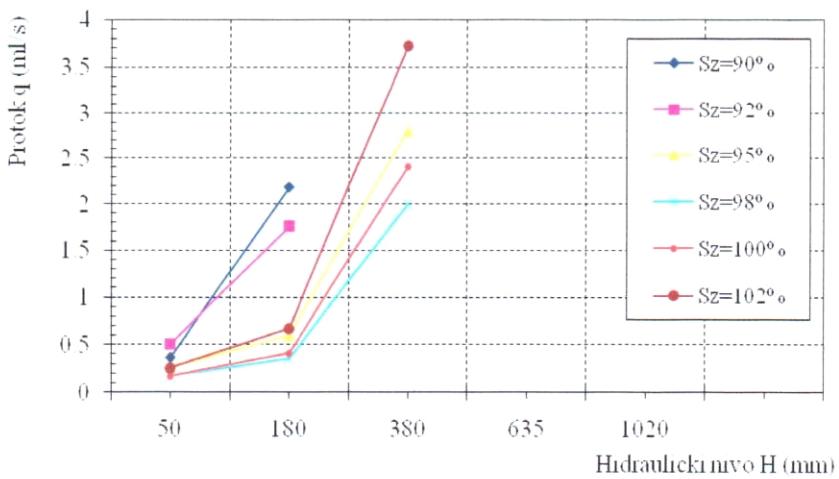
UZORAK: KAOLINITSKA GLINA ARANDELLOVAC KGA-1									
Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)									
	50	180	380	1020	Veličina pore d (mm)				
Stepen zbijenosti Sz (%)	Protok q (ml/s)	Zamugeanje Boja/ čestica	Protok q (ml/s)	Zamugeanje Boja/ čestica	Iznosjenje čestica Boja/	Zamugeanje Boja/	Iznosjenje čestica Boja/	Zamugeanje Boja/	Klasa disperzivnosti
90	0.31	jedva vidljivo blago mlečno belo	malو 2.18	mlečno belo svetlo mutno	malо				2.5/5*
92	0.51	blago	ne 1.76	belo svetlo mutno	malо				2.5/8*
95	0.26	jedva vidljivo	ne 0.60	jedva vidljivo	ne	2.80	mlečno belo svetlo mutno	malо	2.5/5*
98	0.17	jedva vidljivo	ne 0.36	jedva vidljivo	ne	2.0	mlečno belo svetlo mutno	malо	2.5/5*
100	0.17	bistra	ne 0.41	jedva vidljivo	ne	2.4	mlečno belo svetlo mutno	malо	2.5/4*
102	0.30	jedva vidljivo	ne 0.67	jedva vidljivo	ne	3.72	mlečno belo svetlo mutno	malо	2.5/7*

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm

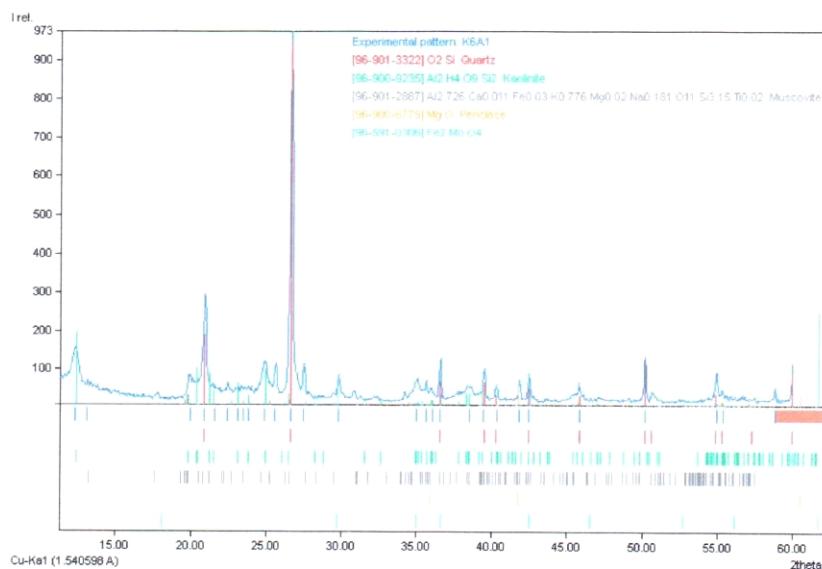
Tabela 6.47. Izgled uzorka KGA-1 Aranđelovac nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti

KAOLINITSKA GLINA ARANĐELOVAC KGA-1					
Uzorak	Sz (%)	90	92	95	98
Izlazna povšina					
Podužni presek					
Prečnik pore (mm)		2.5/5*	2.5/8*	2.5/5*	2.5/5*
Klasa disperzivn.		ND3	ND3	ND3	ND3

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm



**Slika 6.33.** Zavisnost između protoka i stepena zbijkenosti tla za uzorak KGA-1 Arandelovac



**Slika 6.34.** Rezultati XRD analize za uzorak KGA-1 Arandelovac

**Tabela 6.48.** Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka KGA-1 Arandelovac

Uzorak	Mineraloški sastav				
	Kvarc	Kaolinit	Muskovit	Periklas	Spinel
KGA-1 Arandelovac	44.9	39.1	9.7	3.8	2.5

## 6.9 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SV-1 Slankamen

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka SV-1 prikazani su u tabeli 6.49, i na dijagramima na slici 6.35.

U tabeli 6.50 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice. Vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u određenim vremenskim intervalima određena je klasa disperzivnosti. Za svaki vremenski interval opažanja data je klasa uzorka, izmerena temperatura rastvora i odgovarajuća fotografija.

Uzorak lesa SV-1 potopljen u desilovanu vodu i rastvor 0.001M NaOH, klasifikovan je kao slabo disperzino tlo klase SD. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci pokazuju slabu reakciju u vidu jedva vidljivog koloidnog zamućenja oko grudvice tla. Nakon 20 minuta uzorci su totalno raspadnuti do najsitnijih čestica, izgubili su svoj prvobitni oblik, i formiralo se slabo koloidno zamućenje po dnu i po zidovima laboratorijske čaše. Do kraja trajanja opita reakcija se nije menjala.

Na slici 6.36 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu standarda BS 1377-5:1990 i ASTM D 4221-99, iznosi PD=72% odnosno 85% što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno (Tabela 6.51). Slika 6.37 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

U tabelama 6.52 i 6.53 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci SV-1 ispitivanjem u pinhole aparatu, pri različitim stepenima zbijenosti u rasponu od 90-102 % pokazuju klasu disperzivnosti ND2/ND3 – srednje disperzivno tlo. Destilovana voda, koja prolazi kroz uzorak tokom izvođena opita, pri nižim hidrauličkim nivoima ispitivanja ( $H=50$  i  $180$  mm) je bistra do jedva vidljivo zamućena. Tokom ispitivanja pri hidrauličkom nivou  $H=380$ mm, za stepen zbijenosti Sz 90 i 92%

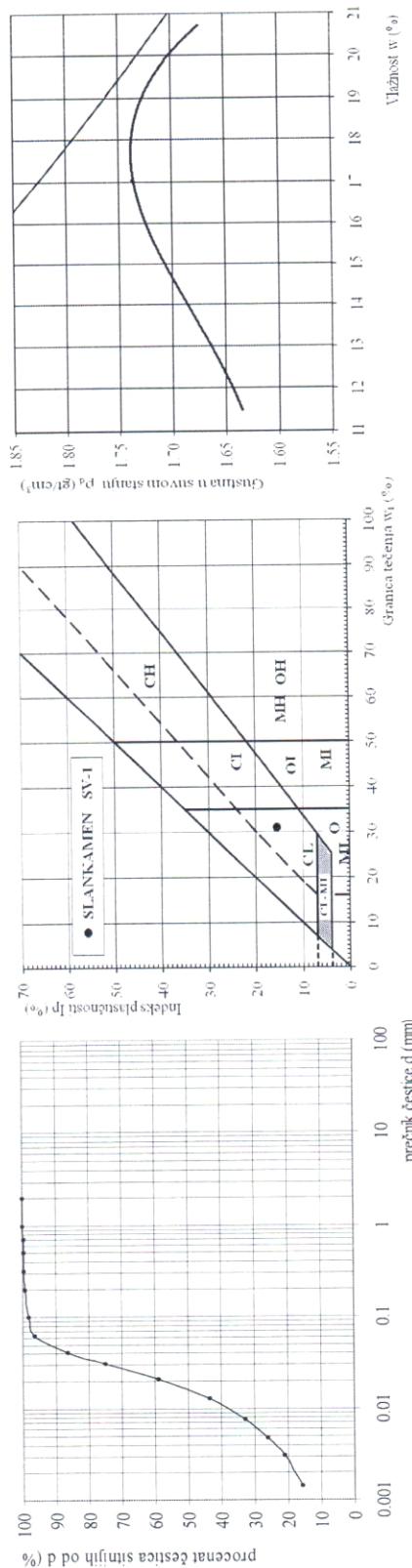
destilovna voda je tamno zamućena, a pri većem stepenu zbijenosti 95-102% ostaje bistra.

Dvojna kategorizacija disperzivnosti usvojena je zbog toga što nije bilo moguće jasno definisati klasu, jer su protoci pri ispitivanju  $H=380\text{mm}$  izuzetno visoki  $q>3 \text{ ml/s}$ , i što nije bilo moguće izvršiti ispitivanje pri hidrauličkom nivou  $H=1020 \text{ mm}$ . Dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti prikazan je na slici 6.38.

Prečnik cilindrične pore je ravnomerno proširen i iznosi  $d=2.5\text{mm}$  duž čitave dužine uzorka. Na izlaznom kraju uzorka formiralo se kupasto proširenje, prečnika od  $d=6-15 \text{ mm}$ . Kao i na prethodnim uzorcima, kupasto proširenje je posledica erodovanja uzorka.

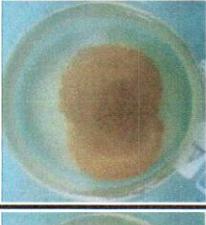
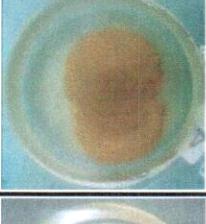
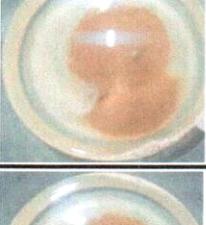
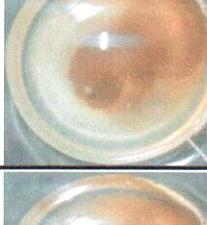
Tabela 6.49. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-1

Granulometrijski sastav tla				Aterbergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov opit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )		USCS klasifikacija tla	
gлина	prăšina	pesak	šljunak					$\rho_{dmax}$	$\rho_{opt}$	CL	
frakcija				w	$w_l$	$w_p$	$I_p$	$I_c$			
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	2,00	60,0 %						
(%)	(%)	(%)	(%)								
18	78	4	/	19,5	31,1	15,7	15,4	0,75	1,737	17,6	



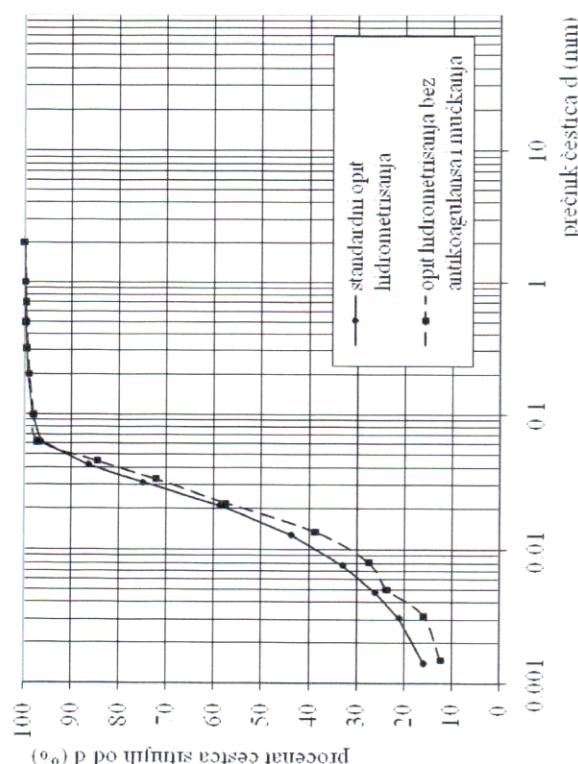
Slika 6.35. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-1 Slankamen

Tabela 6.50. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka SV-1 Slankamen

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	MD	SD	Vreme posmatranja(min, h)			
				2 min	20 min	1 h	4 h
	Temperatura (°C)	18.0	18.0	18.0	19.0	19.0	18.0
Izgled uzorka							
	Klasa disperzivnosti tla	MD	SD	SD	SD	SD	SD
	Temperatura (°C)	17.0	17.0	17.0	18.0	19.0	18.0
Izgled uzorka							
BS 1377-5:1990 tac.6.3	0.001 M NaOH	Rastvor	Destilovana voda	ASTM D 6572-00			



**Slika 6.37.** Opit duplog hidrometrisanja za uzorak SV-1 Slankamen  
a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja



**Slika 6.36.** Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SV-1 Slankamen

**Tabela 6.51.** Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SV-1 Slankamen

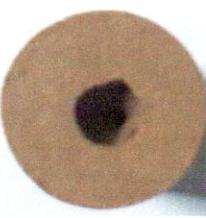
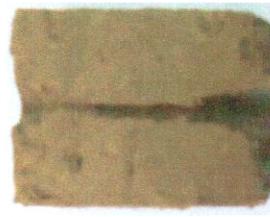
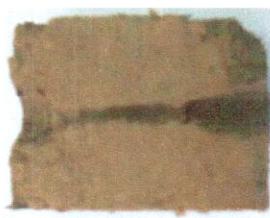
Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja	13	23
Standardni opit hidrometrisanja	18	27
Procenat disperzivnosti PD (%)	72	85
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	<b>D</b>

Tabela 6.52. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak SV-1 Slankamen

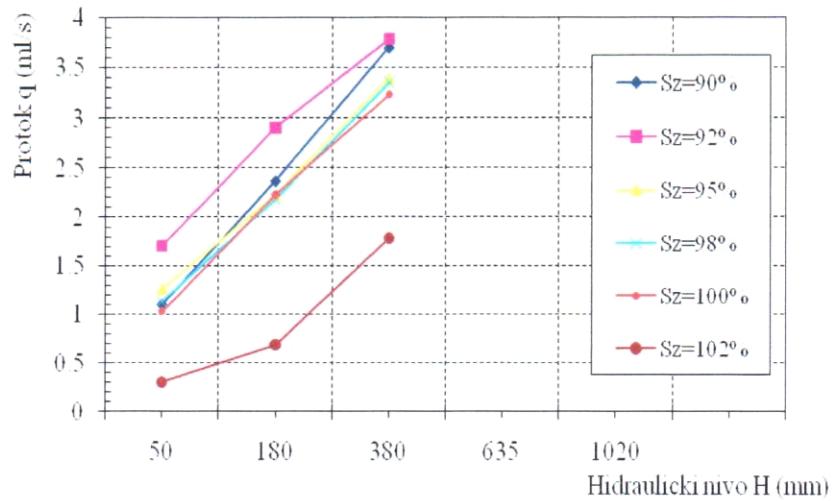
UZORAK: SLANKAMEN SV-1									
Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)					1020				
50		180		380	Protok q (ml/s)		Protok q (ml/s)	Protok q (ml/s)	
Stepen zbijenosti Sz (%)	Zamunjene Boja/ cestica	Iznosene Boja/ cestica	Iznosene Boja/ cestica	Iznosene Boja/ cestica	Iznosene Boja/ cestica	Protok q (ml/s)	Protok q (ml/s)	Protok q (ml/s)	Klasa disperzivnosti
90	1.10	bistra	malo	2.37	blago do srednje	malo	3.70	tumno	mnoho nije mogao da se postigne nivo
92	1.71	bistra	malo	2.90	bistra	malo	3.78	tumno	mnoho nije mogao da se postigne nivo
95	1.26	jedva vidljivo	malo	2.23	bistro	malo	3.39	bistro	malo nije mogao da se postigne nivo
98	1.14	jedva vidljivo	malo	2.19	jedva vidljivo	malo	3.35	bistra	malo nije mogao da se postigne nivo
100	1.03	bistro	ne	2.23	bistro	ne	3.23	bistro	malo nije mogao da se postigne nivo
102	0.31	bistra	malo	0.69	bistro	ne	1.78	bistro	malo nije mogao da se postigne nivo

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm

Tabela 6.53. Izgled uzoraka SV-1 Slankamen nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Uzorak		SLANKAMEN SV-1			
SZ (%)	90	92	95	98	100
Izlazna povšina					
Poduzni presek					
Prečnik pore d (mm)	2.5/15*	2.5/10*	2.5/9*	2.5/7*	2.5/6*
Klasa disperzivnosti	ND2/ND3	ND2/ND3	ND2/ND3	ND2/ND3	ND2/ND3

\* prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm



**Slika 6.38.** Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak SV-1 Slankamen

## **6.10 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SV-6 Slankamen**

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka SV-6 prikazani su u tabeli 6.54, i na dijagramima na slici 6.39.

U tabeli 6.55 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice. Vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u određenim vremenskim intervalima određena je klasa disperzivnosti. Za svaki vremenski interval opažanja data je klasa disperzivnosti, izmerena temperatura rastvora i odgovarajuća fotografija.

Uzorci lesa SV-6 potopljeni u desilovanu vodu i rastvor 0.001M NaOH klasifikovan su kao slabo disperzino tlo klase SD. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci pokazuju slabu reakciju u vidu jedva vidljivog koloidnog zamućenja oko grudvice tla. Nakon 20 minuta uzorci su totalno raspadnuti do najsitnijih čestica, izgubili su svoj prvobitni oblik, i formiralo se slabo koloidno zamućenje po dnu i po zidovima labortorijske čaše. Do kraja trajanja opita reakcija se nije menjala.

Na slici 6.40 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, sračunat na osnovu BS 1377-5:1990 standarda iznosi PD=41% što tlo klasificuje kao srednje disperzivno – klasa SD. Prema ASTM D 4221-99 standardu PD iznosi 63% što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno – klasa D (Tabela 6.56). Slika 6.41 prikazuje izvođenje opita duplog hidrometrisanja.

U tabelama 6.57 i 6.58 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorak SV-6 ispitivanjem u pinhole aparatu, ima slične rezultate kao i uzorak SV-1, tako da je isto i klasifikovan kao srednje disperzivno tlo klase ND2/ND3.

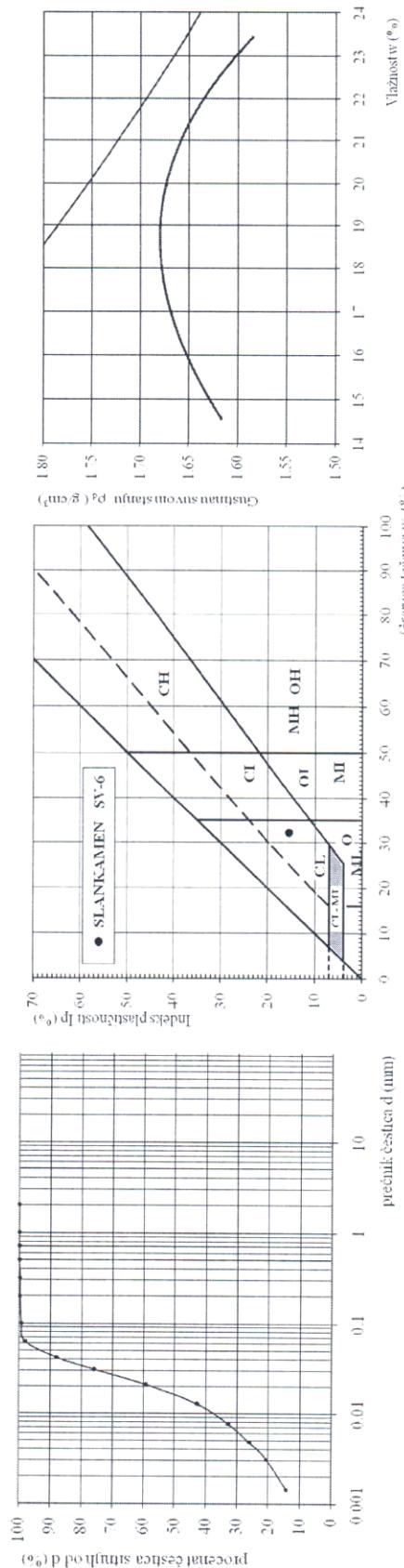
Prečnik cilindrične pore je ravnomerno proširen i na kraju ispitivanja iznosi  $d=2.5\text{mm}$  duž čitave dužine uzorka. Na izlaznom kraju uzorka formiralo se kupasto proširenje,

prečnika od  $d=1.5\text{-}7$  mm. Kao i na prethodnim uzorcima ono je posledica erodovanja uzorka.

Dijagram zavisnosti protoka od stepena disperzvnosti prikazan je na slici 6.42.

**Tabela 6.54.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-6 Slankamen

Granulometrijski sastav tla frakcija	Vlagost			Aterbergove granice			Parametri zbijenosti tla-Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )			USCS klasifikacija tla		
	glina	prăšina	pesak	šljunak	W	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>	CL
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	60,0 mm								
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)								
17	81	2	/	20.6	32.2	16.8	15.4	0.75	1.679	18.6		



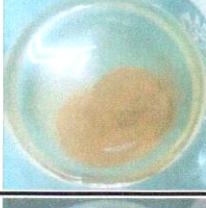
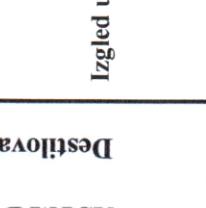
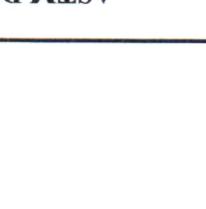
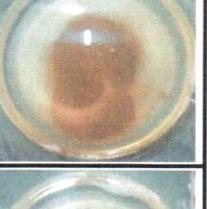
**Slika 6.39.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SV-6 Slankamen

a) Granulometrijski sastav

b) Plastičnost

c) Proctorov optit

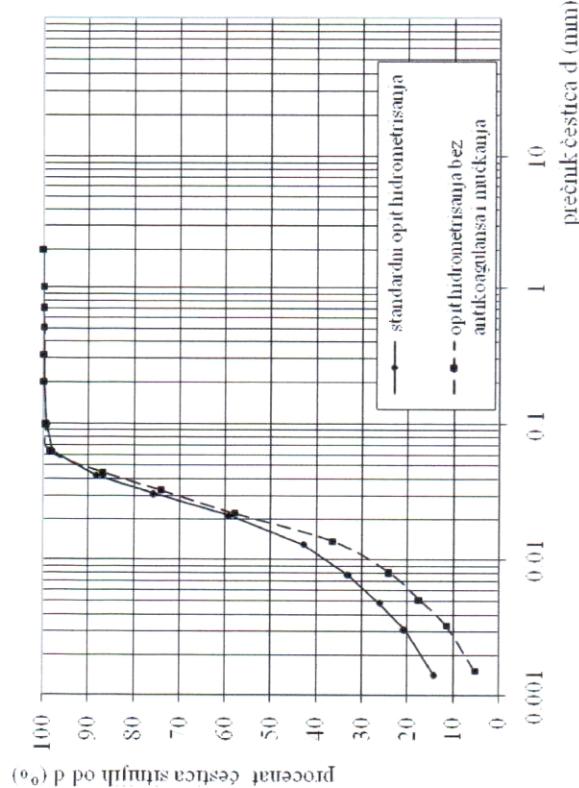
Tabela 6.55. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optitom grudvice uzorka SV-6 Slankamen

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	MD	SD	Vreme posmatranja(min, h)				
				2 min	20 min	1 h	4 h	6 h
Temperatura (°C)	18.0	18.0	18.0					
Izgled uzorka								
0.001 M NaOH Rastvor								
ASTM D 6572-00 Destilovana voda								
BS 1377-5:1990 tac.6.3								
Metoda	Klasa disperzivnosti tla	MD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Temperatura (°C)	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	18.0	19.0	18.0
Izgled uzorka								



Slika 6.41. Opit duplog hidrometrisanja tla za uzorak SV-6 Slankamen

- a) standardni opit hidrometrisanja
- b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućkanja



Slika 6.40. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja tla za uzorak SV-6 Slankamen

Tabela 6.56. Rezultati opita duplog hidrometrisanja tla za uzorak SV-6 Slankamen

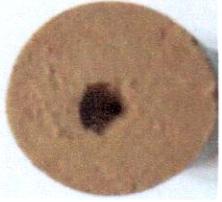
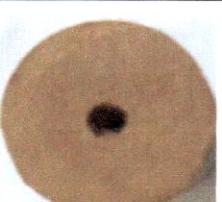
Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mućkanja	7	17
Standardni opit hidrometrisanja	17	27
Procenat disperzivnosti PD (%)	41	63
Klasa disperzivnosti tla	<b>SD</b>	<b>D</b>

Tabela 6.57. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak SV-6 Slankamen

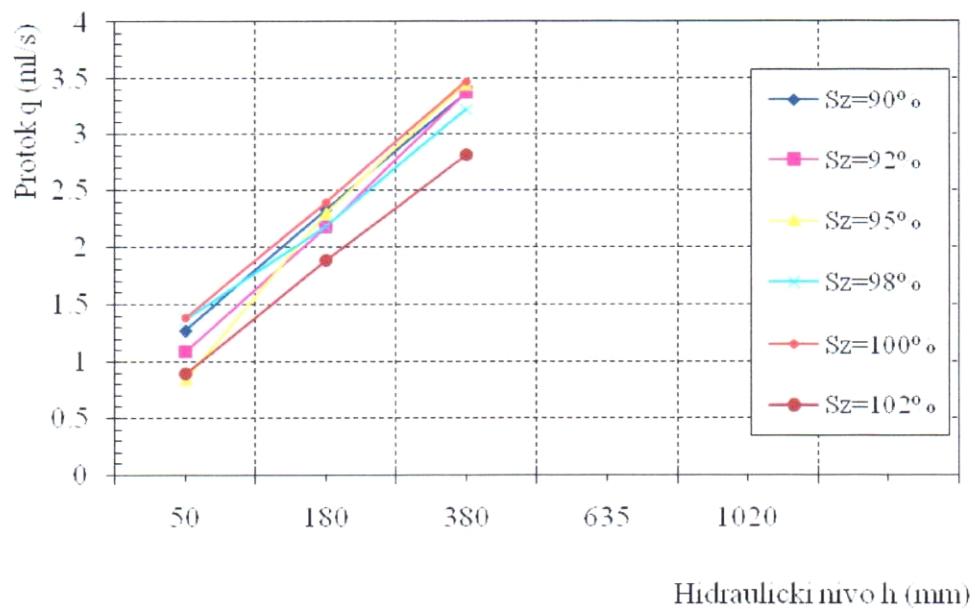
UZORAK: SLANKAMEN SV-6									
Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)									
50		180		380		1020		Klasa disperzivnosti	
Stepen zbijenosti (%)	Protok q (ml/s)	Zamučenje Boja/	Iznosene čestica	Protok q (ml/s)	Zamučenje Boja/	Iznosene čestica	Protok q (ml/s)	Zamučenje Boja/	Velicina pore d (mm)
90	1.27	jedva vidljivo	malo	2.33	bistra	malo	3.37	bistra	malo
92	1.09	jedva vidljivo	malo	2.17	bistra	malo	3.37	bistra	malo
95	0.84	bistra	malo	2.30	bistra	malo	3.45	bistro	malo
98	1.37	bistra	malo	2.18	bistra	ne	3.22	bistra	malo
100	1.38	bistra	malo	2.39	bistra	ne	3.47	bistro	ne
102	0.89	bistra	malo	1.88	bistra	malo	2.81	bistro	malo

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm  
\*\*prekinut optit na 3min 38sek nije mogao da se održava nivo

**Tabela 6.58.** Izgled uzorka SV-6 Slankamen nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti

Uzorak		SLANKAMEN SV-6			
Stepen zbijenosti Sz (%)	90	92	95	98	100
Izlazna povšina					
Podužni presek					
Prečnik rupice $d$ (mm)	2.5/5*	2.5/6*	2.5/1.5*	2.5/3*	2.5/5*
Klasa disperzivnosti	ND2/ND3	ND2/ND3	ND2/ND3	ND2/ND3	ND3

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm



**Slika 6.42.** Zavisnosti protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak SV-6 Slankamen

## 6.11 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SJ-1 Srbobran

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka SJ-1 prikazani su u tabeli 6.59, i na dijagramima na slici 6.43.

U tabeli 6.60 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice. Vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanju vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u određenim vremenskim intervalima određena je klasa disperzivnosti. Za svaki vremenski interval opažanja data je klasa disperzivnosti, izmerena temperatura rastvora i odgovarajuća fotografija.

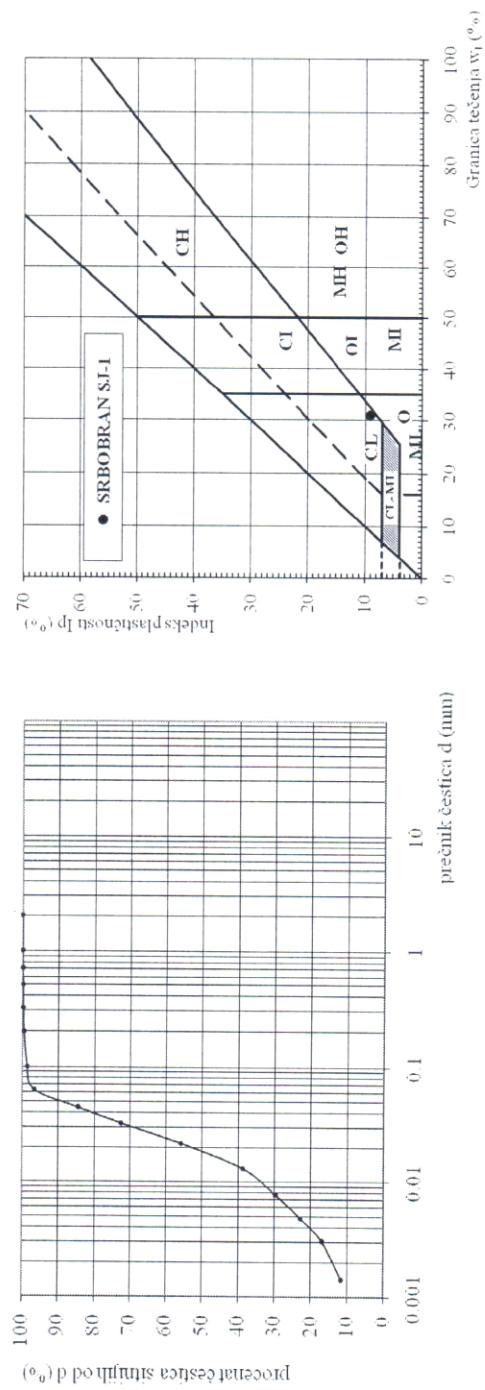
Uzorci lesa SJ-1, potopljeni u destilovanu vodu i rastvor 0.001 M NaOH, klasifikovani su kao srednje disperzino tlo klase MD. Uzorci u oba rastvora pokazuju umerenu reakciju, koja se do kraja trajanja opita nije menjala. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci su totalno raspadnuti do najsitnijih čestica, izgubili su svoj prvočitni oblik, i formiralo se jasno vidljivo koloidno zamućenje po dnu i po zidovima čaše.

Na slici 6.44 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD prema BS 1377-5:1990 standardu iznosi PD=43%, a prema ASTM D 4221-99 standardu je PD=35%. Na osnovu procenta disperzivnosti ispitivano tlo se klasificuje kao srednje disperzivno SD (Tabela 6.61).

U tabelama 6.62 i 6.63 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci lesa SJ-1 ispitivanjima u pinhole aparatu, bez obzira na stepena zbijenosti, već pri hidrauličkom nivou H=50 mm i nakon ispitivanja od 5 min pokazuju intenzivnu disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao disperzivno tlo klase D1. Destilovana voda koja je protekla kroz uzorak je intenzivno zamućena, sa dosta iznetih čestica. Veličina protoka je  $q > 1 \text{ ml/s}$ , a prečnik cilindrične pore  $d$ , koja ima oblik "nepravilnog kanala", nakon ispitivanja iznosio je od 5-12mm.

**Tabela 6.59.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-1 Srbobran

Granulometrijski sastav tla				Aterbergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )				USCS klasifikacija tla	
glina	prasina	pesak	šljunak	Vlagost	w <sub>i</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>	CL		
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	0,06 (%)	2,00 (%)	60,0 (%)	w	w <sub>i</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>		
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)							
14	82	4	/	19.2	31	22	9	1.31	1.783	17.3			



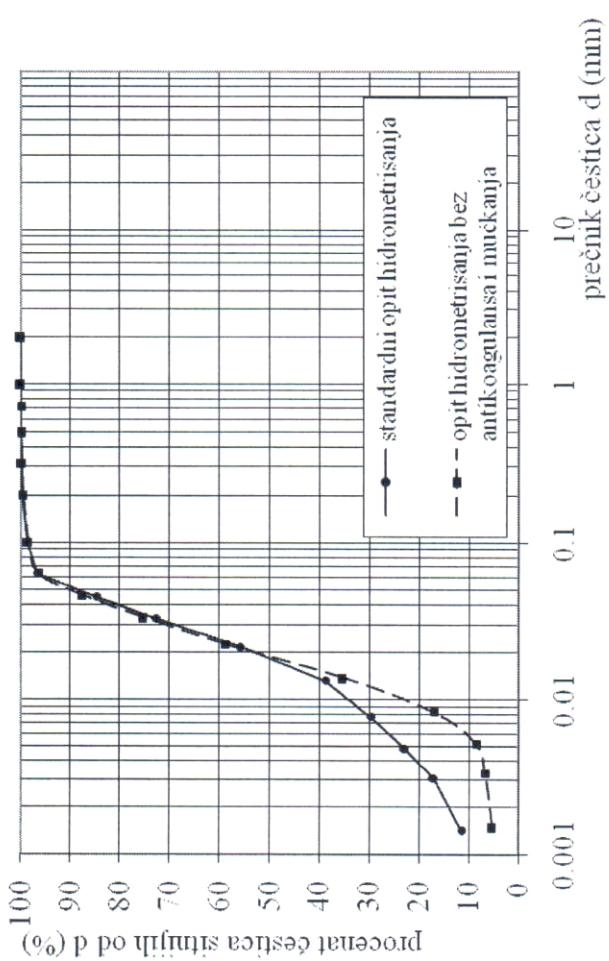
**a)** Granulometrijski sastav

**Slika 6.43.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-1 Srbobran

**b)** Plastičnost

Tabela 6.60. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optiom grudvice uzorka SJ-1 Srbobran

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)				
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h
ASTM D 6572-00	MD	MD	MD	MD	MD	MD
Temperatura (°C)	20.5	20.5	20.5	21.0	21.0	20.0
Destilovana voda	Izgled uzorka					
BS 1377-5:1990 tač.6.3	Klasa disperzivnosti tla	MD	MD	MD	MD	MD
Temperatura (°C)	20.5	20.5	20.5	21.0	21.0	20.0
Rastvor	Izgled uzorka					
	0.001 M NaOH					



Slika 6.44. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-1 Srbobran

Tabela 6.61. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-1 Srbobran

Opit	% čestica sitnijih od 0.002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0.005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja	6	8.5
Standardni opit hidrometrisanja	14	24
Procenat disperzivnosti PD (%)	43	35
Klasa disperzivnosti tla	SD	SD

Tabela 6.62. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za uzorak SJ-1 Srbobran

		Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)				Klase disperzivnosti
		50	180	380	1020	
90	1.54	tamna	mного			5-12* <b>D1</b>
92	1.68	tamna	mного			5-10* <b>D1</b>
95	1.20	tamna	mного			5-7* <b>D1</b>
98	1.33	tamna	mного			5-10* <b>D1</b>
100	0.79	blago zamućenje	мало			5-9* <b>D2</b>
102	1.48	tamna	mного			5-10* <b>D1</b>

\* maksimalni prečnik kanala d (mm)

Tabela 6.63. Izgled uzoraka SJ-1 Srbobran, nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Sz (%)	90	92	95	98	100	102
Zamućenje suspenzije						
Izlazna povšina						
Podužni presek						
Prečnik pore d (mm)	5-12	5-10	5-7	5-10	5-9	5-10
Klasa disperzivnosti	D1	D1	D1	D1	D2	D1

## **6.12 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SJ-2 Srbobran**

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka SJ-2 prikazani su u tabeli 6.64, i na dijagramima na slici 6.45.

U tabeli 6.65 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti dobijeni opitom grudvice. Vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u desilovanoj vodi i rastvoru 0.001M NaOH, u određenim vremenskim intervalima određena je klasa disperzivnosti. Za svaki vremenski interval opažanja data je klasa disperzivnosti, izmerena temperatura rastvora i odgovarajuća fotografija.

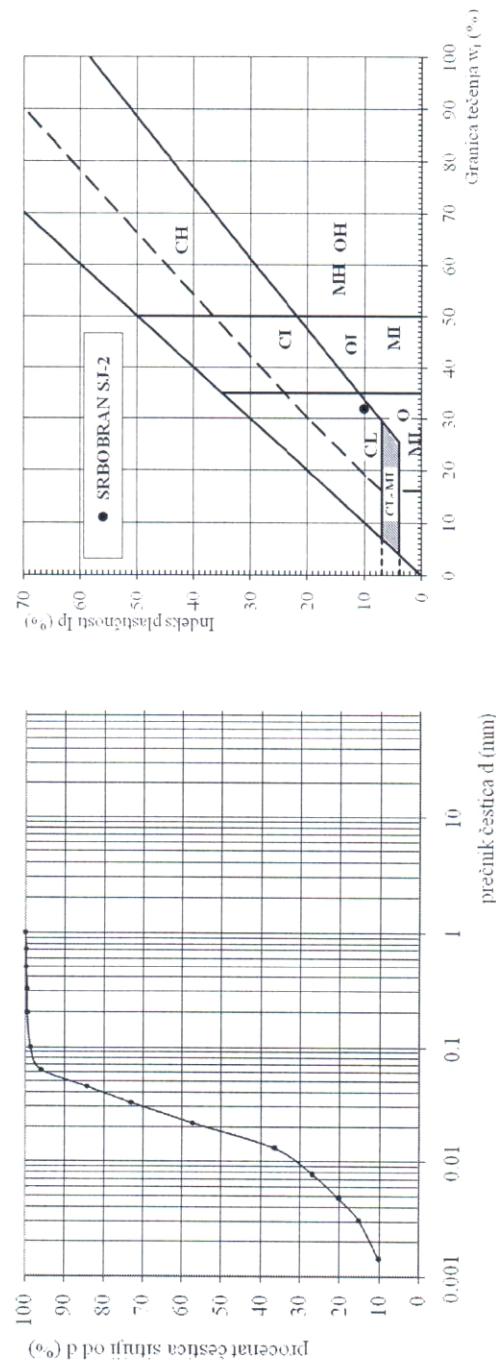
Uzorak lesa SJ-2, potopljen u destilovanu vodu i rastvor 0.001 M NaOH, klasifikovan su kao srednje disperzivno tlo klase MD. Uzorci u oba rastvora pokazuju umerenu reakciju, koja se do kraja trajanja opita nije menjala. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci su se raspali do najsitnijih čestica. Uzorci su izgubili svoj prvobitni oblik, a po dnu i po zidovima čaše, formiralo se jasno vidljivo koloidno zamućenje.

Na slici 6.46 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD, prema BS 1377-5:1990 standardu iznosi PD=67%, a prema ASTM D 4221-99 standardu je PD=86%. Na osnovu procenta disperzivnosti ispitivano tlo se klasificuje kao disperzivno - klase D (Tabela 6.66).

U tabelama 6.67 i 6.68 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci lesa SJ-2 ispitivanjima u pinhole aparatu, bez obzira na stepen zbijenosti, već pri hidrauličkom nivou H=50 mm i nakon ispitivanja od 5 min pokazivali su intenzivnu disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao disperzivno tlo klase D1. Destilovana voda koja je protekla kroz uzorak je intenzivno zamućena, sa dosta iznetih čestica. Veličina protoka iznosila je  $q>1\text{ml/s}$ , a prečnik cilindrične pore d nakon ispitivanja od 5 do 12mm. Cilindrična pora ima oblik "nepravilnog kanala".

**Tabela 6.64.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-2 Srbobran

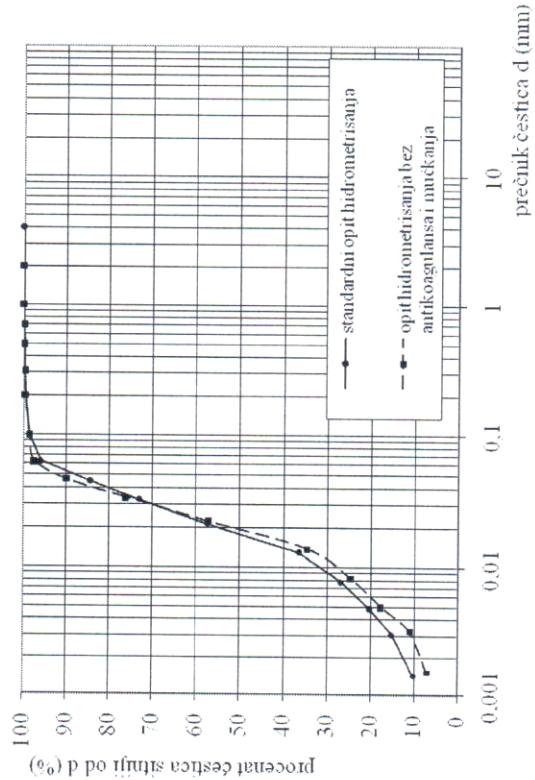
glina	Granulometrijski sastav tla			Vlaznost	Aterbergove granice	Parametri zbijenosti tla- Proctorov opit ( $E=600 \text{ kJ/m}^3$ )	$w_{opt}$	$\rho_{dmax}$	$\rho_{dmin}$	USCS klasifikacija tla
	präsina	pesak	šljunak							
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	0,06 mm	2,00 mm	60,0 mm	w	$w_p$	$I_p$	$I_c$
(%)	(%)	(%)	/	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
12	83	5	/	18,1	32	22	10	1,389	1,804	16,2



**Slika 6.45.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-2 Srbobran  
a) Granulometrijski sastav  
b) Plasticnost

Tabela 6.65. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optitom grudvice uzorka SJ-2 Srbobran

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	MD	Vreme posmatranja(min, h)				24 h
			2 min	20 min	1 h	4 h	
Temperatura (°C)	20.5	20.5	MD	MD	MD	MD	/
Izgled uzorka							
Temperatura (°C)	20.5	20.5	MD	MD	MD	MD	/
Izgled uzorka							
Temperatura (°C)	20.5	20.5	MD	MD	MD	MD	/
Izgled uzorka							



Slika 6.66. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-2 Srbobran

Tabela 6.66. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-2 Srbobran

Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulanса i muckanja	8	18
Standardni opit hidrometrisanja	12	21
Procenat disperzivnosti PD (%)	67	86
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	<b>D</b>

Tabela 6.67. Određivanje klase disperzivnosti pithole optom uzorak SJ-2 Srbobran

UZORAK: SLANKAMEN SV-2						
Stepen zbijenosnosti Sz (%)	Protok q (ml/s)	Boja/ Zamugeanje	Iznosene cestica	Protok q (ml/s)	Boja/ Zamugeanje	Iznosene cestica
90	1.33	tamna	mnogo			5-6*
92	1.80	tamna	mnogo			6-7*
95	1.20	tamna	mnogo			6-10*
98	1.63	tamna	mnogo			5-10*
100	1.58	tamna	mnogo			6-12*
102	1.58	tamna	mnogo			5-12*

\* maksimalni prečnik kanala d (mm)

Tabela 6.68. Izgled uzoraka SJ-2 Srbobran nakon izvedenog pinhole opita ispitivanja disperzivnosti

Sz (%)	90	92	98	95	100	102
Zamućenje suspenzije						
Izlazna povšina						
Podužni presek						
Prečnik d (mm)	5-6	6-7	6-10	6-10	6-12	5-12
Klasa disperz.	D1	D1	D1	D1	D1	D1

### 6.13 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak SJ-4 Srbobran

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka SJ-4 prikazani su u tabeli 6.69, i na dijagramima na slici 6.47.

U tabeli 6.70 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti, dobijeni opitom grudvice tj. vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u određenim vremenskim intervalima. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorci pogrebene zemlje SJ-4, potopljeni u desilovanu vodu i rastvor 0.001M NaOH, klasifikovan su kao srednje disperzino tlo klase MD. Uzorci pokazuju umerenu reakciju, koja se do kraja trajanja opita nije menjala. Za razliku od uzorka SJ-1 i SJ-2, uzorci SJ-4 su se nakon 20 minuta ispitivanja totalno raspali i javila se umerena reakcija disperzivnosti u vidu jasnog koloidnog zamućenja po dnu i po zidovima laboratorijske čaše.

Na slici 6.48 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD iznosi PD=76% (BS 1377-5:1990), odnosno PD=85% (ASTM D 4221-9) što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivnivo (Tabela 6.71).

U tabelama 6.72 i 6.73 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci pogrebene zemlje SV-4 ispitivanjem u pin-hole aparatu, pri svim stepenima zbijenosti, i hidrauličkom nivou H=380 mm, nakon ispitivanja od 5 min, ne pokazuju disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao disperzivno tlo klase ND3. U ovom slučaju klasifikacija je definisana veličinom protoka koji je iznosio  $q > 3 \text{ ml/s}$ . Pri hidrauličkom nivou H=1020 mm nije bilo moguće sprovesti ispitivanje, jer su protoci bili daleko veći od dotoka, tj. nije bilo moguće održavati konstantni hidraulički nivo.

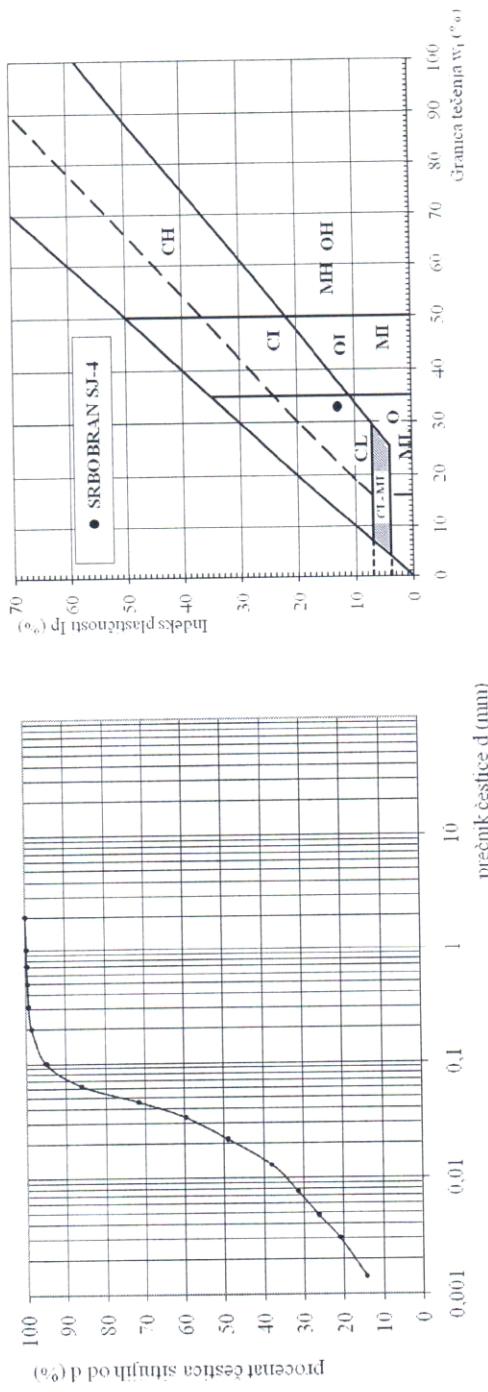
Dijagram zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla dat je na slici 6.49.

Destilovana voda koja je protekla kroz uzorak je sve vreme bistra, sa tek ponekom iznetom česticom. Prečnik cilindrične pore  $d$ , koja ima oblik "nepravilnog kanala", nakon ispitivanja iznosio je od 2-6 mm.

Na slici 6.50 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Precentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.74.

**Tabela 6.69.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-4 Srbobran

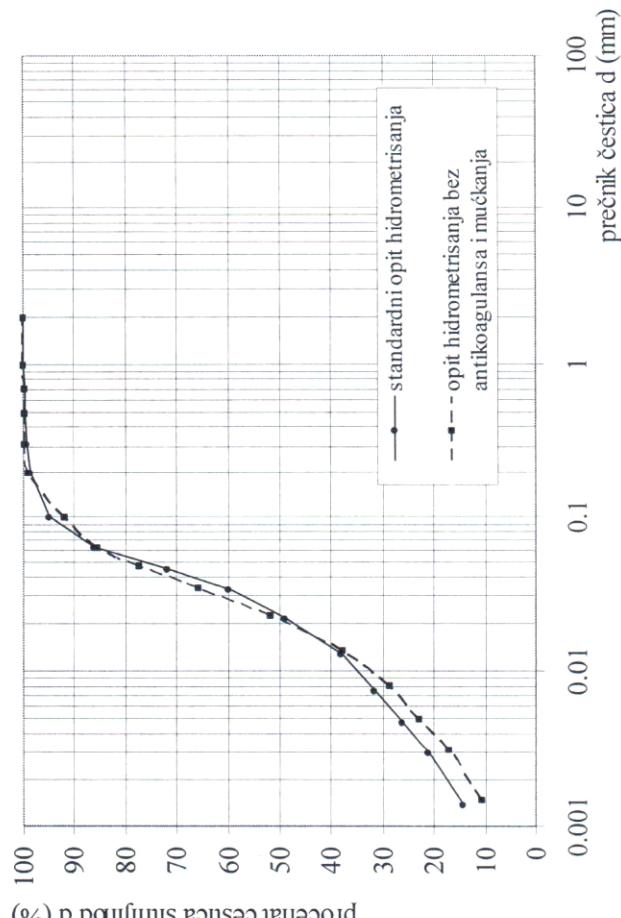
Granulometrijski sastav tla				Aterebbergove granice						Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )		USCS klasifikacija tla			
glina	prăšina	pesak	šljunak												
frakcija				Vlažnost						Aterebergove granice					
<0,002 mm	0,002-0,06 mm	0,06-2,00 mm	2,00-60,0 mm	W	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>	CL				
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)					
17	69	14	/	12.8	33.0	20.0	13.0	1.554	1.724	17.8					



**Slika 6.47.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka SJ-4 Srbobran

Tabela 6.70. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka SJ-4 Srbobran

Metoda	/	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
ASTM D 6572-00	Klasa disperzivnosti tla	MD	MD	MD	MD	MD	/
	Temperatura (°C)	20.5	20.5	20.5	21.0	20.0	/
Destilovana voda	Izgled uzorka						
BS 1377- 5:1990 tač.6.3	Klasa disperzivnosti tla	MD	MD	MD	MD	MD	/
	Temperatura (°C)	20.5	20.5	20.5	21.0	20.0	/
Rastvor	Izgled uzorka						
0.001 M NaOH							



Slika 6.48. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-4 Srbobran

Tabela 6.71. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak SJ-4 Srbobran

Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja	13	23
Standardni opit hidrometrisanja	17	27
Procenat disperzivnosti PD (%)	76	85
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	

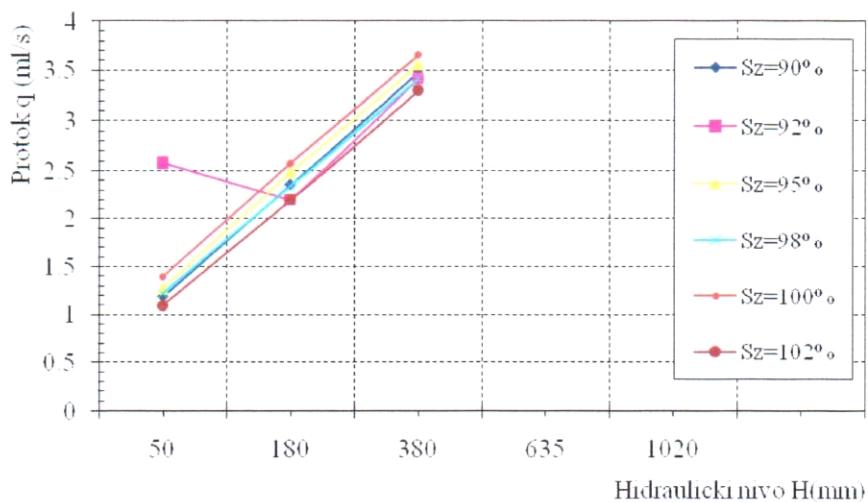
Tabela 6.72. Određivanje klase disperzivnosti pihole opitom za uzorak SJ-4 Srbobran

UZORAK: SRBOBRAN SJ-4									
Stepen zbijenosnosti Sz(%)	Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H(mm)								
	50	180	380	1020	Veličina pore d (mm)	Klasa disperzivnosti			
90	1.19	bistra	malo	2.36	bistra	malo	3.48	bistra	malo
92	2.58	bistra	malo	2.20	bistra	malo	3.42	bistra	malo
95	1.27	bistra	malo	2.48	bistra	malo	3.56	bistra	malo
98	1.23	bistra	malo	2.35	bistra	malo	3.42	bistra	malo
100	1.40	bistra	malo	2.58	bistra	malo	3.66	bistra	malo
102	1.10	bistra	malo	2.20	bistra	malo	3.30	bistra	malo

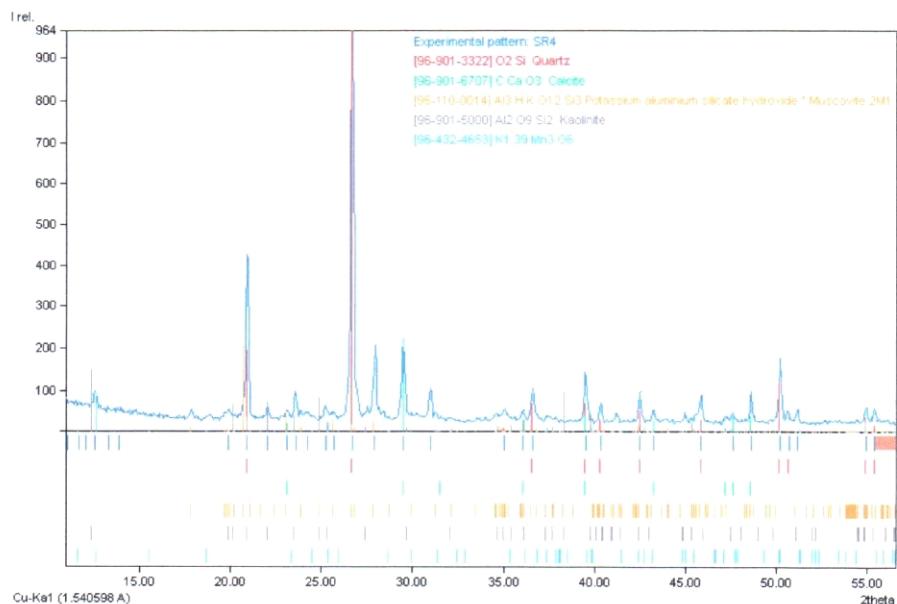
\*maksimalni prečnik d (mm)

Tabela 6.73. Izgled uzoraka SJ-4 Srbobran, nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Stepen zbijen. (%)	90	92	95	98	100	102
Zamućenje suspenzije						
Izlazna povšina						
Poduzni presek						
Precnik d (mm)	2-6	2-6	3-6	3-6	2	2-5
Klasa disperzivnosti	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3



**Slika 6.49.** Zavisnost između protoka i stepena zbijenosti tla za uzorak SJ-4 Srbobran



**Slika 6.50.** Rezultati XRD analize za uzorak SJ-4 Srbobran

**Tabela 6.74.** Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka SJ-4 Srbobran

Uzorak	Mineraloški sastav				
	Kvarc	Kalcit	Kaolinit	Muskovit	Ostalo
SJ-4 Srbobran	49.2	17.4	15.1	15.5	2.8

#### 6.14 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja uzorak BK-1 Bežanijska kosa

Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka BK-1 prikazani su u tabeli 6.75, i na dijagramima na slici 6.51.

U tabeli 6.76 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti, dobijeni opitom grudvice tj. vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u određenim vremenskim intervalima. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorci BK-1 potopljeni i u destilovanu vodu i rastvor NaOH, klasifikovani su kao slabo disperzino tlo klase SD. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci su se potpuno raspali do najsitnijih čestica. Od početka do kraja opita pokazivali su slabu disperzivnu reakciju u vidu jedva vidljivog koloidnog zamućenja oko grudvice tla.

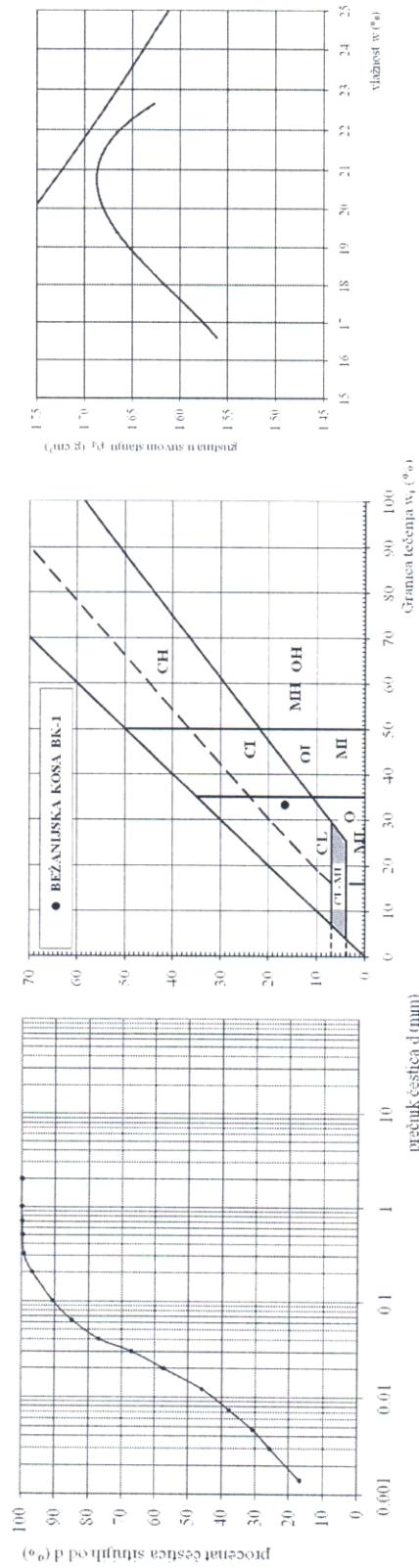
Na slici 6.52 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD iznosi PD=62.5% (BS 1377-5:1990 ), odnosno PD=67% (ASTM D 4221-99) što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno (Tabela 6.77).

U tabelama 6.78 i 6.79 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorak lesa BK-1 ispitivanjem u pinhole aparatu, pri svim stepenima zbijenosti, i hidrauličkim nivoima ne pokazuju disperzivnu reakciju i klasifikovan je kao nedisperzivno tlo klase ND1. Destilovana voda koja je protekla kroz uzorak je sve vreme ispitivanja bistra, sa tek ponekom iznetom česticom pri nižim hidrauličkim nivoima ( $H=50, 180$  mm), i dosta iznošenja čestica pri višim hidrauličkim nivoima ispitivanja. Protok  $q$  prilikom ispitivanja je ravnomerni, i na završetku ispitivanja je manji od 3 ml/s. Na slici 6.53 dat je dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti. Prečnik cilindrične pore na kraju ispitivanja iznosi  $d=1\text{mm}$  duž čitave dužine uzorka. Na izlaznom delu cilindrične pore, javlja se malo kupasto proširenje prečnika 2-3 mm, što je posledica erodovanja uzorka.

Na slici 6.54 prikazan je difraktogram ispitivanja mineraloškog sastava XRD analizom. Procentualno učešće pojedinih minerala prikazano je u tabeli 6.80.

**Tabela 6.75.** Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka BK-1 Bežanijska kosa

Granulometrijski sastav tla				Vlagost Aterbergove granice	Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )				USCS klasifikacija tla
gлина	prăšina	pesak	šljunak		W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	
<0,002 mm	0,002 mm	0,06 mm	2,00 mm	2,00 mm	W	W <sub>l</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	CL
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
21	63	16	/	16.7	33.4	16.9	16.5	1.01	1.688 20.8

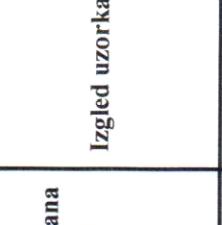
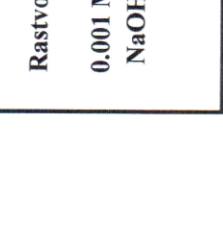


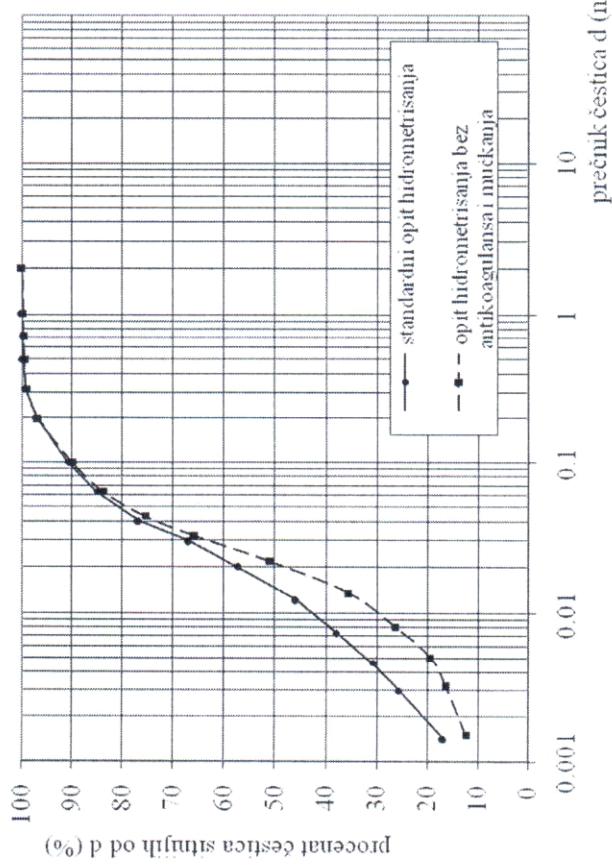
**Slika 6.51.** Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja uzorka BK-1 Bežanijska kosa

a) Granulometrijski sastav  
b) Plastičnost

c) Prokторов опит

Tabela 6.76. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice uzorka BK-1 Bežanijska kosa

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)				24 h
		2 min	20 min	1 h	4 h	
ASTM D 6572-00	SD	SD	SD	SD	SD	/ /
Destilovana voda	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	/ /
Izgled uzorka						
BS 1377-5:1990 tač.6.3	SD	SD	SD	SD	SD	/ /
Rastvor 0.001 M NaOH	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	/ /
Izgled uzorka						



Slika 6.52. Dijagram granulometrijskog sastava za opit duplog hidrometrisanja tla za uzorak BK-1 Bežanijska kosa

Tabela 6.77. Rezultati opita duplog hidrometrisanja za uzorak BK-1 Bežanijska kosa

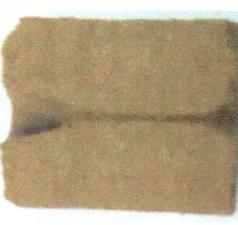
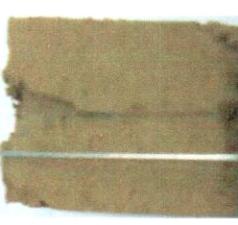
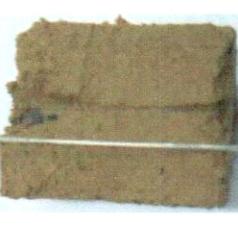
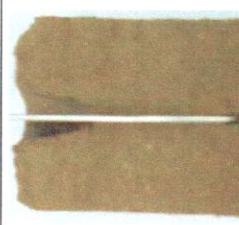
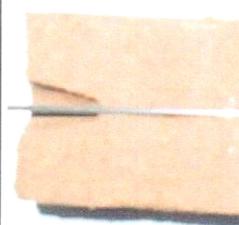
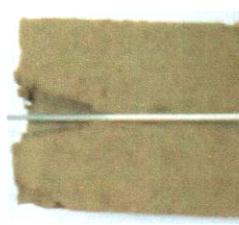
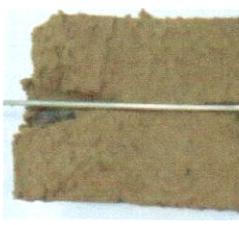
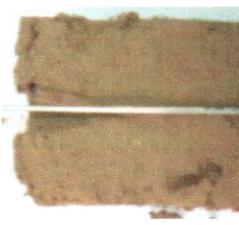
Opit	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
Opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i muckanja	14	20
Standardni opit hidrometrisanja	21	32
Procenat disperzivnosti PD (%)	62,5	67
Klasa disperzivnosti tla	<b>D</b>	<b>D</b>

Tabela 6.78. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom uzorak BK-1 Bežanijska kosa

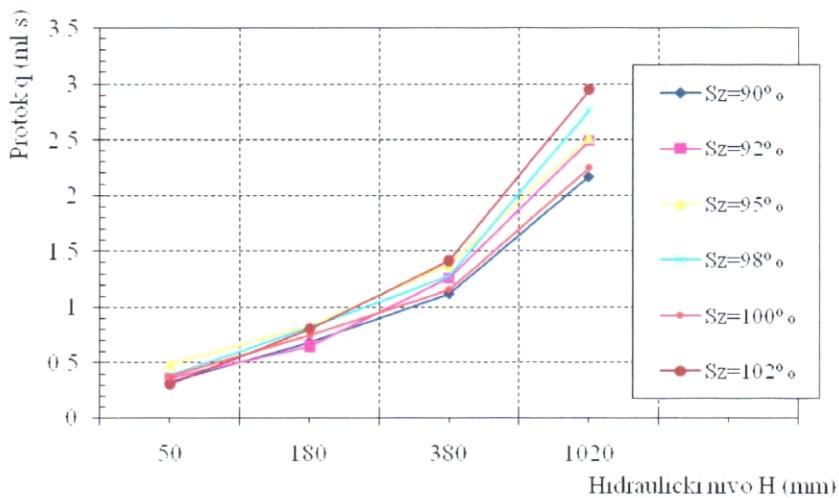
UZORAK: BEŽANIJSKA KOSA BK-1														
Stepen zbijenosti Sz (%)	Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)													
	50			180			380							
	Iznos senje cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Protok cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Protok cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Iznos senje cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Protok cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Iznos senje cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Protok cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Protok cesitica Boja/ Zamucenje q (ml/s)	Klasa disperzivnosti d (mm)					
90	0.33	blago	malo	0.69	bistra	malo	1.12	bistra	malo	2.17	bista	malo	1/10*	ND1
92	0.36	bistra	ne	0.65	bistra	ne	1.26	bistra	ne	2.49	bistra	ne	1/5*	ND1
95	0.49	bistra	ne	0.83	bistra	ne	1.38	bistra	ne	2.52	bistra	ne	1/4*	ND1
98	0.39	bistra	ne	0.82	bistra	ne	1.28	bistra	ne	2.77	bistra	ne	1/5*	ND1
100	0.38	bistra	ne	0.75	bistra	ne	1.16	bistra	ne	2.25	bistra	ne	1/5*	ND1
102	0.31	bistra	ne	0.81	bistra	ne	1.42	bistra	ne	2.95	bistra	ne	1/5*	ND1

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm

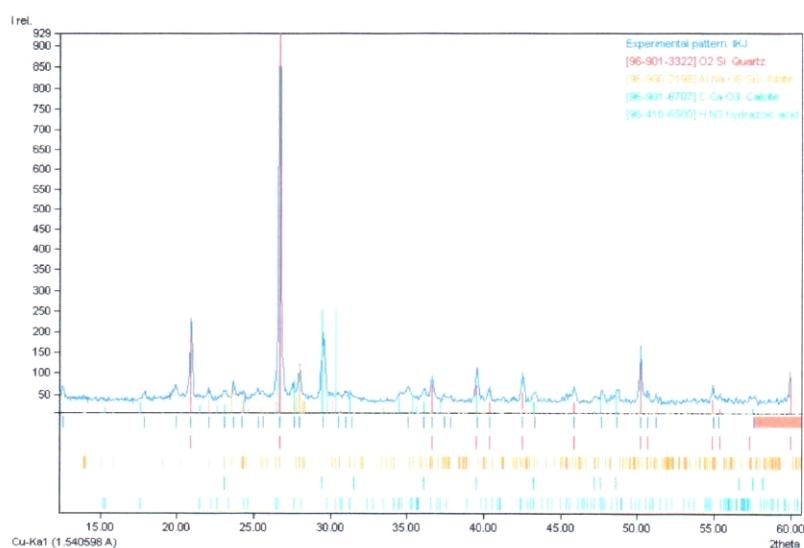
Tabela 6.79. Izgled uzoraka BK-1 Bežanijska kosa nakon izvedenog pinhole optika ispitivanja disperzivnosti

Sz (%)	90	92	95	98	100	102
Izlazna povšina						
Podužni presek						
Podužni presek						
Prečnik d (mm)	1/10*	1/5*	1/4*	1/5*	1/5*	1/5*
Klasa disperziv.	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1

\*prvi broj označava prečnik d kanala, a drugi broj prečnik pore na samom izlazu u mm



Slika 6.53. Zavisnosti protoka i stepena zbijenosti za uzorak BK-1 Bežanijska kosa



Slika 6.54. Rezultati XRD analize za uzorak BK-1 Bežanijska kosa

Tabela 6.80. Rezultati ispitivanja mineraloškog sastava uzorka BK-1 Bežanijska kosa

Uzorak	Mineraloški sastav		
	Kvarc	Kalcit	Albit
BK-1 Bežanijska kosa	49.2	17.4	15.1

## **POGLAVLJE 7. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA**

Poznavanje uzroka nastanka procesa je od suštinskog značaja za njihovo tumačenje. Zato je posebna pažnja posvećena izvođenju laboratorijskih ispitivanja, čiji rezultati nam omogućavaju predviđanje ponašanja ispitivanih sredina.

U okviru ovog poglavlja prikazana je analiza dobijenih rezultata ispitivanja koja su predviđena i izvršena za potrebe ove disertacije sa tematikom disperzivnosti i erodibilnosti finozrnih sredina kao posledice strujanja vode.

Izveden su sledeća laboratorijska ispitivanja:

- XRD ispitivanja (za potrebe procene mineralnog sastava ispitivanih sredina)
- Geohemijska ispitivanja
- Identifikaciono – klasifikaciona ispitivanja sa aspekta geomehanike:
  - granulometrijski sastav
  - vodno-fizičke karakteristike (plastičnost)
  - karakteristike zbijanja
- Određivanje disperzivnosti, odnosno stabilnosti strukture u sadejstvu sa vodom pri strujanju (direktne i indirektne):
  - Indirektne metode:
    - opit grudvica
    - opit dvostrukog hidrometrisanja
  - Direktna metode:
    - pinhole opit

## 7.1 XRD mineraloška ispitivanja

Rendgenska difrakcija je nedestruktivna metoda koja se koristi za identifikaciju prisutnih minerala u strukturi, odnosno mineraloškog sastava materijala. Poznavanje mineraloškog sastava je značajno, jer od vrste minerala direktno zavise osobine i ponašanje finozrnog tla.

XRD ispitivanja su izvedena na automatskom difraktometru za prah PHILIPS PW 1050, kao što je već detaljnije opisano u Pog.5.4, u Institutu tehničkih Nauka, SANU, tokom februara 2015.

U odnosu na primjenjenu metodu postoje i sofisticiranije metode. Međutim, u datom trenutku istraživanja primenjena metoda nam je bila na raspolaganju.

Dobijeni rezultati ispitivanja pojedinačnih uzoraka sa difraktogramima i tumačenjem prikazani su u okviru poglavlja 6. Svodni rezultati za sve uzorke prikazani su u tabeli 7.1.

Na osnovu interpretacije difraktograma (od strane izvršioca ispitivanja), dominantne minerale, u većini uzoraka, predstavljaju: kvarc, muskovit, kalcit i dolomit. Od minerala glina dominatan je mineral kaolinit. Uzorci T-1 i BK-1 sadrže u svom mineraloškom sastavu i albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) koji može biti izvor natrijuma i može uticati na disperzivnost.

## 7.2 Geohemijska ispitivanja

U okviru geohemijskih ispitivanja nisu vršena kompletna geohemijska ispitivanja, već samo određivanje pH uzoraka po BS 1377-3:1990 tač. 9 standardima koji opisuju ovu vrstu ispitivanja. Ispitivanje je izvršeno u Laboratoriji za hemiju Instituta IMS.

Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 7.2.

Prema Chorom-u i dr. (1994) postoji direktna korelacija između pH vrednosti, elektroličke koncentracije i disperzivnosti tla. Generalno disperzivne gline imaju visoku pH alkalnu vrednost (8-8.5). Chorom-u i dr. su dodavanjem neutralnom tlu (pH=7) kiseline ili baze, razmatrali uticaj pH na disperzivnost. Dodavanjem kiseline (HCl) smanjuje se pH vrednost pH<6, pri čemu dolazi do drastičnog povećanja elektrolitičke koncentracije, i smanjenja ukupnog negativnog naelektrisanja prisutnog u tlu. Ovo ima za posledicu flokulisanje čestica i smanjenje disperzivnosti. Sa dodavanjem baze (NaOH), pH vrednost se povećava (pH>8), sadržaj elektrolita se blago povećava i dolazi do povećanja ukupnog negativnog naelektrisanja. Usled povećanja naelektrisanja generalno se povećavaju i odbojne sile između čestica, odnosno disperzivnost.

Dobijeni rezultati ispitivanja pH vrednosti, pokazuju da ispitivana tla imaju pH vrednost veću od 8, što ukazuje na postojanje potencijala za pojavu disperzivnosti. Uzorci peskovite gline U-1 i kaolinitiske gline KGA-1 imaju pH vrednost manju od 7, i smanjen potencijal za pojavu disperzivnosti.

Tabela 7.1. Rezultati XRD analize ispitivanih uzoraka tla

Red.bro.	Uzorak*	Vrsta tla	Geomeh klasifik	Kvarc	Kaolinit	Kanoite	Dolomit	Muskovit	Periklas	Kryzhamovskite	Enstatite	Spinel	Ostalo	Ukupno		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18
1	U-1	prš.gлина	CL	46.3	17.6			36.1								100
2	U-2	prš.gлина	CL/CH	51.6				48.4								100
3	T-1	les I	CL	38.5	25.6		16		18.1	1.8						100
4	K-1	les I	CL	49.8	5.2		26	19								100
5	ZGG-1	les I	CL	47.7		18.1			34.2							100
6	MII-1	les I	CL	39.6	2.9						27.9	24		5.6		100
7	KGA-1	pesk.gлина	CL	44.9	39.1			9.7		3.8			2.5			100
8	SJ-4	les I	CL	49.2	17.4	15.1				15.5					2.8	100
9	BK-1	les I	CL	51.5	20.2					28.3						100

\*Oznake prema tabeli 6.1

Tabela 7.2. Rezultati ispitivanja pH vrednosti ispitivanih uzoraka tla

Red.br.	Uzorak*	Vreme ispitivanja, pH i temperaturna ispitivanja				
		17.03.2015. u 15.00 h		18.03.2015. u 8.30 h		
		pH	temperatura t (°C)	pH	temperatura t (°C)	pH
		2	3	4	5	6
1	<b>U-1</b>	6.27	21.9	6.34	20.5	6.14
2	<b>U-2</b>	8.06	22.4	8.09	20.8	8.01
3	<b>R-1</b>	8.70	22.1	8.65	20.3	8.45
4	<b>T-1</b>	8.05	24.1	8.38	21.6	8.36
5	<b>K-1</b>	8.92	24.1	9.11	21.6	9.07
6	<b>ZGG-1</b>	8.14	24.0	8.51	21.6	8.49
7	<b>MI-1</b>	8.63	22.2	8.65	20.7	8.07
8	<b>KGA-1</b>	6.89	23.9	7.65	21.6	7.70
9	<b>SV-1</b>	8.77	22.1	8.69	20.3	8.56
10	<b>SV-6</b>	8.69	22.1	8.66	20.3	8.49
11	<b>SR-1</b>	9.14	22.3	9.14	20.8	8.50
12	<b>SR-2</b>	9.23	21.7	9.18	20.4	8.84
13	<b>SR-4</b>	9.11	22.0	8.90	20.4	8.65
14	<b>BK-1</b>	8.55	24.1	8.64	21.6	8.60

\*Oznake prema tabeli 6.1

### 7.3 Identifikaciono – klasifikaciona ispitivanja sa aspekta geomehanike

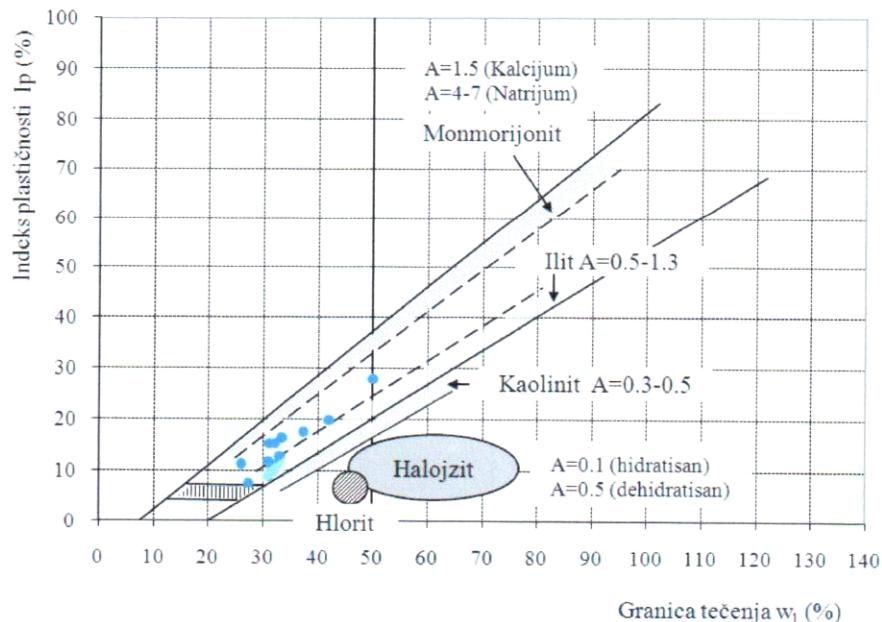
Identifikaciono klasifikaciona ispitivanja obuhvatila su određivanje:

- Granulometrijskog sastava
- Plastičnih osobina ispitivanih sredina
- Karakteristika zbijanja

Ispitivanja su izvedena u potpunosti prema važećim standardima u geomehaničkoj laboratoriji IMS-a za koje laboratorija ima aktivnu akreditaciju.

Dobijeni rezultati prikazani su u poglavlju 6.

Ispitivanja su sprovedena na materijalima koji se uobičajeno koriste za izgradnju nasutih objekata (hidrotehničkih i dr.) i bili su predmet ove teze.



**Slika 7.1.** Plastičnost sa okvirnim podacima o koloidnoj aktivnosti glinenih minerala (dopunjeno prema Holtz-u i Kovacs- u, 1981.) i prikazom ispitivanih uzoraka

Prikaz rezultatima ispitivanih uzoraka na Aterbegovom dijagamu plastičnosti dopunjeno rasporedom uobičajnih glinenih minerala, sa okvirnim podacima o koloidnoj aktivnosti dat je na slici 7.1.

Na osnovu sprovedenih ispitivanja, ispitivani materijali su (prema USCE klasifikaciji) nisko plastične prašinaste gline (CL). Na dijagramu se mogu odvojiti materijali različitog geološkog porekla (eolski sedimenti i sedimenti taloženi u vodenim sredinama).

Prisutni minerali u glinovitom tlu mogu se grubo proceniti iz Aterbergovog dijagrama plastičnosti, na kome su Holtz i Kovacs (1981), izdvojili odgovajuće zone glinenih minerala. Kao što je prikazano na slici 7.1 na osnovu vrednosti granice tečenja  $w_l$  i indeksa plastičnosti  $I_p$ , ispitivanih uzoraka, na dijagramu plastičnosti može se proceniti koji mineral je prisutan. Iz dijagrama se može uočiti da u uzorcima lesa SJ-1, SJ-2, R-1, MI-1 i T-1 preovlađuje mineral ilit. Ostali uzorci se nalaze u prelaznoj zoni između ilita i monmorijonita. Kako glinovito tlo u prirodi, uglavno sadrži nekoliko glinenih minerala, to nije moguće na osnovu karakteristika plastičnosti izdvojiti zonu određenih minerala.

Tabela 7.3. Klase disperzivnosti ispitivanih uzoraka tla

Red.b.r.	Uzorak	Vrsta tla	Geomehanička klasifikacija	Crum test				Double Hydrometer test				Opit test				Pinhole test (D4647-98; BS 1377-5:1990 tač.6.2)			
				BS 1377-5:1990 tač.6.3		ASTM D 6572-00		BS 1377-5:1990 tač.6.4		ASTM D 4221-99		Stepen zbijenosti (%)							
				20 min	6 h	20 min	6 h	(%)	klas a	(%)	klas a	90	92	95	98	100	102		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	U-1	prš.gлина	CL	SD	ND	ND	24	ND	21.5	ND	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1 <sup>2</sup>		
2	U-2	prš.gлина	CL/ CH	ND	ND	ND	ND	39.5	SD	49	SD	ND3	ND3	ND2	ND2	ND2	ND2 <sup>2</sup>		
3	R-1	les I	CL	SD	SD	MD	SD	31	SD	37.5	SD	ND2/ ND3	ND3	ND1	ND1	ND1	ND1		
4	T-1	les I	CL	HD	HD	HD	HD	70	D	94	D	D1	D1	D1	D1	D1	D1		
5	K-1	les I	CL	HD	HD	HD	HD	83	D	96	D	D1	D1	D1	D1	D1	D1		
6	ZGG-1	les I	CL	HD	HD	ND	ND	57	D	69	D	D2	D2/ ND4	ND3	ND3	ND3	ND3		
7	MI-1	les I	CL	SD	SD	SD	SD	61.5	D	86	D	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3		
8	KGA-1	pesk.gлина	CL	HD	HD	HD	HD	111	D	115	D	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3		
9	SV-1	les I	CL	SD	SD	SD	SD	72	D	85	D	ND2/ ND3	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3		
10	SV-6	les I	CL	SD	SD	SD	SD	41	SD	63	D	ND2/ ND3	ND3	ND2/ ND3	ND2/ ND3	ND2/ ND3	ND3		
11	SJ-1	les I	CL	MD	MD	MD	MD	43	SD	35	SD	D1	D1	D2	D2	D1	D1		
12	SJ-2	les I	CL	MD	MD	MD	MD	67	D	86	D	D1	D1	D1	D1	D1	D1		
13	SJ-4	les I	CL	MD	MD	MD	MD	76	D	85	D	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3	ND3		
14	BK-1	les I	CL	SD	SD <sup>1</sup>	SD	SD <sup>1</sup>	62.5	D	67	D	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1	ND1		

ispitivanje nakon 4 h; <sup>2</sup>ispitivanje pri stepenu zbijenosti Sz=105%

## **7.4. Određivanje disperzivnost finozrnog tla**

Disperzivnost finozrnog tla odnosno, stabilnost strukture u sadejstvu sa vodom pri strujanju, u laboratorijskim uslovima ispituje se kako indirektnim metodama (opit grudvica, opit duplog hidrometrisanja) tako i direktnim metodama kao što je to pinhole opit. Objedinjeni rezultati ispitivanja disperzivnosti, za sve tri primenjene metode prikazani su u tabeli 7.3.

### **7.4.1 Indirektne metode ispitivanja**

#### **7.4.1.1 Rezultati opita grudvice**

Rezultati sprovedenih ispitivanja disperzivnosti finozrnog tla opitom grudvice ne pokazuju značajnije razlike zavisno od metode ispitivanja tj. da li je uzorak potapan u destilovanu vodu ili rastvor 0.001 M NaOH. Od ispitivanih uzoraka, samo je uzorak KGG-1 pokazao različite reakcije: u destilovanoj vodi nedisperzivnu reakciju, a u rastvoru 0.001 M NaOH jaku disperzivnu reakciju. Uzorak R-1 potopljen u destilovanu vodu, u prvih 20 minuta imao je jaku disperzivnu reakciju a u rastvoru 0.001 M NaOH, nakon 1 h reakcija je bila slabo disperzivna.

Ukoliko je tlo dispezipivo ono reaguje gotovo trenutno već pri spuštanju uzorka u rastvor. Sve promene u reakciji tla dešavaju se u prvih 20 minuta do 1 časa. Formiranje koloidnog zamućenja počinje u periodu do 20 min da bi dostiglo svoj maksimumu oko 1 h. Dezintegracija uzorka traje svo vreme ali oko 80 % uzoraka dezintegriše se tokom prvih 20 min.

Uzorci tla koji su tokom izvođenja opita grudvice pokazali disperzivnu reakciju i u opitu duplog hidrometrisanja i pinhole opitu pokazuju istu reakciju. Takođe, tla koja su u opitu grudvice pokazala disperzivnost klase slabe do srednje disperzivnosti odgovaraju rezultatima koji u pinhole opitu imaju klase disperzivnosti ND2 i ND3.

Uzorci ispitani opitom duplog hidrometrisanja pokazuju slaganje sa rezultatima dobijenim ispitivanjima opitom grudvice.

Na uzorcima U-1 i U-2 Rovni vršena su i dodatna ispitivanja uticaja vlažnosti i zbijenosti na klasu disperzivnosti. Ispitivanja su rađena sa prirodnom vlažnošću i suvom gustinom ( $w$ ,  $\rho_d$ ) i optimalnom vlažnošću i maksimalnom suvom gustinom ( $w_{opt}$ ,  $\rho_{dmax}$ ) zbijeni standardnom energijom zbijanja po Proctoru ( $600 \text{ kJ/m}^3$ ). Takođe, pored ispitivanja uzorka u  $0.001 \text{ M}$  rastvoru NaOH i destilovanoj vodi, ispitivanja su vršena i u vodi koja potiče iz reke Jablanice (uzorci gline koja se koristila za izgradnju jezgra nasute brane na toj reci) i vodom iz vodovoda. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 7.4.

Uzorak žutih prašinastih glina U-1 potopljen u destilovanu vodu, pri oba uslova zbijenosti, ne pokazuje disperzivnu reakciju i klasifikovana je kao tlo klase ND. Uzorak U-1 potopljen u rastvor NaOH pri prirodnoj vlažnosti pokazuje blagu disperzivnost koja se javlja već nakon 20 min, dok se kod uzorka zbijenog po Proctoru javlja nakon 1 h. U rastvoru vode iz reke i rastoru vode iz vodovoda, uzorak U-1, u uslovima prirodne zbijenosti ne reaguje tj. nije diperzivan. Međutim, u uslovima zbijenosti po Proctoru uzorak U-1 pokazuje slabu disperzivnost – klasa SD.

Na slici 7.1a. prikazan je izgled uzorka U-1 potopljenog u destilovanu vodu koji je klasifikovan kao nedispevivno tlo – klasa ND. Na slici 7.1b prikazan je uzorak U-1 potopljen u rasvor NaOH, gde je uočljivo blago koloidno zamućenje na osnovu koga je uzorak klasifikovan kao slabo disperzivno tlo - klasa SD.

Uzorak mrkocrvenih prašinastih glina U-2 u svim vrstama rastvora, i pri oba uslova vlažnosti i zbijenosti (prirodna vlažnost i gustina,  $w$ ,  $\rho_d$ ; optimalna vlažnost i maksimalna suva gustina,  $w_{opt}$ ,  $\rho_{dmax}$ ) ne pokazuje nikakve disperzivne promene tj. nije disperzivan – klasa ND.



a) destilovana voda

b) 0.001 M natrijum hidroksid

**Slika 7.2.** Opit grudvice - reakcija uzorka U-1 nakon 60 min,

pri prirodnoj vlažnosti i zbijenosti

**Tabela 7.4.** Rezultati opita grudvice za uzorke U-1 i U-2

Uzorak	Rastvor	Vreme	Prirodna vlažnost $w$ (%) i gustina $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Optimalna vlažnost $w_{\text{opt}}$ (%) i maksimalna suva gustina $\rho_{\text{dmax}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
			Klasa	Klasa
U-1	Destilovana voda	20 min	ND	ND
		1 h	ND	ND
		4 h	ND	ND
	Rastvor natrijum hidroksida NaOH	20 min	SD	ND
		1 h	SD	SD
		4 h	SD	SD
	Voda iz reke	20 min	ND	SD
		1 h	ND	SD
		4 h	ND	SD
U-2	Voda iz vodovoda	20 min	ND	SD
		1 h	ND	SD
		4 h	ND	SD
	Destilovana voda	20 min	ND	ND
		1 h	ND	ND
		4 h	ND	ND
	Rastvor natrijum hidroksida NaOH	20 min	ND	ND
		1 h	ND	ND
		4 h	ND	ND
	Voda iz reke	20 min	ND	ND
		1 h	ND	ND
		4 h	ND	ND
	Voda iz vodovoda	20 min	ND	ND
		1 h	ND	ND
		4 h	ND	ND

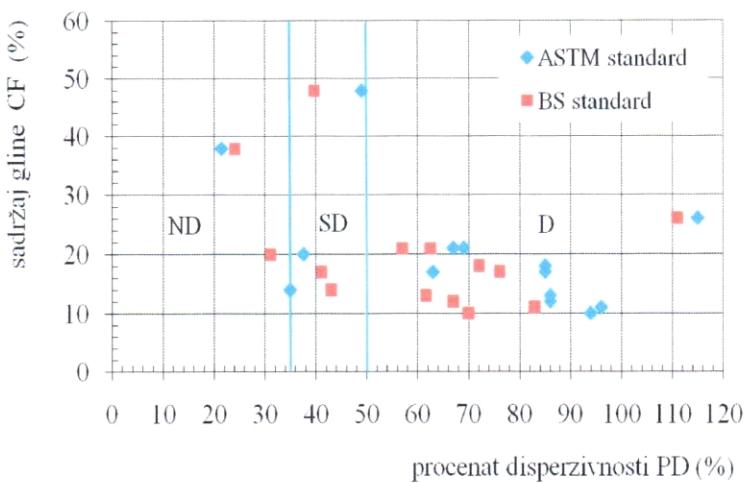
Ranija istraživanja (Sherard, 1976) su pokazala da vlažnost uzorka i vrsta rastvora u kome se izvodi ispitivanje imaju uticaja na disperzivno ponašanje. Sprovedenim dodatnim ispitivanjima, potvrđeno je da kod nekih materijala vlažnost uzorka i vrsta rastvora imaju uticaja na ponašanje tla.

Kako se opit grudvice zasniva na vizuelnoj identifikaciji ponašanja tla ovaj opit nosi visok stepen subjektivnosti. Opit grudvice je vrlo jednostavan opit za izvođenje na terenu i laboratoriji, i može se koristi za preliminarnu procenu disperzivnosti. Poznavanje ograničenja sprovedene metode, nameće potrebu za daljim istraživanjima, koja bi trebalo usmeriti u pravcu uticaja vlažnosti, zbijanja i vrste rastvora na rezultate opita grudvice.

#### **7.4.1.2 Rezultati opitom duplog hidrometrisanja**

Prema ranijim istraživanjima na rezultate opita duplog hidrometrisanja utiču: vrsta tla, vrsta antikoagulansa koji se koristi prilikom ispitivanja, kvalitet vode i način pripreme uzorka (Sherard, 1976).

Određivanje disperzivnosti tla opitom duplog hidrometrisanja, pokazalo je da ispitivani uzorci tla imaju istu klasu disperzivnosti nezavisno od standarda koji je primenjivan: ASTM D 4221-99 ili BS 1377-5:1990 (osim uzorka SV-6). Oba standarda propisuju korišćenje natrijumheksametafosfata kao antikoagulansa. Razlika između opita je u čitanju veličine čestica, koje se koristi u proračunu procenta disperzivnosti: čitanje na 0.005mm (ASTM standard) ili čitanje na 0.002mm (BS standard). BS 1377-5:1990 standard je nešto strožiji, odnosno veličina čestica koju koristi BS standard u proračunu disperzivnosti, bliža je veličini koloidnih čestica. Usled toga procenat disperzivnosti je realniji kada se određuje prema BS standardu.



**Slika 7.3.** Odnos sadržaja glinovite frakcije i procenta disperzivnosti

Na slici 7.3 prikazane su izdvojene klase disperzivnosti, prema dobijenom procentu disperzivnosti u funkciji sadržaja glinovite frakcije. Sadržaj glinovite frakcije nema uticaja na klasu disperzivnosti. Iz dijagrama je evidentno da disperzivne gline imaju umereni sadržaj od 10-22 (26) % gline. Međutim tla sa sadržajem glinenih frakcija manjih od 10% nemaju dovoljno koloidnih čestica da bi pokazala disperzivno ponašanje (Sherard i dr., 1976).

Bitno je napomenuti da je disperzivnost u funkciji vrste prisutnog glinenog minerala, a ne sadržaja "glinene" frakcije (prema USCE klasifikaciji čestice sitnije od 0.002 mm). Tako je moguće da tlo ima visok procenat frakcija sitnijih od 0.002 mm, a da nema disperzivnih svojstva. Ovo je usled toga što "glinene" čestice po svom mineralnom sastavu ne predstavljaju glinene minerale već i druge minerale (kvac, feldspate i dr.)

Rezultati opita duplog hidrometrisanja pokazuju da tla kod kojih je procenat disperzivnosti  $PD < 35\%$  i koja su klasifikovana kao nedisperzivna tla, istu nedisperzivnu reakciju pokazuju i u opitu grudvice i u pinhole opitu npr. uzorak U-1.

Tla kod kojih je procenat disperzivnosti između 35-50% (uzorci U-2, R-1, SV-6) i koja su klasifikovana kao srednje disperzivno tlo, pokazuju srednje disperzivnu reakciju i u pinhole opitu, dok u klasifikaciji opitom grudvice postoje izvesna odstupanja.

Za tla kod kojih je procenat disperzivnosti PD>50%, postoji velika neusaglašenost u rezultatima dobijenim opitom duplog hidrometrisanja i pinhole opitom, naročito kod tla koja su klasifikovana pinhole opitom kao srednje disperzivna tla klase ND2 i ND3. Za tla koja su opitom duplog hidrometrisanja klasifikovana kao disperzivna klase D, pinhole opitom je potvrđena klasa.

#### **7.4.1.3 Zaključak**

Bez obzira na svoju jednostavnost, indirektne metode ispitivanja daju pogodnu preliminarnu ocenu o ponašanju tla u pogledu disperzivnosti. Na osnovu rezultata ovih ispitivanja može se prepoznati materijal kao i planirati dalja detaljnija ispitivanja u pogledu definisanja disperzivnosti i erodibilnosti tla.

Treba naglasiti da pri ovim preliminarnim ispitivanjima pokazatelji disperzivnosti su procenjeni u uslovima gde nema obnavljanja tečne faze tj. nema strujanja vode kroz strukturu sredine.

Na osnovu ispitivanja metodom duplog hidrometrisanja jasno da nije moguće uspostavljanje korelaceione zavisnosti između stepena zbijenosti i stepena dispezivnosti. Nasuprot tome, metod grudvice po svom principu izvođenja daje mogućnost ocene disperzivnosti zavisno od stepena zbijenosti. Međutim, izvedenim ispitivanjima nije uspostavljena funkcionalna zavisnost.

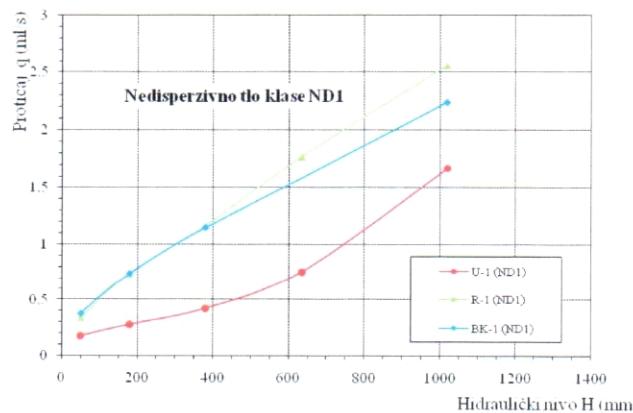
## 7.5 Direktne metode ispitivanja

Za ispitivanje disperzivnosti sredine, u ovom radu, korišćena je najpoznatija metoda tzv. pinehole opit.

### 7.5.1 Rezultati dobijeni pinhole opitom

Ispitivanjima disperzivnosti u pinhole aparatu, pri stepenu zbijenosti Sz=100%, jasno su izdvojene sledeće kategorije tla: ND1, ND2, ND3 i D1. Uzorci SV-1 i SV-6, zbog male vrednosti proticaja (koji se koristi pri klasifikaciji), nisu mogli biti definisani kao jedna klasa. Zato su, sa aspekta sigurnosti, klasifikovani kao mešovita klasa ND2/ND3.

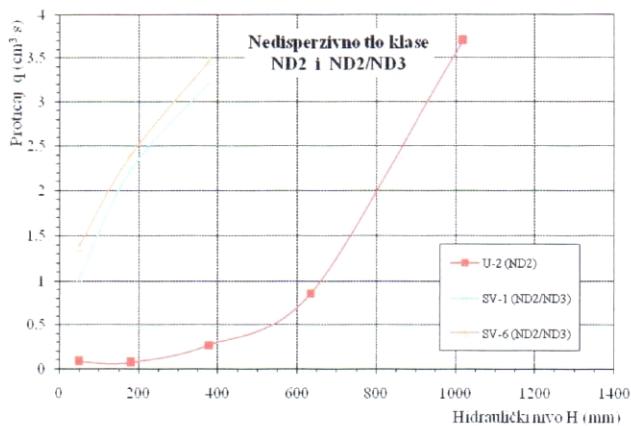
Na slici 7.4 prikazan je dijagram zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND1 pri stepenu zbijenosti Sz=100%.



**Slika 7.4.** Zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja  
za nedisperzivna tla klase ND1

Uzorci klase disperzivnosti ND1, jasno se međusobno razlikuju: kriva proticaja uzorka U-1 prašinaste gline izdvaja se od uzorka lesa R-1 i BK-1. Hidraulički nivo tokom ispitivanja je postepeno povećavan od 50-1020 mm. Pri svakom hidrauličkom nivou ispitivanje je trajalo 5 minuta, protok je bio konstantan, i rastao je do 1.7 do 2.6 ml/s.

Porast proticaja tokom ispitivanja je gotovo linearno zavisan od hidrauličkog nivoa, odnosno hidrauličkog gradijenta. Ovi uzorci nemaju promenu u prečniku pore tokom ispitivanja  $d=1$  mm, osim kupastog proširenja na izlazu/nizvodnom delu uzorka, koje je posledica erodovanja uzorka. Na to ukazuje i iznošenje finozrnih čestica iz uzorka pri višim hidrauličkim nivoima  $H>380$  mm. Ovo ukazuje da su tokom ispitivanja u uzorcima stvoreni uslovi za pojavu lokalne erozije ali nema pokazatelja koloidne erozije. Slični rezultati dobijeni su i prilikom ispitivanja sprovedenih sa stepenima zbijenosti  $Sz=90, 92, 95, 98$  i  $102\%$ .



**Slika 7.5.** Zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND2 i ND2/ND3

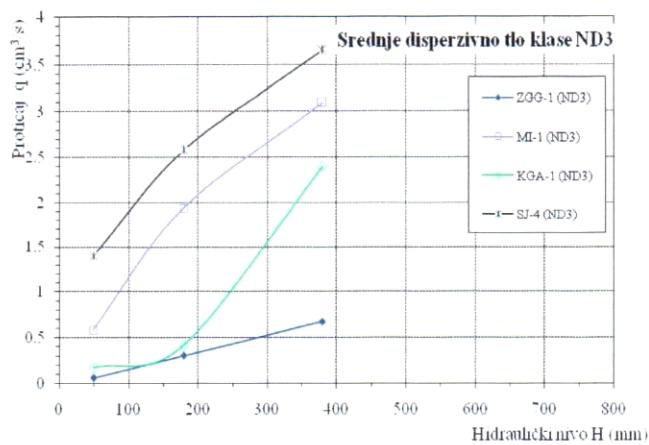
Na slici 7.5 prikazan je dijagram zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND2, odnosno ND2/ND3, pri stepenu zbijenosti  $Sz=100\%$ .

Prilikom ispitivanja uzorka prašinaste gline U-2, (klase ND2) u prvih 5 minuta pri hidrauličkom nivou  $H=50$  mm došlo je do pada protoka od početnog  $q=0.19$  na završni  $q=0.08 \text{ ml/s}$ . Voda je bila bistra i nastavilo se sa ispitivanjima pri nivou  $H=180\text{mm}$  pri čemu je protok nastavio da pada do  $q=0.07 \text{ ml/sek}$ . Nakon toga pri nastavku ispitivanja protok je nastavio da raste. Pri ponovljenom opitu dogodilo se isto, osim što je vršeno ispitivanje i pri hidrauličkom nivou  $H=635$  mm, kada je došlo do iznošenja veće količine čestica što je imalo za posledicu naglo povećanje protoka, tako da je pri

hidrauličkom nivou  $H=1020$  mm protok bio veći od  $q>3.7$  ml/s. Ispitivanje pri ovom nivou je trajalo 2 minuta jer dalje nije bilo moguće održavati konstantan hidraulički nivo.

Pad protoka pri nižim hidrauličkim nivoima ispitivanja može se objasniti sužavanjem i zatvaranjem veštački formirane cilindrične pore, ili usled lošeg bušenja ili bubreњa. Ovaj glinoviti materijal ima granicu tečenja  $w_l=50\%$  i sadržaj glinovite frakcije od  $CF=48\%$ , što može biti indikator za bubrige gline. Voda je sve vreme ispitivanja bila bistra, a prečnik pore proširen od 2-5 mm.

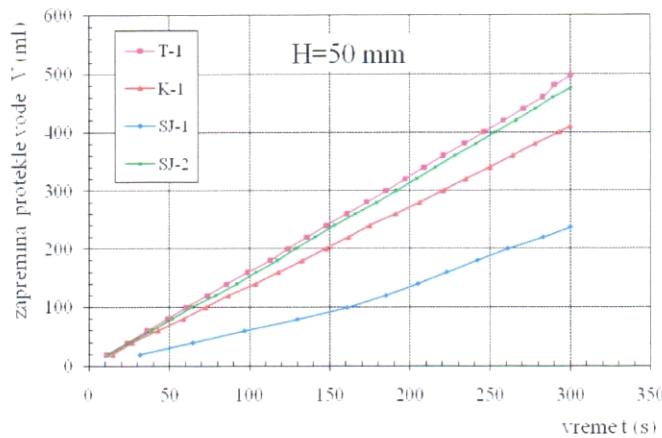
Uzorci lesa SV-1 i SV-6 su kategorisani kao nedisperzivno do srednje disperzivno tlo klase ND2 i ND3, kod kojih je ispitivanje završeno pri hidrauličkom nivou  $H=380$  mm, nakon 15 min. Krive zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja imaju identične oblike sa malim odstupanjima u veličini protoka, što nam pokazuje da se radi o sličnim/istim materijalima u pogledu disperzivnosti. Voda je sve vreme ispitivanja bila bistra, ali je došlo do proširenja cilindrične pore na 2.5 mm. Na izlaznom delu uzorka formirano je plitko kupasto proširenje prečnika do 15 mm. Ovo ukazuje na intenzivan erozioni proces iznošenja čestica, što je i registrovano tokom izvođenja opita. Usled intenzivnog erodovanja zidova cilindrične pore i iznošenja čestica, nije bilo moguće prilikom ispitivanja održavati konstantnim hidraulički nivo  $H=1020$  mm, te su ispitivanja morala bila prekinuta. U nedostatku podataka na osnovu kojih se vrši klasifikacija uzorka, pri hidrauličkom nivou  $H=1020$  mm, tlo je klasifikovano kao dvojna klasa ND2/ND3 na osnovu rezultata ispitivanja pri hidrauličkom nivou  $H=380$  mm. Kako je protekla voda kroz uzorak sve vreme ispitivanja bistra bez koloidnog zamućenja, ispitivano tlo nije disperzivno već erodibilno.



**Slika 7.6.** Zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND3

Uzorci ZGG-1, MI-1, KGA-1 i SJ-4 su kategorisani kao srednje disperzivno tlo klase ND3, kod kojih je ispitivanje završeno pri hidrauličkom nivou  $H=380$  mm, nakon 15 min ispitivanja. Na slici 7.5 dat je dijagram zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa ispitivanja za nedisperzivna tla klase ND3. Na dijagramu se jasno izdvajaju krive zavisnosti pojedinih vrsta tla. Uzorak lesa ZGG-1 ima ravnomeran porast protoka u zavisnosti od hidrauličkog nivoa ispitivanja. Kod kaolinitiske gline KGA-1 imamo nagli porast protoka pri hidrauličkom nivou  $H=380$  mm, kao posledicu proširenja veštačke pore u uzorku. Uzorak lesa MI-1, i pogrebene zemlje SJ-4 imaju približno isti oblik krive zavisnosti protoka od hidrauličkog nivoa.

Kod uzorka ZGG-1 duž cele dužine uzorka formirao se nepravilni erozioni kanali maksimalnog prečnika 15 mm, dok je kod ostalih uzoraka ravnomerno proširenje kanala za 1-2 mm. Destilovana voda protekla kroz uzorak je blago zamućena. Ova grupa uzoraka, klasifikovana kao klasa ND3 srednje disperzivno tlo, ima nešto slabije izraženu eroziju u odnosu na predhodne dve grupe, ali i nešto jače izraženu disperzivnost.



**Slika 7.7.** Zavisnosti zapremine protekle vode u vremenu ispitivanja za disperzivno tlo klase D1, pri hidrauličkom nivu  $H=50$  mm

Dijagram zavisnosti zapremine protekle vode u vremenu ispitivanja za disperzivno tlo klase D1, pri hidrauličkom nivu  $H=50$  mm, prikazan je na slici 7.7. Za disperzivno tlo količina protekle vode kroz uzorak pri hidrauličkom nivou  $H=50$  mm, kontinuirano raste i dostiže maksimalni protok nakon 5 minuta ispitivanja. Intenzivno koloidno zamućenje destilovane vode koja je protekla kroz uzorak, klasificiše ova tla kao izuzetno disperzivna.

Grupisanje i klasifikacija ispitivanih uzoraka u četiri prethodno navedene i opisane klase disperzivnosti odnosila se za najčešće zahtevani stepen zbijenosti  $Sz=100\%$ . Međutim ispitivanja disperzivnosti sprovedena sa stepenom zbijenosti  $Sz=90, 92, 95, 98$  i  $102\%$  pokazala su da stepen zbijenosti nema značajnijeg uticaja na klasu disperzivnosti. Ukoliko je tlo disperzivno klase D1 ono će pokazivati istu disperzivnu reakciju pri svim stepenima zbijenosti. Isto tako, ako tlo nije disperzivno (klase ND1) ono će pokazivati nedisperzivnu reakciju nezavisno od stepena zbijenosti odnosno gustine tla.

Pojedina tla iz klase D2, ND2 i ND3 mogu pokazivati pri nižim stepenima zbijenosti  $Sz=90-95\%$ , nižu klasu zbijenosti u odnosu na klasu izdvojenu pri višim stepenima

zbijenosti Sz=98-120%. Ispitivanja na ovim materijalima, su pokazala da se uglavnom radi o smanjenju disperzivnosti tla za jednu klasu disperzivnosti.

### **7.5.2 Zaključak**

Pinhole opit ili opit veštački formirane cilindrične pore je najčešće primenjivani fizički opit za određivanje disperzivnosti tla. Opitom se simulira strujanje vode kroz porni prostor u tlu. Veličina protoka, intenzitet koloidnog zamućenja i veličina prečnika pore su parametri koji se prate tokom i nakon ispitivanja, i na osnovu kojih se vrši klasifikacija disperzivnog tla. Opit je jednostavan za izvođenje u laboratoriji i visoko ponovljiv. Iako je ovde korišćen na veštački prirpremljenim zbijenim uzorcima može se uspešno primenjivati i na neporemećenim uzorcima.

Naime, pinhole opit je u suštini empirijski opit zasnovan na subjektivnoj proceni. Daje vrlo jasne rezultate pri klasifikaciji disperzivnog tla klase D1 i D2, i klasu nedisperzivnog tla ND1 i ND2. Međutim, ispitivanja su pokazala da kod tla klasa srednje disperzivnosti ND3 i ND4 se mogu javiti nedoumice u klasifikaciji. Ove nedoumice se javljaju usled nedovoljno definisanih kriterijuma klasifikacije, posebno kada su u pitanju male vrednosti proticaja.

## **POGLAVLJE 8. MELIORATIVNE MERE ZA POBOLJŠANJE DISPERZIVNIH SVOJSTAVA TLA**

Kada je identifikaciono-klasifikacionim opitima prepoznato da je tlo disperzivno, to ne znači da je u potpunosti neupotrebljivo za korišćenje pri izgradnji nasutih brana, nasipa ili vodonepropusnih barijera. Primenom odgovarajućih meliorativnih mera disperzivno tlo se može poboljšati u nedisperzivno tlo, koje se dalje može koristiti za nasipanje. Za ovu svrhu se uglavnom koriste aktivni hemijski dodaci kao što su: hidratisani (gašeni) kreč, negašeni kreč, poljoprivredni kreč, aluminijumsulfat, gips, pepeo ili mešavina hidratisanog kreča i pepela (McCook i McElroy, 1991).

### *Kreč*

Hidratisani (gašeni) kreč ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) predstavlja hidratisani kalcijum oksid. Kada se pomeša sa disperzivnim glinama, kalcijum brzom reakcijom zamenjuje natrijumove katjone. Kreč reaguje i sa  $\text{SiO}_2$  i alumosilikatima u tlu. Neki primeri meliorativnih intervencija u disperzivnom tlu, pokazali su da se nisu pojavila oštećenja i 20-tak godina nakon poboljšanja. Prema Mc Cook-u i McElroy-u (1991), laboratorijska ispitivanja u pinhole opitu pokazala su da je dodatak 1% hidratisanog kreča dovoljan da se disperzivno tlo poboljša u nedisperzivno. Praktično terensko iskustvo je pokazalo, da zbog slabijeg mešanja i doziranja na terenu, ovaj procenat nije dovoljan, već je potrebno dodati 2% hidratisanog kreča. Isto tako, ispitivanja u nekim glinama pokazala su da procenat hidratisanog kreča od 2 % nije bio dovoljan (McCook D. i McElroy, 1991). U svakom slučaju neophodno je uzorke ispitati u pinhole aparatu kako bi se odredila optimalna količina hemijskog dodatka.

Prilikom određivanja optimalne količine hidratisanog kreča potrebno je da ona iznosi toliko da granica skupljanja bude dovoljno visoka, kako se nebi pojavile pukotine sušenja u tretiranom tlu. Hidratisani kreč ima uticaja na Aterbergove granice, tako da je

potrebno sprovesti ispitivanja pri različitim sadržajima kreča kako bi se uspostavila optimalna zavisnost.

Pored hidratisanog kreča može se koristiti i mešavina 2/3 poljoprirednog kreča i 1/3 hidratisanog (gašenog) kreča.

Prednosti primene hidratisanog kreča ogledaju se u pozitivnom praktičnom dugogodišnjem iskustvu. Nedostaci se ogledaju u visokoj ceni koštanja tj. troškovi sirovine i ugradnje su vrlo visoki. Negovanje materijala nakon mešanja sa hidratisanim krečom je neophodna da bi se smanjila „krtost“ zbijenog tla. Tlo se uglavnom neguje (provlažava) minimalno 48 sati nakon zbijanja.

Kada se koristi negašeni kreč umesto hidratisanog potrebna je i veća količina vode za proces vezivanja. Drugi nedostatak hidratisanog kreča je porast pH vrednosti tretiranog tla što za posledicu ima otežani rast vegetacije.

Negašeni kreč se ponekad koristi umesto hidratisanog (gašenog) kreča, pošto je lakše dostupan na tržištu. Koristi se u vidu granula, ali ovakav nije baš pogodan za ugradnju jer je granulisani kreč teže umešati nego hidratisani koji je u obliku finijeg praha. Takođe, više vode je potrebno da bi se odigrala reakcija sa granulisanim krečom nego sa hidratisanim. Prilikom rada sa negašenim krečom neophodne su mere predostrožnosti, zbog opasnosti od topote koja nastaje usled reakcije kreča sa vodom.

#### *Aluminijum sulfat $Al_2(SO_4)_3$*

Za stabilizaciju disperzivnog finoznog tla može se koristiti i granularni i tečni  $Al_2(SO_4)_3$ . Odmah nakon mešanja sa  $Al_2(SO_4)_3$  sa tlom, tlo se može zbijati. Nema potrebe za čekanjem da se tlo osuši, zato što  $Al_2(SO_4)_3$  nema tako jak uticaj na plastičnost i krtost kao kreč. Ovo je prednost jer se troškovi pripreme i ugradnje smanjuju, međutim cena koštanja sirovine je visoka.

*Gips*

Laboratorijska ispitivanja izvedena u pinhole aparatu nisu pokazala da je gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) toliko efikasan u stabilizaciji disperzivnog tla (McCook D. i McElroy C., 1991).

*Pepeo*

Leteći pepeo je proizvod otpada pri sagorevanju fino sprašenog uglja u struji vazduha u kotlovima termoelektrana. Primena pepela za poboljšanje karakteristika disperzivnog finozrnog tla, direkno zavisi od hemijskog sastava pepela, jer on varira zavisno od tipa i uslova sagorevanja uglja koji se koristio. Prema standardu ASTM C618-05 leteći pepeo se prema pucolanskoj aktivnost deli na dve klase C i F:

- Leteći pepeli klase C su pucolanski samovezujući pepeli sa visokim sadržajem, uglavnom između 15% i 35%, negašenog kreča CaO.
- Leteći pepeli klase F imaju pucolanska, ali ne i samovezujuća svojstva zbog niskog sadržaja CaO. Pepeli klase F obično sadrže manje od 10% negašenog kreča (CaO).

Pored sadržaja CaO, razlika između elektrofilterskog pepela klase F i klase C je i u procentualnom sadržaju pucolanskih oksida silicijum dioksida, aluminijum oksida i gvožđa ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Suvi pepeo izdvojen od dimnih gasova poseduje pucolanske osobine, amorfni silicijum dioksid i aluminijum oksid unutar pepela klase F zahtevaju neko sredstvo/aktivator za poboljšanje vezivnih karakteristika, kao što je npr. portland cement, negašeni ili gašeni kreč, uz prisustvo vode kako bi došlo do reakcije i dobijanja hidratisanih produkata cementnih minerala: trikacijumsilikata, dikalcijumsilikata, trikalcijumaluminata i drugih cementnih minerala.

Prema EN 14227-4 pepeli se dele na:

- Silikatne koji su inertni, to su pepeli Kolubarskog i Kostolačkog ugljenog basena (TENT i TEKO)
- Kalcijski pepeli su aktivni pepeli, zbog visokog sadržaja kalcijuma (TE Gacko)
- Mešoviti silikatno-kalcijski pepeli koji su umereno aktivni (Kosovske termoelektrane)

Primena pepela zasniva se na dve hemijske reakcije: katjonskoj izmeni i pucolanskoj reakciji. Kada glinovitom tlu dodamo pepeo, reaktivni CaO reaguje sa vodom formirajući kalcijum hidroksid koji disocira u  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{OH}^-$  jone. U tlu dolazi do zamene pojedinih (kod disperzivnog tla  $\text{Na}^+$ ) vrsta jona na površini koloidne čestice gline. Ova reakcija je vrlo brza, gotovo trenutna. Nakon toga počinje dugotrajna pucolanska reakcija kalcijuma iz pepela sa rastvorenim aluminijumom i silicijumom iz glina, pri čemu u prisustvu vode nastaje stabilan kalcijum silicijum hidrati i kalcijum aluminat hidrat. Nastala jedinjenja imaju osobinu da povezuju čestice tla, i tako povećavaju koheziju i ukupnu čvrstoću tla i druga geotehnička svojstva tla. Pucolanska reakcija prikazana je jednačinama od 8.1 do 8.4 (Sharma i dr. 2012):



## 8.1 Poboljšanje disperzivnog tla primenom elektrofilterskog pepela

U cilju sagledavanja mogućnosti primene disperzivnog tla razmatrana je izmena osobina sa elektrofilterskim odnosno letećim pepelom. Za poboljšanje disperzivnog tla korišćen je pepeo sa deponije termoelektrane “Nikola Tesla A” iz Obrenovca tzv. TENT A.

Treba napomenuti da je ovaj pepeo jeste po poreklu leteći međutim važno je napomenuti da je do deponije –odlagališta transportovan takozvanim hidro transportom u obliku suspenzije obogaćene sa dimnim gasovima. Materijal koji je korišćen za ispitivanje potiče sa ovih bazena – odlagališta u kojima je taložen leteći pepeo u obliku suspenzije. Mnogobrojnim istraživanjima je dokazano da ovako transportovani pepeo ima mala pucolanska svojstva.

Pepeo iz TENT A pripada klasi pepela F (prema standardu ASTM C618-05) tj. klasi pepela koji ima manji sadržaj CaO (<10%) i stoga slaba samovezujuća svojstva. Iz tih razloga potrebno je dodavanje aktivatora (kreč, portland cement i dr.) kako bi se obezbediladovljna količina kalcijum za odigravanje reakcije hidratacije između CaO i oksida  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Međutim, rezultati nekih ranijih istraživanja su pokazali da leteći pepeo može poboljšati svojstva tla i bez dodatnih aktivatora (Vukićević i dr. 2013, 2015; Kumar 2011).

Optimalni sadržaj pepela, koji se koristi za stabilizaciju, trebalo bi da omogući razvoj hemijske reakcije koja će dovesti do promene u mikrostrukturi disperzivnog tla. Većina ranijih istraživanja (Sharma i dr. 2012; Vukićević i dr. 2013, 2015; Kumar i Sharma 2004, Kumar 2011; Mackiewicz i dr. 2005; Terrel i dr. 1979; Cokca 2001; Zia i Fox, 2000.) pokazala je da je optimalni sadržaj pepela u rasponu od 10-30% zavisno od vrste tla, vrste pepela i efekta koji se stabilizacijom želi postići.

Mallikarjuna i Rama Subbarao (2012.), su takođe razmatrali koji je to optimalni sadržaj pepela u tlu, i istraživanja sproveli u veoma širokom rasponu dodatka pepela od 5% do 80% (0, 5, 10, 15, 20, 25, 40 i 80%). Sa ekonomskog aspekta i uštede prirodnih resursa ovako visok % pepela ima svoje opravdanje. Međutim, ova istraživanja su pokazala da ovako visok sadržaj pepela od 80% drastično smanjuje jednoaksijalnu čvrstoću. Generalno sa povećanjem % pepela povećava se maksimalna suva gustina ( $\rho_{dmax}$ ) i jednoaksijalna čvrstoća, a smanjuje optimalni sadržaj vode, granica tečenja, granica plastičnosti i indeks bubrenja tla. Naime, koji procenat pepela je optimalan za koje tlo

optimalan za koje tlo direktno zavisi od granice tečenja tla i sadržaja grubozrne frakcije (sadržaj čestica krupniji od  $425 \mu$ ). Kratak prikaz dobijenih rezultata dat je u tabeli 8.1.

**Tabela 8.1.** Prikaz optimalnog sadržaja pepela (modifikovan po Mallikarjuna i Rama Subbarao, 2012.)

Tlo	Granica tečenja $w_t$ (%)	Sadržaj čestica $>425 \mu$ (%)	Optimalni % dodatka pepela*
1	52	25	5
2	52	70	15
3	112	25	20
4	112	70	40

\*pepeo klase F (ASTM C618-03)

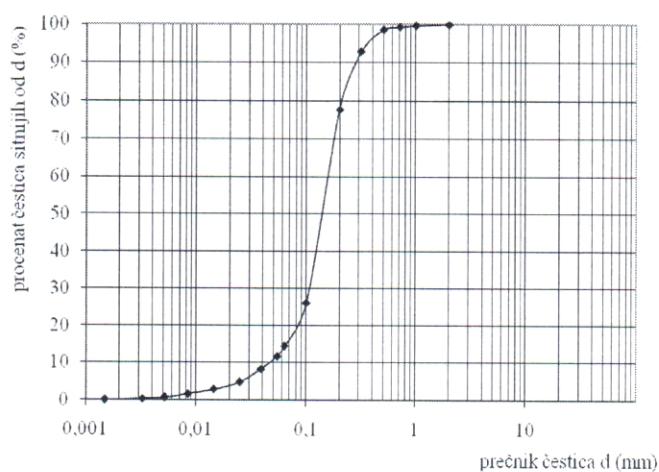
Na osnovu predhodnih studija i sa aspekta razmatranja poboljšanja karakteristika disperzivog tla pepelom ispitani su uticaji sa dodacima pepela od 10, 30 i 50%. Za stabilizaciju disperzivnog tla izabрано je tlo koje je pokazalo najitenzivniju disperzivnu reakciju u opitima za identifikaciju i klasifikaciju disperzivnog tla. To je uzorak K-1 koji predstavlja prašinastu glinu niske plastičnosti (prema USCS klasifikaciji), u konkretnom slučaju les I lesnog horizonta pozajmišta kod Kelebije koje se koristilo za izgradnju nasipa autoputa E-75. Detaljni rezultati geomehaničkih ispitivanja tla za potrebe preliminarne ocene disperzivnosti uzorka K-1 su već dati u poglavlju 6.6.

Hemijski sastav korišćenog pepela prikazani su u tabeli 8.2

Granulometrijski sastav uzorka deponijskog pepela TENT A ispitivan je kombinovanom metodom sejanja i areometrisanja prema standardu SRPS U.B1.018:2005. Deponijski pepeo TENT A predstavlja neplastični prašinasti pesak sa 13% frakcije prašine i 87 % frakcije peska. Rezultati granulometrijske analize prikazani su na dijagramu na slici 8.1.

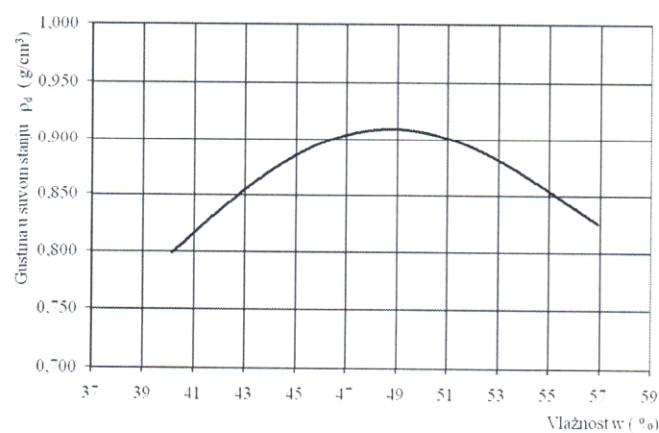
**Tabela 8.2.** Hemski sastav uzorka pepela sa deponije TENT A

Hemjska analiza	Sadržaj (%)
Gubitak žarenjem, uzorak u dostavljenom stanju	10.61
Gubitak žarenjem, uzorak iznad 45µm	10.76
Gubitak žarenjem, uzorak ispod 45µm	10.19
SiO <sub>2</sub>	56.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.77
TiO <sub>2</sub>	0.52
CaO	7.54
MgO	1.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.058
SO <sub>3</sub>	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.86
K <sub>2</sub> O	1.23
MnO	0.033
CO <sub>2</sub>	3.19
Nerastvorni ostatak HCl/Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	65.34
Nerastvorni ostatak HCl/KOH	26.84
Sadržaj reaktivnog SiO <sub>2</sub>	35.08
Sadržaj reaktivnog CaO	3.45



**Slika 8.1.** Granulometrijski sastav uzorka deponijskog pepela TENT A

Određivanje zbijenosti deponijskog pepela TENT A izvedena je prema standardnom Proctorovom opitu SRPS U.B1.038:1997 sa energijom zbijanja od  $E=600 \text{ kJ/m}^3$ . Dobijeni rezultati prikazani su na dijagramu na slici 8.2.



**Slika 8.2.** Odnos suve gustine i vlažnosti za uzorak deponijskog pepela TENT A

Dobijeni rezutati pokazuju male vrednosti maksimalne suve zapreminske mase  $\rho_{dmax}=0.909 \text{ g/cm}^3$ , i visoke vrednosti optimalne vlažnosti  $w_{opt}=48.5\%$ , što je u saglasnosti sa dosadašnjim iskustvima.

Uzorci mešavine disperzivnog tla i pepela veoma su pažljivo pripremani pod istim uslovima. Prethodno osušeni uzorci tla i pepela su u odgovarajućem suvom masenom odnosu pomešani i homogenizovani. Nakon toga, dodavana je masa destilovane vode koja odgovara optimalnoj vlažnosti. Uzorci mešavine tla i pepela su zbijani direktno u cilindru za pinhole opit statičkim zbijanjem na hidrauličkoj presi u tri sloja, isto kao i prilikom ispitivanja uzorka tla. Zbijanje uzorka vršeno je odmah nakon mešanja prema literaturi (Sharma i dr. 2012; Vukićević i dr. 2015; Mackiewicz i dr. 2005; Terrel i dr. 1979). Zbijanje treba otpočeti odmah nakon mešanja materijala, a najkasnije dva sata nakon mešanja. Kasnije zbijanje može imati negativan uticaj na stabilizaciju tla. Tokom procesa hidratacije leteći pepeo veže čestice u mešavini, te je tokom kasnijeg zbijanja potrebna veća energija zbijanja. Uzorci su čuvani i negovani u eksikatoru 7 dana kako bi se omogućio razvoj hemijske pucolanske reakcije (Bhuvaneshwari i dr. 2007; Vakili i dr. 2013a, b)

Na ovako pripremljenim uzorcima mešavine lesa i pepela, sprovedena su ispitivanja disperzivnosti opitima kao i na predhodnim uzorcima tla: opit grudvice, opit duplog hidrometrisanja i pinhole opit.

## **8.2 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 90:10 uzorak LP-10**

Za potrebe poboljšanja disperzivnog tla uzorku lesa K-1 je dodato 10% letećeg pepela. Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka mešavine LP-10 prikazani su u tabeli 8.3, i na dijagramima na slici 8.3.

U tabeli 8.4 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti, dobijeni opitom grudvice tj. vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u određenim vremenskim intervalima. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorci PL-10 potopljeni u destilovanu vodu i 0.001 M rastvor NaOH klasifikovan su kao slabo disperzivno tlo klase SD. Već nakon 2 minuta ispitivanja od potapanja uzorci su se potpuno raspali do najsitnijih čestica i došlo je do formiranja finog koloidnog zamućenja po dnu laboratorijske čaše. Za nijansu slabija reakcija uočena je u rastvoru NaOH. Nakon 4 časa posmatranja, oba rastvora su se izbistrla i jasno su se po dnu čaše izdavajale raspadnute čestice, tako da je tlo klasifikovano kao nedisperzivno tlo klase ND.

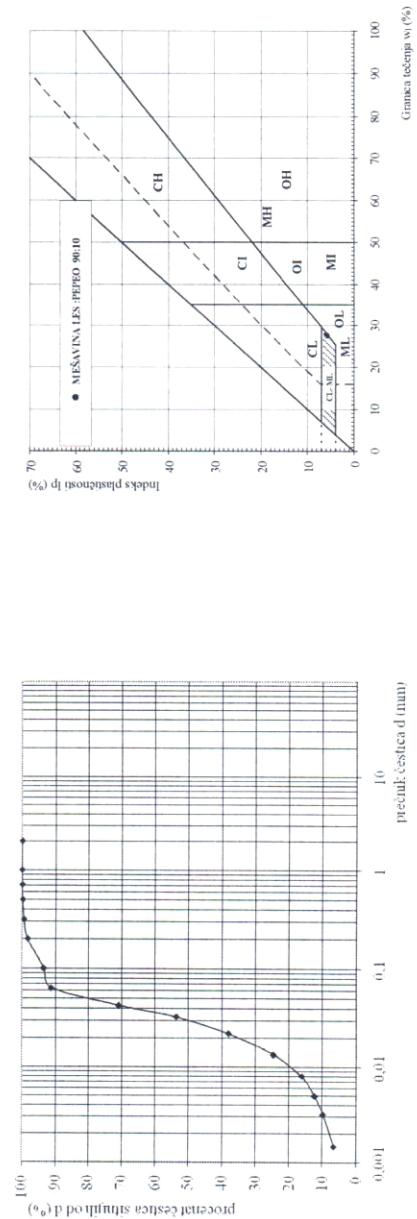
Na slici 8.4 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD iznosi PD=100% (standard BS 1377-5:1990), odnosno PD=108% (ASTM D 4221-99) što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno (Tabela 8.5).

U tabelama 8.6 i 8.7 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci mešavine lesa i pepela u odnosu 90:10 LP-10 ispitivani su pri stepenu zbijenosti Sz=100%. Ispitivanjem u pinhole aparatu pri hidrauličkom nivou H=50 mm i nakon ispitivanja od 5 min uzorci pokazuju intenzivnu disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao disperzivno tlo klase D1. Destilovana voda koja je protekla kroz

uzorak je intenzivnog zamućenja, sa dosta iznetih čestica. Protok prilikim ispitivanja je ravnomeran, i na završetku ispitivanja je veći od 1 ml/s. Prečnik cilindrične pore d nakon ispitivanja iznosio je od 4-10 mm.

Tabela 8.3. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine leša i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10

Uzorak	Granulometrijski sastav tla			Vlagost			Aterebergove granice			Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )			USCS klasifikacija tla
	glina mm (%)	prăšina mm (%)	pесак mm (%)	sljunka (%)	w	w <sub>p</sub>	w <sub>l</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	$\rho_{dmax}$	w <sub>opt</sub>		
les	9	85	6	/	14.5	27.3	19.6	7.7	1.66	1.753	15.1	CL	
pepeo	/	13	87	/	/	/	/	/	/	0.909	48.5	SM	
mešavina 90:10	8	82	10	/	27.7	21.8	5.9	/	1.668	1.844		SM	



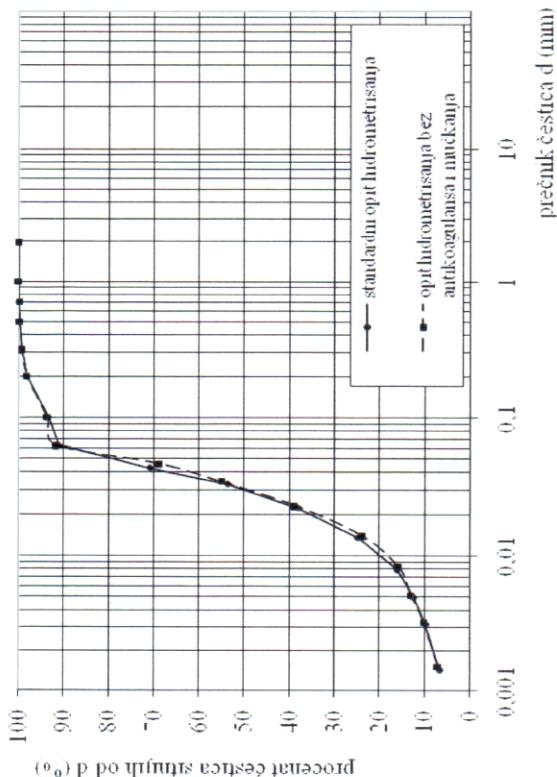
a) Granulometrijski sastav

b) Plasticnost

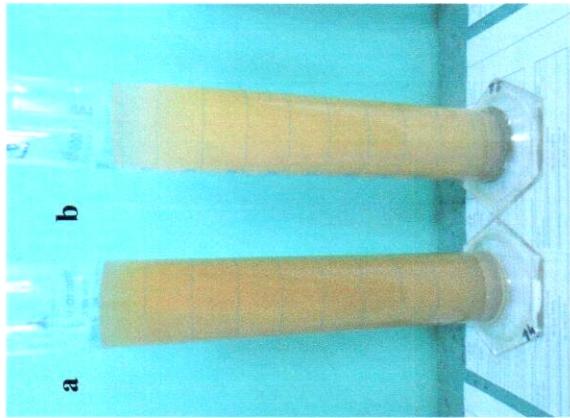
Slika 8.3. Prikaz rezultata laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine leša i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10

Tabela 8.4. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice mešavine leša i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	SD	SD	Vreme posmatranja(min, h)			
				2 min	20 min	1 h	4 h
Temperatura (°C)	20	20	20			20	20
Izgled uzorka							
Klasa disperzivnosti tla	SD	SD	SD	Vreme posmatranja(min, h)			
				1 h	4 h	6 h	24 h
Temperatura (°C)	19.5	19.5	20.0			20.0	20.0
Izgled uzorka							



Slika 8.4. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja, uzorak LP-10



Slika 8.5. Opit duplog hidrometrisanje tla uzorak LP-10

a) standardni opit hidrometrisanja  
b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja

Tabela 8.5. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzorak LP-10

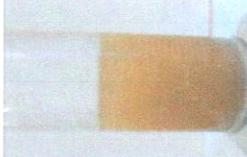
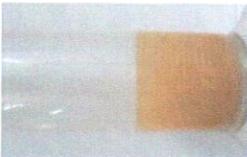
Uzorak: LP-10 MEŠAVINA LES:PEPEO 90:10	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
u destilovanoj vodi	8	13
u antikoagulantu	8	12
% disperzivnosti	100	108
Klasa disperzivnosti tla	D	D

Tabela 8.6. Određivanje klase disperzivnosti pinhole opitom za mešavinu leša i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10

UZORAK: MEŠAVINA LESA I PEPELA U ODNOSU 90:10		Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)				Klasa disperzivnosti
Uzorak/cilindar	Uzorkovanje	50	180	380	1020	Veličina pore d (mm)
7	1.20	tamna	mnogo			6-10* D1
8	1.51	tamna	mnogo			4-10* D1
9	1.52	tamna	mnogo			5-8* D1

\* maksimalni prečnik d (mm)

Tabela 8.7. Izgled uzorka nakon izvedenog pinhole optika za mešavinu lesa i pepela u odnosu 90:10, uzorak LP-10

Uzorak/cilindar	7	8	9
Zamucenje suspenzije			
Izlazna povšina			
Poduzni presek			
Prečnik pore d (mm)	6-10	4-10	5-8
Klasa disperzivnosti	D1	D1	D1

### **8.3 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30 uzorak LP-30**

Za potrebe stabilizacije disperzivnog tla uzorku lesa K-1 je dodato 30% letećeg pepela. Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka mešavine LP-30 prikazani su u tabeli 8.8, i na dijagramima na slici 8.6.

U tabeli 8.9 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti, dobijeni opitom grudvice tj. vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u određenim vremenskim intervalima. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

Uzorci LP-30 potopljeni u desilovanu vodu i 0.001 M rastvor NaOH klasifikovani su kao slabo disperzivno tlo klase SD. Nakon 2 minuta ispitivanja uzorci su se potpuno raspali do najsitnijih čestica. Od početka do kraja opita pokazivali su slabu disperzivnu reakciju u vidu jedva vidljivog koloidnog zamućenja oko grudvice tla.

Na slici 8.7 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD iznosi PD=125% (BS 1377-5:1990 standard), odnosno PD=100% (ASTM D 4221-99) što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno tlo klase D (Tabela 8.10). Na slici 8.8 dat je prikaz opit duplog hidrometrisanja tla: na slici a) menzura sa antikoagulansom, a na slici b) menzura bez antikoagulansa.

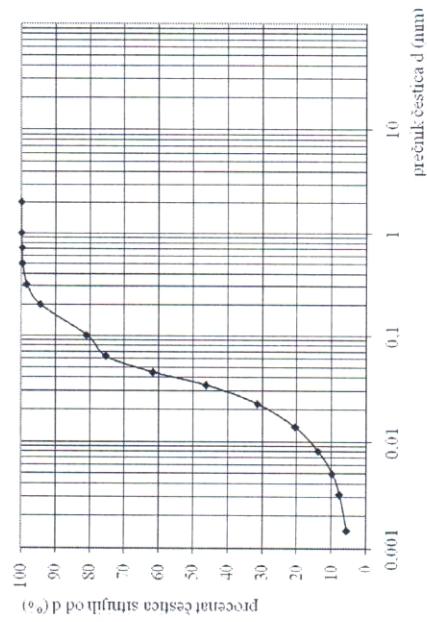
U tabelama 8.11 i 8.12 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30 ispitivanjem u pinhole aparatu, pri stepenu zbijenosti Sz=100%, pokazuju različitu disperzivnu reakciju i klasifikovani su kao srednje disperzivno tlo klase ND3 i ND4, i disperzivno tlo klase D2. Ispitivanje pri hidrauličkom nivou H= 50mm izvedeno je u II ciklusa od po 5 minuta, usled toga što pri prvom ciklusu nije postignut odgovarajući proticaj q<1 ml/s (prema zahtevima

standarda proticaj bi trebalo da iznosi  $1.0 < q < 1.4 \text{ ml/s}$ ). Uzorci su klasifikovani prema rezultatima dobijenim u drugom ciklusu.

Destilovana voda koja je protekla kroz uzorak je blago do srednje zamućena u prvom ciklusu ispitivanja pri hidaruličkom nivou  $H=50 \text{ mm}$ , sa tek ponekom iznetom česticom. U drugom ciklusu ispitivanja zamućenje postaje intenzivnije, kao i ispiranje i iznošenje čestica iz uzorka. Cilindrična pora, usled erodovanja čitavom dužinom uzorka, je nepravilo proširena prečnika od 5-17 mm.

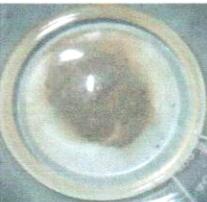
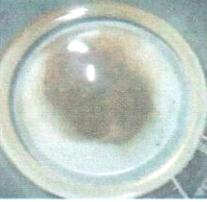
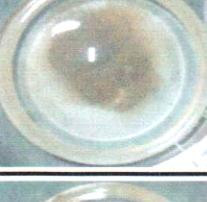
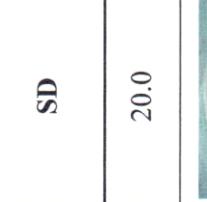
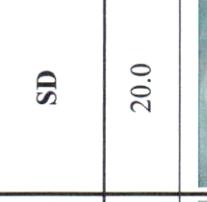
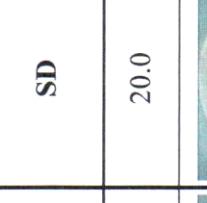
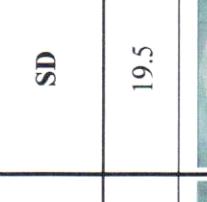
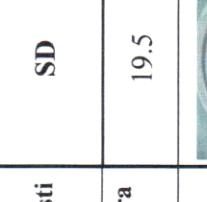
Tabela 8.8. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30

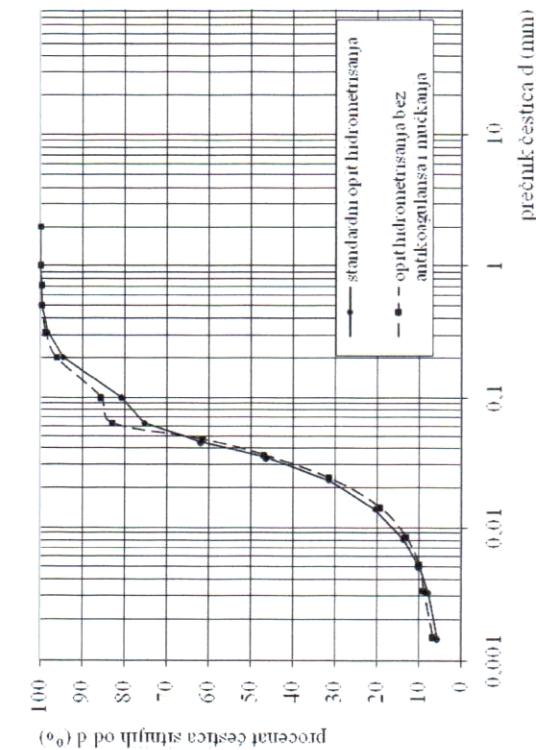
Uzorak	Granulometrijski sastav tla				Aterebertove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov optit (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )			USCS klasifikacija tla	
	Vlagost				Vlagost				Vlagost				
	glina	präšina	pesak	šljunak	frakcija	w	w <sub>f</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ <sub>dmax</sub>	w <sub>opt</sub>	
	<0.002 mm (%)	0.002-0.06 mm (%)	0.06-2.00 mm (%)	2.00-60.0 mm (%)									
les	9	85	6	/	14.5	27.3	19.6	(%)	(%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	CL
pepeo	/	13	87	/	/	/	/				0.909	48.5	SM
mešavina 70:30	6	68	26	/	/	28.9	/	/	/	/	1.499	25.12	SM



Slika 8.6. Granulometrijski sastav mešavine lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30

Tabela 8.9. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optiom grudvice mešavine leša i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
ASTM D 6572-00 Destilovana voda	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20
Izgled uzorka							
BS 1377-5:1990 tac.6.3 Rastvor 0.001 M NaOH	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Temperatura (°C)	19.5	19.5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Izgled uzorka							



Slika 8.7. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja uzoraka LP-30

Slika 8.8. Opit duplog hidrometrisanje tla, uzorak LP-30

- a) standardni opit hidrometrisanja
- b) opit hidrometrisanja bez antikoagulansa i mučkanja

Tabela 8.10. Rezultati opita duplog hidrometrisanja uzoraka LP-30

Uzorak LP-30: MEŠAVINA LES:PEPEO 70:30	% čestica sitnijih od 0.002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0.005 mm (ASTM D 4221-99)
u destilovanoj vodi	7,5	10
u antikoagulansu	6	10
% disperzivnosti PD	125	100
<b>Klasa disperzivnosti tla</b>	<b>D</b>	<b>D</b>



Tabela 8.11. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za mešavinu lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30

Probaj	Protok q (ml/s)	Zamućenje Boja/ Iznosene je čestica	Klasa disperzivnosti										
4	0.61	blago do srednje	malo	1.53	tamna	mnogo						17	ND3
5	0.60	blago do srednje	mnogo									15	ND4
5	0.53	blago do srednje	malo										
5	0.84	tamna	mnogo										
6	0.79	blago do srednje	malo									5-10*	D2
6	1.13	tamna	mnogo										
4/2	0.67	blago do srednje	malo									5-12*	D2
4/2	1.20	tamna	mnogo										
5/2	0.52	blago do srednje	malo									5-10*	ND4
5/2	0.78	tamna	mnogo										

\*maksimalni prečnik d (mm)

Tabela 8.12. Izgled uzorka nakon izvedenog pinhole opita za mešavinu lesa i pepela u odnosu 70:30, uzorak LP-30

Proba	4	5	6	4/2	5/2
Zamućenje suspenzije					
Izlazna povšina					
Poduzni presek					
Prečnik d (mm)	17	15	15	5-10*	5-10*
Klasa disperzivnosti	ND3	ND4	D2	D2	ND4

\*maksimalni prečnik d (mm)

#### 8.4 Prikaz dobijenih rezultata ispitivanja mešavine lesa i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Za potrebe stabilizacije disperzivnog tla uzorku lesa K-1 je dodato je 50% letećeg pepela. Dobijeni rezultati ispitivanja uzorka mešavine LP-50 prikazani su u tabeli 8.13, i na dijagramima na slici 8.9.

U tabeli 8.14 su prikazani rezultati određivanja klase disperzivnosti, dobijeni opitom grudvice tj. vizuelnom identifikacijom ponašanja tla u određenim vremenskim intervalima. Za svako merenje prikazana je odgovarajuća fotografija.

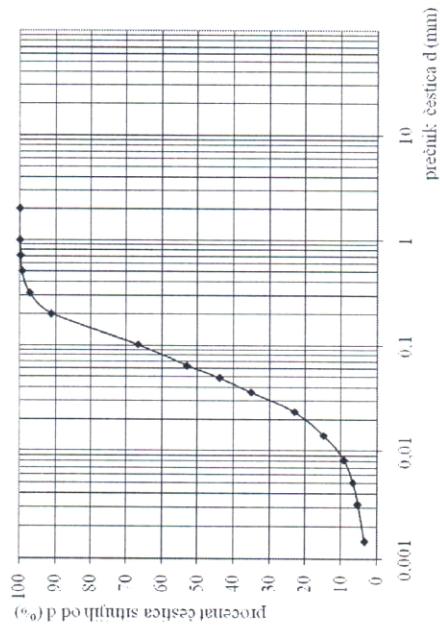
Uzorci LP-50 potopljeni u destilovanu vodu i 0.001 M rastvor NaOH klasifikovan su kao srednje disperzino tlo klase MD. Već nakon 2 minuta ispitivanja uzorci u oba rastvora, su se potpuno raspali do najsitnijih čestica i došlo je do nastanka finog koloidnog zamućenja po dnu laboratorijske čaše.

Na slici 8.10 je dat dijagram granulometrijskog sastava opita duplog hidrometrisanja. Procenat disperzivnosti PD iznosi PD=163% (BS 1377-5:1990 sandard), odnosno PD=136% (ASTM 4221-99) što ispitivano tlo klasificuje kao disperzivno (Tabela 8.15). Na slici 8.11 prikazan je opit duplog hidrometrisanja tla.

U tabelama 8.16 i 8.17 prikazani su rezultati određivanja klase disperzivnosti pinhole opitom. Uzorci mešavine lesa i pepela u odnosu 50:50, LP-50 ispitivani su pri stepenu zbijenosti Sz=100%. Ispitivanja su izvedena do hidrauličkog nivoa H=380 mm, pri čemu je voda i dalje ostala bistra, a protok je  $q>1.8\text{ml/s}$ . Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H=1020 mm nije bilo moguće izvesti zbog stalnog pada hidrauličkog nivoa. Zbog toga su uzorci mešavine lesa i pepela uslovno klasifikovani kao srednje disperzivno tlo klase ND3. Na jednom uzorku je izvedeno ispitivanje i pri hidrauličkom nivou H=1020mm, koji je klasifikovan kao srednje disperzivno tlo klase ND2. Cilindrična pora je erodovana celom dužinom uzorka, tako da prečnik pore nakon ispitivanja iznosi od 3-15 mm. Na slici 8.12 dat je dijagram zavisnosti protoka od stepena zbijenosti.

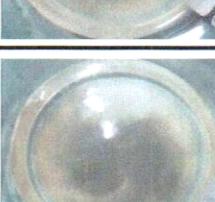
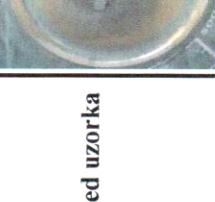
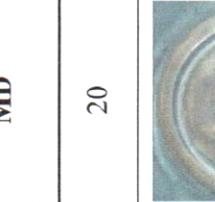
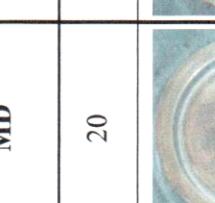
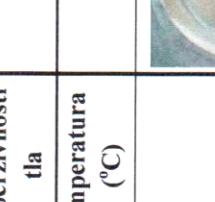
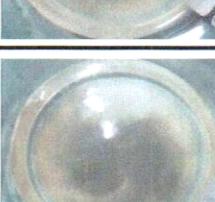
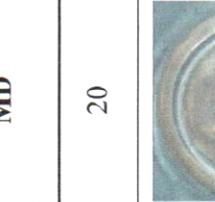
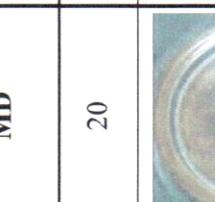
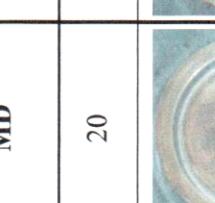
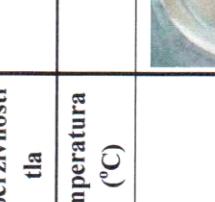
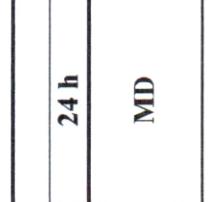
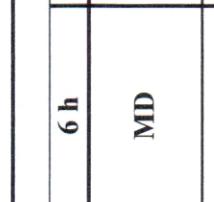
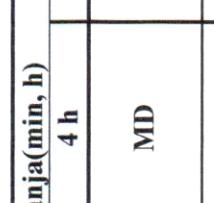
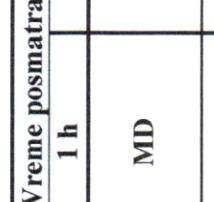
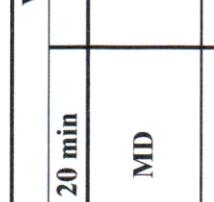
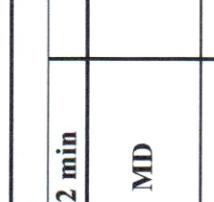
Tabela 8.13. Rezultati laboratorijskih geomehaničkih ispitivanja mešavine leša i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

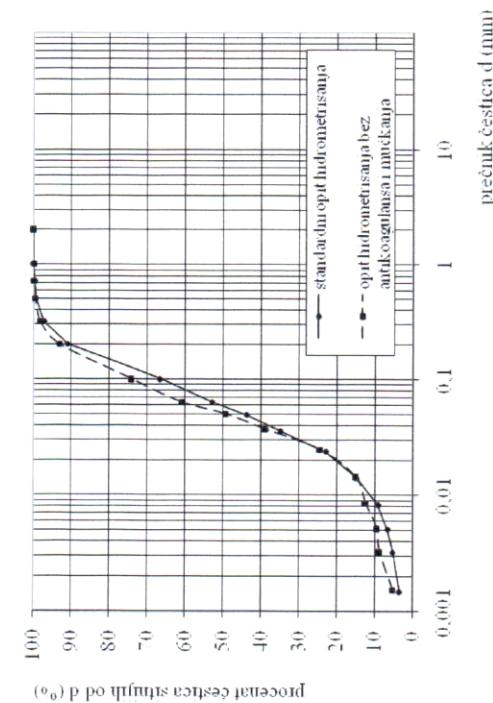
Uzorak	Granulometrijski sastav tla				Vlažnost frakcija	Atereebergove granice				Parametri zbijenosti tla- Proctorov opt (E=600 kJ/m <sup>3</sup> )	USCS klasifikacija tla
	glina	prasha	pesak	šljunak		w	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	
<0.002 mm	0.002-0.06 mm	0.06-2.00 mm	2.00-60.0 mm		w (%)	w <sub>l</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	I <sub>c</sub> (%)	$\rho_{dm}$ (g/cm <sup>3</sup> )	W <sub>opt</sub> (%)
les	9	85	6	/	14.5	27.3	19.6	7.7	1.66	1.753	15.1
pepeo	/	13	87	/	/	/	/	/	/	0.909	48.5
mešavina 50:50	4	50	46	/	/	/	/	/	/	1.331	31.8



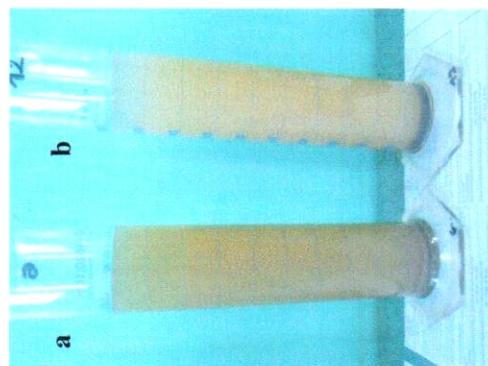
Slika 8.9. Granulometrijski sastav mešavine leša i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Tabela 8.14. Rezultati ispitivanja disperzivnosti tla optom grudvice mešavine lesa i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Metoda	Klasa disperzivnosti tla	Vreme posmatranja(min, h)					
		2 min	20 min	1 h	4 h	6 h	24 h
	MD	MD	MD	MD	MD	MD	MD
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20
Izgled uzorka							
	MD	MD	MD	MD	MD	MD	MD
Temperatura (°C)	19.5	19.5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Izgled uzorka							
	MD	MD	MD	MD	MD	MD	MD
BS 1377-5:1990 tač.6.3							
Rastvor 0.001 M NaOH							
Destilovana voda							
ASTM D 6572-00							



Slika 8.10. Granulometrijski sastav za opit duplog hidrometrisanja uzoraka LP-50



Slika 8.11. Opit duplog hidrometrisanja tla, uzorak LP-50

- a) standardni opit hidrometrisanja
- b) opit hidrometrisanja bez antikoagulanca i mučkanja

Tabela 8.15. Rezultati optita duplog hidrometrisanja uzorak LP-50

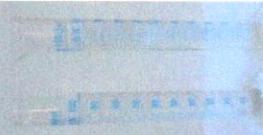
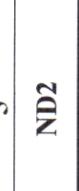
Uzorak: MEŠAVINA LES:PEPEO 50:50	% čestica sitnijih od 0,002 mm (BS 1377-5:1990 tač.6.4)	% čestica sitnijih od 0,005 mm (ASTM D 4221-99)
u destilovanoj vodi	6,5	9,5
u antikoagulantru	4	7
% disperzivnosti	163	136
<b>Klasa disperzivnosti tla</b>	<b>D</b>	<b>D</b>

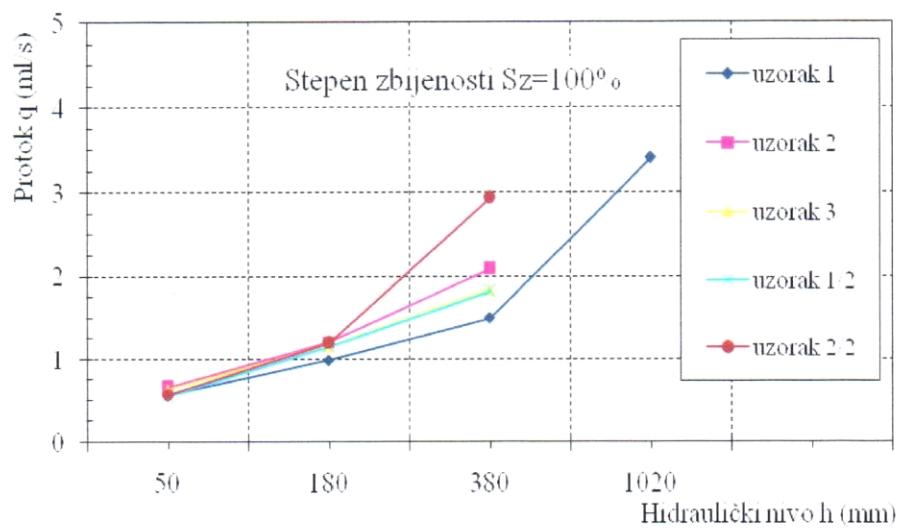
Tabela 8.16. Određivanje klase disperzivnosti pinhole optom za mešavinu lesa i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

**UZORAK: MEŠAVINA LESA I PEPELA U ODNOSU 50:50**

Uzorak/cilindar	Ispitivanja pri hidrauličkom nivou H (mm)						Klasa disperzivnosti	
	50			180				
	Protok q (ml/s)	Zamućenje Boja/ čestica	Iznosjenje čestica	Protok q (ml/s)	Zamućenje Boja/ čestica	Iznosjenje čestica		
1	0.56	bistra ne	0.99 malo	1.50 bistra	ne	3.41 bistra	malo	5 ND2
2	0.66	bistra malo	1.21 mного	2.09 bistra	malo	veliki protok ne može da se dostigne nivo	3-4 ND3	
3	0.63	bistra malo	1.17 много	1.84 bistra	много	veliki protok ne može da se dostigne nivo	5-8 ND3	
1/2	0.55	bistra malo	1.16 mного	1.82 bistra	много	veliki protok ne može da se dostigne nivo	15 ND3	
2/2	0.57	bistra malo	1.20 много	2.94 bistra	много	veliki protok ne može da se dostigne nivo	3-5 ND3	

Tabela 8.17. Izgled uzorka nakon izvedenog pinhole optira za mješavinu lesa i pepela u odnosu 50:50, uzorak LP-50

Proba	1	2	3	1/2	2/2
Zamućenje suspenzije					
Izlazna povšina					
Podužni presek					
Prečnik d (mm)	5	3-4	5-8	15	3-5
Klasa disperzivnosti	ND2	ND3	ND3	ND3	D1



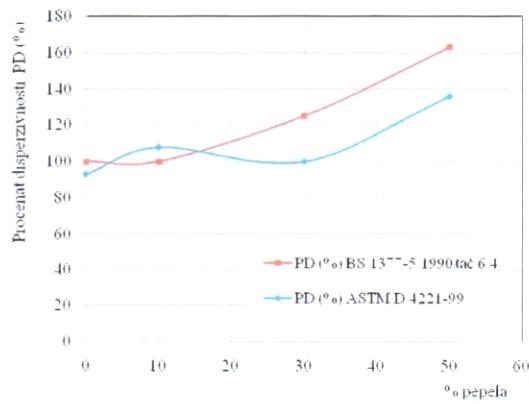
**8.12.** Zavisnost protoka i hidrauličkog nivoa za stepen zbijenosti Sz=100%

## 8.5 Zaključna razmatranja dobijenih rezultata poboljšanja disperzivnog tla pepelom

U tabeli 8.14 prikazani su sumirani rezultati ispitivanja disperzivnosti tla uzoraka disperzivnog tla K-1 homogeno pomešanog sa pepelom, koji potiče sa deponije termoelektrane "TENT A". Na pripremljenim uzorcima, pri različitim odnosima mešanja pepela i tla, sprovedena su ispitivanja disperzivnosti metodama ispitivanja, koje su primenjivane i ranije: opit grudvice, opit duplog hidrometrisanja i pinhole opit.

U tabeli 8.13 prikazani su rezultati ispitivanja disperzivnosti tla opitom grudvice, za uzorce disperzivnog tla sa pepelom u različitom odnosu od 10, 30 i 50%. Poređenja radi date su i fotografije ispitivanog disperzivnog tla (uzorak K-1). Sva ispitivanja prikazana su nakon 1 h od potapanja uzorka u čašu sa destilovanom vodom i rastvorom 0,001 M NaOH.

Nakon poboljšanja disperzivnog tla pepelom, klasa disperzivnosti na osnovu rezultata opitom grudvice, se promenila za dve tj. tlo je od klase visoko disperzivnog - HD prešlo u klasu slabog do srednje disperzivnog tla – SD/MD. Procentualni udio pepela nije imao uticaj na poboljšanje disperzivnih svojstava i klasifikaciju prema opitu duplog hidrometrisanja.



Slika 8.13. Procenat disperzivnost (PD) u zavisnosti od količine korišćenog pepela na osnovu opita duplog hidrometrisanja

Tabela 8.18. Klasa disperzivnosti ispitivanih uzoraka mešavine lesa K-1 i pepela "TENT A"

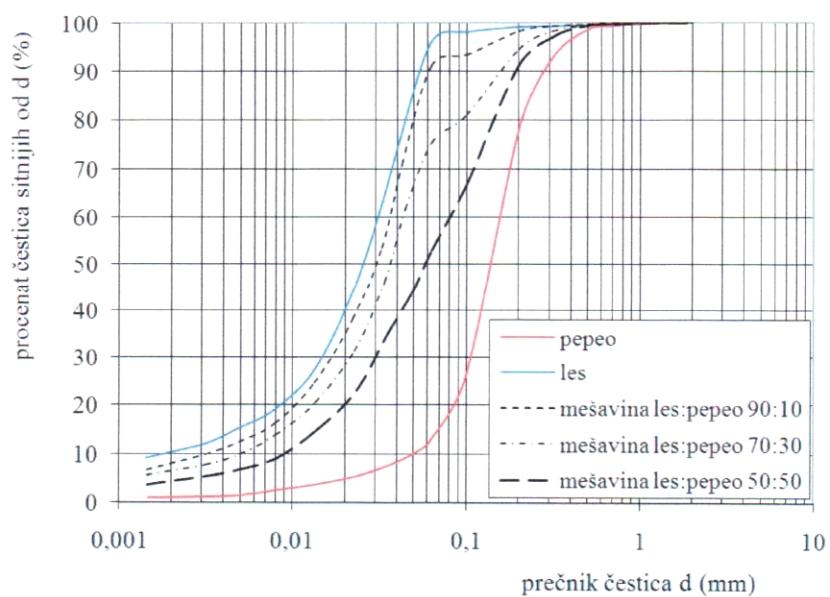
VRSTA OPITA ISPITIVANJA DISPERZIVNOSTI TLA									
Red.bro.	Uzorak	Vrsta tla	Geomehanika Klasifikacija	Opit grudvice		Opit duplog hidrometrisanja		Pinhole opit (ASTM D4647-98; BS 1377-5:1990 tač.6.2)	
				BS 1377- 5:1990 tač.6.3	ASTM D 6572-00	BS 1377- 5:1990 tač.6.4	ASTM D 4221-99	Stepen zbijenosti Sz=100 (%)	
				20 min	20 min	24 h min	klas a (%)	klas a (%)	Proba
				4 h	6	7	9	10	1
1	2	3	4	5	6	8	9	10	2
1	LP-50	mešavina pepeo:les 50:50	SM	MD	MD	MD	163	D	3
2	LP-30	mešavina pepeo:les 70:30	SM	SD	SD	SD	125	D	4
3	LP-10	mešavina pepeo:les 90:10	SM	SD	SD	SD	100	D	5
									6
									18

Tabela 8.19. Rezultati ispitivanja disperzivnosti optom grudvice za uzorku mešavine lesa K-1 i pepela "TENT A"

Metoda	/	IZGLED UZORKA (nakon 1 h posmatranja)							
		K-1	HD	LP-10	LP-30	LP-50			
Temperatura (°C)	22	20	SD	SD	SD	MD			
Izgled uzorka									
ASTM D 6572-00	BS 1377-5:1990 tač.6.3	Rastvor 0.001 M NaOH	Destilovana voda	Klasa disperzivnosti tla	HD	SD	SD	SD	MD
Temperatura (°C)	22	20	20	Izgled uzorka	20	20	20	20	20

Analizom rezultata dobijenih metodom duplog hidrometrisanja tla dobijeno je da sa povećanjem % pepela, povećava se procenat disperzivnosti, kako je to prikazano na slici 8.12.

Međutim, kako je zadatak poboljšanja tla upravo suprotan tj. smanjenje procenta disperzivnosti, analizirani su mogući uzroci ove pojave. Naime, sa povećanjem udela pepela u ukupnom granulometrijskom sastavu smanjuje se udeo glinovite i prašinaste komponente, a povećava udeo peskovite komponente. (Slika 8.13). Jedno od ograničenja u primeni metode duplog hidrometrisanja, odnosi se na granulometrijski sastav, tj. metoda se može primeniti samo na tla koja sadrže više od 12 % čestica sitnijih od 0,005 mm (Standard ASTM D 4221-99). Tla kod kojih je sadržaj finozrnih čestica ispod 12 %, ne sadrže dovoljno glinenih koloidnih čestica da bi pokazivala disperzivno ponašanje.



**Slika 8.14.** Granulometrijski sastav uzoraka pepela, lesa i mešavina lesa i pepela

Kako mešavine lesa i pepela sadrže ispod 12 % glinovite komponente, primena metode duplog hidrometrisanja za određivanje procenta disperzivnosti ovih materijala, nije adekvatna.

U istraživanjima Vakili-a A.H. i dr .(2013) razmatran je uticaj prirodnih pucolana i vremena stabilizacije uzoraka, na procenat disperzivnosti. Naime, dodavanjem 2, 4, 5, 6 i 8 procenta prirodnih pucolana disperzivnim glinama, dokazano je da nakon dodatka 5 % pucolana, procenat disperzivnosti počinje da raste. Takođe, potrebno je da prođe oko 90 dana od pripreme uzorka za stabilizaciju do ispitivanja, da bi se procenat disperzivnosti smanji sa 100% na 30 %. Dodavanjem disperzivnom tlu samo 3% cementa, procenat disperzivnosti se smanjuje na nulu za samo 7 dana.; a dodavanjem 2 % cementa za 14 dana. Kombinacijom 5% prirodnih pucolana i 1.5 % cementa, procenat disperzivnosti se smanjuje na nulu za 14 dana.

Vreme od pripreme ispitivanih uzoraka do ispitivanja bilo je 7 dana, što je možda nedovoljno za razvoj pucolanske reakcije i smanjenje procenta disperzivnosti.

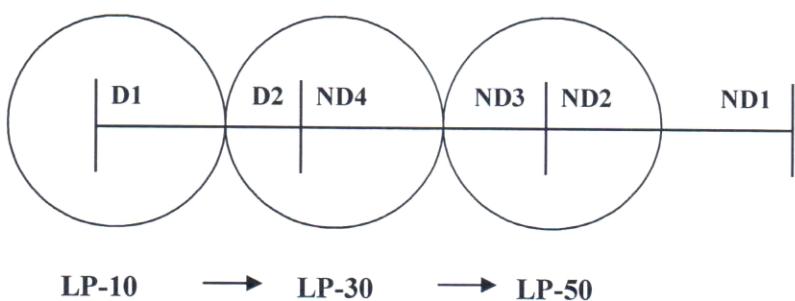
Za poboljšanje disperzivnih karakteristika tla korišćen je pepeo klase F koji nema samovezujuća svojstva, pa mu je neophodno dodavati hemijski aktivator kako bi došlo do reakcije. Na osnovu rezultata nekih ranijih istraživanja, koja su pokazala da leteći pepeo može poboljšati svojstva tla i bez dodatnih aktivatora, u istraživanjima nije korišćen aktivator. U svakom slučaju neophodno je povesti računa o kvalitetu korišćenog pepela. Tu se u prvom redu misli na starost kao i na mogućnost kontakta sa vodom (čak i vlažna atmosfera može znatno da doprinese degradaciji letećeg pepela)

Za potrebe modifikovanja disperzivnih karakteristika tla neophodno je dalja ispitivanja izvesti sa različitim dužim vremenskim intervalima od pripreme do početka ispitivanja uzorka, i uz dodavanje odgovarajućeg hemijskog aktivatora npr. kreča.

Ispitivanja sprovedena pinhole opitom na uzorcima disperzivnog tla tretiranog sa 10, 30 i 50 % pepela ukazuju da je materijal nakon poboljšanja postao nedisperzivan. Dodavanjem veće količine pepela umanjio se efekat disperzivnosti, (slika 8.14). Dodavanjem 10% pepela disperzivno tlo ne menja klasu, sa 30 % pepela disperzivno tlo menja klasu u srednje disperzivno tlo (ND4), a dodavanjem 50 % pepela u srednje disperzivno do nedisperzivno tlo (ND3, ND2) (slika 8.15).

Sa povećanje % pepela smanjuje se i vrednost protoka destilovane vode  $q$  kroz cilindrični otvor uzorka ispitivanog u pinhole aparatu. Tako za mešavinu sa dodatkom 10% pepela ispitivanje se završava već pri hidrauličkom nivou  $H=50$  mm, a vrednosti protoka iznose od  $q=1.20-1.52$  ml/s. Za mešavinu sa dodatkom 30% pepela ispitivanja su izvedena u trajanju od 10 min (dva ciklusa) na nivou  $H=50$  mm, i vrednosti protoka su iznosile od 0.52-0.79 ml/s u I ciklusu, odnosno 0.60-1.20 ml/s u drugom ciklusu. Na jednom uzorku ispitivanja su izvedena na hidrauličkom nivou  $H=180$ mm (tlo klasifikovano kao ND3) i vrednost protoka je iznosila  $q=1.53$  ml/s.

Za mešavinu sa dodatkom 50 % cementa, protok pri ispitivanju pri hidrauličkom nivou  $H=50$ mm iznosio je  $q=0.55-0.66$  ml/s, pri hidrauličkom nivou  $H=180$ mm protok je iznosio  $q=0.90-1.21$  ml/s, a pri hidrauličkom nivou  $H=380$ mm  $q =1.50-2.94$  ml/s. Pri hidrauličkom nivou  $H=1020$  mm protok je prevazilazio kapacitet aparata  $q>3.7$  ml/s.



**Slika 8.15.** Uticaj % pepela na smanjenje klase disperzivnosti određene pihole opitom

## 9. ZAKLJUČAK

Disperzivna finozrna tla predstavljaju koloidne disperzne sisteme, kod kojih usled specifičnog mineraloškog i hemijskog sastava pri strujanju vode dolazi do slabljenja strukturnih veza i odvajanja pojedinih čestica tj. deflokulacije. Iznošenjem i ispiranjem finozrnih čestica iz strukture, poroznost se povećava, formiraju se erozioni kanali i dolazi do pojave različitih oštećenja u objektima izgrađenim od ovakvog tla.

Disperzivna tla imaju povećani sadržaj rastvorenih natrijumovih jona u pornoj vodi. Natrijumovi joni povećavaju debljinu dvojnog difuznog sloja koji okružuje pojedinačne glinene čestice. Ovo za posledicu ima da su odbojni sile (elektrostatičke sile) veće od privlačnih sila (van del Walss-ove sile), usled čega čestice gline u prisustvu vode disperguju u suspenziji. Dakle, disperzivnost je direktna posledica fizičko-hemijskih promena u strukturi finozrnog glinovitog tla, koju nazivaju i „koloidnom erozijom“ (Sherard, 1976). Disperzivnost za posledicu ima pojavu unutrašnje erozije, koju treba razlikovati od drugih vidova unutrašnje erozije, koji nastaju kao posledica fizičko-mehaničkih karakteristika tla.

Disperzivna tla se ne mogu prepoznati uobičajenim identifikaciono – klasifikacionim opitima koji se primenjuju pri identifikaciji i klasifikaciji tla sa geomehaničkog stanovišta, kao što su granulometrijska analiza, opit plastičnosti i dr. Osnovne metode koje se koriste za ispitivanje disperzivnosti su:

- opit grudvice (crumb test),
- opit duplog areometrisanje (SCS)
- pinhole opit – opit veštački formirane cilindrične pore
- hemijski opiti za određivanje sadržaja natrijuma (ESP i SAR)

Opit grudvice i duplog hidrometrisanja kao indirektni pokazatelji diperzivnosti, koriste koloidnu zamućenost suspendovanih koloidnih čestica. Pinhole opitom simulira se uticaj tečenja vode duž pora u zemljanim nasutim objektima. Dok se identifikacija

pomoću hemijski opiti bazira na sadržaju natrijuma u ukupnom sadržaju rastvorenih soli u tlu.

Opit grudvice je vrlo jednostavan opit za izvođenje na terenu i laboratoriji, i može se koristiti za preliminarnu procenu disperzivnosti. Ukoliko je opitom grudvice utvrđeno da je tlo disperzivno, ono je disperzivno i u drugim opitim. Međutim, mnoga disperzivna tla ne pokazuju disperzivnu reakciju u opitu grudvice. Kako se opit grudvice zasniva na vizuelnoj identifikaciji ponašanja tla ovaj opit nosi visok stepen subjektivnosti. Poznavanje ograničenja sprovedene metode nameće potrebu za daljim istraživanjima, koja bi trebalo usmeriti u pravcu uticaja vlažnosti, zbijanja i vrste rastvora na rezultate opita grudvice.

Opit duplog hidrometrisanja predstavlja pouzdan opit za određivanje disperzivnosti finozrnog tla. Tla koja se u ispitivanjima ovim opitom identifikuju kao disperzivna, pokazuju disperzivnu reakciju i u drugim opitim.

Bez obzira na svoju jednostavnost, indirektne metode ispitivanja daju pogodnu preliminarnu ocenu o ponašanju tla u pogledu disperzivnosti. Na osnovu rezultata ovih ispitivanja može se prepoznati materijal kao i planirati dalja detaljnija ispitivanja u pogledu definisanja disperzivnosti i erodibilnosti tla.

Na osnovu izvedenih ispitivanja metodom duplog hidrometrisanja jasno je da nije moguće uspostavljanje korelace zavisnosti između stepena zbijanosti i klase disperzivnosti. Nasuprot tome, metoda grudvice po svom principu izvođenja daje mogućnost ocene disperzivnosti u zavisnosti od stepena zbijenosti. Međutim, izvedenim ispitivanjima nije uspostavljena funkcionalna zavisnost.

Pinhole opit ili opit veštački formirane cilindrične pore, je najčešće primenjivan fizički opit za određivanje disperzivnosti tla. Veličina protoka, intenzitet koloidnog zamućenja i veličina prečnika pore, su parametri koji se prate tokom i nakon ispitivanja, i na

osnovu kojih se vrši klasifikacija disperzivnog tla. Opit je jednostavan za izvođenje u laboratoriji i ponovljiv. U ovom radu su korišćeni veštački pripremljeni zbijeni uzorci, međutim pinhole opit se može uspešno primenjivati i na neporemećenim uzorcima.

Naime, pinhole opit je u suštini empirijski opit zasnovan na subjektivnoj proceni. Daje vrlo jasne rezultate pri klasifikaciji disperzivnog tla klase D1 i D2 i nedisperzivnog tla klase ND1 i ND2. Ispitivanja su pokazala da kod tla klase srednje disperzivnosti ND3 i ND4, se mogu javiti nedoumice u klasifikaciji. Ove nedoumice se javljaju usled nedovoljno definisanih kriterijuma klasifikacije, posebno kada su u pitanju male vrednosti proticaja.

Ispitivanja disperzivnosti sprovedena pinhole opitom na veštački pripremljenim uzorcima sa stepenom zbijenosti Sz=90, 92, 95, 98, 100 i 102% pokazala su da stepen zbijenosti nema značajnijeg uticaja na klasu disperzivnosti. Ukoliko je tlo disperzivno klase D1 i D2, ono će pokazivati istu disperzivnu reakciju pri svim stepenima zbijenosti. Isto tako, ako tlo nije disperzivno klase ND1 i ND2 ono će pokazivati nedisperzivnu reakciju nezavisno od stepena zbijenosti odnosno gustine tla. Pojedina srednje disperzivna tla, klase ND4 i ND3 mogu pokazivati pri nižim stepenima zbijenosti Sz=90-95% niži klasu disperzivnosti, u odnosu na klasu disperzivnosti izdvojenu pri višim stepenima zbijenosti Sz=98-120%. Ispitivanja su pokazala da se uglavnom radi o poboljšanju disperzivnosti tla za jednu klasu disperzivnosti.

Primenom odgovarajućih meliorativnih mera disperzivno tlo se može prevesti u nedisperzivno tlo, koje se dalje može koristiti za nasipanje. U cilju sagledavanja mogućnosti primene disperzivnog tla razmatrana je mogućnost poboljšanja disperzivnih osobina tla elektrofilterskim odnosno letećim pepelom. Za poboljšanje disperzivnog tla korišćen je pepeo sa deponije termoelektrane "Nikola Tesla A" iz Obrenovca tzv. TENT A koji je u određenoj količini od 10, 30 i 50 % dodavan dispezivnom tlu (K-1).

Nakon dodavanja pepela klasa disperzivnosti, na osnovu rezultata opitom grudvice, se promenila za dve tj. tlo je od klase visoko disperzivnog - HD prešlo u klasu srednje disperzivnog tla - SD. Procentualni udeo pepela nije imao uticaj na poboljšanje disperzivnih svojstava i klasifikaciju prema opitu duplog hidrometrisanja. Primena metode duplog hidrometrisanja za određivanje procenta disperzivnosti mešavine lesa i pepela u cilju poboljšanja disperzivnog tla nije dala očekuvane rezultate.

Ispitivanja sprovedena pinhole opitom na uzorcima disperzivnog tla tretiranog sa 10, 30 i 50 % pepela ukazuju da je materijal nakon toga postao nedisperzivan. Dodavanjem veće količine pepela umanjio se efekat disperzivnosti. Dodavanjem 10% pepela disperzivno tlo ne menja klasu, sa 30 % pepela disperzivno tlo menja klasu u srednje disperzivno tlo (ND4), a dodavanjem 50 % pepela u srednje disperzivno do nedisperzivno tlo (ND3, ND2).

Za poboljšanje disperzivnih karakteristika tla korišćen je pepeo klase F koji nema samovezujuća svojstva, pa mu je neophodno dodavati hemijski aktivator kako bi došlo do reakcije. Zbog toga je neophodno povesti računa o kvalitetu pepela koji se koristi za potrebe poboljšanja disperzivnih karakteristika tla. Tu se u prvom redu misli na starost kao i o mogućnostima kontakta pepela sa vodom (čak i vlažna atmosfera znatno doprinosi degradaciji letećeg pepela).

## LITERATURA

Abbasi, N., Nazifi, M. H. (2012). Assessment and Modification of Sherard Chemical Method for Evaluation of Dispersion Potential of Soils, *Geotechnical and Geological Engineering, Technical Note*, DOI 10.1007/s10706-012-9573-7.

Aitchison, G. D., Wood, C. C. (1965). Some Interactions of Compaction, Permeability and Post-Construction Deflocculation Affecting the Probability of Piping Failures in Small Dams, *Proceedings 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II*, 442-446.

Almog, E., Kelham, P., King, R. (2011). Models of dam failure and monitoring and measuring techniques, *Defra Flood and Coastal Erosion Risk Management Research and Development Programme , Project: SC080048/R1*.

Arulanandan, K., Heinzen R. T., (1977). Factors influencing erosion in dispersive clays and methods of identification, *Proceedings of International Symposium on Erosion and Solid Matter Transport in Land Waters, Paris, UNESCO and IAHS (International Association of Hydrological Sciences), Publication No.122*, 75-81.

ASTM Standard D 6572-06 (2006). Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by Crumb Test, *Annual Book of ASTM Standards*.

ASTM Standard D 4221-99 (1999). Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clay Soils by Double Hydrometer, *Annual Book of ASTM Standards*.

ASTM Standard D 4647-93 (1998). Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinehole Test, *Annual Book of ASTM Standards*.

ASTM Standard C 618-05 (2005). Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.

Atkinson, J. H., Charles, J. A., Mhach, H. K., (1990). Examination of erosion resistance of clays in embankment dams, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.23, No.2, 103-108; doi: 10.1144/GSL.QJEG.1990.023.02.01.

Belarbi, A., Zadjaoui, A., (2013). Dispersive Clay- Influence of Physical and Chemical Properties on Dispersion Degree, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 18, 1727-1738.

Bell F. G., (1992). Engineering properties of Soils and Rocks – Ch. 6.7: *Dispersive soils*, Wiley, 182-190.

Bell, F. G., Maun, R. R. (1994). Dispersive soils: a review from South African perspective, *Quarterly Journal of Engineering Geology* 27, 195-210.

Bergaya, F., Lagaly, G. (2013). Developments in Clay Science – Volume 5A, *Handbook of Clay Science*, Elsevier Ltd, Amsterdam.

Bhuvaneshwari, S., Soundara, B., Robinson, R. G., Gandhi, S. R. (2007). Stabilization and Microstructural Modification of Dispersive Clayey Soils, *First International Conference on Soil and Rock Engineering, Srilankan Geotechnical Society, Colombo, Sri Lanka*, 1-7.

- Bezzazi, M., Khamlich, A., Vera, M. P., Cintas Rubio, M. D., Olegario, C. L. (2010). A Simplified Analytical Modeling of the Hole Erosion Test, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 3 (4), 765-768.
- Blais, J. P. (2005). Typologi de l'erosion interne et erosion interne des digues fluviales: une courte revue bibliographique, *Ingenieries No. Special*, 65-70.
- Briaud J. (2008). Case Histories in Soil and Rock Erosion:Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander,Normandy Cliffs, and New Orleans Levees, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1425-1447.
- British Standard (1990). BS 1377-5:1990, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes - Part 5: Compressibility, permeability and durability tests; It.6 Determination of dispersibility, 15-19.
- Brown J., Bridle R. (2008). Progress in assessing Internal Erosion, *Proceedings of the 15th Conference of the British Dam Society: Ensuring Reservoir Safety into the Future*, Tomas Telford, University of Warwick, 29-38.
- Carey, B., (2014). Understanding dispersive soils, Landcare Queensland,  
<http://landcare.org.au/resources-links/achieving-soil-conservation-in-queensland>.
- Chorom, M., Rengasamy, P., Murray, R. S., (1994). Clay Dispersion as Influenced by pH and Net Particle Charge of Sodic Soils, *Australian Journal of Soil Research* Vol.32, 1243-1252; DOI: 10.1071/SR9941243.
- Clark, M. R. E., (1986). Mechanics, Identification, Testing, and Use of Dispersive Soil in Zimbabwe.

Cokca, E. (2001). Use of Class C Fly Ashes for the Stabilization of an Expansive Soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 7, 568-573.

Courivaud J. R., Fry J. J., Bonelli S., Benahmed N., Regazzoni P. L., Marot D., (2009). Measuring the erodibility of soil materials constituting earth embankments: a key input for dams and levees safety assessment, Hydro 2009, Lyon, France, 9.  
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00516263/en>

Čaki, L., (1996). Geotehničke karakteristike procesa brenja Beogradskih tercijarnih glina, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, str.137.

Decker, R. S., Dunnigan, L. P., (1977). Development and Use of the SCS Dispersion Test, *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Engineering Projects, ASTM Special Technical Publication No. 623, American Society for Testing and Materials*, 94-109.

Dixit, M., Gupta, S. L., (2011). Problems in characterization and identification of dispersive soils - a case study, *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol.04, No 06 SPL, 143-146.

Dunnigan, P. L., (1987). Portable Pinhole Test Apparatus, *Soil Mechanics Note No.12, 210-VI US Department o Agriculture – Soil Conseration Service, Engineering Division*, 1-20.

Đoković, K., Rakić, D., Ljubojev, M., (2013). Estimation compaction parameters of soil based on Atterberg limits, *Journal of Mining and Metallurgy Engineering Bor, Mining and Metallurgy Institute Bor*, Vol. 4/2013, 1-8.

- Đoković, K., Čaki, L., Šušić, N., (2013). Preliminary tests for determining dispersion of fine - grained soils, *8th International Conference - Assessment, Maintenance and Rehabilitation of Structures and Settlements, Borsko jezero, Serbia*, 361–368.
- Đoković, K., Čaki, L., Šušić, N. (2013). Assessing soil dispersivity based on classification tests, *5th International Conference – Geotechnics in Civil Engineering, Sokobanja, Serbia*, 197-204.
- Đoković, K., Ćirilović, J., Šušić, N., Hadži-Niković, G. (2014). Application of regression analysis for prediction of compaction parameters of clay soils, *Proceedings of the 4th Symposium of Macedonian Association for Geotechnics, Macedonia, Struga*, 169-176.
- Đoković, K., Čaki, L., Šušić, N., Hadži-Niković, G. (2014). Modifikovani pin-hole aparat za određivanje disperzivnosti finozrnog tla, *Tehnička i razvojna rešenja - bitno poboljšan postojeći proizvod, Odluka Instituta IMS br. 3-15670 od 31.12.2014.*
- Đoković, K., Ćirilović, J., Šušić, N., Hadži-Niković, G. (2015). Correlations dependence of index properties and compaction parameters of soil, *Proceedings of the 9th International Conference: Assesment, Maintance and Rehabilitation of Structures and Settlements, Zlatibor, Serbia*, 99-106.
- Đoković, K., Čaki, L., Šušić, N., Hadži-Niković, G. (2015). Research dispersive finegrain soils by pinhole test, *Proceedings of the 6th International Conference Geotechnics in Civil Engineering, Vršac, Serbia*, 169-174.
- Đoković, K., Čaki, L., Šušić, N., Hadži-Niković, G. (2016) Identification and classification of dispersive fine - grained soils, *Proceedings of the 6th International Conference GNP 2016: Civil Engineering – Science and Practice, Žabljak, Montenegro*, u štampi.

Emerson, W. W., (1967). A Classification of Soil Aggregates Based on Their Coherence in Water, *Australian Journal of Soil Research*, Vol.5, 47-57.

Emerson W. W. (1994). Aggregate Slaking and Dispersion Class, Bulk Properties of Soil, *Australian Journal of Soil Research*, Vol.32, 173-184.

EN 14227-4:2014 (2014). Mešavine vezane hidrauličkim vezivom - Specifikacije; Deo 4: Leteći pepeo za mešavine vezane hidrauličkim vezivom.

Engineer Manual- US Army Corps of Engineers (USACE) - Engineering and Design (2004) *General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams*, EM 1110-2-2300 30; <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/>.

Fauzilah, I., Zainab, M., Mazidah, M., (2008). A Study on the Mechanism of Internal Erosion Resistance to soil Slope Instability, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.13, 12.

Fell, R., Chi Fai Wan C. F., Cyganiewicz J., Foster M. (2003). Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 307-314; DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307).

Fell, R., MacGregor P., Stapledon D., Bell G. (2005). Geotechnical Engineering of Dams, A. A. Balkema, Leiden, The Netherlands, 905.

Fell, R., Fry J. J. (2013). State of The Art on the Likelihood of Internal Erosion of Dams and Levees by Means of Testing, Ch.1 - Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees , Editor Stephane Bonelli, Wiley.

- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents, *Canadian Geotechnical Journal Vol. 37(5)*, 1000–1024.
- Fry, J. J., Vogel, A., Royer, P., Courivaud, J. R., (2012). Dam failures by erosion: lessons from ERINOH data bases, *ICSE6, Paris*, 273-280.
- Garner, S. J., Sobkowicz, J. C., (2002). Internal instability in gap-graded cores and filters, *Proc. 2002 annual CDA conference, Victoria, B.C., Canada*.
- Ghataora G. S., Burns B., Hassan M., Morris M., (2007). Soil piping tests on Thorngumbald flood embankment, *Defra and Environment Agency, Science Report FD2411/TR3*, 30; [www.defra.gov.uk/environ/fcd/reseach](http://www.defra.gov.uk/environ/fcd/reseach)
- Grim, R. E., (1968). *Clay Mineralogy, second ed. McGraw-Hill, New York*.
- Hadži-Niković, G., Đoković, K., Vujić, S. (2015). “Effect of Absorption on Active Pressure in Flourey Soil”, *Journal of Mining Science, Vol. 51, No. 2*, 253-260.  
DOI: 10.1134/S1062739115020064
- Haghghi, I., (2012). Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion des sols: développement d'essais et applications pratiques, *THÈSE DE DOCTORAT, Université Paris-EST*.
- Hanson, G. J., (1992). Erosion Resistance of Compacted Soils, *Transportation Research Record No. 1369, Advances in Geotechnical Engineering*, 26-30.
- Hardie, M., (2009). Dispersive soils and their Management, *Technical Reference Manual, Sustainable Land Use, Department of Primary Industries and Waterable , Tasmania*.

- Harmse H. J, Gerber F. A., (1988). A proposed procedure for the Identification of Dispersive Soils, *Proceedings of Second International Conference on Case Histories In Geotechnical Engineering, St. Louis, Paper No. 3.14*
- Heinzen, R. T., Arulanandan, K. (1977). Factors Influencing Dispersive Clays and Methods of Identification, *Special Technical Publication ASTM STP No 623: Dispersive clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Project, 202-217.*
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. (1981). Introduction to Geotechnical Engineering, *Prentice Hall.*
- ICOLD (1990). Dispersive soils in embankment dams, *International Commission on Large Dams, Paris, Bulletin No.77.*
- ICOLD (2011) Small dams - Design, Surveillance and Rehabilitation, *International Commission on Large Dams, Paris, Bullten No.157.*
- Kezdi, A., (1979). Soil physics – selected topics, *Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, p.160*
- Kinney, J. L., (1979). Laboratory Procedures for Determining the Dispersibility of Clayey Soils, *Bureau of Reclamation Report No. REC-EERC 70-10, 20.*
- Knodel, P. C.,(1991). Characteristics and Problems of Dispersive Clays Soils R-91-9, *US Bureau of Reclamation, 1-18.*
- Lambe T. W., Whitman V. R., (1969). Soil Mechanics, *John Wiley, p.553.*

- Lashkaripour G. R., Khamehchiyan M., Soloki H. R., Rahimi E., (2009). The characteristics of dispersive soils in Sistan plain, Eastern Iran, *Journal of Applied Geology, Vol.3., No.1*, 73-87.
- Lowell, C. W., Wiltshire, R., (1987). Engineering Aspects of Soil Erosion, Dispersive Clays and Loess, *ASCE Geotechnical Special Publication GSP 10 - Proceedings of Simposium-Soil Properties Committee at the Geotechnical Engineering Division of the ASCE, New Jersey*.
- MacIver, B. N., Hale, G. P., (1986). Pinhole erosion test for identification of dispersive clays, *Appendix XIII, Engineer Manual EM 1110-2-1906, Change 1, 1980, Engineering and Design Laboratory Soils Testing, Headquarters Department of the Army Office fthe Chief at Engineers*.
- Mackiewicz S. M., Ferguson, E. G., (2005). Stabilization of soil with self-cementing coal ashes, *2005 World of Coal Ash (WOCA)*, Lexington, 1-7.
- Maharaj A., (2011). The Use of the Crumb Test as a Preliminary Indicator of Dispersive Soils, *Proceedings of the 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 299-306.
- Maharaj A., (2012). The Chemical Analysis of Soils for Identification of Dispersivity, *Unsaturated Soils: Research and Applications*, Springer, Naples, Italy, Part 4, 393-399.
- Maharaj A., Paige-Green P. (2013). The SCS Double Hydrometer Test in dispersive soil identification, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*, 389-392.

Mallikarjuna Rao K., Rama Subbarao G. V., (2012) Optimum fly ash for mechanical stabilization of expansive soils using 22 factorial experimental design, *Nat Hazards* Vol. 60, str.703–713; DOI 10.1007/s11069-011-0040-1.

Marković G. (1984). Geotehničke karakteristike lesnih terena sa posebnim osvrtom na urbanu gradnju, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakutet, Univerzitet u Beogradu, str.137.

Mattsson, H., Hellström, J. G. I., Lundström, T. S., (2008). On Internal Erosion in Embankment Dams, A literature survey of the phenomenon and the prospect to model it numerically, Research Report 54.

Mc Cook, D., Mc Elroy, C., (1991). Dispersive Clays – Soil Mechanics, *Note No.13, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division*, 1-24.

Mitchell K. J. (1976). Fundamentals of Soil Behavior, *University of California, Berkeley, John Wiley and Sons*, p.422.

Nadal-Romero, M. E., Verachtert, E., Poesen, J., (2009). Pinhole test for identifying susceptibility of soils to piping erosion: effect of water quality and hydraulic head, *International Conference on Desertification in memory of professor John B: Thornes, Murcia*, 351-354.

Nadal-Romero, M. E., Vearchtert, E., Poesen, J., (2011a). Pinhole test for identifying susceptibility of different horizons in loess-derived soils to piping erosion, *Landform Analysis*, Vol. 17, 131–134.

Nadal-Romero, M. E., Verachtert, E., Maes, R., Poesen, J. (2011b). Quantitative assessment of the piping erosion susceptibility of loess-derived soil horizons using the pinhole test, *Geomorphology*, Vol.135, 66–79;

doi: 10.1016/j.geomorph.2011.07.026

Nikolić, D., Stojanović, V., Zamurović, M. (1978). Primena metode pinhole testa za proučavanje disperzivnosti glina, *Savez jugoslovenskih laboratorijs za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija - SJLIIMIK, XVI kongres, I-51, Vrnjačka Banja, 1-13.*

Nonveiller, E. (1983). Nasute brane – Projektovanje i građenje, *Školska knjiga, Zagreb*, str.359.

Paige-Green P., (2008). Dispersive and Erodible Soils -Fundamental differences, *Proceedings of Conference – Problem Soils in South Africa, Midrand*, 59-65.

Pham, T. L., (2008). Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide, *Doctorat Geotechnique, Laboratoire central des Ponts et Chaussees (LCPC), ParisTech*, p.214.

Pham, T. L., Christophe, C., Duc, M., Reiffsteck, P., Guedon, S. (2008). Development of a new test to characterize dispersion of soil, *Fourth International Conference on Scour and Erosion*, 436-441.

Phani Kumar, B., Sharma, R., (2004). Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, Iss. 7, 764-767.

Prasanna Kumar, S.M., (2011). Cementitious compounds formation using pozzolans and their effect on stabilization of soils of varying engineering properties, *2011 International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE*, Singapore, 212-215.

Raine, S., Loch, R. J. (2003). What is a sodic soil?, Identification and management options for construction sites and disturbed land, *In Roads Structures and soils in rural Queensland, Queensland Department of Main Roads, Brisbane*, 14.

Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, *Agriculture Handbook No. 60, United States Department of Agriculture*.

Richards, K. S., Reddy K. R., (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams, *Bull Eng Geol Environ* 66, 381–402, DOI 10.1007/s10064-007-0095-0.

Richards, K. S. (2012). Internal Erosion-Potential Failure Modes, [www.damsafety.org/media/Documents/FEMA/TS19\\_FiltersDrainsGeotex\\_EM2012feb/Richards\\_InternalErosion.pdf](http://www.damsafety.org/media/Documents/FEMA/TS19_FiltersDrainsGeotex_EM2012feb/Richards_InternalErosion.pdf).

Richards, K. S., Reddy, K. R. (2012). Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils, *Geotechnique* 62, No. 10, 933–942; <http://dx.doi.org/10.1680/geot.11.P.058>.

Ronnqvist, H. (2010). Predicting Surfacing Internal Erosion in Moraine Core Dams, *PH Thesis, Royal Institute of Technology KH, Stockholm, Sweden*, p58.

Schafer, G. J., (1978). Pinhole Test for Dispersive Soil - Suggested Change, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 104, No. 6, 760-765.

Sharma, N. K., Swain, S. K, Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 30, Iss. 5, 1197-1205; DOI 10.1007/s10706-012-9532-3.

- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker R. S., Steele E. F.(1976a). Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.102, No.GT1*, 69-85.
- Sherard, J. L., Decker, R. S., Dunnigan, L. P. (1976b). Identification and Nature of Dispersive Soils, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol.102, No.GT4*, 287-301.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S. (1977). Some Engineering Problems with Dispersive Clays, *Special Technical Publication ASTM STP No 623: Dispersive clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Project*, 3-12.
- Sherard, J. L. (1986). Hydraulic Fracturing in Embankment Dams, *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering, Vol.112, Iss. 10*, 905-979.
- Sherard, J. L., Decker, R. S., Ryker, N. L. (1992). Piping in Earth Dams of Dispersive Clays, *ASCE Geotechnical Special Publication GSP 32, No.32, (part Embankment Dams)*, 55-93.
- Sobkowicz, J., Byrne, P., Leroueil, S., Garner, S. (2000). The effect of dissolved and free air on the pore pressures within the core of the WAC Bennett dam, *Proc. 53rd Canadian Geotechnical Conference. Montreal, Canada*, 87-95.
- Sridharan, A., Sudhakar, M. R., Dwarkanath, H. N. (1992). Dispersive Behavior of Nonswelling Clays, *Geotechnical Testing Journal, Vol.15, No.4*, 380-386.
- Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J., Mitchell, J. K., Thompson, M. R. (1979). Soil stabilization in pavement structures: A user's manual, *FHWA-IP-80-2, Vol. 2*.

Tosun, H., Savas, H. (2009). The Mechanized Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils for Earthfill Dams, *2nd International Conference – Long Term Behaviour of Dams, Gratz, Austria*, 537-541.

Umesh, T. S., Dinesh, S. V., Sivapullaiah, P. V. (2011). Characterization of Dispersive Soils, *Materials Sciences and Application*, Vol. 2, 629-633.  
doi:10.4236/msa.2011.26085 (<http://www.SciRP.org/journal/msa>).

US Bureau of Reclamation (2012). Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis, Ch.26 Internal Erosion Risk;  
<http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html>.

Vakili A. H., Selamat M. R., Moayedi H., Amani, H. (2012). Stabilization of Dispersive Soils by Pozzolan, *Forensic Engineering 2012*, 726-735.  
doi: 10.1061/9780784412640.077

Vakili, A. H., Selamat, M. R., Moayedi, H. (2013). Effects of using pozzolan and Portland cement in the treatment of dispersive clay, *The Scientific World Journal*, Vol. 2013 Article 547615. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/547615>.

Van Olphen H. (1963). An introduction to clay colloid chemistry, *John Wiley and Sons, New York*.

Velasco E. (2013). Scanning Electron Microscope (SEM) as a means to determine dispersibility, *Graduate Theses and Dissertations Paper 13396., Iowa State University, Digital Repository Iowa State University*, 204.

Volk, G. M. (1937). Method of Determination of the Degree of Dispersion of the Clay Fraction of Soils, *Proceedings Soil Science Society of America*, Vol. 2, 561.

- Vukićević, M., Maraš-Dragojević, S., Jocković, S., Marjanović, M., Pujević, V. (2013). Research Results of Fine-Grained Soil Stabilization Using Fly Ash from Serbian Electric Power Plants, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*, 3267-3270.
- Vukićević, M., Pujević, V., Marjanović, M., Jocković, S., Maraš-Dragojević, S. (2015). Stabilization of fine-grained soils with fly ash, *Gradjevinar* 67, 761-770.
- Vuković, M., Pušić, M. (1986). Filtracione deformacije i stabilnost tla, *Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“*, posebna izdanja knjiga 31, Beograd, str.36.
- Zia, N., Fox, P. J. (2000). Engineering properties of loess-fly ash mixtures for roadbase construction, *Transportation Research Record 1714, Transportation Research Board, Washington, DC*, 49–56. doi: <http://dx.doi.org/10.3141/1714-07>.

## BIOGRAFIJA

Ksenija S. Đoković je rođena 22. jula 1966. u Pančevu. Osnovnu i srednju Građevinsko tehničku školu završila je sa odličnim uspehom u Beogradu. Nosilac je diplome "Nikola Tesla" iz oblasti tehničkih predmeta. Diplomirala je 1991. godine na temu "Uticaj klizišta na životnu sredinu područja Beograda". Diplomski rad nagrađen je nagradom Privredne komore Beograda za 1991. godinu. Magistarski rad pod naslovom "Primena metode povratne analize kod sanacije klizišta" odbranila je na Rudarsko-geološkom fakultetu, na smeru za geotehniku 2002. godine. U periodu 1991-1993, kao inženjer-pripravnik, radila je u Geozavodu-HIG iz Beograda, na poslovima izrade Kompleksne geološke karte Beograda. Kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije (1993-1995), bila je angažovana na naučnom projektu koji je realizovan na Katedri za primenu računara u rudarstvu i geologiju, na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu. Od septembra 1995. godine zasniva stalni radni odnos u Institutu za ispitivanje materijala u Centru za puteve i geotehniku. U Institutu IMS, kao viši saradnik-projektant bavila se projektovanjem geotehničkih istraživanja, geotehničkim istraživanjima terena, laboratorijskim geomehaničkim ispitivanjima, sanacijama klizišta, proračunima fundiranja objekata, izradom baze podataka klizišta. Od 2005. kao vodeći inženjer za laboratorijska ispitivanja, bavi se laboratorijskim geomehaničkim ispitivanjima za različite vrste objekata. Uporedo sa stručnim bavi se i naučno-istraživačkim radom. U periodu od 1995-2015. godine, kao istraživač učestvovala je u sedam naučno-istraživačkih i tehnoloških projekata, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja R Srbije, u sklopu osnovnih istraživanja i istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja. Autor je i koautor, 62 rada objavljena na međunarodnim skupovima, 45 radova objavljenih u nacionalnim časopisima i na domaćim skupovima i dva tehnička rešenja. Član je više međunarodnih i domaćih udruženja i društava kao što su: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), International Association of Engineering Geology and the Environment (IAEG), Srpsko društvo za mehaniku tla i geotehničko inženjerstvo.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Ксенија Ђоковић

број индекса Г 302

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

### ГЕОМЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ЕРОДИБИЛНОГ И ДИСПЕРЗИВНОГ ФИНОЗРНОГ ТЛА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 07.03.2016.



**Прилог 2.**

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Ксенија Ђоковић

Број индекса Г 302

Студијски програм Геотехника

Наслов рада ГЕОМЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ЕРОДИБИЛНОГ И ДИСПЕРЗИВНОГ  
ФИНОЗРНОГ ТЛА

Ментор Проф. др Драган Миловановић, редовни професор

Потписани/а Ксенија С. Ђоковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 07.03.2016.



**Прилог 3.**

## **Изјава о коришћењу**

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **ГЕОМЕХАНИЧКА СВОЈСТВА ЕРОДИБИЛНОГ И ДИСПЕРЗИВНОГ ФИНОЗРНОГ ТЛА**

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, 07.03.2016.



1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцима, односно лиценцима отвореног кода.