Metode određivanja strukture tla

Mikulić, Grgur

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:428626

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij rudarstva

METODE ODREĐIVANJA STRUKTURE TLA

Završni rad

Grgur Mikulić

R4068

Zagreb, 2020

KLASA: 602-04/20-01/91
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 16.09.2020..

Grgur Mikulić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/91, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 28.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

METODE ODREĐIVANJA STRUKTURE TLA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu prof.dr.sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Biljana Kovačević Zelić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

METODE ODREĐIVANJA STRUKTURE TLA

Grgur Mikulić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom završnim radu opisane su metode kojima promatramo ili utvrđujemo određene karakteristike te opisujemo strukturu tla. Tla su sastavljena od diskretnih čestica tla i skupina čestica, te za njihovo razmatranje koristimo direktne ili indirektne motode. Za svaku pojedinu metodu opisani su principi izvođenja, uređaji koji su se koristili, rezultati ispitivanja, te značajke koje određujemo. Direktnim metodama, uglavnom koristeći mikroskop, dobili smo snimke koje smo kasnije analizirali. Indirektnim metodama smo uglavnom dobili parametre preko kojih također možemo analizom dobiti određene značajke strukture.

Ključne riječi: Direktne i indirektne metode, struktura tla, mikroskopija, pore, rendgenska difrakcija

Završni rad sadrži: 31 stranice, 1 tablicu, 19 slika i 12 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof., RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof., RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent, RGNF
Dr. sc. Petar Hrženjak, izv. prof., RGNF

Datum obrane: 23.09.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. DEFINIRANJE MATERIJALA I STRUKTURE TLA 2
2.1. Nevezana tla 2
2.2. Vezana tla 4
3. POLARIZACIJSKI MIKROSKOP 7
4. ELEKTRONSKI MIKROSKOP 10
4.1. Ekološki skenirajući elektronski mikroskop ili ESEM 12
4.1.1. Analiza snimaka 13
5. RENDGENSKA DIFRAKCIJA PRAHA 14
5.1. Transmisijska visokoenergijska elektronska difrakcija i računalna tomografija (CT) 15
6. ANALIZA DISTRIBUCIJE VELIČINA PORA 18
6.1. Određivanje volumetrijske raspodjele pora 18
6.1.1. Analiza snimka 19
7. INDIREKTNE METODE KARAKTERIZACIJE STRUKTURE 21
7.1. Širenje elastičnog vala 21
7.2. Dielektrična disperzija i električna vodljivost 23
7.3. Toplinska vodljivost 24
8. ZAKLJUČAK 25
9. LITERATURA 27

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Različiti raspored čestica u istom tlu daje drugačiji porozitet: a) najrahliji raspored; b) najgušći raspored; c) gust raspored s kuglama različitog promjera (Nonveiller, 1979) ... 2
Slika 2-2 Oblici struktura za krupnozrnate materijale (Mitchel i Soga, 2005) ... 3
Slika 2-3 Struktura taloženja vrlo sitnih čestica: a) saćasta struktura taloženja; b) pahuljasta struktura taloženja; c) struktura sedimenata sa zrnima različite krupnoće (Nonveiller, 1979) ... 4
Slika 2-4 Načini spajanja čestica i terminologija (Shanmukha, 2016) ... 5
Slika 2-5 Modeli združivanja čestica gline (Mitchel i Soga, 2005) ... 6
Slika 3-1 Prikaz osnovnih dijelova polarizacijskog mikroskopa (Tomašić, 2015) ... 7
Slika 3-2 Uzorak tla iz Woomera u Australiji (Mitchel i Soga, 2005) ... 8
Slika 3-3 Trodimenzionalna ili prostorna rešetka preko koje prikazujemo kristalografske osi (Ružičić, 2015) ... 8
Slika 4-1 Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) (Sveučilište u Rijeci, 2010) ... 10
Slika 4-2 Mikrostrukture kaolinita, ilita i montmorilonita nastale sedimentacijom u destiliranoj vodi ili otopini NaCl promatrane elektronskim mikroskopom (Mitchel i Soga, 2005) ... 11
Slika 4-4 ESEM prikaz: ilitna glina (lijevo) i kvarcno zrno (desno) (Mitchel i Soga, 2005) ... 13
Slika 4-5 ESEM slika bubrenja bentonita u smijesi pijeska i bentonita (Mitchel i Soga, 2005) ... 13
Slika 5-1 Položaj ploha prema kristalografskim osima (Ružičić, 2015) ... 14
Slika 5-2 XRD MiniFlex je rendgenski difraktometar (ROFA d.o.o., 2019) ... 15
Slika 5-3 CT snimak uzorka zbijenog pijeska prilikom troosnog posmika: a) horizontalni presjek, b) vertikalni presjek i c) 3D snimak (Mitchel i Soga, 2005) ... 16
Slika 6-1 Grafički prikaz distribucije veličine pora za isti uzorak različitom metodom zbijanja (Mitchell i Soga, 2005) ... 19
Slika 6-2 Prikazi snimki za : a) metodu poligona i b) metodu slobodnog prolaza (Mitchel i Soga, 2005) ... 20
Slika 7-1 Vrste mehaničkih valova u tlu (Kvasnička i Domitrović, 2007) ... 22
Slika 7-2 TLS-100- uređaj kojim ispitujemo tlo metodom tranzijentnog protoka topline (Termtest INC., 2019.) ... 24

POPIS TABLICA

Tablica 1 Tehnike proučavanja strukture tla (Mitchel i Soga, 2005) 25

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
Δp	Pa	diferencijalni tlak
f	-	koeficijent otpora
L	m	duljina
ρ	kg/m^3	gustoća
Å	1×10^{-10} m	Angstrem (jedinica duljine)
-	torr	tlak
λ	$W/(m \cdot °C)$	toplinska vodljivost
n	-	poroznost
T	°C	temperatura
υ	-	Poissonov koeficijent
FI	-	indeks strukture
V	-	područje baznog vrha
PR	-	omjer vrhova
E	N/mm^2	Youngov model elastičnosti
t	s	vrijeme
Q	J	toplina
θ	rad	kut močenja

1. UVOD

Građevinski, rudarski i drugi objekti grade se na tlu ili stijeni, koju je potrebno prethodno istražiti kako bi se temeljem rezultata istražnih radova moglo pristupiti sljedećim fazama projektiranja, izgradnje i održavanja objekata. Iako su tla sastavljena od diskretnih čestica tla i skupina čestica, masa tla se gotovo uvijek promatra kao kontinuum za inženjersku analizu i namjenu. Unatoč tome, specifične vrijednosti svojstava kao što su čvrstoća, propusnost i stišljivost ovise o veličini i obliku čestica, njihovom rasporedu i silama među njima. Dakle, za razumijevanje inženjerskog ponašanja tla i projektnih svojstava potrebno je poznavanje ovih faktora.

Raspored čestica u tlima ostao je uglavnom nepoznat sve dok odgovarajuće optičke, rendgenske i mikroskopske tehnike pomoću elektronskog mikroskopa nisu omogućile izravno promatranje. Daljnjim razvitkom mjernih tehnika došlo je do još boljeg razumijevanja struktura tla, te razvitka novih numeričkih metoda kojima se mogu simulirati uvjeti nastanka struktura.

Povećane računalne brzine omogućile su simulaciju slaganja individualnih čestica tla modeliranjem dodirnog čestičnog ponašanja dovodeći time do razvoja još novijih numeričkih metoda. Danas je moguće provoditi simulacije s raznim trodimenzionalnim oblicima čestica, složenim modelima kontakata i interakcijama s pornim fluidima.

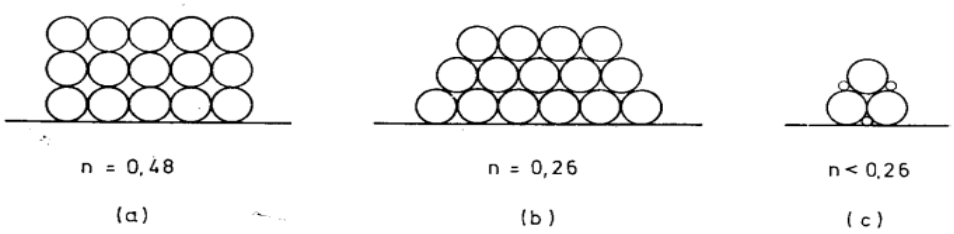
U posljednjih trideset godina, kako je tehnologija sve više napredovala, poboljšale su se tehnike mjerenja te prikazi rezultata koristeći računala. Te nove tehnike su računalna tomografija (CT), analiza kompleksne digitalne slike, ekološki skenirajući elektronski mikroskop (ESEM), kao i mnoge druge. Sve te tehnike će biti opisane u ovome završnom radu.

2. DEFINIRANJE MATERIJALA I STRUKTURE TLA

Struktura tla definira svojstva tla, a zavisno o načinu na koje je tlo nastalo u prirodi nalazimo različite strukture. One osim o postanku tla ovisi još i o mineraloškom sastavu osnovne stijene. Razaznajemo dvije elementarne strukture: vezana struktura za koherentne materijale i nevezana struktura za nekoherentne materijale. Struktura tla je raspored čvrstih čestica u tlu te se ona kod koherentnih i nekoherentnih materijala tla bitno razlikuje. Kod nekoherentnog tla, dominantan čimbenik koji utječe na formiranje strukture tla je gravitacija, a kod koherentnih tala važan je utjecaj ne samo gravitacije već i molekularnih sila. Potrebno je uzeti u obzir veličinu, oblik i funkciju različitih strukturnih jedinica. Promatramo tri relativne veličine: makrostruktura, mikrostruktura i ministruktura (Mitchel i Soga, 2005). Makrostruktura obuhvaća stratifikaciju, pukotine, pore i velike nehomogenosti koje su vidljive prostim okom ili povećalom. Za opažanje mikrostrukture već je potreban polarizacijski mikroskop, jer se sastoje od relativno skupljenih čestica malih pora među njima. Tipični elementi strukture materijala su veličine do nekoliko desetaka mikrometra. Ministrukture se sastoje od mikrostruktura te pora među njima. Mogu biti veličine nekoliko stotina mikrometara.

2.1. Nevezana tla

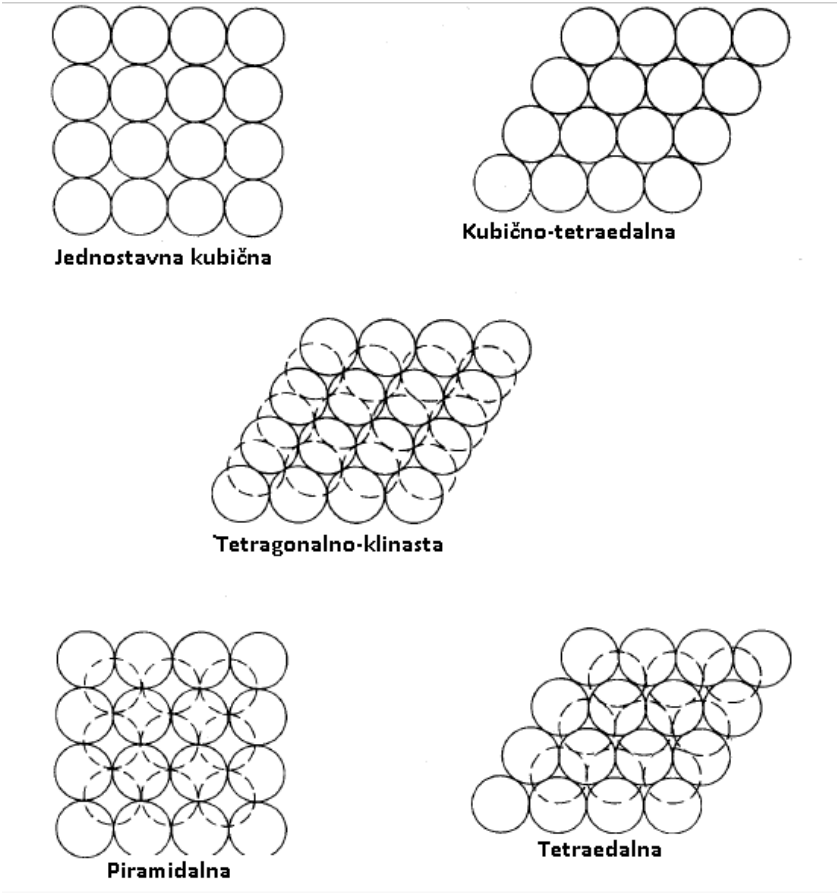
U skupinu nekoherentnih ili nevezanih tala pripadaju ona koja u sebi sadrže pojedinačna zrna koja su vidljiva prostim okom. To su pijesci i šljunci s promjerom pojedinog zrna većim od 0,06 mm. Vodopropusnost tih tala je velika i voda se lako kreće u njegovim porama. Imaju veću otpornost na smicanje, odnosno jače izraženo trenje. Veličine čestica u tlu variraju, a kao rezultat toga, manje čestice mogu zauzimati pore između većih čestica. To rezultira tendencijom ka većim gustoćama i manjim omjerima pora u odnosu na čvrste čestice (Slika 2-1).



Slika 2-1 Različiti raspored čestica u istom tlu daje drugačiji porozitet: a) najrahliji raspored; b) najgušći raspored; c) gust raspored s kuglama različitog promjera (Nonveiller, 1979)

Niže vrijednosti poroznosti i gustoće te veća jedinična masa za pijesak i šljunak mogu se pripisati prahu koji ispunjava velike praznine između čestica šljunka. Za materijal koji ima zrnca jednake veličine postoji više mogućih struktura: jednostavna kubična, kubično-tetraedalna, tetragonalno-klinasta, piramidalna i tetraedalna kao što je prikazano na slici 2-2, te se postižu poroziteti od 0,35 do 0,91.

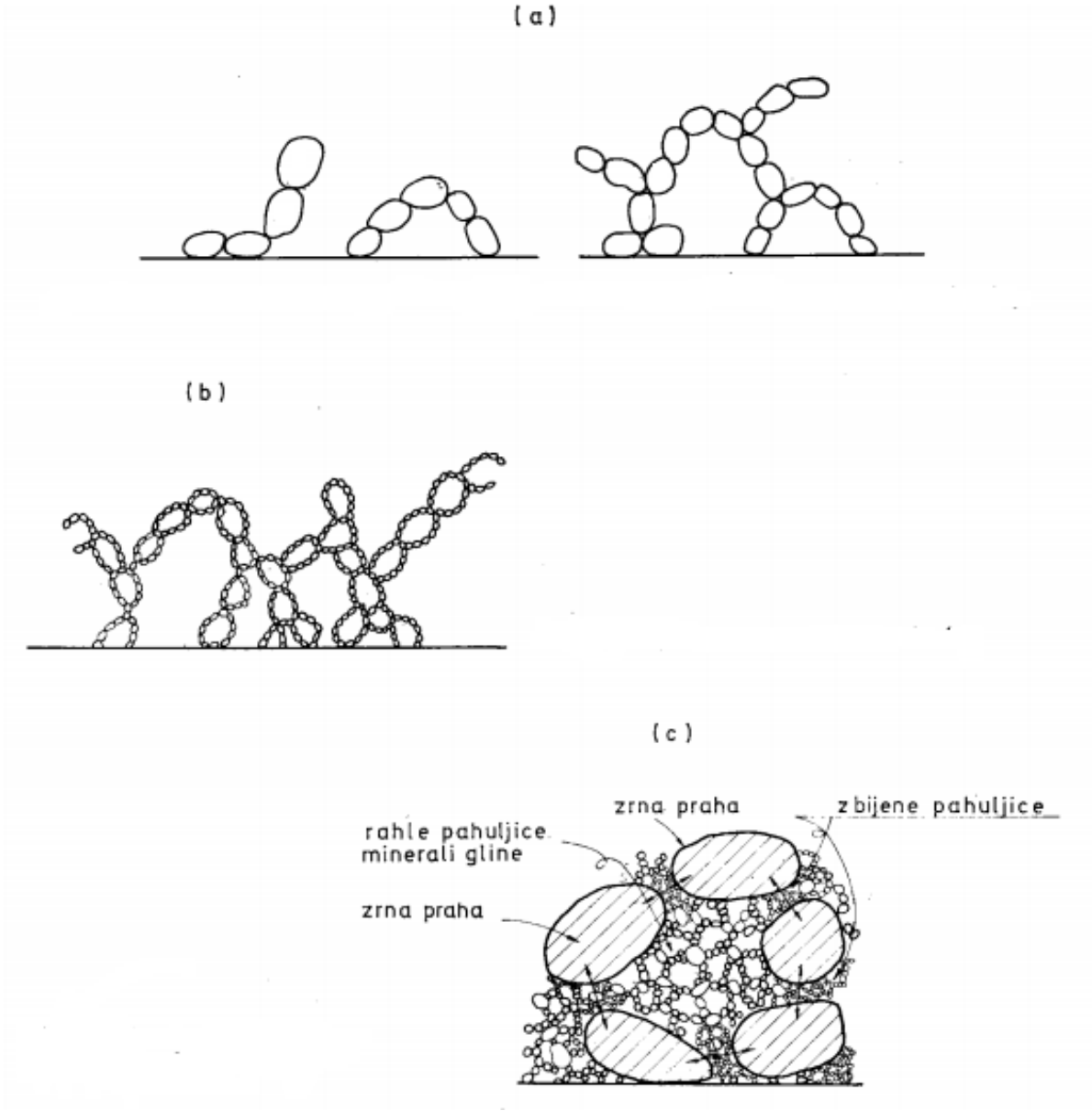
Proučavanje strukture nekoherentnih tala obično se vrši optičkim putem. Te čestice su dovoljno velike da se lako mogu vidjeti petrografskim mikroskopom. Mnoga su istraživanja pokazala da određeno nekohorentno tlo može imati različite strukture u istom omjeru pora ili relativnoj gustoći. Karakterizacija njihove strukture može se izvršiti u smislu faktora oblika zrna, orijentacije zrna i orijentacija kontakta među česticama. Orijentacija zrna u ležištu pijeska može se opisati u smislu nagiba osi čestica prema skupu referentnih osi. Orijentacije dodira među česticama i njihova raspodjela utječu na svojstva deformacije i čvrstoću te anizotropiju.



Slika 2-2 Oblici struktura za krupnozrnate materijale (Mitchel i Soga, 2005)

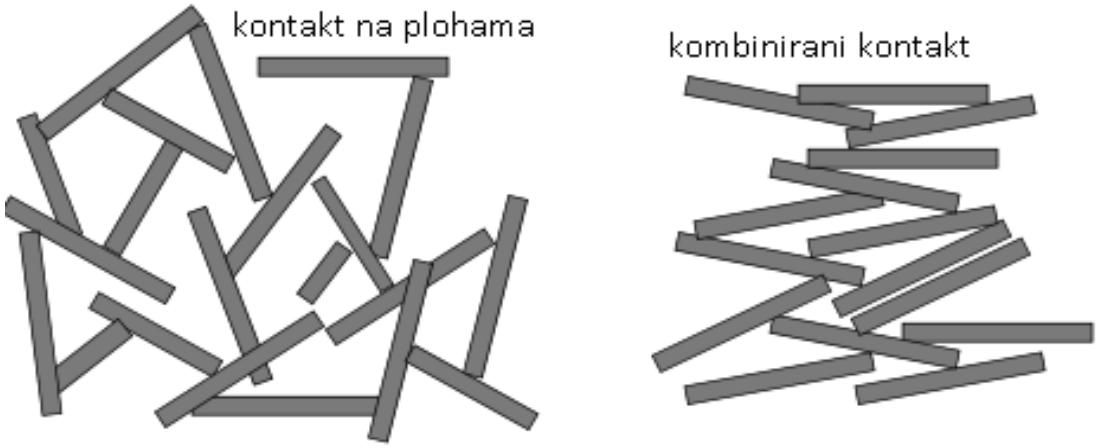
2.2. **Vezana tla**

U skupinu koherentnih ili vezanih tala pripadaju ona čija su pojedinačna zrna nevidljiva prostim okom, odnosno prah i glina s promjerom zrna manjim od 0,06 milimetara. Za njih je karakteristično da su čestice međusobno povezane silama kohezije. Što se tiče strukture ona može biti saćasta, pahuljasta i složena kao što je prikazano na slici 2-3. Različite strukture u sitnozrnom tlu presudno utječu na njegova fizikalno-mehanička svojstva (čvrstoća, deformabilnost, propusnost). Prisustvo krupnijih čestica među sitnijim česticama također utječu na svojstva takvog tla. Čestice gline imaju oblik pločica s jasno izraženim utjecajem električnog naboja na svojoj površini.

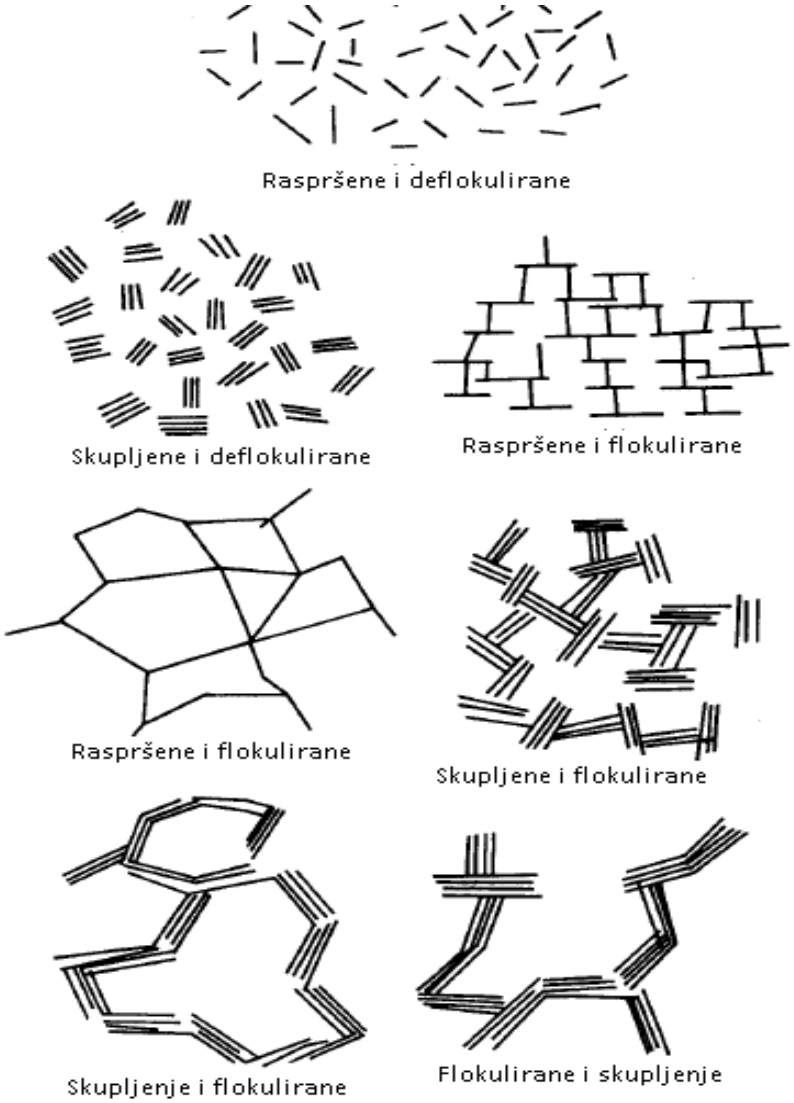


Slika 2-3 Struktura taloženja vrlo sitnih čestica: a) saćasta struktura taloženja; b) pahuljasta struktura taloženja; c) struktura sedimenata sa zrnima različite krupnoće (Nonveiller, 1979)

Mnogi nanosi tla su nastali taloženjem djelovanjem vode ili u mirnoj vodi. Razumijevanje ponašanja nakupina čestica u suspenzije predstavlja dobar početak za shvaćanje strukture tla, te promjene tijekom prošlosti. Što se tiče nakupina u glinama, kao što se vidi na slici 2-5, postoje: raspršene, skupljene, flokulirane i deflokulirane strukture. Nadalje čestice se mogu združiti kontaktom na vrhovima (*engl. „edge-to-edge“),* na plohama (*engl. „face-to-face“*) ili kombinirano (*engl. „edge-to-face“*) koje kao primjer vidimo na slikama 2-4 i 2-5.



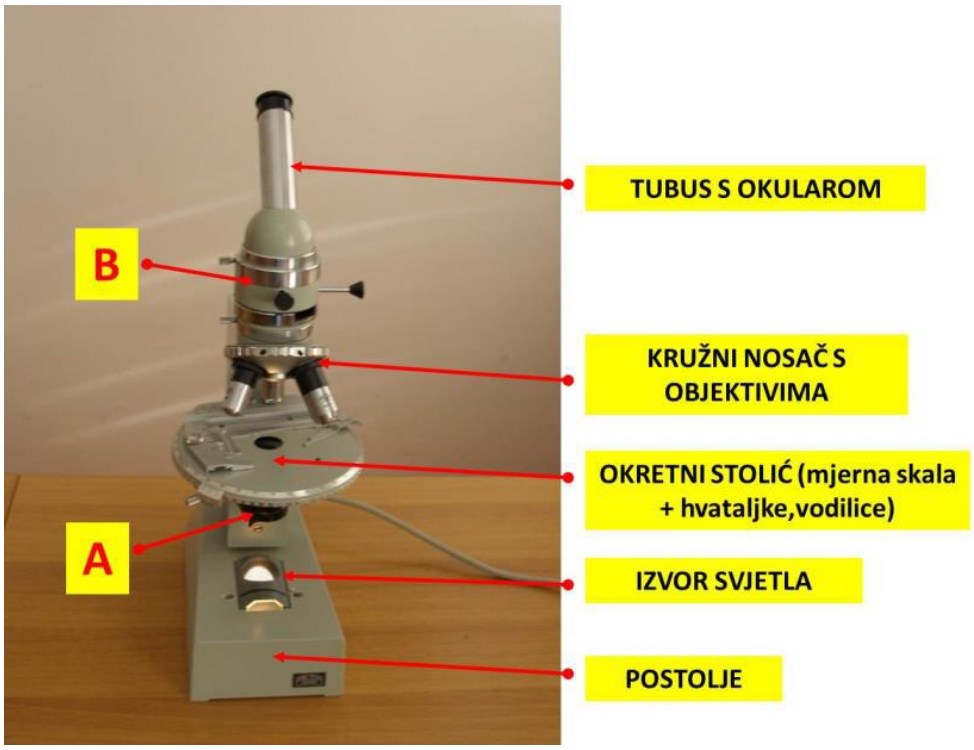
Slika 2-4 Načini spajanja čestica i terminologija (Shanmukha, 2016)



Slika 2-5 Modeli združivanja čestica gline (Mitchel i Soga, 2005)

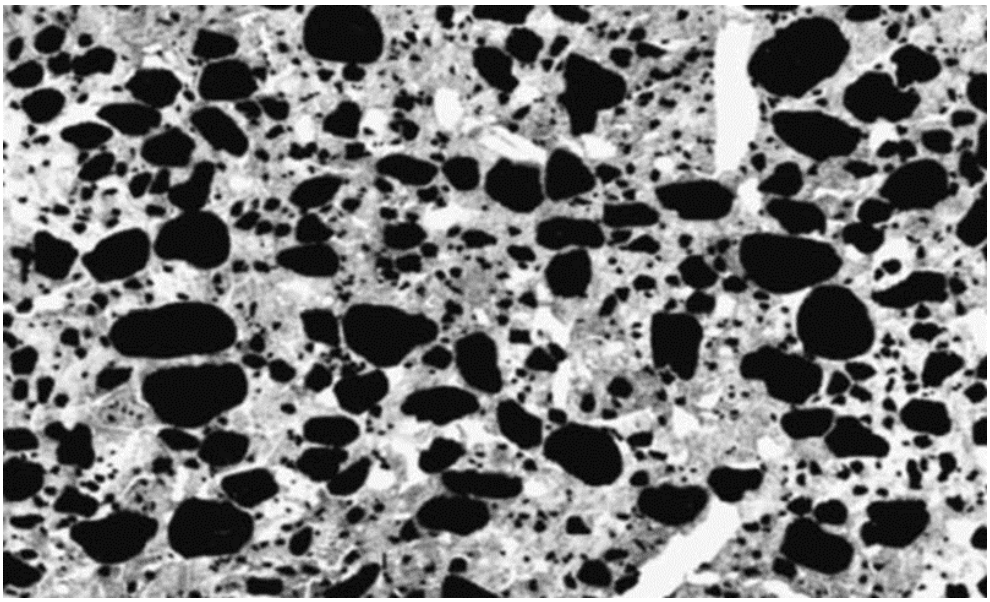
3. POLARIZACIJSKI MIKROSKOP

Polarizacijski mikroskop služi za promatranje u polariziranoj svjetlosti (slika 3-1). Opremljen je dvjema Nicolovim prizmama: jedna ispred objektiva polarizira svjetlost (polarizator), a druga, između objektiva i okulara služi za istraživanja interferencijskih pojava u objektu (analizator). Osim u mehanici tla polarizacijski mikroskop upotrebljava se u mineralogiji i kristalografiji za ispitivanje kristalnih tijela u polariziranoj svjetlosti tj. za određivanje mineraloško-petrografskih svojstava svih vrsta stijena, ruda i drugih mineralnih sirovina.



Slika 3-1 Prikaz osnovnih dijelova polarizacijskog mikroskopa (Tomašić, 2015)

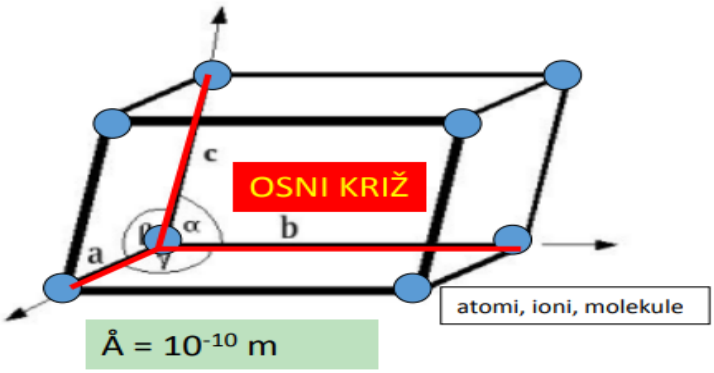
Pojedinačne čestice praha i pijeska mogu se vidjeti koristeći petrografski i binokularni mikroskop, te se veličina, orijentacija, raspodjela čestica i pore mogu opisati sistematično. Tanki presjeci ili polirane površine mogu se koristiti za dvodimenzionalne analize i takvi se planarni uzorci mogu prikazati ružama pora. Trodimenzionalne analize zahtijevaju seriju paralelnih presjeka, te se takvi uzorci mogu prikazati pomoću ortografske mreže. Kao ilustracija dvodimenzionalnosti uzoraka na slici 3-2 prikazane su pore (bijela boja), matriks od gline (siva boja) i čestice pijeska (crna boja) na uzorku pustinjskog tla blizu Woomera u Australiji, što ukazuje na neki stupanj preferirane orijentacije.



Slika 3-2 Uzorak tla iz Woomera u Australiji (Mitchel i Soga, 2005)

Obično nije moguće vidjeti pojedine čestice gline polarizacijskim mikroskopom zbog ograničene moći razlučivanja čestica, te dubine polja. Praktična razlučivost je na nekoliko mikrometara pomoću uvećanja do oko 300 puta. Ako su ipak glinene pločaste čestice poredane paralelno jedne uz druge u grupi, onda se one ponašaju optički kao jedna velika čestica s određenim optičkim svojstvima.

Optičke i kristalografske osi minerala gline gotovo su slučajne za pojedine čestice te one formiraju tzv. osni križ (Slika 3-3). Kod optički izotropnih materijala svijetlost se u svim smjerovima širi istom brzinom, odnosno imaju jedan indeks loma, te svijetlost vibrira u svim smjerovima okomitim na smjer širenja svjetla. Za čestice plosnatog oblika, indeksi loma u smjerovima (a) i (b) približno su jednaki, ali se razlikuju od onih u smjeru osi (c). Razlika indeksa loma uz različite optičke osi kristala određuje optička svojstva nazvana 'dvolom'.



Slika 3-3 Trodimenzionalna ili prostorna rešetka preko koje prikazujemo kristalografske osi (Ružičić, 2015)

To znači da se dvolom pojavljuje uvijek, osim kada se svjetlost širi duž osi (c) i tada može vibrirati u svim smjerovima u horizontalnoj ravnini. Ukoliko se svijetlost širi duž bilo kojeg drugog smjera nastat će dvije polarizirane zrake: ordinarna i ekstraordinarna koje se šire različitim brzinama i vibriraju međusobno okomito. Ordinarna zraka uvijek, bez obzira na smjer širenja svijetlosti vibrira okomito na kristalografsku os (c) i širi se brzinom v_0 što znači da ima isti indeks loma n_0. Ekstraordinarna zraka vibrirat će okomito na smjer širenja i na smjer ordinarne zrake, a njena brzina v_e ovisit će o smjeru. Intenzitet ovisi o razlici u brzinama odnosno njihova razlika postaje veća što je veći kut između smjera širenja i osi (c), a najveći je za kut 90°. Omjer minimalnog intenziteta I_{min} do najvećeg intenziteta I_{max} naziva se dvolomni omjer, te se njime fotometrijskim mjerenjem određuje orijentacija čestica gline.

Optička mikroskopska studija strukture pruža prikaz nekih karakteristika koje su premale da bi se vidjele prostim okom, a prevelike da bi se mogle determinirati pomoću elektronskog mikroskopa, te su jako važne za razumijevanje ponašanja tla. Neke od ovih značajki uključuju raspodjelu praha i zrna pijeska, slojeve čestica praha i pijeska, homogenost strukture i teksture, diskontinuitete raznih tipovima i ravnine smicanja.

4. ELEKTRONSKI MIKROSKOP

Elektronski mikroskop je uređaj kojim se, s pomoću uskog snopa elektrona, dobiva uvid u mikrostrukturu promatranog uzorka, uz golemo povećanje. Najviše su u upotrebi transmisijski i skenirajući elektronski mikroskopi. Primjena elektronskoga mikroskopa vrlo je široka. Može otkriti čestice gline te izravno prikazati njihov raspored. Praktična granica razlučivosti transmisijskog elektronskog mikroskopa (TEM) manja je od 10 Å, a mogu se vidjeti i atomske ravnine. Praktična granica SEM-a je oko 100 Å, ali manje povećanje je dovoljno za razlučivanje detalja glinenih čestica i ostalih vrlo malih sastojaka tla. Glavne prednosti SEM-a u odnosu na TEM su: mnogo veća dubina polja, širok, neprekinuti opseg mogućih uvećanja (oko 20 do 20 000 puta) i sposobnost izravnog proučavanja površina. Glavna prednost TEM-a u odnosu na SEM je njegova veća granica razlučivosti.



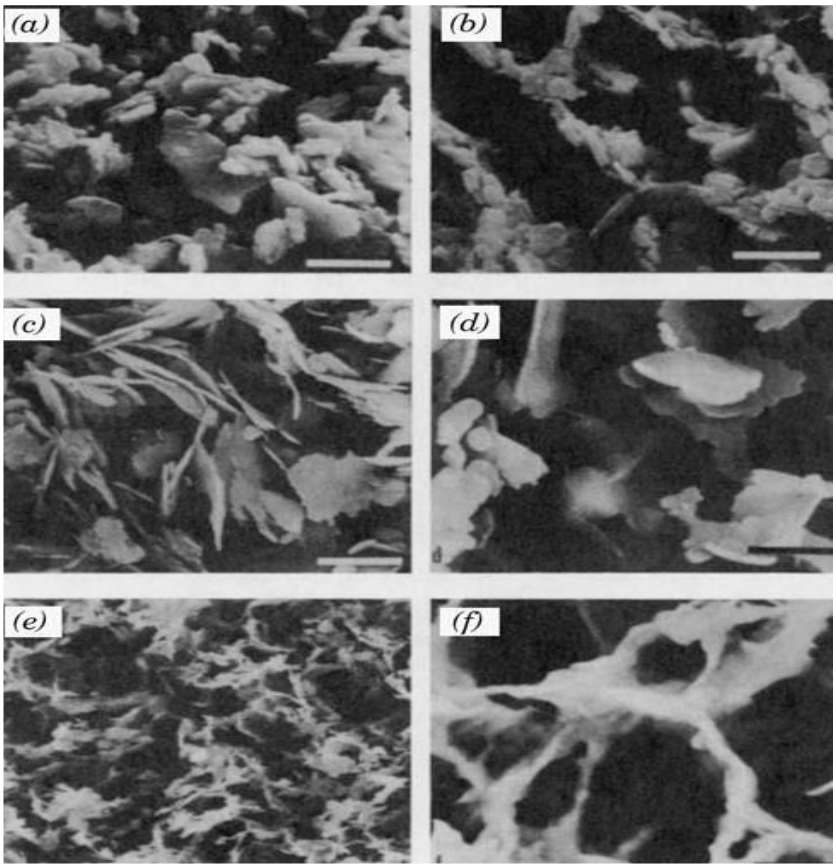
Slika 4-1 Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) (Sveučilište u Rijeci, 2010)

Obje vrste elektronske mikroskopije zahtijevaju posebnu komoru za uzorke ($1x10^{-5}$ torr), jer se vlažna tla ne mogu izučavati izravno ako nisu smještena u posebne komore. Mogu se također proučavati zamrznuti materijali. Obično je potrebno premazati površine SEM uzorka vodljivim filmom koji sprječava površinsko prodiranje i gubitak razlučivosti.

Glavna poteškoća istraživanja strukture pomoću elektronskog mikroskopa je priprema uzorka, površinskih duplikata ili ultra tankih presjeka koji zadržavaju neoštećenu strukturu

izvornog tla prilikom vađenja uzoraka iz tla. Općenito, što je veći udio vode i koeficijent pora u izvornom uzorku, vjerojatnost poremećaja je također veća. Kod bubrivih tala, struktura tla može se poremetiti gubitkom međuslojne vode pa su potrebne specijalne tehnike za pripremu ispitnih uzoraka (na pr. tehnika smrzavanja).

Da su pažljive tehnike uspješne u očuvanju osjetljive strukture svjedoči slika, koja pokazuje mikrostrukture šest umjetno dobivenih uzoraka gline dobivenih sedimenatacijom. Neporemećene mikrostrukture uzoraka gline prikazane su na slici 4-2. Na slici 4.2. a) i b) je prikazan kaolinit, u, 4.2 c) i d) ilit, te 4.2. e) i f) montmorilonit u istim otopinama (destilirana voda i otopina NaCl) (Mitchel i Soga, 2005). Ovi uzorci su dobiveni postupnim taloženjem čestica gline veličina manjih od 1 μm iz 1 postotne suspenzije, a potom zamrzavanjem i sušenjem uzorka. Kada se taloži u destiliranoj vodi, dobiveni su sljedeći poroziteti: kaolinit 96%, liti 90%, a montmorilonit 83%. Kada se sedimentira u otopini elektrolita poroznosti su 97, 98 i 99% za iste gline. Tako dobivene mikrostrukture koje nastaju u uvjetima neometane sedimentacije imaju prilično visoke poroznosti (60 do 90 posto). Sedimenti takve vrste vrlo stišljivi i male čvrstoće.



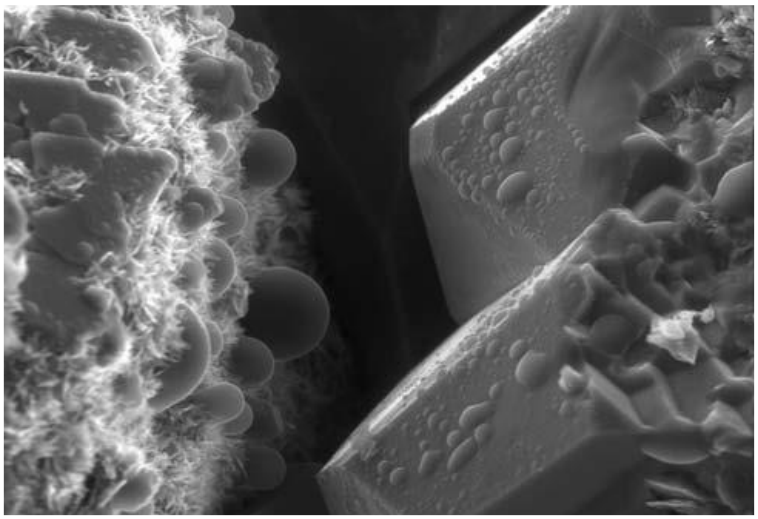
Slika 4-2 Mikrostrukture kaolinita, ilita i montmorilonita nastale sedimentacijom u destiliranoj vodi ili otopini NaCl promatrane elektronskim mikroskopom (Mitchel i Soga, 2005)

4.1. **Ekološki skenirajući elektronski mikroskop ili ESEM**

Konvencionalni SEM uzorci moraju biti suhi, kompatibilni s vakuumom i električki vodljivi. Prilikom ispitivanja tekućih i hidratiziranih uzorka, tlak mora biti najmanje 612 Pa, što predstavlja najmanji tlak pare pri kojem je moguće održavanje vode u tekućem stanju na temperaturi 0°C. Ekološkim skenirajućim elektronskim mikroskopom (ESEM) moguće je ispitivanje vlažnih i neprovodljivih uzoraka u prirodnom stanju, jer ima posebnu komoru za uzorke pod većim tlakom odvojenom od visoko-vakuumskih elektronsko-optičkih dijelova u kojima se nalazi SEM elektromagnetska leća. Razlika tlakova postiže se pomoću posebnih uređaja koji imaju poseban otvor za ograničavanje tlaka. Ispitivanje uzorka možemo koristiti posredstvom raznih plinova (H_2O, CO_2, N_2, i drugih), relativne vlažnosti od 0 do 100%, tlaka (čak do 6.7 kPa) i temperatura (u rasponu od -180 do 1500 °C).

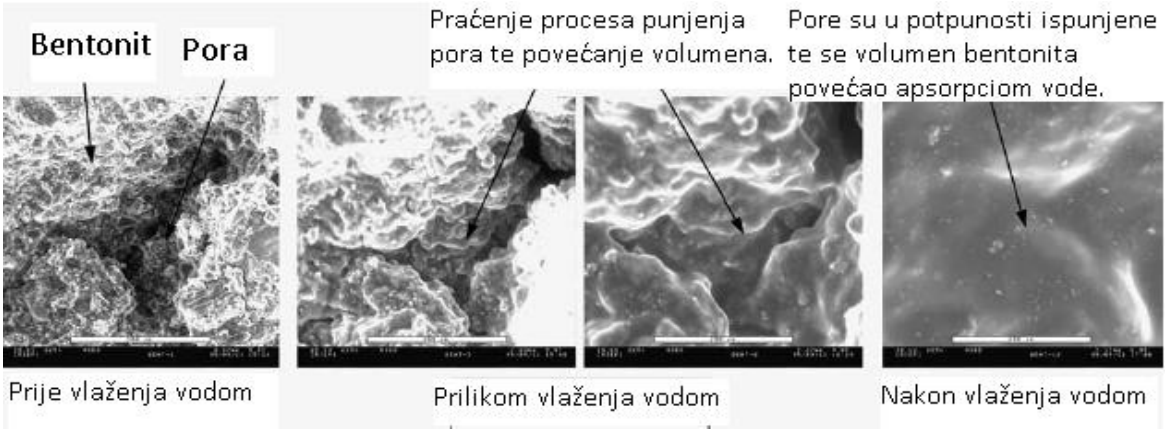
ESEM slike dobivaju se pomoću detektora električnog naboja koji sakuplja i obrađuje signale generirane molekulama ioniziranih plinova (obično vodena para) u komori za uzorke. Sporedni elektroni koje emitira uzorak sudaraju se s molekulama plina, koje zatim uzrokuju ionizaciju plina, stvarajući pozitivne ione i dodatne sekundarne elektrone. Kaskadno pojačanje signala iz izvornih sekundarnih elektrona omogućuje da sekundarni detektor elektrona stvori sliku. Pozitivni ioni su privlačeni na negativno nabijenu površinu uzorka potiskujući primarni naboj. Ovo suzbijanje naboja omogućuje snimanje neprovodljivih uzoraka.

Značajna značajka ESEM-a je njegova sposobnost promatranja tekućina unutar uzoraka, koju jasno vidimo na slici 4-4. Na slici s lijeve strane vidimo ilitnu glinu čija je površna hidrofobna, a s desne strane kvarcna zrna čija je površina hidrofilna. Stopa sublimacije i kondenzacije vode može se kontrolirati pomoću nametnutog tlaka i temperature. Budući da se pritisak i temperatura mogu mijenjati u komori za uzorke, ESEM omogućava praćenje dinamike promjene u uzorcima kao što su vlaženje, sušenje, apsorpcija, taljenje, korozija i kristalizacija.



Slika 4-3 ESEM prikaz: ilitna glina (lijevo) i kvarcno zrno (desno) (Mitchel i Soga, 2005)

Slika 4-5. prikazuje ESEM prikaz bubrenja bentonita u smjesi pijeska i bentonita (Mitchel i Soga, 2005). U početku su čestice bentonita pričvršćene za zrna pijeska te se uočavaju makropore. Kada se uzorku doda voda, bentonit bubri do potpunog zatvaranja pora.



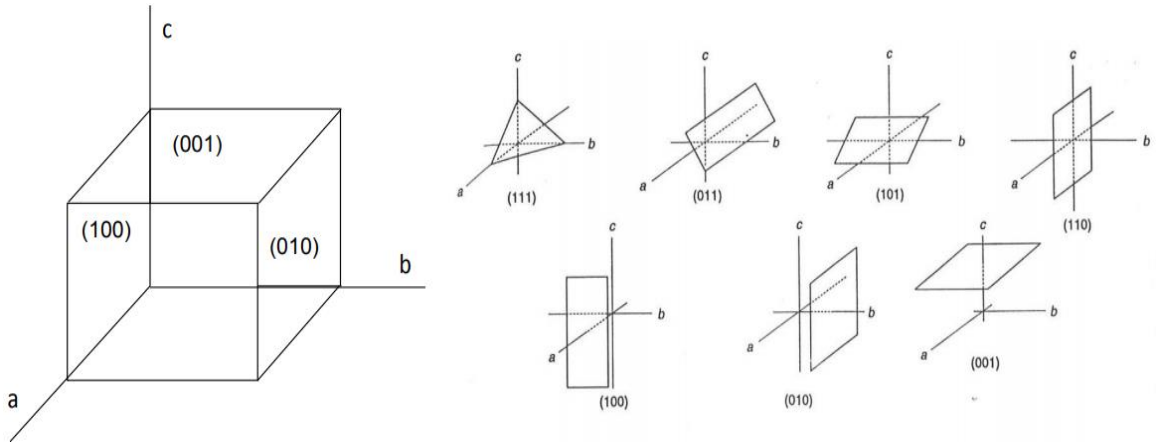
Slika 4-4 ESEM slika bubrenja bentonita u smijesi pijeska i bentonita (Mitchel i Soga, 2005)

4.1.1. Analiza snimaka

Analizatori snimaka mogu se koristiti u kombinaciji s optičkim i elektronskim mikroskopima za kvantificiranje značajki strukture. Digitalne kamere mogu pretvoriti reflektiranu ili propuštenu svjetlost iz uzorka u piksele. Količina svjetlosti po pikselu tada se pretvara u analogni signal. Nakon što se stekne cjelokupna slika, analogni signal za svaki piksel pretvara se u digitalni oblik za analizu, obradu i pohranu. Analiza snimaka nudi uvelike povećan potencijal za bolji kvantitativni opis različitih elemenata strukture.

5. RENDGENSKA DIFRAKCIJA PRAHA

Kristalografske ravnine u mineralima lome rendgenske zrake određenim intenzitetom koji ovisi o: količini minerala u volumenu tla koje je ozračeno, te o udjelu mineralnih zrnaca koji su pravilno orijentirani. Za minerale gline, paralelno orijentirane čestice (listići) pojačavaju bazalni odraz, ali smanjuju intenzitet odraza u drugim smjerovima ravnina. Intenzitet (001) refleksije omogućava procjenu orijentacije čestica gline. Za razumijevanje plohe potrebno je znati na koju plohu u kristalografiji se odnosi, npr. ploha (001) siječe samo os (c) u jednoj točki (Slika 5-1).



Slika 5-1 Položaj ploha prema kristalografskim osima (Ružičić, 2015)

Relativne visine bazalnih vrhova za različite uzorke istog materijala označavaju razliku u orijentaciji čestica. Indeks strukture (FI), čija se vrijednost temelji na površinama ispod vršnih vrijednosti difrakcije, definira se kao:

$$FI = V/(P + V) \quad \textbf{(5-1)}$$

gdje V označava površinu ispod bazne vršne vrijednosti u presjeku okomitom na orijentacijsku ravninu, a P je ista površina na ravnini paralelnoj orijentaciji čestica. Veličina indeksa (FI) varira od 0 koja označava pravilnu paralelnu orijentaciju do 0,5 za potpuno nasumičnu orijentaciju.

Prednost rendgenske difrakcije je mogućnost kvantifikacije podataka na način koji nije bio moguć metodama optičkih i elektronskih mikroskopa. Međutim, razvojem metoda analize snimaka uvelike je prevladala ovaj problem kod takvih mikroskopa. Rendgenske metode imaju neke nedostatke, kao što su: otežano tumačenje u polimineralnim tlima, podaci

se ponderiraju u korist strukturi koja je najbliže površini uzorka, a rezultat ispitivanja tla koje uključuje i mikrostrukture i ministrukture te predstavlja njihovu prosječnu vrijednost, tj. ne razlučuje ih nego uprosječuje.

Za metodu rendgenske difrakcije koristimo uređaj koji si zove rendgenski difraktometar (slika 5-2). Rendgenska je difrakcija najprikladnija za analizu strukture monomineralnih glina u kojima su orijentacije čestica na područjima veličine rendgenske zrake (nekoliko milimetra). U kombinaciji s drugim metodama rendgenska difrakcija može pobliže opisati karakter mikrostrukture.

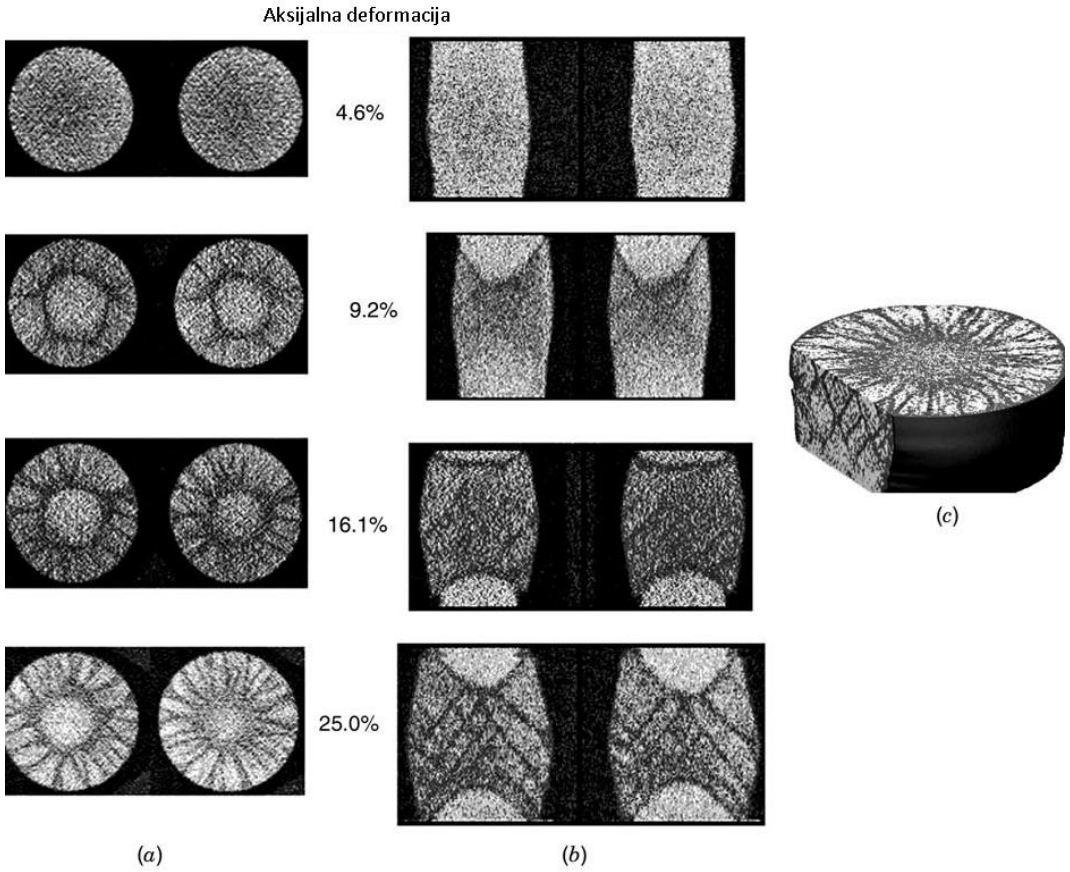


Slika 5-2 XRD MiniFlex je rendgenski difraktometar (ROFA d.o.o., 2019)

5.1. Transmisijska visokoenergijska elektronska difrakcija i računalna tomografija (CT)

Transmisijska visokoenergijska elektronska difrakcija spada u posredna ili nerazorna ispitivanja kojima na temelju razlike u gustoći elektrona utvrđujemo stratigrafiju, homogenost i makrostrukture tla, te nam također daju informacije o poremećajima i teksturi (Mitchel i Soga, 2005). Pokus se često koristi u praksi zato što je brz, jednostavan i jeftin, a također je koristan prilikom ispitivanja deformacija u tlu. Rezultati se često koriste za određivanja zona smicanja i procjenu deformacija, te njihovih promjena unutar materijala.

Računalna tomografija (CT) omogućuje izradu trodimenzionalnog profila gustoće unutar materijala sastavljanjem rendgenske radiografske dvodimenzionalne slike snimljene pod različitim kutovima. Rezolucija CT skenera određuje se dimenzijama izvora i detektora te njihove pozicije u odnosu na ispitni uzorak. Tehnika je korištena za ispitivanje razvoja i položaja zone smicanja unutar uzorka jer dilatancija materijala lokalno u zoni smicanja daje malu gustoću elektrona. Na slici 5-2 su prikazane zone smicanja u cilindričnim uzorcima pijeska koji su smicani do različitih aksijalnih pomaka u troosnom pokusu kompresije.



Slika 5-3 CT snimak uzorka zbijenog pijeska prilikom troosnog posmika: a) horizontalni presjek, b) vertikalni presjek i c) 3D snimak (Mitchel i Soga, 2005)

Kako se povećavaju aksijalni pomak, šire se zone smicanja s većim koeficijentom pora unutar uzoraka. Mogu se uočiti dvije različite pojave:

1. Konusne zone smicanja uočavaju se na horizontalnim presjecima pomoću tamnijih kružnica koji se pojavljuje u središtu, te postaju manjeg promjera od ruba prema sredini visine uzoraka. To sugerira konusni oblik zone smicanja od sredine do rubova. Vrh konusa nalazi se na sredini uzorka, a simetrija postoji na središnjoj osi uzorka.

2. Paralelne ravnine smicanja na vertikalnom presjeku, a na horizontalnom presjeku vidljive kao radijalno orijentirane linije od kružnica prema rubu uzorka. Pomno ispitivanje ovih linija otkriva da postoji nekoliko parova konjugiranih zona smicanja u dva različita nagnuta kuta.

6. ANALIZA DISTRIBUCIJE VELIČINA PORA

Oblik i raspored pora jedno su od tri najvažnijih mjera strukture tla, zajedno s raspodjelom veza i orijentacijom čestica. Informacije o porama možemo dobiti određivanjem volumetrijskog rasporeda pora, te iz analize snimaka tankih presjeka i SEM snimaka.

6.1. Određivanje volumetrijske raspodjele pora

Volumetrijska raspodjela veličina pora može se odrediti prisilinim prodorom nemočivog fluida, metodom kapilarne kondenzacije koja se temelji na interpretaciji adsorpcije i izotermne desorpcije, te uklanjanjem vode pokusom usisa ili pritiskom zraka.

Maksimalna veličina pora koja se može izmjeriti metodom kapilarne kondenzacije je oko 0,1 μm. Uz moguću iznimku intraagregatnih pora, većina pora tla je veća, pa je ova metoda ograničene korisnosti. Metoda prodora žive korisna je za mjerenje veličina pora od oko 0,01 μm do nekoliko desetaka mikrometara. Osnova metode je da nemočivi fluid (kut močenja >90°) neće ulaziti u pore bez pritiska. Promjer pora cilindričnog oblika određuje se prema formuli:

$$d = -\frac{4\tau \cos\theta}{p} \tag{6-1}$$

gdje d predstavlja promjer, τ površinsku napetost utisnutog fluida, θ kut močenja i p predstavlja pritisak.

Volumen žive utisnute u suhi uzorak koji je mase 1 g, mjeri se uzastopno pri različitim tlakovima. Ukupni volumen utisnute žive pod bilo kojim tlakom daje ukupni volumen pora s ekvivalentnim promjerom većim od onog koji odgovara tom pritisku.

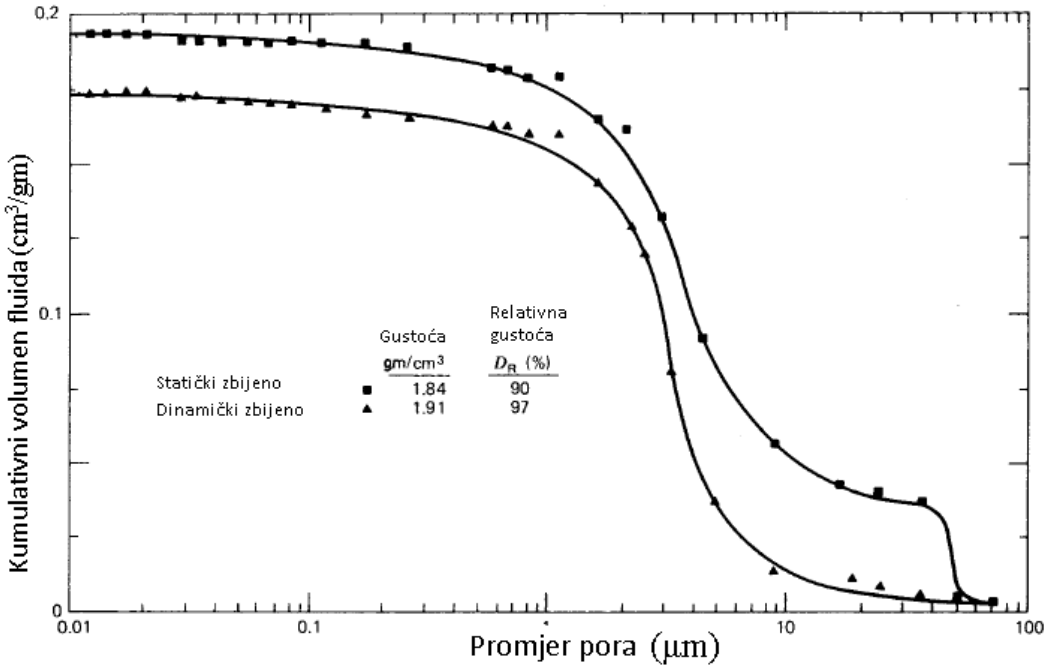
Ograničenja metode prodiranja žive su:

- Pore u početku moraju biti suhe. Liofilizirani uzorci često se koriste kako bi se minimalizirao učinak promjene volumena nakon sušenja.
- Izolirane pore se ne mjere.
- Pore dostupne samo kroz manje pore neće se mjeriti sve dok se ne prodre kroz manje pore.
- Uređaj možda neće moći prodrijeti u najmanje pore uzorka.

Unatoč tim ograničenjima, raspodjela veličine pora određena metodom prodiranja žive može pružiti korisne informacije o čimbenicima koji utječu na strukturu tla i odnose njihovih

svojstava. Dobiveni podaci prikazuju se u obliku krivulje kumulativnog volumena utisnutog fluida u odnosu na promjer pora (slika 6.1). Promjene gustoće i metoda pripreme uzorka rezultiraju promjenama u raspodjeli veličine pora, što se na vidi slici 6-1, gdje gornja krivulja prikazuje uzorak dobiven statičkim zbijenjem, a donja uzorak koji je dinamički zbijan.

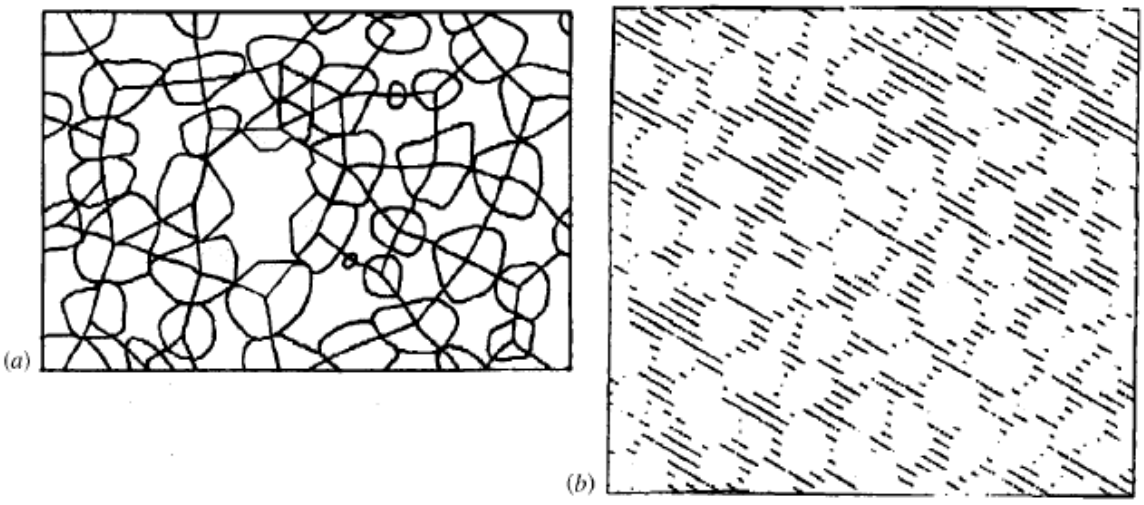
Raspodjela veličina pora može se procijeniti za pijesak, koji je pregrub za prodiranje žive, određivanjem volumena vode u porama koja se odvodi ili usisom ili pritiskom zraka na pornu vodu.



Slika 6-1 Grafički prikaz distribucije veličine pora za isti uzorak različitom metodom zbijanja (Mitchell i Soga, 2005)

6.1.1. Analiza snimka

Prostorna raspodjela pora unutar uzorka tla može se dobiti analizom snimaka dobivenih iz tankih uzoraka. Dostupne su dvije metode analiza snimaka: (1) metoda poligona i (2) metoda slobodnog prolaza. U prvoj metodi centroidi čestica smješteni su i povezani kako bi stvorili poligone, prikazujući pojedinačne praznine (slika 6-2 (a)). Koristeći ovu metodu, otkriveno je da rahliji uzorci pijeska pokazuju veću varijabilnost koeficijenta pora od gušćih uzoraka. Metodom slobodnog prolaza mjeri se prolaz po paralelnim linijama skeniranja kroz čestice i pore, te se dobiva prikaz kao na slici 6-2 (b). Kod uzoraka tala fluvijalnog postanka ta metoda pokazala je puno veće pore u horizontalnom, nego u vertikalnom smjeru.



Slika 6-2 Prikazi snimki za : a) metodu poligona i b) metodu slobodnog prolaza (Mitchel i Soga, 2005)

7. INDIREKTNE METODE KARAKTERIZACIJE STRUKTURE

Osim izravnih metoda, moguće je za odredbu strukture tla koristiti i neizravne metode kod kojih se mjerenjem svojstava poput brzine širenja valova, provođenje električne struje ili toplinske vodljivosti može donijeti određene zaključke i o strukturi tla. Te će metode ukratko biti opisane u ovom poglavlju.

7.1. Širenje elastičnog vala

Brzine širenja primarnih i sekundarnih seizmičkih valova kroz tlo ovise o gustoći, naprezanju i strukturi tla. Prema teoriji elastičnosti, koja je primjenjiva na tla za male deformacije, brzina poprečnog vala (S-val) V_s i uzdužnog vala (P-val), kao što je vidljivo na slici 7-1, brzine V_p povezane su s modulom posmika G i modulom volumne promjene, K:

$$V_s = \sqrt{G/p} \tag{7-1}$$

$$V_p = \sqrt{K/p} \tag{7-2}$$

gdje je ρ gustoća tla.

Modul volumne promjene K povezan je s poznatijim Youngovim modulom elastičnosti sljedećim izrazom:

$$K = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} E \tag{7-3}$$

u kojem je μ Poissonov koeficijent. Youngov modul i modul smicanja međusobno su povezani izrazom:

$$E = 2(1+\mu)G \tag{7-3}$$

Moduli ovise o primijenjenim efektivnim naprezanjima, povijesti naprezanja, koeficijentu pora i indeksu plastičnosti. Za nekoherentna tla modul posmika varira približno kao kvadratni korijen efektivnog modula volumne promjene. Za koherentna tla taj je odnos iskazan s potencijom koja varira od 0,5 do 1. Modul posmika tla pri malim deformacijama ovisi o kontaktnoj krutosti i strukturi. Stoga promjena brzine posmičnog vala s promjenom

naprezanja daje uvid u ovisnost naprezanja o kontaktnom pritisku. Prilikom računanja V_s i V_p pretpostavljamo da se tlo ponaša kao izotropno-elastični medij. Ako je materijal visokoelastičan, brzine valova postaju ovisne o frekvenciji, pa gore navedene formule nisu izravno primjenjive.

Ako dva uzorka istog tla imaju istu gustoću i pod istim su efektivnim naprezanjem, ali imaju različite strukture, imat će različite vrijednosti modula. Ta će se razlika odraziti razlikama u brzinama posmičnog i kompresijskog vala. Te se brzine mogu mjeriti, a to osigurava sredstvo za procjenu strukture. Brzina posmičnog vala je korisnija od ove dvije, jer se posmični valovi prenose samo kroz čvrstu zrnastu strukturu tla, odnosno posmični valovi se ne mogu prenijeti vodom. Anizotropna struktura tla i stanja naprezanja mogu se otkriti na temelju različitih brzina širenja posmičnog vala u različitim smjerovima.

Ako je materijal suh, modul K može se odrediti mjerenjem brzine posmičnog vala i kompresijskog vala. Ako materijal sadrži vodu, brzine P-vala ovise o elastičnim svojstvima čvrstih čestica tla i vode, zasićenosti i poroznosti. U uvjetima potpune zasićenosti dostupna su rješenja za dvofazne medije. Rješenja pokazuju da postoje dva P-vala i jedan S-val. Brzi P-val i S-val standardni su valovi, a brzine slabo ovise o frekvenciji. Spori P-val (ili Biotov val) je povezan s procesom difuzije protoka vode u deformabilnom poroznom mediju, posebno na niskim frekvencijama, te ga je vrlo teško otkriti. Stoga se brzi P-val i S-val obično koriste za karakterizaciju tla.

U potpuno zasićenom stanju, brzi P-val širi se brzinom koja je 10 do 15% veća od brzine kojom se širi kroz vodu. To je zato što krutost skeleta tla doprinosi povećanju brzine P-vala. S druge strane, brzina S-vala ne ovisi o zasićenosti vodom. S druge strane, u vrlo rahlom zasićenom tlu, P-val se kontrolira modulom vode i ima vrijednost oko 1500 m/s. Prilikom ulaska čak i male količine zraka, brzina P-vala se značajno smanjuje zbog smanjenja modula koji kontrolira smjesu tekućine i zraka.



Slika 7-1 Vrste mehaničkih valova u tlu (Kvasnička i Domitrović, 2007)

7.2. **Dielektrična disperzija i električna vodljivost**

Protok električne energije kroz tlo sastavljen je od (1) protoka samo kroz čestice tla, koji je mali, jer je čvrsta faza loš vodič, (2) protoka samo kroz pore i (3) protoka kroz čvrste čestice i pore. Ukupni električni protok također ovisi o poroznosti, zakrivljenosti protočnih puteva i uvjetima na granicama između čvrstih i tekućih faza. Ti faktori, pak, ovise o rasporedu čestica i gustoći. Stoga se jednostavno mjerenje električne vodljivosti činilo brzim i pouzdanim sredstvom za procjenu strukture tla. Međutim, električna mjerenja u tlima kompliciraju se ukoliko se koristi istosmjerna struja, zbog pojave elektrokinetičke sprege, poput elektroosmoze, i elektrokemijskih učinaka koji mogu uzrokovati nepovratne promjene u sustavu. S druge strane, ako se koristi izmjenična struja, tada izmjerene reakcije ovise o frekvenciji. Stoga primjena električnih metoda i tumačenje podataka zahtijevaju pažljivo razmatranje kako metoda mjerenja može utjecati na ono što se mjeri. Međutim, mjerenje frekvencijske ovisnosti električnih svojstava može biti korisno za procjenu strukture i procjene inženjerskih svojstava.

U sitnozrnatim materijalima kao što su gline, primjena izmjeničnog polja uzrokuje osciliranje električnih naboja koji su nakupljeni uz površine čestica s amplitudom koja ovisi o čimbenicima kao što su vrsta naboja, povezanost naboja s površinama, raspored čestica, te jakost i frekvencija polja. Ti titrajni naboji doprinose polarizacijskoj struji koja se može mjeriti. Broj naboja po jedinici volumena pomnožen s prosječnim pomakom je polariziranost. Veličina polariziranosti određena je sastavom i strukturom materijala, a izražava se dielektričnom konstantom. U kojoj će se mjeri razviti polarizacija ovisi o lakoći kretanja naboja i vremenu raspoloživom za pomicanje.

Karakteristike električne reakcije u niskofrekventnom području ovise o veličini i raspodjeli čestica, sadržaju vode, smjeru strujanja u odnosu na smjer preferirane orijentacije čestica, vrsti i koncentraciji elektrolita u porama, karakteristikama površine čestica i poremećenosti uzorka. Povezanost dielektričnih svojstava i parametara sastava i stanja poput poroznosti, oblika čestica, anizotropije strukture i specifične površine daje Arulanandan (preuzeto iz Mitchel i Soga, 2005). Teorija se temelji na odnosu između poroznosti i dielektričnih svojstava smjese otopine i sferičnih čestica te njezinog proširenja na elipsoidne čestice koje su sve orijentirane u jednom smjeru.

7.3. **Toplinska vodljivost**

Prijenos topline kroz tlo vrši se kroz zrna tla, vodu i zrak u porama. Kako je toplinska vodljivost minerala u tlu oko 2,9 W/(m · °C), a vode i zraka 0,6, odnosno 0,026 W/(m · °C), prijenos topline uglavnom se odvija kroz čestice tla. Sukladno tome, što je niži koeficijent pora, što je veći broj i površina kontakta među česticama i što je veći stupanj zasićenja, to je veća i toplinska vodljivost.

Toplinska vodljivost može se odrediti relativno jednostavnom metodom tranzijentnog protoka topline pri kojoj se linijski izvor topline, nazvan toplinska igla, ubacuje u tlo. Toplinska igla sadrži grijaću žicu i temperaturni senzor (slika 7-2). Kada se igla kontinuirano zagrijava, temperature T_2 i T_1, mjerene u vremenima t_2 i t_1, povezane su s toplinskom vodljivosti prema izrazu:

$$k = \frac{4}{Q}\pi \frac{\ln(t_2)-\ln(t_1)}{T_2-T_1} \tag{7-4}$$

gdje je Q primijenjena količina topline u vremenskom razdoblju od t_1 do t_2.

Razlike u toplinskoj vodljivosti u različitim smjerovima pružaju informaciju o anizotropiji tla. Primjerice odnos toplinske vodljivosti u horizontalnom i vertikalnom smjeru u glinama s preferiranom orijentacijom čestica varira od 1,05 do 1,7 ovisno o vrsti gline, konsolidacijskom pritisku i poremećenosti uzorka. Mjerenja toplinskim sondama također se mogu koristiti za otkrivanje razlika u gustoći na različitim mjestima u istom materijalu te za procjenu promjene gustoće, sadržaja vode i strukture uzrokovane mehaničkim i okolišnim promjenama na stanje tla.



Slika 7-2 TLS-100- uređaj kojim ispitujemo tlo metodom tranzijentnog protoka topline (Termtest INC., 2019.)

8. ZAKLJUČAK

Jedan od vrlo važnih parametara prilikom proučavanja ponašanja tla je njegova struktura. Informacije o strukturi nam mogu dati informacije poput onih o postanku i kasnijim procesima na promatranom prostoru. Može se, također dobiti uvid o utjecaju kvalitete uzorkovanja na strukturu tla odnosno stanje neporemećenosti uzorka, informacije o mobilizaciji vršne i rezidualne čvrstoću, kao i razvoju deformacija u tlu pri povećanju naprezanja i slično. Neizravnim metodama istraživanja strukture tla često se determiniraju svojstva poput homogenost i anizotropije tla in-situ (Yong i Warkentin, 1975).

Izravnim metodama, a naročito kombinacijom više njih, dobivaju se informacije o: raspodijeli, slojevima, homogenosti, ponašanju tla, diskontinuitetima, ravninama smicanja i mnogim drugim značajkama. Sve opisane metode sumarno su navedene u tablici 1, gdje su istaknute i osnovne značajke metoda, kao i njihove mogućnosti.

Tablica 1 Tehnike proučavanja strukture tla (Mitchel i Soga, 2005)

Metoda	Osnova	Opseg promatranja i uočljive značajke
Optički mikroskop (polarizacijski)	Izravno promatranje prijeloma površine tankih presjeka	Pojedinačne čestice veličine praha i veće, skupine čestica gline, preferirana orijentacija gline, homogenost u milimetarskom mjerilu ili veće, velike pore, zone smicanja
Elektronski mikroskop	Izravno promatranje čestica ili površina loma kroz uzorak tla (SEM) i promatranje površinskih replika (TEM)	Rezolucija na oko 100 Å; velika dubina polja sa SEM-om; izravno promatranje čestica; skupine čestica i prostor pora; detalji mikrostrukture; ekološki SEM može se koristiti za promatranje

		uzoraka koji sadrže vodu i plin
Rendgenska difrakcija	Skupine paralelnih glinenih listića proizvode jaču difrakciju od slučajno orijentiranih listića	Orijentacija u zonama s površinom od nekoliko kvadratnih milimetara i debljinom od nekoliko mikrometara; najbolje u čistim monomineralnim glinama
Analiza distribucije veličine pora	Prisilni upad nemočivog fluida (obično živa) ili kapilarna kondenzacija	Pore veličina od 0,01 do 10 μm, a za kapilarnu kondenzaciju maksimalna veličina 0,1 μm
Širenje električnih valova	Raspored čestica, gustoća i naprezanje utječu na brzinu vala	Anizotropija; određuje strukturu preko volumena jednakog veličini uzorka
Dielektrična disperzija i električna vodljivost	Varijacije dielektrične konstante i vodljivosti s frekvencijom	Procjena anizotropije, flokulacije i deflokulacije;
Toplinska vodljivost	Orijentacija i gustoća čestica utječu na toplinsku vodljivost	Anizotropija

Zaključno, možemo reći da istraživanja strukture tla nisu značajnije zastupljena u geotehničkom inženjerstvu, kao što se to može reći za neka druga znanstvena područja. Pregledom literature uočeno je, da je utjecaj strukture tla na njegovo ponašanje značajan, od istraživanja homogenosti i izotropije tla do istraživanja mehaničkog i hidrauličkog ponašanja, pa bi bilo poželjno metode, koje su ukratko opisane u ovom radu, ubuduće češće koristiti.

9. LITERATURA

KVASNIČKA P., DOMITROVIĆ D. 2007. Mehanika tla. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

MITCHELL J.K., SOGA K. 2005. Fundamentals od Soil Behavior. Treće izdanje. Kanada: John Wiley & Sons, INC.

NONVEILLER E. 1979. Mehanika tla i temeljenje građevina. Zagreb: Školska knjiga.

ROFA d.o.o. 2019. XRD MiniFlex. URL: http://www.rofa.hr/ponuda/rigaku/miniflex (12.09.2020.)

RUŽIČIĆ S. 2015. Opća mineralogija i kristalografija URL: https://moodle.srce.hr/2015-2016/pluginfile.php/399266/mod_resource/content/1/Predavanje_3_op%C4%87a%20mineralogija%2C%20kristalografija.pdf (10.09.2020.)

SHANMUKA 2016. Soil structure/Soil fabric. URL: https://knowledge4civil.wordpress.com/2016/12/11/soil-structuresoil-fabric (07.09.2020.)

SVEUČILIŠTE U RIJECI 2010. Skenirajući elektronski mikroskop (SEM). URL: https://www.phy.uniri.hr/hr/ustroj/29-hr/ustroj/laboratoriji/800-pretrazni-elektronski-mikroskop.html (12.09.2020.)

TERMTEST INC.2019. Portable Thermal Conductivity measuring. URL: https://thermtest.com/applications/soil-thermal-conductivity-tls

TOMAŠIĆ N. 2015. Mineralna Optika. URL: http://geol.pmf.hr/~ntomasic/predavanja/Predavanja_Mineralna_Optika.pdf (05.09.2020.)

WIKIPEDIA 2020. Elektronski Mikroskop. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektronski_mikroskop (02.09.2020.)

WIKIPEDIA 2020. Struktura tla. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Struktura_tla (30.08.2020.)

YONG R.N., WARKENTIN B.P. 1975. Soil Properties and Behaviour. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.