Usporedba laboratorijskih i empirijskih metoda određivanja koeficijenta propusnosti tla

Živković, Patricia

Master's thesis / Diplomski 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:169:456479

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

Diplomski studij geološkog inženjerstva

USPOREDBA LABORATORIJSKIH I EMPIRIJSKIH METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI TLA

Diplomski rad

Patricia Živković

GI 372

Zagreb, 2020.

KLASA: 602-04/20-01/32
URBROJ: 251-70-03-20-3
U Zagrebu, 10.06.2020.

Patricia Živković, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/32, UR. BROJ: 251-70-03-20-1 od 18.02.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

USPOREDBA LABORATORIJSKIH I EMPIRIJSKIH METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI TLA

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

Voditeljica

(potpis)

Prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko Ružičić

(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

Diplomski rad

USPOREDBA LABORATORIJSKIH I EMPIRIJSKIH METODA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI TLA

PATRICIA ŽIVKOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

U diplomskom radu provedena su ispitivanja koeficijenta propusnosti definiranog kao mjera sposobnosti medija (tla, stijene) da propušta vodu. Ispitana su četiri uzorka koja su pripremljena u laboratoriju kombinacijom različitih frakcija prirodnog tla, kako bi se mogao utvrditi utjecaj veličine čestica i graduiranosti tla na vrijednosti koeficijenta propusnosti. Granulometrijski sastav tla određen je metodom sijanja prema normi ASTM D 422. Koeficijent propusnosti laboratorijski je određen na svim uzorcima korištenjem metode permeametra sa stalnom razinom. Ispitivanja metodom permeametra sa stalnom razinom provedena su prema normi ASTM D 2434-68. U navedenim normama definirani su načini pripreme i ugradnje uzoraka, provedba pokusa i obrada rezultata. Dobiveni podaci su analizirani i uspoređeni s empirijskim metodama.

Ključne riječi:	koeficijent propusnosti/hidraulička vodljivost, permeametar, empirijske metode
Završni rad sadrži:	56 stranica, 11 tablica, 24 slika, 12 referenci
Jezik izvornika:	hrvatski
Pohrana rada:	Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentorica:	Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF
Pomoć pri izradi:	Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
	Mirela Burečić Šafran, mag. ing. rud., RGNF
Ocjenjivači:	Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF
	Dr. sc. Jelena Parlov, izvanredna profesorica RGNF
	Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF

Datum obrane: 10. srpnja 2020.

University of Zagreb Master's Thesis

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

COMPARISON OF THE LABORATORY AND EMPIRICAL METHODS IN DETERMINING OF THE COEFFICIENT OF SOIL PERMEABILITY

PATRICIA ŽIVKOVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering

Department of Mining Engineering and Geotechnics

Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

In this thesis, the permeability coefficient is defined as a measure of the medium's (soil, rock) ability to transmit water. Four samples were artificially prepared in the laboratory by combining different soil fractions to determine the effect of particles' size and gradation of soil on the values of the permeability coefficient. The sieving method was performed according to ASTM D 422 for the determination of the particle size distribution of soil. Coefficient of permeability was determined by laboratory testing method of a constant head permeameter on all samples. Those results were analyzed and compared to empirical methods. Testing with a constant head permeameter was performed according to ASTM D 2434-68. In the mentioned standards, the details for the preparation and installation of samples, conducting of experiments and processing of results are defined.

Keywords	coefficient of permeability/ hydraulic conductivity, permeameter, empirical methods
Thesis contains:	56 pages, 11 tables, 24 figures, 12 references
Original in:	Croatian
Archived in:	Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb
Supervisor:	PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor
Tech. assistance:	PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor Mirela Burečić Šafran, Mag.ing.min.
Reviewers:	PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor PhD Jelena Parlov, Associate professor PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor

Date of defense: July 10, 2020.

Zahvale

Prije svega zahvaljujem se mentorici, prof. dr. sc. Biljani Kovačević Zelić na stručnim savjetima, razumijevanju i pomoći pri izradi ovog diplomskog rada.

Srdačno se zahvaljujem dipl. ing. Evelini Oršulić na susretljivosti, pomoći i strpljenju tijekom provedenih laboratorijskih ispitivanja.

Veliko hvala doc. dr. sc. Dubravku Domitroviću na uloženom vremenu i strpljenju. Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Jeleni Parlov na stručnim savjetima i uloženom vremenu.

Najveće hvala mojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom cijelog studiranja. Hvala mojoj sestri Gabrieli koja je uvijek bila uz mene u svakom porazu i uspjehu tijekom cijelog mog školovanja.

Za kraj htjela bih citirati jedan od meni dragih citata oca mehanike tla, Karla von Terzaghija:

"Da bi se postigla kompetencija u zemljanim radovima mora se živjeti s tlom. Mora ga se voljeti i promatrati njegovo ponašanje, ne samo u laboratoriju nego također i na terenu, kako bi se postalo bliskim s onima od mnogih svojstava koja se ne otkrivaju u zapisnicima bušenja i laboratorijskih pokusa. Iskustvo koje se time stječe slično je znanju koje poljodjelac akumulira tijekom vremena u odnosu prema komadu zemlje koji voli i obrađuje. Ja sam također ustanovio, tijekom godina, da znanje akumulirano u ljudskome mozgu nema praktične vrijednosti ako njegov vlasnik nema moralne hrabrosti da se njime služi kao osnovom za odlučivanje. I na kraju, ne mogu dovoljno naglasiti da nikada ne propustim priliku ustanoviti izravnim promatranjem, razliku između predviđenog i stvarnog ponašanja. Istražujući svoje, za života stečeno znanje, s kojim sam uspostavio vlastiti sustav zdravo-razumskog rasuđivanja, ustanovio sam:

"Moje znanje, na svaki kilogram teorije konstrukcija i mehanike tla, sadrži 100 g geologije. Tih 100 g geologije bitno je kao što je bitan kvasac u procesu fermentacije u kruhu, ali predstavlja samo mali dio znanja koje pokrivaju znanosti o zemlji." (Karl Terzaghi, ICSMF, London, 1957.).

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA V

1. UVOD 1

2. KOEFICIJENT PROPUSNOSTI 3

3. LINEARNI ZAKON FILTRACIJE 9

4. METODE ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI 12

4.1. Laboratorijska metoda – permeametar 14

4.1.1. Permeametar sa stalnom razinom 15

4.1.2. Permeametar s promjenjivom razinom 16

4.2. Konvencionalne metode i uređaji 18

4.3. Empirijske metode 19

4.3.1. Hazen 20

4.3.2. Breyer 21

4.3.3. Slichter 22

4.3.4. Terzaghi 22

4.3.5. USBR 23

4.3.6. Kozeny-Carman 23

5. ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA TLA 25

5.1. Postupak određivanja granulometrijskog sastava tla 25

5.2. Obrada rezultata granulometrijskog sastava tla 26

6. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI PERMEAMETROM SA STALNOM RAZINOM 31

6.1. Priprema uzorka 31

6.2. Priprema ćelije za ugradnju uzorka 31

6.3. Sastavljanje ćelije i ugradnja uzorka 32

6.4. Postupak ispitivanja 37
6.5. Obrada rezultata 38
7. KORELACIJA VRIJEDNOSTI DOBIVENIH METODOM PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM I PODATAKA DOBIVENIH EMPIRIJSKIM IZRAZIMA 45
7.1. Obrada rezultata 45
9. ZAKLJUČAK 53
10. LITERATURA 56

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Trokomponentni karakter tla 3
Slika 2-2. Prikaz vrijednosti koeficijenta propusnosti za različite vrste tala (Urumović, 2003.) 4
Slika 3-1. Shematski prikaz Darcyjevog uređaja (Bačani 2006.) 9
Slika 4-1. Shematski prikaz permeametra sa stalnom razinom (Urumović, 2003.) 16
Slika 4-2. Shematski prikaz permeametra s promjenjivom razinom (Urumović, 2003.) 17
Slika 5-1. Određivanje granulometrijskog sastava tla 25
Slika 5-2. Granulometrijske krivulje ispitnih uzoraka 28
Slika 6-1. Dijelovi ćelije permeametra 32
Slika 6-2. Postavljanje tronošca 33
Slika 6-3. Postavljanje manometarskih spojnica 33
Slika 6-4. Ugradnja uzorka 34
Slika 6-5. Detalji ugradnje uzorka 34
Slika 6-6. Pričvršćivanje potisnog klipa 35
Slika 6-7. Saturacija ugrađenih uzoraka 36
Slika 6-8. Ustaljene razine vode u cjevčicama 37
Slika 6-9. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za jednoliko graduirani pijesak (SU) 39
Slika 6-10. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za jednoliko graduirani šljunak (GU) 40
Slika 6-11. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za dobro graduirani šljunak (GW) 40
Slika 6-12. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za loše graduirani šljunak (GP) 41
Slika 6-13. Granulometrijske krivulje ispitnih uzoraka i vrijednosti koeficijenta propusnosti 42
Slika 7-1. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak SU 49
Slika 7-2. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak GU 50
Slika 7-3. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak GW 50
Slika 7-4. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak GP 51

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Klasifikacija tla prema stupnju koeficijenta propusnosti (Petrinjek, i dr., 2018.) 5
Tablica 2-2. Stanje zbijenosti tla (Kvasnička i Domitrović, 2007.) 6
Tablica 2-3. Vrijednosti koeficijenta propusnosti za pojedinu vrstu stijene ili tla (Domenico i Schwartz, 1990.) 8
Tablica 5-1. Prikaz rezultata za jednoliko graduirani pijesak 26
Tablica 5-2. Prikaz rezultata za jednoliko graduirani šljunak 27
Tablica 5-3. Prikaz rezultata za dobro graduirani šljunak 27
Tablica 5-4. Prikaz rezultata za loše graduirani šljunak 28
Tablica 5-5. Klasifikacija tla po normi ASTM D 2487 29
Tablica 5-6. Vrijednosti parametara ispitanih uzoraka 30
Tablica 6-2. Vrijednosti koeficijenta propusnosti ispitnih uzoraka metodom permeametra sa stalnom razinom 42
Tablica 7-1. Usporedba vrijednosti dobivenih permeametrom sa stalnom razinom i podataka dobivenih empirijskim korelacijama 46

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

A	površina poprečnog presjeka	(m^2)
c	bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke stijene ili tla (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pore)	(-)
Cc	koeficijent zakrivljenosti	(-)
Cu	koeficijent jednoličnosti	(-)
d	promjer pore kroz koju se fluid filtrira	(m)
d_{10}	karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza	(mm)
d_{20}	karakteristični promjer zrna kod 20 % prolaza	(mm)
d_{30}	karakteristični promjer zrna kod 30 % prolaza	(mm)
d_{60}	karakteristični promjer zrna kod 60 % prolaza	(mm)
d_e	efektivni promjer zrna	(mm)
$f(n)$	funkcija poroznosti	(-)
g	ubrzanje sile teže	(m/s^2)
ρ_v	gustoća fluida	(kg/m^3)
$\frac{\rho_1}{\rho_g}, \frac{\rho_2}{\rho_g}$	tlačna visina	(m)
h	razlika tlakova na gornjoj i donjoj strani uzorka ($(h_1 + h_2)/2$)	(m)
h_1	razlika tlakova na gornjoj i donjoj strani uzorka u vremenu t_1	(m)
h_2	razlika tlakova na gornjoj i donjoj strani uzorka u vremenu t_2	(m)
ΔH	visina energetskog horizonta	(m)
i	hidraulički gradijent	(-)
I_D	indeks relativne gustoće	(-)
k	koeficijent propusnosti	(m/s)
K	unutrašnja propusnost	(m^2)
L	visina uzorka	(m)
n	poroznost tla	(-)
η	dinamički viskozitet fluida	(kg/ms)
Q	količina vode koja protječe kroz porozni materijal; protok	(m^3/s)
q	specifični protok	(m/s)
q_{ul}	količina vode koja ulazi u uzorak s donje strane	(m/s)

q_{iz}	količina vode koja izlazi iz uzorka	(m/s)
Δt	interval vremena (s) u kojem dolazi do protoka ΔQ (t_2 - t_1)	(s)
t_1	vrijeme početka mjerenja vodopropusnosti (datum, vrijeme)	(s)
t_2	vrijeme završetka mjerenja vodopropusnosti (datum, vrijeme)	(s)
v	prividna ili Darcyjeva brzina toka	(m/s)
$\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g}$	brzinska visina	(m)
v	kinematički koeficijent viskoznosti	(m^2/s)
z_1, z_2	nadmorska, geodetska visina	(m)

1. UVOD

Prilikom provođenja inženjerskih zahvata i izgradnje geotehničkih objekata, često treba odrediti koeficijent propusnosti, kao jedan od bitnih projektnih parametara tla. Tečenje fluida igra veliku ulogu kod razvoja deformacija, promjene volumena, stabilnosti, a utječe i na brzinu odvijanja samih procesa. Postoje brojna istraživanja koja se bave proučavanjem toka vode kroz poroznu sredinu radi čestih geotehničkih problema koji se mogu pojaviti uslijed protjecanja vode. Neka od njih su problemi s prodorom vode, dugotrajna konsolidacija, poremećaji stabilnosti i slično.

Koeficijent propusnosti najčešće se opisuje kao mjera sposobnosti medija (tlo, stijena) da propušta vodu odnosno to je lakoća kojom se neki fluid kreće kroz tlo ili stijenu. On se može odrediti laboratorijskim i terenskim metodama ili procijeniti korištenjem empirijskih izraza. Koristi se za modeliranje procjeđivanja vode kroz tlo, te utjecaja na stanje naprezanja i deformacija u tlu.

U svrhu izrade ovog diplomskog rada provedena su laboratorijska ispitivanja koeficijenta propusnosti tla metodom permeametra sa stalnom razlikom potencijala. Prije samog ispitivanja pripremljeni su umjetni uzorci, kombinacijom različitih frakcija tla kako bi se mogla utvrditi ovisnost koeficijenta propusnosti tla o veličini čestica i graduiranosti tla. Dobiveni podaci pomoću permeametra uspoređeni su s koeficijentom propusnosti koji je određen korištenjem različitih empirijskih izraza.

Rezultati koji su dobiveni laboratorijskim metodama na uzorcima manjih dimenzija često mogu dati nedovoljno pouzdane podatke o propusnosti tla. Zato se u nekoherentnom, jače propusnom tlu koeficijent propusnosti mjeri na terenu (Nonveiller, 1981.). Određivanje koeficijenta propusnosti terenskim metodama provodi se: mjerenjem brzine tečenja nagnutog homogenog podzemnog toka vode, pokusnim crpljenjem ili utiskivanjem i drugim terenskim metode. Mjerenje brzine tečenja nagnutog homogenog podzemnog toka vode provodi se tako da se na odgovarajućoj udaljenosti u smjeru najvećeg pada vodnog lica naprave dvije bušotine u vodonosnom sloju. U uzvodnu bušotinu ubaci se boja (uranin i sl.), ili sol, pa se vađenjem uzorka vode iz nizvodne bušotine prati pojava oblaka boje i soli. Iz proteklog se vremena izračuna brzina tečenja v. Mjerenje razine podzemne vode u tim

bušotinama daje pad nivoa i gradijent tlaka *i* u smjeru toka. Pouzdani rezultati se mogu dobiti samo ako je vodonosni sloj homogen i jednoličnog nagiba (Nonveiller, 1981.).

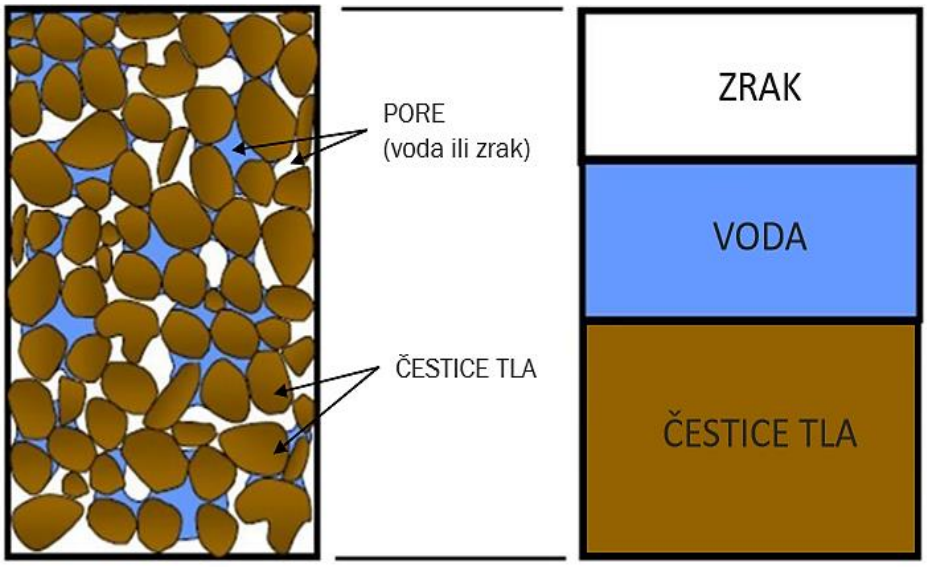
Ispitivanja su provedena u Geomehaničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu. Pri tome su za određivanje granulometrijskog sastava te koeficijenta propusnosti tla korištene norme ASTM D 422, ASTM D 2434 – 68 koje definiraju pripremu i ugradnju uzoraka, provedbu pokusa i obradu rezultata. Metoda sijanja korištena je u svrhu određivanja granulometrijskog sastava tla kako bi se mogli definirati parametri koji su korišteni prilikom izračuna empirijskim korelacijama.

Prema Posavec. i dr. (2018.) navodi se kako se u različitim znanstvenim područjima koja se bave istraživanjem podzemnih voda mogu koristiti pojmovi hidraulička vodljivost ili koeficijent propusnosti. Termini koji se danas najčešće koriste u hidrogeološkoj literaturi i praksi su hidraulička vodljivost, K [L/T] (m/s u SI sustavu) ili koeficijent propusnosti, k [L/T] (m/s u SI sustavu), a koriste se specifično za označavanje jednofaznog tečenja vode kroz porozni medij. Pojam propusnost, k [L^2] (m^2 u SI sustavu) predstavlja unutarnju, apsolutnu ili specifičnu propusnost koja se odnosi na porozni medij koji je potpuno saturiran s jednofaznim fluidom tj. vodom u razmatranom slučaju, a koji predstavljaju karakteristike isključivo porozne sredine, ne i fluida. Hidraulička vodljivost označava kapacitet porozne sredine da provodi vodu, a propusnost označava kapacitet porozne sredine da provodi bilo koji fluid.

U okviru diplomskog rada korišten je termin koeficijent propusnosti *k*, koji se koristi u okviru geotehničkih istraživanja.

2. KOEFICIJENT PROPUSNOSTI

Tlo je materijal koji se sastoji od tri komponente: čvrstih čestica, tekuće i plinovite faze u porama između čestica. Riječ je o tzv. trokomponentnom karakteru tla (Slika 2-1.). U ponašanju tla odražavaju se svojstva svih triju faza kao i njihove interakcije. Ponašanje takvog materijala je vrlo kompleksno, radi čega je neophodno proučiti karakteristike svake faze, a zatim i njihovu interakciju. Čestice tla su zrna i pločice vrlo različitih veličina, oblika i mineraloškog sastava. Čestice tla opisane su gustoćom, granulometrijskim sastavom, bojom, oblikom i mineraloškim sastavom čestica. U tlu najčešće imamo dva fluida (voda i zrak) što samo opisivanje tečenja čini složenijim nego kada imamo samo jedan fluid. Najčešće se proučavaju ili potpuno suha ili potpuno zasićena tla. (Kvasnička i Domitrović, 2007.).



Slika 2-1. Trokomponentni karakter tla

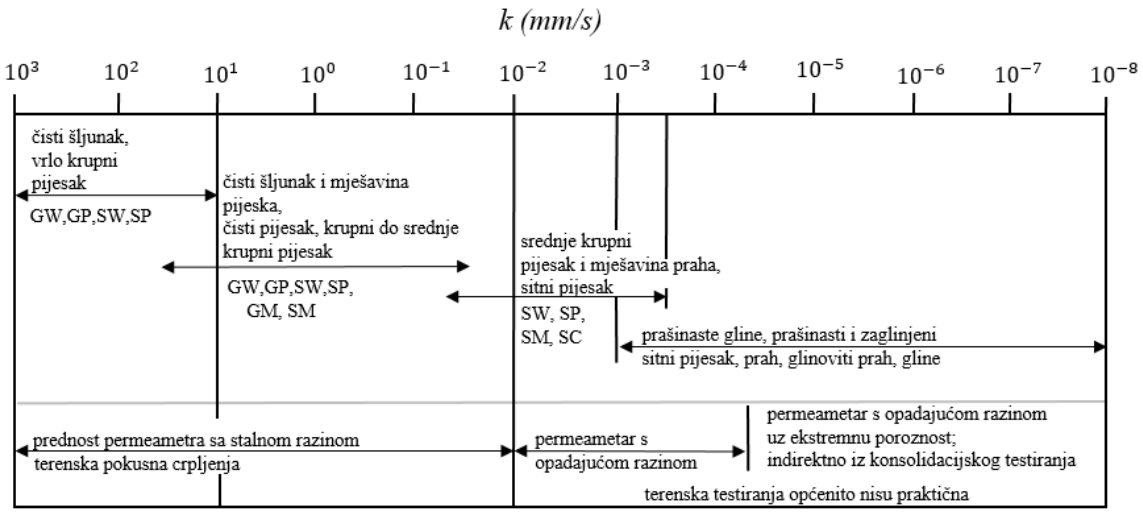
Tečenje vode u poroznom mediju povezano je s porama koje se nalaze između čestica. Promatrajući pore u tlu može se uočiti kako one mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene vodom. Kada je u tlu cjelokupni prostor pora ispunjen vodom, u njemu djeluje hidrostatski tlak.

Koeficijent propusnosti osnovni je parametar za strujanje vode kroz tlo. Veličina koeficijenta propusnosti prvenstveno ovisi o veličini pora, koje pak ovise o

granulometrijskom sastavu tla. Što je manji promjer zrna to su i pore manje, time je manji i koeficijent propusnosti. Već i mala količina sitnih čestica (promjera manjeg od 0,06 mm) znatno smanjuje prosječni promjer pora, a time i koeficijent propusnosti.

Koeficijent propusnosti osim o vrsti materijala (Slika 2-2.) ovisi i o vrsti tekućine koja se procjeđuje kroz porozni medij. Vrijednosti koeficijenta propusnosti različitih vrsta sedimenta dane su na slici u mm/s, a mogu se prikazati u m/dan (1 dan = 86 400 s). Očit je vrlo veliki raspon mogućih veličina koeficijenta propusnosti.

Predstavlja se kao osnovni parametar za strujanje vode u tlu, a zavisno o vrsti tla varira u rasponu od preko deset redova veličine. Niti za jednu vrstu tla koeficijent propusnosti nije konstantan, već zavisi o svojstvima poroznog medija i svojstvima fluida. Prema tome možemo reći kako ovisi o: veličini zrna, koeficijentu pora, obliku zrna, njihovoj raspodjeli i povezanosti tj. o strukturi tla, količini zraka u porama i o mineraloškom sastavu tla.



Slika 2-2. Prikaz vrijednosti koeficijenta propusnosti za različite vrste tala (Urumović, 2003.)

Koeficijent propusnosti može se definirati kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene/tla jedinične površine (F = 1 m^2) uz jedinični hidraulički gradijent tj. pad potencijala za 1 m na udaljenosti od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode (dimenzija L/T na pr. *m/s, m/dan, cm/s*) (Bačani 2006.). On ovisi o značajkama stijene ili tla kroz koji teče fluid i o značajkama tog fluida (2-1):

$$k = c \times d^2 \times \frac{\rho_v \times g}{\eta} = K \times \frac{\rho_v \times g}{\eta} \quad (2\text{-}1)$$

gdje je:

k – koeficijent propusnosti (m/s),

c – bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje značajke stijene ili tla (poroznost, zbijenost, oblik zrna o čemu ovisi geometrija pore),

d – promjer pore kroz koju se fluid filtrira (m),

g – ubrzanje sile teže (m/s^2),

ρ_v – gustoća fluida (kg/m^3),

η – dinamički viskozitet fluida (Pas = kg/ms)

K - unutrašnja propusnost (m^2)

Na značajke stijene ili tla odnosi se izraz cd^2, a naziva se propusnost, permeabilnost ili unutrašnja propusnost *K* izražena u m^2. S druge strane, izraz $\frac{\rho_v \times g}{\eta}$ odnosi se na značajke fluida.

Prema veličini koeficijenta propusnosti tlo se može klasificirati od praktično nepropusnih do vrlo propusnih tala (Tablica 2-1.).

Tablica 2-1. Klasifikacija tla prema stupnju koeficijenta propusnosti (Petrinjek, i dr., 2018.)

Stupanj propusnosti	Vrijednosti koeficijenta propusnosti *k* [m/s]
Visoki	$> 10^{-3}$
Srednji	$10^{-3} – 10^{-5}$
Niski	$10^{-5} – 10^{-7}$
Vrlo niski	$10^{-7} – 10^{-9}$
Praktički nepropustan	$< 10^{-9}$

Određivanje koeficijenta propusnosti u određenim geotehničkim zahvatima zahtjeva veliku točnost kao što su problemi koji su vezani za zbrinjavanje otpada, naročito opasnog.

Suprotno tomu, kod rješavanja problema vezanih za stabilnost pokosa, dovoljno je poznavati koeficijent propusnosti unutar jednog reda veličine ili dokazati da se ona nalazi u nekim granicama. Prije samog određivanja koeficijenta propusnosti potrebno je ispitati odgovarajuća svojstva tla koja obuhvaćaju granulometrijski sastav, oblik i veličinu zrna, specifičnu gustoću čestica tla, poroznost i saturiranost.

U laboratorijskim uvjetima u homogenom, izotropnom materijalu koeficijent propusnosti lako je odrediti. U prirodnim uvjetima u tlu redovito postoje primjese različitih frakcija, a i utjecaj zbijenosti pa se, radi toga, koeficijent propusnosti *k* određuje na osnovu pokusa na terenu. Stanje zbijenosti definira se pomoću indeksa relativne gustoće (I_D) za nekoherentne materijale koji predstavlja jedan od indeksnih parametara koji uz granulometrijski sastav tla daje informacije o svojstvima tla koja su povezana s porozitetom i vlažnošću tla. Indeks relativne gustoće računa se na sljedeći način (2-2):

$$I_D = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \qquad (2\text{-}2)$$

gdje je:

e_0 – koeficijent pora u prirodnom stanju,

e_{max} – koeficijent pora u najgušćem stanju,

e_{min} – koeficijent pora u najrahlijem stanju.

Stanje tla prema prirodnoj zbijenosti može biti od vrlo rahlog do vrlo zbijenog (Tablica 2-2.).

Tablica 2-2. Stanje zbijenosti tla (Kvasnička i Domitrović, 2007.)

STANJE	I_D (-)
vrlo rahlo	< 20
rahlo (rastresito)	0,20 – 0,40
srednje zbijeno	0,40 – 0,60
zbijeno	0,60 – 0,80
vrlo zbijeno	> 0,80

Vrijednosti koeficijenta propusnosti za pojedine vrste stijena ili tla prikazane su u tablici 2-3. Vidljivo je kako najniže vrijednosti imaju neraspucale magmatske i metamorfne stijene, a najviše vrijednosti ima šljunak, okršeni i grebenski vapnenac i propusni bazalt.

Unutar jedne grupe stijena najmanje razlike su kod sedimenata, a najveće kod kristalinskih stijena. U rješavanju praktičnih problema uzima se da su stijene koje imaju koeficijent propusnosti, k manji ili jednak 10^{-9} m/s nepropusne. U toj skupini nalazimo glinu, šejl, te neraspucane magmatske i metamorfne stijene. Ako su te iste vrste stijena raspucale, onda njihov koeficijent propusnosti može biti za dva ili tri reda veličine veći (Bačani, 2006.).

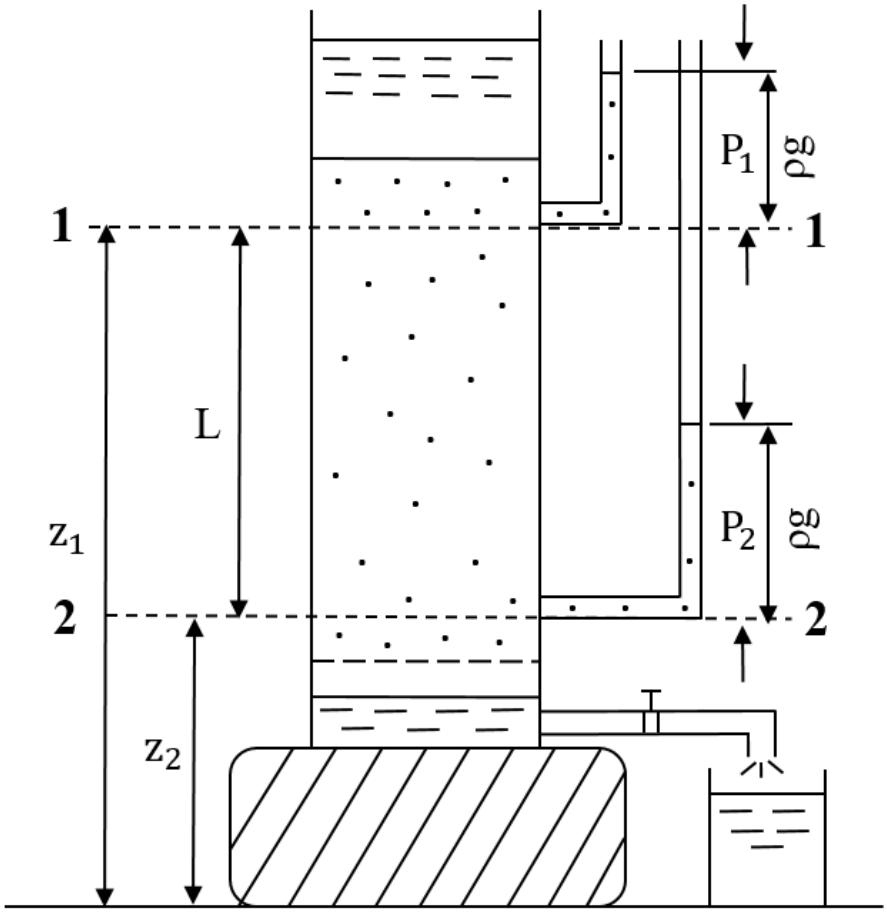
U geotehničkoj literaturi koristi se termin koeficijent propusnosti, dok je ekvivalent navedenom terminu u okviru hidrogeologije termin hidraulička vodljivost (eng. *hydraulic conductivity*). U nastavku diplomskog rada koristit će se termin koeficijent propusnosti.

Tablica 2-3. Vrijednosti koeficijenta propusnosti za pojedinu vrstu stijene ili tla (Domenico i Schwartz, 1990.)

Vrsta stijene/tla	Koeficijent propusnosti, *k* (m/s)
SEDIMENTI:	
Šljunak	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
Krupnozrnati pijesak	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$
Srednjezrnati pijesak	$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$
Sitnozrnati pijesak	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-4}$
Prah (silt), les	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
Glina	$1 \times 10^{-11} - 4{,}7 \times 10^{-9}$
SEDIMENTNE STIJENE:	
Okršeni i grebenski vapnenac	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-2}$
Vapnenac, dolomit	$1 \times 10^{-9} - 6 \times 10^{-6}$
Pješčenjak	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$
Siltit	$1 \times 10^{-11} - 1{,}4 \times 10^{-8}$
Sol	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-10}$
Anhidrit	$4 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-8}$
Šejl	$1 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$
KRISTALINSKE STIJENE:	
Raspucale magmatske i metamorfne stijene	$8 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-3}$
Neraspucale magmatske i metamorfne stijene	$3 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-10}$
Rastrošeni granit	$3{,}3 \times 10^{-6} - 5{,}2 \times 10^{-5}$
Rastrošeni gabro	$5{,}5 \times 10^{-7} - 3{,}8 \times 10^{-6}$
Bazalt	$2 \times 10^{-11} - 4{,}2 \times 10^{-7}$
Permeabilni bazalt	$4 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-2}$

3. LINEARNI ZAKON FILTRACIJE

Temeljni zakon koji opisuje laminarni gravitacijski tok vode u poroznoj sredini uspostavljen je empirijski (Darcy, 1865.) i naziva se Darcyjev zakon. Francuski inženjer Henry Darcy ustanovio je da je strujanje vode kroz tlo analogno strujanju vode u uzorku. Darcyjev uređaj imao je oblik cilindrične posude ispunjene ispitivanim poroznim materijalom (pijeskom) koji je prikazan na slici 3-1. Na površinu poroznog medija Darcy je dodavao vodu, te je na taj način održavao stalnu razinu. S donje strane bila je rešetka kroz koju je procijeđena voda otjecala u menzuru. U kontrolnim presjecima 1-1 i 2-2 postavljeni su piezometri za mjerenje tlačnih visina (Žugaj, 2015.).



Slika 3-1. Shematski prikaz Darcyjevog uređaja (Žugaj, 2015.)

Na tok vode u presjecima 1-1 i 2-2 može se primijeniti Bernoullijeva jednadžba (3-1):

$$z_{1+}\frac{\rho_1}{\rho_g}+\frac{v_1^2}{2g}=z_{2+}\frac{\rho_2}{\rho_g}+\frac{v_2^2}{2g}+\Delta H \qquad (3\text{-}1)$$

gdje je:

z_1, z_2 – nadmorska, geodetska visina - položaj strujnice, odnosno osi cijevi u odnosu na geodetski horizont (m),

$\frac{\rho_1}{\rho_g}, \frac{\rho_2}{\rho_g}$ – tlačna visina, tj. dubina točke ispod razine vode u piezometru (m),

$\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g}$ - brzinska visina – visina s koje bi tijelo u zrakopraznom prostoru palo i dobilo brzinu v (m),

ΔH – visina energetskog horizonta – koja se za idealnu tekućinu ne mijenja od presjeka do presjeka (m).

Brzine v_1 i v_2 vrlo su male prema tome je i njihova kvadratna vrijednost podijeljena s dvostrukom vrijednosti gravitacije zanemarivo mala u odnosu na tlačne visine $\frac{\rho_1}{\rho_g}$ i $\frac{\rho_2}{\rho_g}$, a ukoliko su površine presjeka 1-1 i 2-2 jednake, brzinske visine $\frac{v_1^2}{2g}$ i $\frac{v_2^2}{2g}$ se poništavaju pa izraz poprima oblik (3-2):

$$(z_{1+}\frac{\rho_1}{\rho_g})-(z_{2+}\frac{\rho_2}{\rho_g})=\Delta H \qquad (3\text{-}2)$$

Promjena tlaka ΔH može se svesti na jedinicu duljine, pa je hidraulički gradijent *i* jednak izrazu (3-2):

$$i=\frac{\Delta H}{L}=\frac{h_1-h_2}{L} \qquad (3\text{-}2)$$

Razlika hidrauličkog potencijala (h_1-h_2) podijeljena s duljinom L tj. linijom tečenja naziva se hidraulički gradijent *i*. Nakon što se izmjeri protok vode i podjeli s površinom protjecajnog presjeka *A*, dobiven je sljedeći izraz (3-4):

$$v = k \times i \tag{3-4}$$

Izraz Q = k × i × A predstavlja Darcyjev zakon, a koeficijent *k* je koeficijent propusnosti. Darcyeva brzina tečenja nije stvarna brzina tečenja vode kroz pore tla, jer se računa kao da voda teče kroz cijelu površinu *A*. Prema tome količina vode koja protječe jediničnom površinom iznosi (3-5):

$$\frac{Q}{A} = q = v = k \times \frac{h_1 - h_2}{L} = - k \times i \tag{3-5}$$

gdje je:

Q – količina vode koja protječe kroz porozni materijal; protok (m^3/s),

A – površina poprečnog presjeka okomita na smjer toka (m^2),

q – specifični protok tj. količina vode koja protječe kroz jediničnu površinu poprečnog presjeka (m/s),

v – prividna ili Darcyjeva brzina toka (m/s),

k – faktor proporcionalnosti za kojeg Darcy navodi da ovisi o propusnosti sloja (m/s),

h_1, h_2 – visine vode (potencijali) iznad referentne ravnine mjerene pomoću manometara na ulazu i izlazu poroznog medija (m),

i – hidraulički gradijent (bezdimenzijska veličina), gubitak mehaničke energije fluida (vode) duž toka ili pad potencijala na promatranom putu. S obzirom da se voda kreće s mjesta višeg na mjesto nižeg potencijala, stavljamo znak minus u jednadžbu (3-6).

Kako je hidraulički gradijent bezdimenzionalna veličina, slijedi da koeficijent propusnosti ima dimenziju brzine, odnosno kada je hidraulički gradijent jednak jedinici, koeficijent propusnosti je jednak brzini protjecanja. Prema tome koeficijent propusnosti *k* predstavlja brzinu procjeđivanja pri nagibu odnosno gradijentu $i = 1$. Brzina tečenja u poroznom materijalu vrlo je mala, pa je kretanje podzemne vode najčešće laminarno. Samo pri kretanju vode velikim brzinama kroz šljunke, tečenje podzemne vode je turbulentno, a za takve slučajeve ne vrijedi Darcyjev zakon. Granica tečenja za porozni medij je u rasponu od 1 do 10.

4. METODE ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI

Postoje brojne metode koje se mogu koristiti za određivanje koeficijenta propusnosti. Koeficijent propusnosti može se odrediti terenskim i laboratorijskim metodama. Terenska ispitivanja zahvaćaju znatno veći volumen ispitivanog područja. S druge strane, laboratorijska ispitivanja zahvaćaju mali volumen promatranog područja tako da postoji problem dobivanja reprezentativnih uzoraka. Sam odabir metode ovisit će o cilju istraživanja i raspoloživim sredstvima. Najčešće korištene metode su:

1. laboratorijske metode: permeametar, metoda sa stalnom razlikom tlakova u troosnom uređaju i metoda s promjenjivom razlikom tlakova u edometru (konvencionalne metode), metoda sa zadanim protokom (*eng. flow pump test),*
2. metoda koja se temelji na empirijskim formulama uz korištenje podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine,
3. terenske metode: na pr. metoda pokusnog crpljenja.

Koeficijent propusnosti može se u laboratoriju određivati pomoću permeametra gdje se razlikuju permeametri s promjenjivom razlikom potencijala (*eng. falling head*) i permeametri s konstantnom razlikom potencijala (*eng. constant head*). Metoda sa stalnom razlikom tlakova u troosnom uređaju i metoda s promjenjivom razlikom tlakova u edometru pripadaju konvencionalnim metodama mjerenja propusnosti, a metoda sa zadanim protokom je novija i predstavlja modificiranu/inverznu metodu u odnosu na metodu konstante razlike tlakova. Kod upravo spomenute metode, nameće se protok fluida kroz uzorak, a mjeri se odgovarajuća razlika tlakova. Određivanje koeficijenta propusnosti kod konvencionalnih metoda temelji se na mjerenju protoka vode kroz uzorak određenog presjeka uz određene uvjete tlaka.

Ispitivanja u hidrauličkom edometru i troosnom uređaju imaju brojne nedostatke od kojih je najznačajniji dugo vrijeme trajanja pokusa iz kojeg može proizaći i pitanje točnosti mjerenja. Također nedostaci koji se pojavljuju kod ispitivanja u edometru su sljedeći: ne može se točno odrediti kolika je količina tekućine isparila, a kolika je stvarno prošla kroz uzorak. Uz to, uzorci su ugrađeni u metalni cilindar u kojem je tijekom ispitivanja teško osigurati nepropusni kontakt između uzorka i stijenke cilindra, tako se dio tekućine može procijediti kraj uzorka pa se radi prividno većeg protoka dobiva veći koeficijent propusnosti.

Sama naprezanja koja djeluju na uzorak ne mogu se kontrolirati unutar cilindra, što je dodatna komponenta koja ima utjecaj na propusnost. Zrak u porama može jako utjecati na mjerenje koeficijenta propusnosti. Mjehurići zraka ponašaju se kao čestice, što smanjuje površinu slobodnu za prijenos eksperimentalnog fluida, a time i mjerenjem dobivenu vrijednost koeficijenta propusnosti. Zbog jednostavnosti pokusa i niske cijene uređaja edometar se ipak i dalje koristi za određivanje koeficijenta propusnosti. Osim konvencionalnim edometrom koeficijent propusnosti, *k* moguće je odrediti i hidrauličkim edometrom. Mjerenja koeficijenta propusnosti pomoću hidrauličkog edometra provode se i mjerenjem promjene volumena uzorka tijekom ispitivanja. Preko pomoćnog klipa edometra moguće je kontinuirano pratiti pomake, odnosno slijeganje uzorka tijekom trajanja pokusa (Veinović i dr., 2003.).

Za razliku od konvencionalnih metoda, modernija metoda zadanog protoka (*eng. flow pump test*), ima višestruke prednosti. Izbjegava se uporaba visokih gradijenata, koji su kod konvencionalnih metoda korišteni radi ubrzavanja procesa mjerenja, ali uzrokovali su i odstupanje od uvjeta tečenja po Darcy-jevom zakonu, te pojavu dodatne konsolidacije uzorka. Izbjegava se također i uporaba niskih gradijenata, koja kod konvencionalnih metoda nije praktična niti pouzdana, jer je vrijeme mjerenja pri niskim gradijentima obično jako dugo, a količine procijeđene vode su male. Ubrzanim procesom mjerenja onemogućen je rast bakterija, pa i eventualna promjena kemizma eksperimentalnog fluida. Još jedna od prednosti je to što ne dolazi do širenja opreme (birete) uslijed temperaturnih promjena što uzrokuje greške pri očitavanju. Najistaknutija prednost metode zadanog protoka u odnosu na konvencionalne očituje se u činjenici da se protok može preciznije nametnuti na krajevima uzorka. Modificirana je metoda mjerenja koeficijenta propusnosti s konstantnom razlikom tlaka utoliko što se tekućina utiskuje u ili izvlači iz uzorka konstantnom brzinom, odnosno zadanim protokom, tijekom čega se prati promjena razlike tlaka na kapi i bazi uzorka (Veinović i dr., 2003.).

Osim prednosti metoda zadanog protoka ima i određene nedostatke. Komercijalna primjena ograničena je zbog visokih inicijalnih troškova sustava (posebno pumpe za nanošenje protoka) i nedostatka standardizirane opreme (Veinović i dr., 2003.).

4.1. Laboratorijska metoda – permeametar

Pri laboratorijskom ispitivanju koeficijenta propusnosti uzorci se podvrgavaju toku koji se može odvijati pri stalnoj razini (permeametar sa stalnom razinom) ili toku s promjenjivom razinom (permeametar s promjenjivom razinom).

Za slabo propusne materijale ($k < 10^{-5}$ m/s) koristi se permeametar s promjenjivom razinom tj. mjeri se koeficijent propusnosti sitnozrnatih materijala (prahova i gline). Potreban je zbog problema mjerenja vrlo malih protoka kakvi su prisutni kod materijala kao što su prah i glina. Za dobro propusne materijale ($k > 10^{-5}$ m/s) koristi se permeametar sa stalnom razinom potencijala tj. mjeri se koeficijent propusnosti krupnozrnatih materijala (šljunka i pijeska). U ovom slučaju se uspostavlja stacionarno strujanje vode kroz uzorak, a kod permeametra s promjenjivom razinom ulazna voda polako se spušta u cijevi, a njezino isparavanje se sprječava pokrivanjem površine uzlazne vode tankim čepom.

U oba slučaja voda se može dodavati bilo na vrh, bilo na dno uzorka, pa tok može biti silazni ili uzlazni. Uzorak obično ima oblik pravilnoga kružnog cilindra, a smješten je između dviju poroznih pločica zanemarivog otpora. Uzorak mora biti potpuno saturiran destiliranom vodom i ne smije sadržavati mjehuriće zraka, kako bi se minimizirali učinci zarobljenog zraka u šupljinama. Pri normalnim okolnostima, u vodi ipak postoji određeni sadržaj otopljenog zraka (oko 20 litara po m^3 vode pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku) (Urumović, 2003.).

Pri istraživanju koeficijenta propusnosti pomoću permeametra za dobivanje pouzdanih rezultata treba voditi računa o sljedećim ograničenjima:

1. Tla su u prirodi obično uslojena, pa je u laboratoriju zahtjevno simulirati stvarne terenske uvjete;
2. U pijesku su k_v i k_h međusobno različitih vrijednosti, reda veličine $k_h = (10 - 1000) \times k_v$. Pri uzimanju uzoraka nepovratno se gube prirodni uvjeti, u ovom slučaju navedeni odnosi vrijednosti koeficijenta u dva smjera;
3. Male dimenzije laboratorijskih uzoraka dovode do djelovanja rubnih uvjeta, poput tečenja uz glatke strane posude i stvaranja mjehurića zraka u vodi ili obliku zamki zraka u uzorku, što može imati zamjetan učinak na rezultate;
4. Metode permeametrom odvijaju se samo u saturiranim uvjetima;

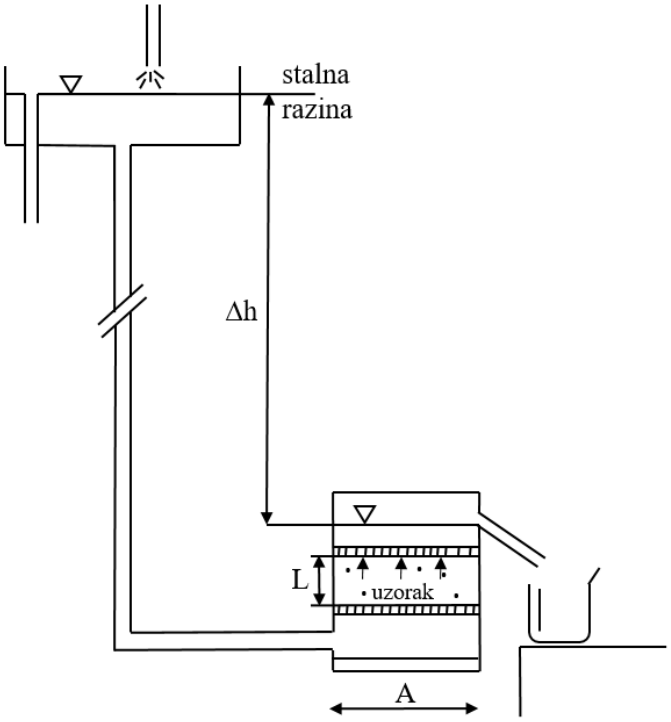
5. Kada je *k* malen, reda veličine 10^{-7} do 10^{-11} m/s, vrijeme potrebno za provedbu pokusa lako može uzrokovati evaporaciju i procurivanje opreme, što dovodi do pogreške u mjerenjima;
6. Zbog duljine trajanja pokusa, obično se primjenjuje hidraulički gradijent od 5 ili veći, dok je u prirodi reda veličine od 0,001 do 2;
7. U pijesku nerealno visok hidraulički gradijent može stvarati turbulencije, dakle okolnosti toka različite su od terenskih u kojima se odvija laminaran tok;
8. Nerealno visok hidraulički gradijent može dovesti do konsolidacije i poroznosti koja je različita od prirodne poroznosti uzorka (Urumović, 2003.).

4.1.1. Permeametar sa stalnom razinom

Određena vrijednost *k* pojedinog sloja tla ili stijene često predstavlja podatak s kojim se ne mogu izravno predočavati raspodjele propusnosti cijeloga vodonosnika ili paketa slojeva, a ponekad niti sloja o kojemu je riječ.

U permeametru sa stalnim tlakom (Slika 4-1.) strujanje je ustaljeno i jednodimenzijsko. Uzorak je izložen stalnoj razlici piezometarske razine *Δh*, koja osigurava stalnu količinu toka *Q*, mjerljivu na donjem preljevu. Uz poznate vrijednosti duljine *L* i površine presjeka uzorka *A* moguće je izravno iz Darcyjevog zakona odrediti propusnost *k* prema izrazu (4-1):

$$\mathrm{k} = \frac{\mathrm{Q} \times \mathrm{L}}{\mathrm{A} \times \Delta \mathrm{h}} = \mathrm{K} \times \frac{\rho_{\mathrm{g}}}{\eta} \qquad (4\text{-}1)$$



Slika 4-1. Shematski prikaz permeametra sa stalnom razinom (Urumović, 2003.)

4.1.2. Permeametar s promjenjivom razinom

Permeametar s promjenjivom razinom primjenjuje se kada je nužno postići manju propusnost u uzorku, a posebno je prikladno za određivanje hidrauličke vodljivosti sitnozrnatih materijala (Urumović, 2003.).

Količina protjecanja vode kroz uzorak određuje se opažanjem iznosa pada visine vode u uspravnoj cijevi (Slika 4-2). Tijekom nekog vremena t_1, visina vode opadne s njezine inicijalne visine Δh_1 na Δh_2, a brzina *v* opadanja razine vode u cijevi presjeka *a* iznosi (4-2):

$$v = -\frac{dh}{dt} \tag{4-2}$$

gdje znak minus označava opadanje razine. Opadanje razine vode u cijevi izražava količinu toka (4-3):

$$q_{ul} = -a\frac{dh}{dt} \tag{4-3}$$

koja ulazi u uzorak s donje strane i uzrokuje tok nestlačive tekućine kroz uzorak i iz njega. Količina toga toka je (4-4):

$$q_{iz} = A \times q = A \times K \times i \quad (4\text{-}4)$$

gdje je:

A – površina uzorka,

$i = \frac{\Delta h}{L}$ – gradijent toka kroz uzorak

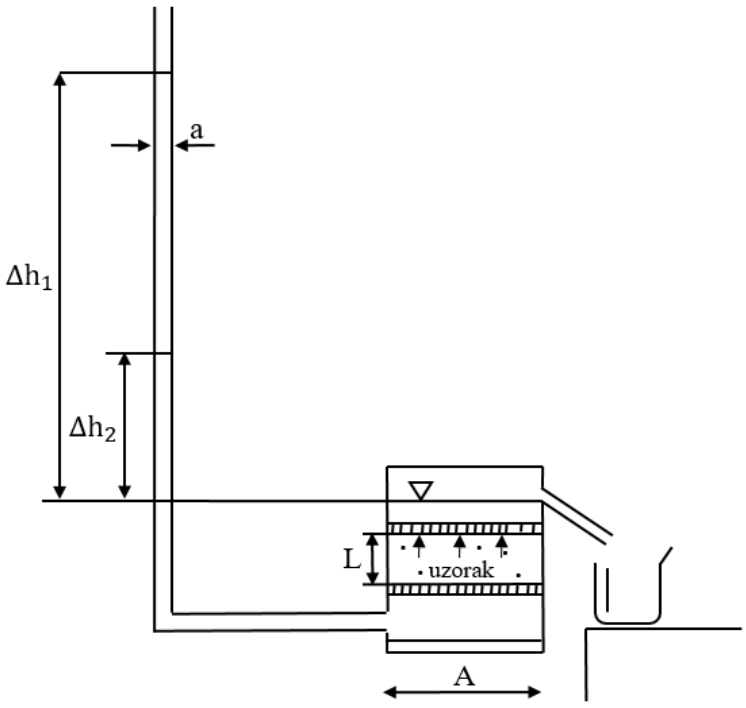
K – unutrašnja propusnost

Prema načelu kontinuiteta nestlačive tekućine, izlazni tok mora biti jednak ulaznome toku prema izrazu (4-5):

$$-a \times \frac{dh}{dt} = A \times K \times \frac{\Delta h}{L} \quad (4\text{-}5)$$

Tijekom nekog vremena t_1, visina vode opadne s njezine inicijalne visine Δh_1 na Δh_2 (Urumović, 2003). S podacima o visini uzorka u ćeliji L te površini poprečnog presjeka cjevčice *a*, koeficijent propusnosti određuje se iz izraza (4-6):

$$k = \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (4\text{-}6)$$



Slika 4-2. Shematski prikaz permeametra s promjenjivom razinom (Urumović, 2003.)

4.2. Konvencionalne metode i uređaji

Kod konvencionalnih metoda, mjerenje količine procijeđene vode redovito predstavlja problem, jer ja za procjeđivanje mjerljivih količina potrebno dosta vremena, a preciznost mjernog instrumenta ovisi o kvaliteti njegove izvedbe, što utječe i na cijenu ispitivanja. Mjerenje sa stalnom razlikom tlakova u troosnom uređaju i metoda s promjenjivom razlikom tlakova u edometru smatraju se konvencionalnim metoda.

Ispitivanje propusnosti metodom sa stalnom razlikom tlakova u troosnom uređaju smatralo se jednom od najboljih načina mjerenja koeficijenta propusnosti. Navedena metoda ima brojne prednosti, a jedne od njih je što je uzorak okružen fleksibilnom membranom, koja tijesno prianja uz stijenke uzorka uslijed djelovanja ćelijskog tlaka, čime se sprječava stvaranje kanala za prolaz vode. Zasićenost uzorka osigurava se primjenom povratnog tlaka (Veinović i dr., 2003.).

U ovoj metodi tlakovi se određuju na početnoj razini, odnosno prisutna je konstantna razlika tlaka '*h'*. Voda se pod stalnim tlakom utiskuje u uzorak, a rezultirajući protok se mjeri, po mogućnosti i na ulazu i na izlazu iz uzorka (Veinović i dr., 2003.)

4.3. Empirijske metode

Na temelju podataka o granulometrijskom sastavu nekoherentnog tla (šljunak i pijesak) razvijene su empirijske metode za izračun koeficijenta propusnosti. Mnogi autori razvili su niz empirijskih metoda za određenu vrstu materijala. Empirijski izrazi temelje se na svojstvima poroznog medija (tla) kroz koje teče neki fluid, ali i fizikalnim svojstvima samog fluida. Uglavnom je taj fluid u geotehničkoj praksi voda. Osnovni fizikalni parametri za vodu su: gustoća ρ, koeficijent viskoznosti η ili fluidnosti ϕ i koeficijent stlačivosti β. Svojstva poroznog medija su: ukupna poroznost *n*, koeficijent pora *e*, koeficijent propusnost *k*, specifična površina f_p, koeficijent stlačivosti α (Urumović, 2003.).

Za procjenu koeficijenta propusnosti korišteni su empirijski izrazi čije su uvjete primjene zadovoljavala svojstva granulometrijskog sastava ispitivanog materijala. Odabrane su sljedeće empirijske metode: Hazen-ova, Breyer-ova, Schlicter-ova, Terzaghi-jeva, USBR-ova i Kozeny-Carman-ova. Pri procjeni koeficijenta propusnosti uzeta su u obzir svojstva ispitne tekućine odnosno vode pri temperaturi od 20 °C.

Značajan utjecaj na propusnost ima porozitet tla, *n*. U empirijskim izrazima (Odong 2007., prema Vuković i Soro, 1992.) za računanje poroziteta koriste izraz (4-6):

$$n = 0{,}255\,(1 + 0{,}83^{Cu}) \qquad (4\text{-}6)$$

gdje je:

n – poroznost tla,

C_u – koeficijent jednoličnosti, izračunat iz svojstva granulometrijske krivulje ($\frac{d_{60}}{d_{10}}$),

d_{60} - karakteristični promjer zrna kod 60 % prolaza (mm),

d_{10} - karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza (mm).

Općenito se empirijske jednadžbe za procjenu koeficijenta propusnosti mogu napisati u obliku (4-7):

$$k = \frac{g}{v} \times C \times [f(n)] \times d_e^2 \qquad (4\text{-}7)$$

gdje je:

g – gravitacijsko ubrzanje (m/s^2),

v – kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s),

C – bezdimenzijski koeficijent proporcionalnosti, čija veličina ne ovisi samo o vrsti promatranoga poroznog medija, nego i o tome na koji način se izražava učinak hidrauličkoga polumjera (specifične površine), vijugavosti i poroznosti,

$f(n)$ – funkcija poroznosti,

d_e – promjer efektivnog zrna (mm).

4.3.1. Hazen

Najranija istraživanja odnosa veličine zrna i koeficijenta propusnosti pripadaju Allenu Hazenu. Hazenov empirijski izraz može se primijeniti za tla koja zadovoljavaju sljedeće uvjete: $C_u < 5$ i efektivni promjer zrna d_{10} mora biti između 0,1 mm i 3 mm. Na temelju brojnih eksperimenata povezanih s istraživanjem poroznog medija, Hazen (1893.) preporučuje izraz za određivanje koeficijenta propusnosti (4-8):

$$k = \frac{g}{v} \times (6 \times 10^{-4}) \times \left(1 + 10(n - 0{,}26)\right) \times {d_{10}}^2 \qquad (4\text{-}8)$$

gdje je:
g – gravitacijsko ubrzanje (m/s^2),

v – kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s),

$C = 6 \times 10^{-4}$,

$f(n) = \left(1 + 10(n - 0{,}26)\right)$,

d_{10} – karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza (mm).

Hazen-ova metoda izvorno je razvijena za jednoliko graduirane pijeske, no može se primijeniti za područje sitnog pijeska do šljunka. Općenito se može očekivati kako će slabo graduirani pijesak imati veći koeficijent propusnosti od dobro graduiranog (Urumović, 2003.).

4.3.2. Breyer

Breyer-ov empirijski izraz preporučuje se kod materijala čiji je efektivni promjer zrna d_{10} između 0,06 mm i 0,6 mm, a koeficijent jednoličnosti C_u između 1 i 20. Ova metoda ne uzima u obzir vrijednost poroznosti, stoga je funkcija poroznosti $f\ (n)$ jednaka jedinici. Izraz za određivanje koeficijenta propusnosti je (4-9):

$$k = \frac{g}{v} \times (6 \times 10^{-4}) \times \log\left(\frac{500}{Cu}\right) \times {d_{10}}^2 \qquad (4\text{-}9)$$

gdje je:

g – gravitacijsko ubrzanje (m/s^2)

v – kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s)

$C = (6 \times 10^{-4}) \times \log\left(\frac{500}{Cu}\right)$

$f(n) = 1$

d_{10} – karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza (mm)

Breyer-ov empirijski izraz koristan je za materijale s heterogenom raspodjelom i slabo sortiranim zrnima. U sedimentološkom smislu veličina čestica prikazuje se na dva načina. Najčešće korištena ljestvica za klasifikaciju i nomenklaturu sedimenata i sedimentnih stijena je Udden-Wentworthova ljestvica, no može se koristiti i modificirana Udden-Wentworthove ljestvice s logaritamskim Φ jedinicama. Grafički prikaz rezultata je sljedeći: pomoću histograma (prikaz količine svake pojedine frakcije u obliku stupaca), krivulje učestalosti (frekvencijska krivulja) i kumulativnom granulometrijskom krivuljom. Ukoliko je riječ o heterogenom materijalu, zrna su slabo sortirana – riječ je o naglo taloženom sedimentu (npr. olujni sedimenti) ili sedimentu taloženom iz viskoznih tokova (npr. muljni tokovi). U mehanici tla ukoliko je riječ o heterogenom materijalu, veličine čestica nisu jednake, te je tlo dobro ili loše graduirano. Raspodjela veličine čestica prikazuje se pomoću granulometrijske krivulje.

4.3.3. Slichter

Slichterov empirijski izraz pogodan je za materijale čija je efektivna veličina zrna između 0,1 mm do 0,5 mm. Koeficijent propusnosti prema Slichter-u određuje se izrazom (4-10):

$$k = \frac{g}{v} \times (1 \times 10^{-2}) \times n^{3.287} \times {d_{10}}^2 \quad (4\text{-}10)$$

gdje je:

g – gravitacijsko ubrzanje (m/s^2),

v – kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s),

$C = 1 \times 10^{-2}$,

$f(n) = n^{3.287}$,

d_{10} – karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza (mm).

4.3.4. Terzaghi

Prema (Odong, 2007. prema Cheng i Chen, 2007.) Terzaghi-jeva formula najprimjenjenija je za materijale poput krupnog pijeska sa zaobljenim do uglatim zrnima. Vrijednost C_t, koeficijent sortiranosti (*eng. sorting coefficient*) kod zaobljenih zrna iznosi $10{,}7 \times 10^{-3}$, a kod uglatih zrna $6{,}1 \times 10^{-3}$. U radu je korištena srednja vrijednost koja iznosi $8{,}4 \times 10^{-3}$. Koeficijent sortiranosti označava se i oznakom S_0, pokazatelj distribucije veličine čestica. Način određivanja je dvojak, matematičkim izračunom iz kumulativne granulometrijske krivulje (standardne devijacije (Folk i Ward), kvadratnog korijena P_{75}/P_{25} (Trask i Krumbein)) ili usporedbom s vizualnim komparatorima za procjenu sortiranosti čestica.

Terzaghi-jev izraz koeficijenta propusnosti glasi (4-11):

$$k = \frac{g}{v} \times C_t \times \left(\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2 \times {d_{10}}^2 \quad (4\text{-}11)$$

gdje je:

g - gravitacijsko ubrzanje (m/s^2),

v - kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s),

C_t = 10,7 × 10^{-3} (zaobljena zrna) ili 6,1 × 10^{-3} (uglata zrna),

$f(n) = (\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}})^2$,

d_{10} – karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza (mm).

4.3.5. USBR

Empirijski izraz USBR - „United State Bureau od Reclamation“ izračunava koeficijent propusnosti iz efektivnog zrna veličine d_{20} i ne ovisi o poroznosti materijala. Najprikladniji je za pijeske srednje graduiranosti (Odong, 2007. prema Cheng i Chen, 2007.) čiji je koeficijent jednoličnosti manji od 5. Izraz na temelju kojeg se određuje USBR-ov koeficijent propusnosti je (4-12):

$$k = \frac{g}{v} \times 4,8 \times 10^{-4} \times d_{20}^{0,3} \times {d_{20}}^2 \qquad (4\text{-}12)$$

gdje je:

g - gravitacijsko ubrzanje (m/s^2),

v - kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s),

C = 4,8 × 10^{-4},

$f(n) = 1$,

d_{20} - karakteristični promjer zrna kod 20 % prolaza (mm).

4.3.6. Kozeny-Carman

Jedan od najraširenijih pristupa izražavanju odnosa između propusnosti i geometrijskih svojstava porozne sredine predstavljen je Kozeny-Carmanovom jednadžbom. Zasniva se na teoriji hidrauličkoga promjera, odnosno specifične površine kao geometrijskoga parametra o kojemu ovisi strujanje Newtonova fluida (Urumović, 2003.).

Osnovne postavke izvorno je predložio Kozeny (1927.), a Carman (1937., 1956.) ih je kasnije dopunio i preuredio oblik jednadžbe u onaj koji se danas najčešće koristi. Metoda nije prikladna za materijale čiji je efektivni promjer zrna veći od 3 mm i za glinovita tla (Odong 2007. prema Carrier, 2003.). Modificirani oblik jednadžbe je (4-13):

$$k = \frac{g}{v} \times 8{,}3 \times 10^{-3} \times \left(\frac{n^3}{(1-n)^2}\right) \times {d_{10}}^2 \qquad (4\text{-}13)$$

gdje je:

g - gravitacijsko ubrzanje (m/s^2),

v - kinematički koeficijent viskoznosti (m^2/s),

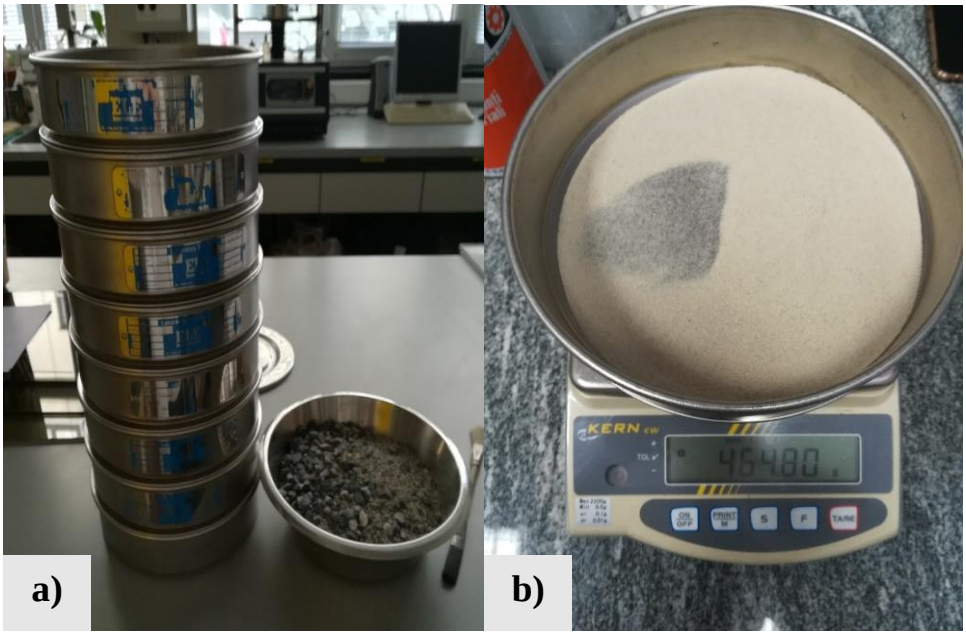
$C = 8{,}3 \times 10^{-3}$,

$f(n) = \left(\frac{n^3}{(1-n)^2}\right)$,

d_{10} - karakteristični promjer zrna kod 10 % prolaza (mm).

5. ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA TLA

Određivanje granulometrijskog sastava tla, metodom sijanja provodi se s ciljem određivanja masenog postotka pojedine frakcije u tlu. Sijanjem se određuje granulometrijski sastav krupnozrnatog tla čija je veličina čestica veća od 0,06 mm. Oprema koja je korištena prilikom ispitivanja je sljedeća: sita, laboratorijska vaga i četkica (Slika 5-1.). U svrhu određivanja granulometrijskog sastava tla ispitanih uzoraka korištena je norma ASTM D 422.



a) sita b) vaganje mase uzorka i sita nakon sijanja

Slika 5-1. Određivanje granulometrijskog sastava tla

5.1. Postupak određivanja granulometrijskog sastava tla

Kako bismo odredili granulometrijski sastav tla za pojedini uzorak prvo je potrebno izvagati masu svih sita i posude za prosjev koja se planira koristiti prilikom ispitivanja. Otvori sita (promjer sita) smanjuju se na svakom sljedećem situ (odozgo prema dolje). Potrebno je izvagati masu suhog uzorka, posložiti sita i pažljivo staviti uzorak na gornje sito. Poklopcem poklopiti gornje sito. Kružnim pokretima potrebno je protresti sita. Pažljivo uzimati sito po sito pri čemu je potrebno izvagati masu svakog sita tj. zaostalu frakciju na pojedinom situ. Na kraju četkicom očistiti sita.

5.2. Obrada rezultata granulometrijskog sastava tla

Nakon provedenog postupka ispitivanja rezultati su prikazani na slici 5-2. za jednoliko graduirani pijesak (SU), jednoliko-, loše- i dobro-graduirani šljunak (GU, GP i GW). Proračun koji je potrebno provesti kako bi se mogle crtati granulometrijske krivulje prikazan je u tablicama 5-1. do 5-4. U tablici 5-1. prikazan je proračun za jednoliko graduirani pijesak (na slici 5-2 označen simbolom SU), a u tablici 5-2. za jednoliko graduirani šljunak (oznaka GU). Rezultati za dobro graduirani šljunak (na slici GW) nalaze se u tablici 5-3. Tablični rezultati za loše graduirani šljunak (na slici GP) nalaze se u tablici 5-4.

Tablica 5-1. Prikaz rezultata za jednoliko graduirani pijesak

Masa posude (g)		314,07				
Masa posude i suhog uzorka (g)		2174,58				
Masa suhog tla za sijanje (g)		1860,51				
Masa sita (g)	Masa sita i ostatka tla (g)	Masa ostatka tla (g)	Postotak ostatka (%)	Kum. postotak ostatka (%)	Kum. postotak prolaza	Otvor sita
528,01	528,01	0,00	0,00	0,00	100,00	2,000
528,01	528,01	0,00	0,00	0,00	100,00	0,850
495,75	500,39	4,64	0,25	0,25	99,75	0,425
439,02	1039,57	600,55	32,29	32,54	67,46	0,250
361,38	648,89	287,51	15,46	93,33	6,67	0,075
254,41	255,58	1,17	0,06	100,00	0,00	0,000
Ukupna masa suhog tla nakon sijanja (g)			1859,71			

Tablica 5-2. Prikaz rezultata za jednoliko graduirani šljunak

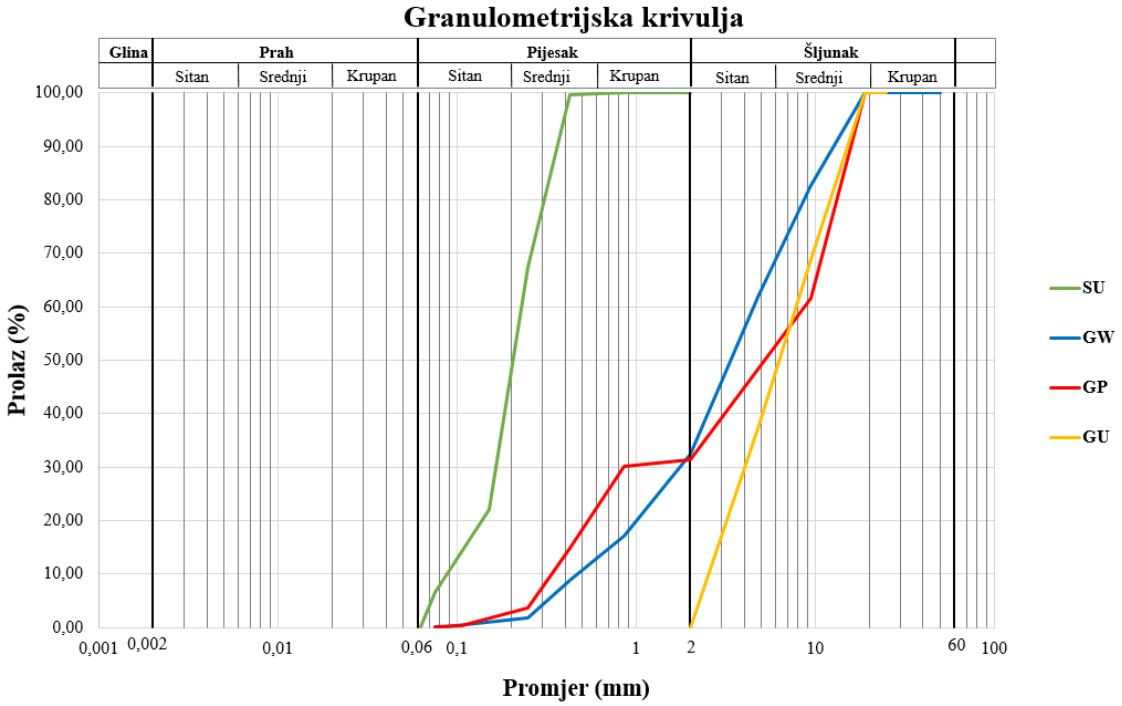
Masa posude (g)		314,81				
Masa posude i suhog uzorka (g)		3453,00				
Masa suhog tla za sijanje (g)		3138,19				
Masa sita (g)	Masa sita i ostatka tla (g)	Masa ostatka tla (g)	Postotak ostatka (%)	Kum. postotak ostatka (%)	Kum. postotak prolaza	Otvor sita
537,11	537,11	0,00	0,00	0,00	100,00	19,000
537,14	1511,87	974,73	31,06	31,06	68,94	9,500
528,01	1523,40	995,39	31,72	62,78	37,22	4,750
495,77	1663,62	1167,85	37,22	100,00	0,00	2,000
254,37	254,37	0,00	0,00	100,00	0,00	0,000
Ukupna masa suhog tla nakon sijanja (g)			3137,97			

Tablica 5-3. Prikaz rezultata za dobro graduirani šljunak

Masa posude (g)		628,22				
Masa posude i suhog uzorka (g)		2836,04				
Masa suhog tla za sijanje (g)		2207,82				
Masa sita (g)	Masa sita i ostatka tla (g)	Masa ostatka tla (g)	Postotak ostatka (%)	Kum. postotak ostatka (%)	Kum. postotak prolaza	Otvor sita
589,80	589,80	0,00	0,00	0,00	100,00	19,000
537,15	918,50	381,35	17,28	17,28	82,72	9,500
528,43	988,33	459,90	20,84	38,12	61,88	4,750
496,31	1147,80	651,49	29,52	67,64	32,36	2,000
439,62	775,98	336,36	15,24	82,88	17,12	0,850
381,48	563,70	182,22	8,26	91,14	8,86	0,425
361,38	518,12	156,74	7,10	98,24	1,76	0,250
342,07	380,61	38,54	1,75	99,99	0,01	0,075
254,39	254,70	0,31	0,01	100,00	0,00	0,000
Ukupna masa suhog tla nakon sijanja (g)			2206,91			

Tablica 5-4. Prikaz rezultata za loše graduirani šljunak

Masa posude		628,54				
Masa posude i suhog uzorka		2731,03				
Masa suhog tla za sijanje		2102,49				
Masa sita (g)	Masa sita i ostatka tla (g)	Masa ostatka tla (g)	Postotak ostatka (%)	Kum. postotak ostatka (%)	Kum. postotak prolaza	Otvor sita
536,49	705,19	168,70	8,02	8,02	91,98	9,500
527,98	1455,68	927,70	44,11	52,13	47,87	4,750
495,73	536,69	40,96	1,95	54,08	45,92	2,000
439,01	1386,46	947,45	45,05	99,13	0,87	0,850
381,44	399,41	17,97	0,85	99,99	0,01	0,425
361,37	361,45	0,08	0,00	99,99	0,01	0,250
341,97	342,08	0,11	0,01	100,00	0,00	0,075
254,38	254,45	0,07	0,00	100,00	0,00	0,000
Ukupna masa suhog tla nakon sijanja (g)			2103,04			



Slika 5-2. Granulometrijske krivulje ispitnih uzoraka

Krivulje granulometrijskog sastava tla koristile su se kao ulazni podaci za proračun propusnosti korištenjem empirijskih metoda odnosno za određivanje efektivnog promjera zrna, definiranja koeficijenta jednoličnosti C_u i koeficijenta zakrivljenosti C_c. Navedeni koeficijenti definiraju se na temelju karakterističnih vrijednosti promjera zrna. S obzirom na

vrijednosti C_u i C_c možemo razlikovati dobro, srednje, loše i jednoliko graduirano tlo (Tablica 5-5.).

Tablica 5-5. Klasifikacija tla po normi ASTM D 2487

<table>
<tr><td colspan="4" rowspan="2">Kriterij za dodjeljivanje simbola i naziva pojedinim grupama tla na osnovi laboratorijskih ispitivanja</td><td colspan="2">Klasifikacija tla</td></tr>
<tr><td>Simbol</td><td>Naziv grupe</td></tr>
<tr><td rowspan="8">KRUPNOZRNA TLA
(više od 50% ostaje na situ br. 200 – 0.075 mm)</td><td rowspan="4">Šljunak
(više od 50% ostalo je na situ br. 4 – 4.75 mm)</td><td rowspan="2">Čisti šljunak
(manje od 5% sitnih čestica)</td><td>$C_u \geq 4$ i
$1 \leq C_c \leq 3$</td><td>GW</td><td>Dobro graduirani šljunak</td></tr>
<tr><td>$C_u < 4$ i/ili
$1 > C_c > 3$</td><td>GP</td><td>Slabo graduirani šljunak</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Šljunak sa sitnim česticama
(više od 12% sitnih čestica)</td><td>Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH</td><td>GM</td><td>Prašinasti šljunak</td></tr>
<tr><td>Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH</td><td>GC</td><td>Glinoviti šljunak</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Pijesak
(50% ili više prolazi kroz sito br. 4 – 4.75 mm)</td><td rowspan="2">Čisti šljunak
(manje od 5% sitnih čestica)</td><td>$C_u \geq 6$ i
$1 \leq C_c \leq 3$</td><td>SW</td><td>Dobro graduirani pijesak</td></tr>
<tr><td>$C_u < 6$ i/ili
$1 > C_c > 3$</td><td>SP</td><td>Slabo graduirani pijesak</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Šljunak sa sitnim česticama
(više od 12% sitnih čestica)</td><td>Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH</td><td>SM</td><td>Prašinasti pijesak</td></tr>
<tr><td>Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH</td><td>SC</td><td>Glinoviti pijesak</td></tr>
</table>

Koeficijent jednoličnosti dobije se na temelju izraza (5-1):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{5-1}$$

Koeficijent zakrivljenosti dobije se izrazom (5-2):

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \tag{5-1}$$

Definirane vrijednosti parametara D_{10}, D_{30}, D_{60} i navedenih koeficijenata prikazane su u tablici 5-6. Karakteristični promjeri dobiju se na način da se u granulometrijskom dijagramu povuče horizontala na odgovarajućim postocima (10%, 30% i 60%) i očitaju odgovarajuće vrijednosti promjera u mm. Koeficijent jednoličnosti C_u=1 odgovara materijalu kojemu su sva zrna jednakog promjera. Ako promjer zrna značajno varira, onda je C_u vrlo velik. Što je C_u veći to je materijal manje jednoličan.

Tablica 5-6. Vrijednosti parametara ispitanih uzoraka

Uzorci	SU	GU	GW	GP
D_{10} (mm)	0,09	2,74	0,48	0,35
D_{30} (mm)	0,17	4,22	1,82	0,85
D_{60} (mm)	0,23	8,16	4,57	9,08
C_u (-)	2,56	2,98	9,46	26,02
C_c (-)	1,32	0,80	1,50	0,23

Iz tablice 5-6. može se uočiti kako su pripremljena tri uzorka šljunka različite graduiranosti, kao i jedan uzorak pijeska koji je jednolično graduiran. Tako pripremljeni uzorci omogućit će ispitivanje utjecaja graduiranosti šljunka na koeficijent propusnosti usporedbom rezultata za uzorke s oznakama GU, GW i GP. Također, uzorak jednolično graduiranog pijeska (SU) će u komparaciji s jednolično graduiranim šljunkom (GU) pokazati utjecaj veličine čestica (maksimalni i efektivni promjer zrna) na propusnost tla.

6. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI PERMEAMETROM SA STALNOM RAZINOM

U ovome radu, za procjenu koeficijenta propusnosti korištena je laboratorijska metoda permeametra sa stalnom razinom. Za ispitivanje koeficijenta propusnosti pri stalnoj razini korištena je norma ASTM D 2434-68.

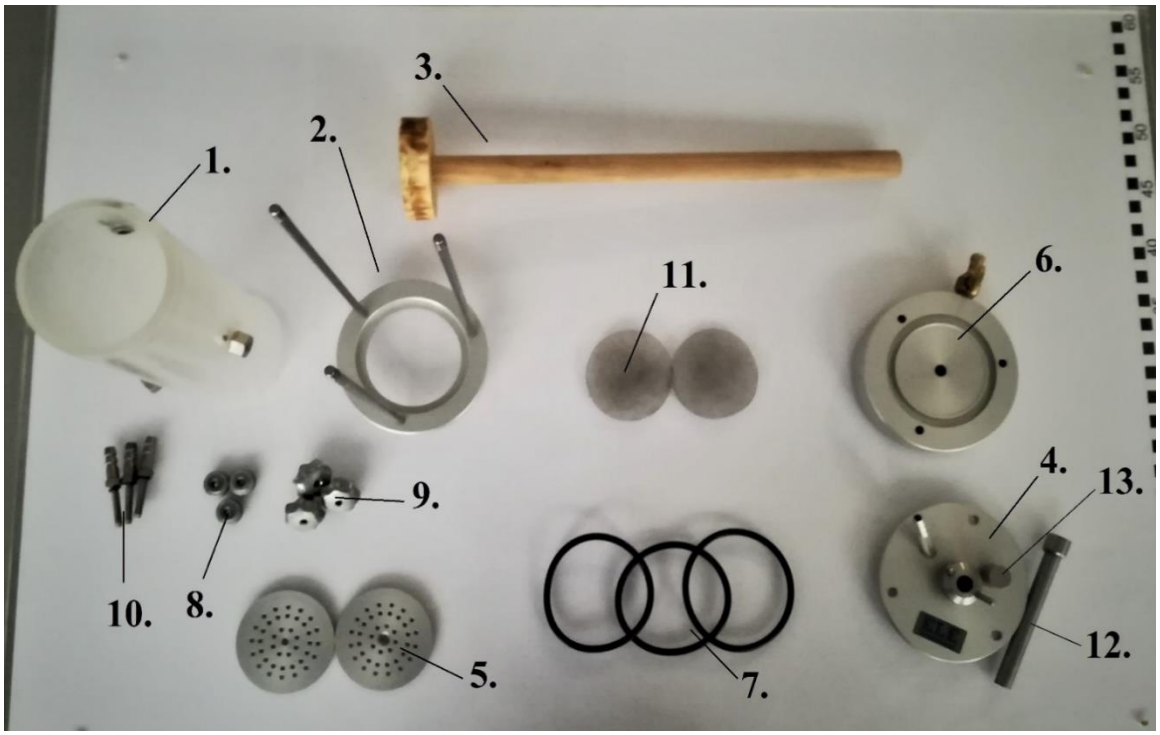
U ovome poglavlju bit će detaljnije opisan način pripreme uzorka i ćelije, ugradnja uzorka u samu ćeliju, izvedba pokusa, te obrada podataka dobivenih pomoću propisane norme.

6.1. Priprema uzorka

Korištena norma ASTM D 2434 – 68 nalaže da se iz uzorka, koji ugrađujemo u ćeliju za ispitivanje koeficijenta propusnosti, moraju ukloniti zrna veća od 19 mm i da u uzorku ne smije biti više od 10% čestica manjih od 75 μm. Ovaj uvjet je u provedenim ispitivanjima zadovoljen što se može vidjeti iz prethodno prikazanih granulometrijskih krivulja laboratorijskih uzoraka (slika 5-2). Nakon pripremljenog (reprezentativnog) uzorka, potrebno je pripremiti ćeliju za ugradnju uzorka.

6.2. Priprema ćelije za ugradnju uzorka

Prije ugradnje uzorka moraju se izmjeriti dimenzije ćelije. Potrebno je izmjeriti udaljenost između manometara, L (m), poprečni presjek, A (cm^2) i srednju vrijednost unutarnjeg promjera ćelije, D (m). Na slici 6-1. prikazani su dijelovi ćelije permeametra.



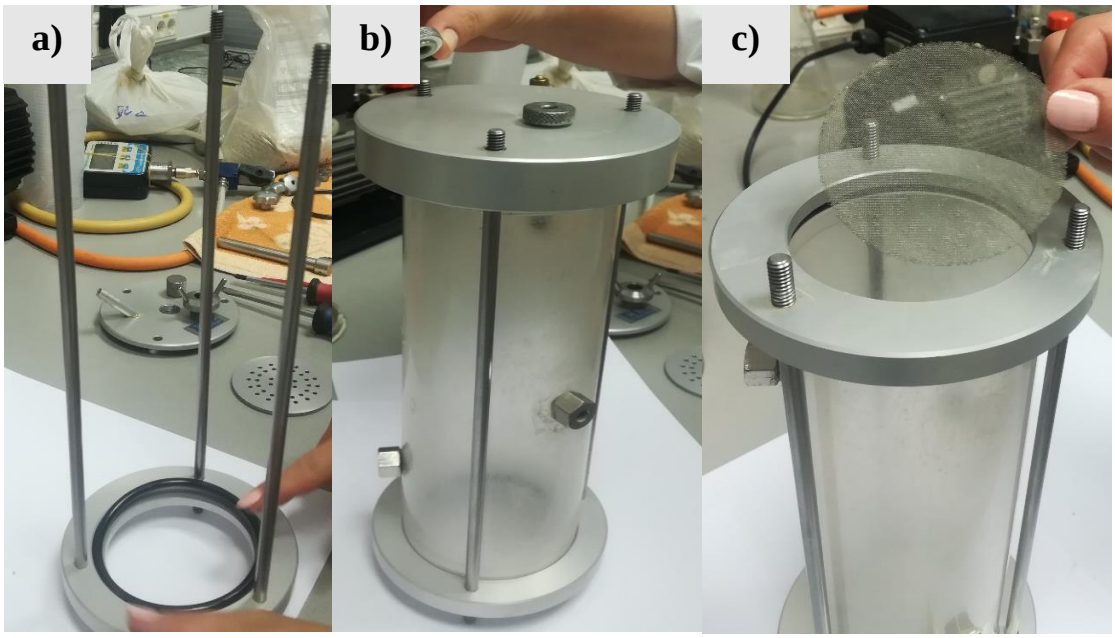
Legenda: 1. Ćelija permeametra, 2.Tronožac za učvršćivanje, 3. Drveni bat za istiskivanje zraka iz uzorka 4. Gornja ploča s otvorom, 5. Porozni disk, 6. Donja bazna ploča s ventilom 7. Gumena brtva, 8. Donji navoji, 9.Gornji navoji, 10. Manometarske spojnice, 11. Filtarske mrežice (papir), 12. Potisni klip i 13. Odzračni ventil.

Slika 6-1. Dijelovi ćelije permeametra

6.3. Sastavljanje ćelije i ugradnja uzorka

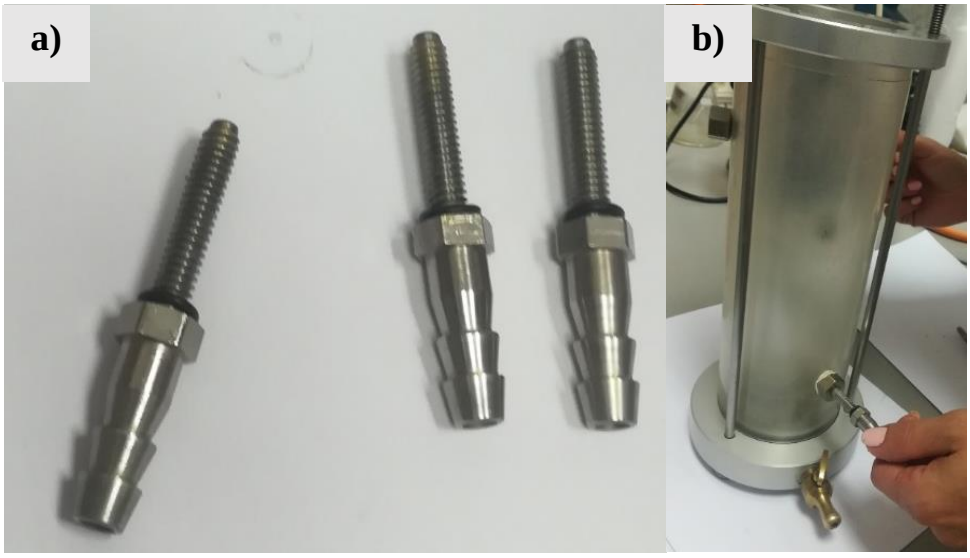
Prije samog sastavljanja ćeliju je potrebno dobro očistiti osobito u spojnim dijelovima. Čestice uzorka ne smiju ostati na ćeliji radi postizanja dobrog brtvljenja. Nakon što se donja bazna ploča dobro očisti, na postolje ćelije postavi se gumena brtva koja se prethodno namaže vazelinom. Nakon toga stavlja se porozni disk koji je potrebno učvrstiti duljim vijkom.

Prije stavljanja tronošca za učvršćivanje ćelije, potrebno je i na njega, na predviđeni utor, staviti gumenu brtvu prethodno namazanu vazelinom. Nakon toga stavlja se tronožac i učvršćuju se donji navoji kako bi se ćelija mogla pričvrstiti (Slika 6-2.). Nakon toga postavlja se filtarska mrežica na dno učvršćene ćelije. Navoji manometarskih spojnica premažu se vazelinom i zavrnu se do unutarnjeg ruba stijenke ćelije (Slika 6-3.).



a) postavljanje gumene brtve na dno tronošca, b) učvršćivanje donjih navoja c) postavljanje filtarske mrežice

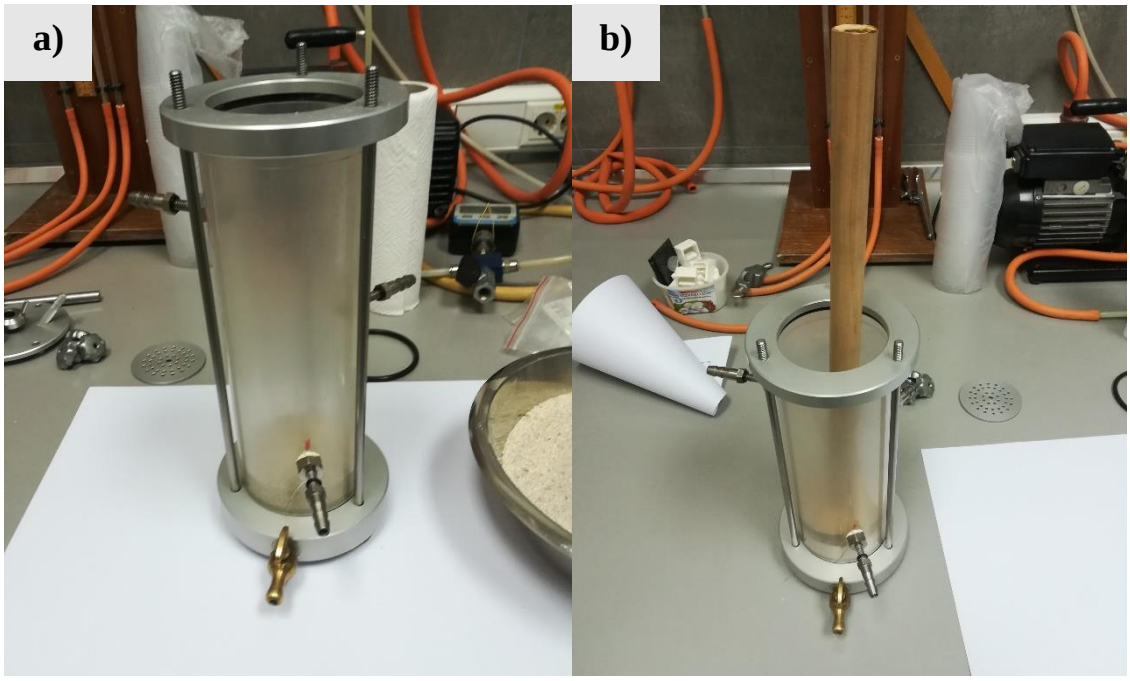
Slika 6-2. Postavljanje tronošca



a) manometarske spojnice b) zavrtanje spojnice do unutarnjeg ruba stijenke ćelije

Slika 6-3. Postavljanje manometarskih spojnica

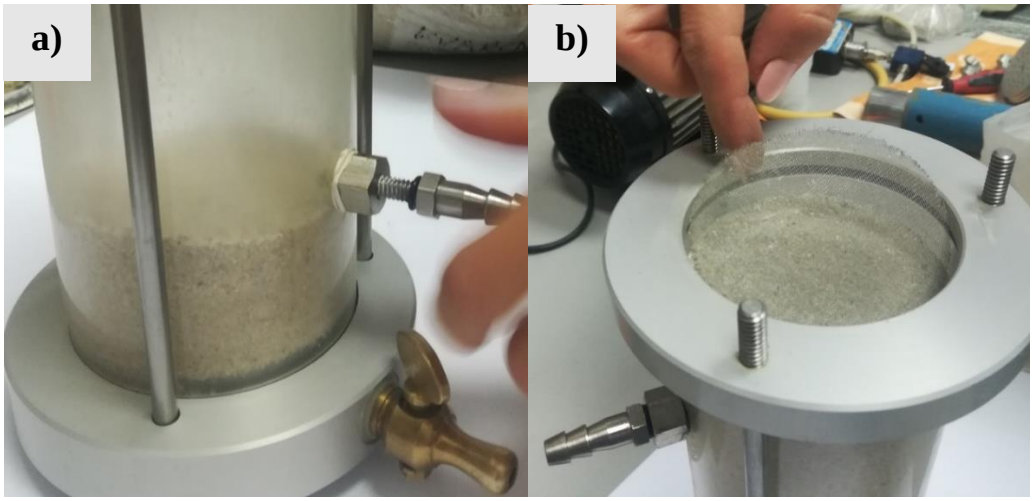
Nakon toga, započinje se s ugradnjom uzorka, kao što je vidljivo na slici 6-4. Pomoću lijevka kružnim pokretima sipa se uzorak u ćeliju do visine od oko 2 cm. Nakon toga drvenim batom lagano se sabija uzorak, te na taj način istiskuje zrak.



a) Postavljanje uzorka u ćeliju b) istiskivanje zraka pomoću drvenog bata

Slika 6-4. Ugradnja uzorka

Kada se dođe do visine manometarskih spojnica kao što je vidljivo na slici 6-5., spojnice je potrebno zavrnuti do kraja i nastaviti s daljnjom ugradnjom uzorka. Postupak zavrtanja manometarskih spojnica ponavlja se još dva puta. Nakon što se ugradi uzorak u ćeliju, postavlja se filtarska mrežica na vrh uzorka.

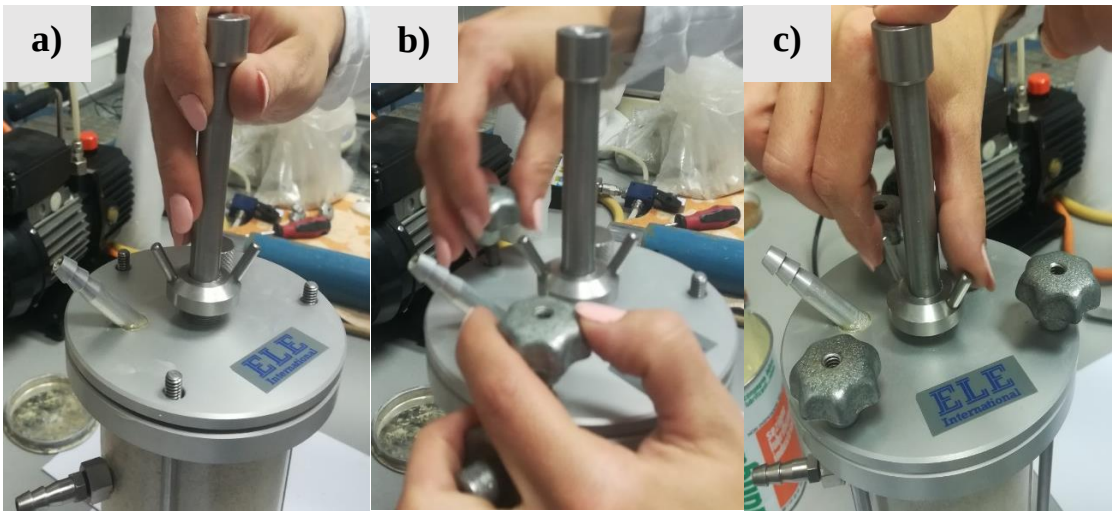


a) zavrtanje manometarske spojnice do konačnog položaja b) postavljanje filtarske mrežice na vrh uzorka

Slika 6-5. Detalji ugradnje uzorka

Nakon toga slijedilo je sastavljanje gornje ploče ćelije, pri čemu treba paziti da se svaka gumena brtva kao i svaku plohu kontakta, odnosno spoja namaže vazelinom.

Potom se stavlja gornja ploča s otvorom, te se pričvršćuje pomoću vijaka. Nakon stezanja vijaka na gornjoj ploči, pričvršćuje se potisni klip koji štiti uzorak od poremećaja prilikom njegove deaeracije i saturacije (Slika 6-6.).



a) stavljanje gornje ploče s otvorom b) pričvršćivanje pomoću vijka c) pričvršćivanje potisnog klipa

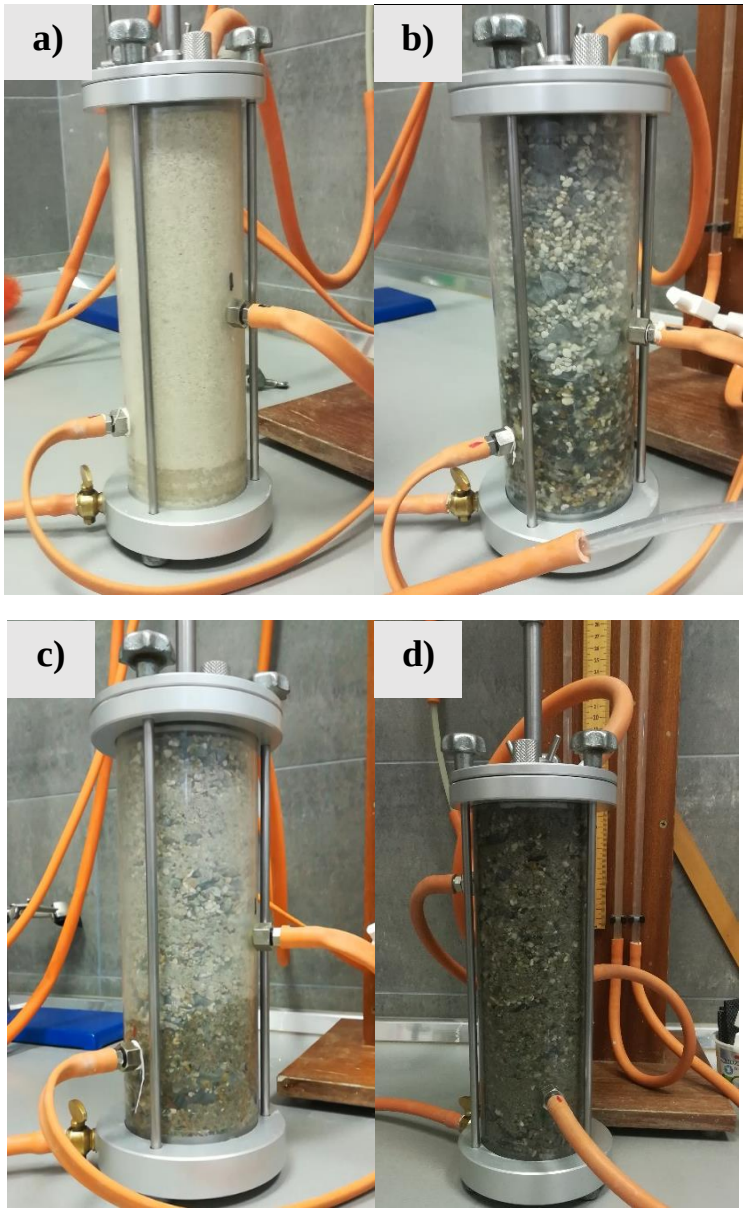
Slika 6-6. Pričvršćivanje potisnog klipa

Zbog lakšeg stavljanja i skidanja crijeva potrebno je svaku spojnicu na koju dolazi crijevo namazati vazelinom. Spaja se crijevo na svaku spojnicu. Prije početka saturacije uzorka potrebno je napuniti spremnik vodovodnom vodom.

Sljedeći je korak postavljanje plastičnih zatezača tj. „štipaljki“ na svaku cjevčicu na manometru kako bi se spriječio dovod zraka u uzorak pri sljedećem koraku uklanjanja zraka iz uzorka.

Uklanjanje zraka iz uzorka obavlja se pomoću vakuum pumpe u vremenu od 10 do 15 minuta kako bi se iz uzorka istisnuo sav zrak.

Nakon istiskivanja zraka iz uzorka, sljedeći korak je polako saturirati uzorak na način da se sasvim polagano otvori ventil na postolju ćelije, te se pomoću vakuum pumpe i crijeva koje vodi iz spremnika s vodom na ventil postolja saturira uzorak odozdo prema gore. Postupak ugradnje uzorka i saturacije proveden je na sva četiri ispitna uzorka (Slika 6-7.).



a) Uzorak SU b) uzorak GU c) uzorak GW d) uzorak GP

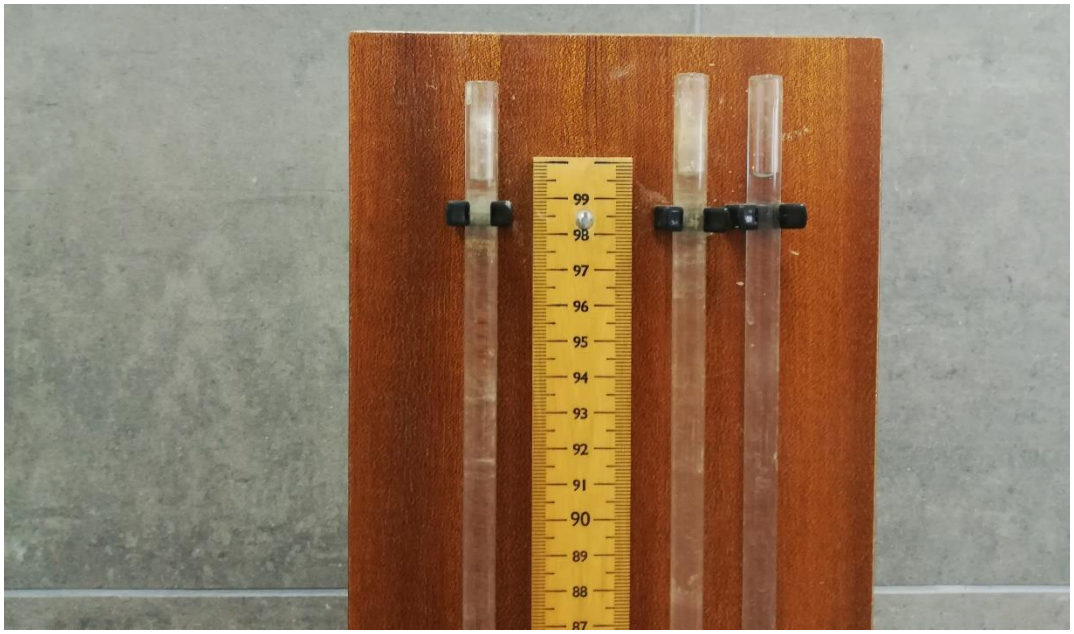
Slika 6-7. Saturacija ugrađenih uzoraka

Kada je uzorak potpuno saturiran, potrebno je pratiti u crijevu dolazak vode do mjesta prolaska ventila. Kada voda bude vidljiva u prozirnom dijelu crijeva zatvara se ventil.

Na poklopcu se nalazi ispušni ventil koji je zatvoren, no ukoliko se dogodi da u uzorku ima zraka ventil se otvori kako bi se oslobodio zarobljeni zrak u uzorku.

6.4. Postupak ispitivanja

Postupak ispitivanja započinje otvaranjem dovodnog ventila te osiguravanjem slobodnog protoka vode kroz uzorak. Kad se razina vode u sve 3 cjevčice u manometru podigne na istu visinu možemo biti sigurni da u uzorku nema zraka (Slika 6-8.).



Slika 6-8. Ustaljene razine vode u cjevčicama

Nakon postizanja stabilne manometarske razine započinje mjerenje. Počinje se s razlikom visina dizanja vode u manometarskim cjevčicama od 2 cm, nakon toga se ta razlika povećava za 0,5 cm kako bi se povećao protok koji je linearno proporcionalan hidrauličkom gradijentu i koji je u granicama Darcyjevog zakona.

Riječ je o laminarnom načinu strujanja kod kojega svaka čestica putuje duž jasno određene staze, koja se nikada ne presijeca stazom neke druge čestice. Pri laminarnom strujanju srednja brzina toka izravno je proporcionalna hidrauličkome gradijentu. Porastom brzine laminarni tok prelazi laminarni nelinearni tok a potom u turbulentni.

Brzina nije jedini čimbenik koji određuje hoće li strujanje biti laminarno ili turbulentno. Stoga se kao kriterij za određivanje laminarnosti koristi tzv. Reynoldsov broj, R_e. Reynoldsov broj je bezdimenzijska veličina koja predstavlja odnos inercijskih sila prema

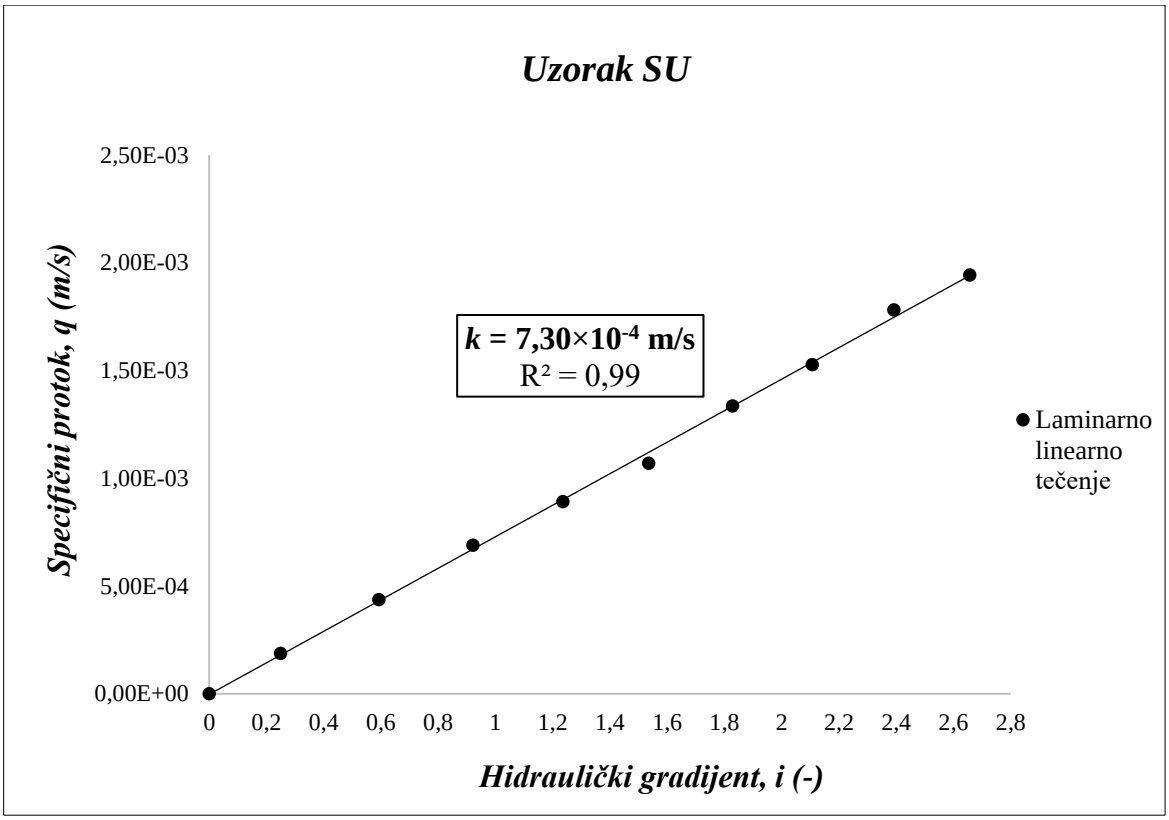
silama trenja. Granica tečenja laminarnog u turbulentni tok je između 1 – 10 u slučaju poroznog medija.

Povećanje gradijenta, odnosno povećanje razlike u manometarskim visinama u cjevčicama ponavlja se dovoljan broj puta dok se ne dođe do odstupanja od linearnog odnosa specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta, što upućuje na pojavu turbulentnog toka. Kod svakog gradijenta, mjeri se potrebno vrijeme (izraženo u sekundama) za punjenje menzure od 100 ml.

6.5. Obrada rezultata

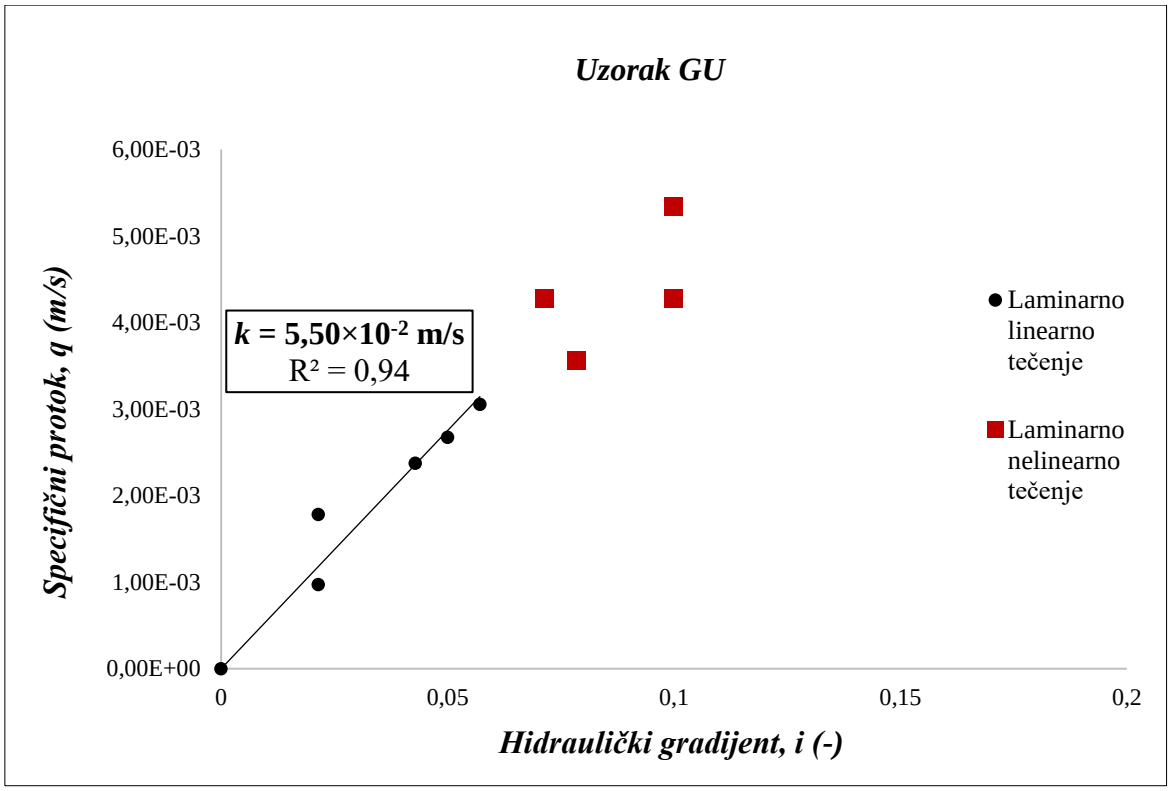
Ovisnost specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta prikazan je za sva četiri ispitna uzorka. Provedeno je po devet mjerenja za sva četiri ispitna uzorka (SU; GU, GW i GP). Mjerene su sljedeće vrijednosti: promjena volumena, vrijeme, temperatura i razina vode u cjevčicama. Na temelju obrade podataka aproksimirani su pravci, definirani kao funkcija ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta. Nagib pravca predstavlja koeficijent propusnosti za podatke koji predstavljaju linearni tok.

Dobiveni koeficijent propusnosti tla za jednoliko graduirani pijesak iznosi k = $7{,}30 \times 10^{-4}$ m/s, te je prikazan na slici 6-9.

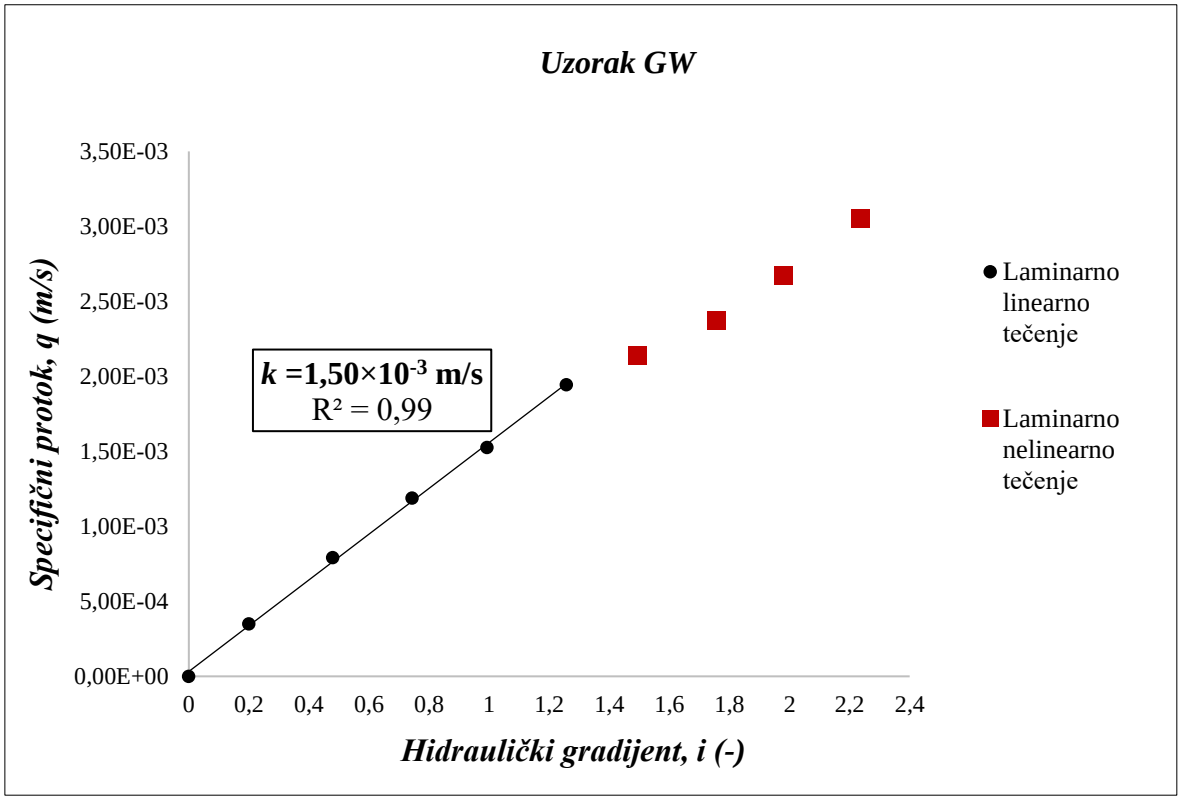


Slika 6-9. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za jednoliko graduirani pijesak (SU)

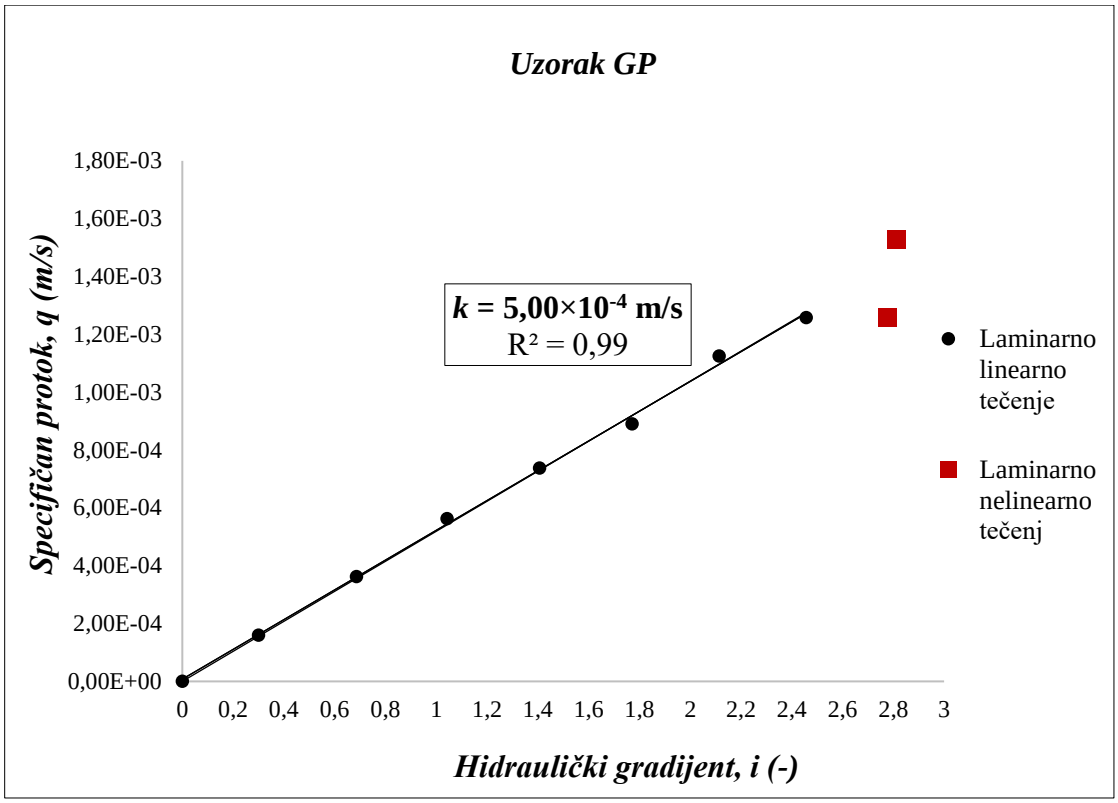
Za jednoliko graduirani šljunak (GU) koeficijent propusnosti iznosi $5{,}50 \times 10^{-2}$ m/s koji je prikazan na slici 6-10. Koeficijent propusnosti za dobro graduirani šljunak (GW) iznosi $1{,}50 \times 10^{-3}$ m/s koji je prikazan na slici 6-11. Na slici 6-12. prikazana je ovisnost specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za loše graduirani šljunak (GP), a koeficijent propusnosti u tom slučaju iznosi $5{,}00 \times 10^{-3}$m/s.



Slika 6-10. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za jednoliko graduirani šljunak (GU)



Slika 6-11. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za dobro graduirani šljunak (GW)



Slika 6-12. Ovisnosti specifičnog protoka i hidrauličkog gradijenta za loše graduirani šljunak (GP)

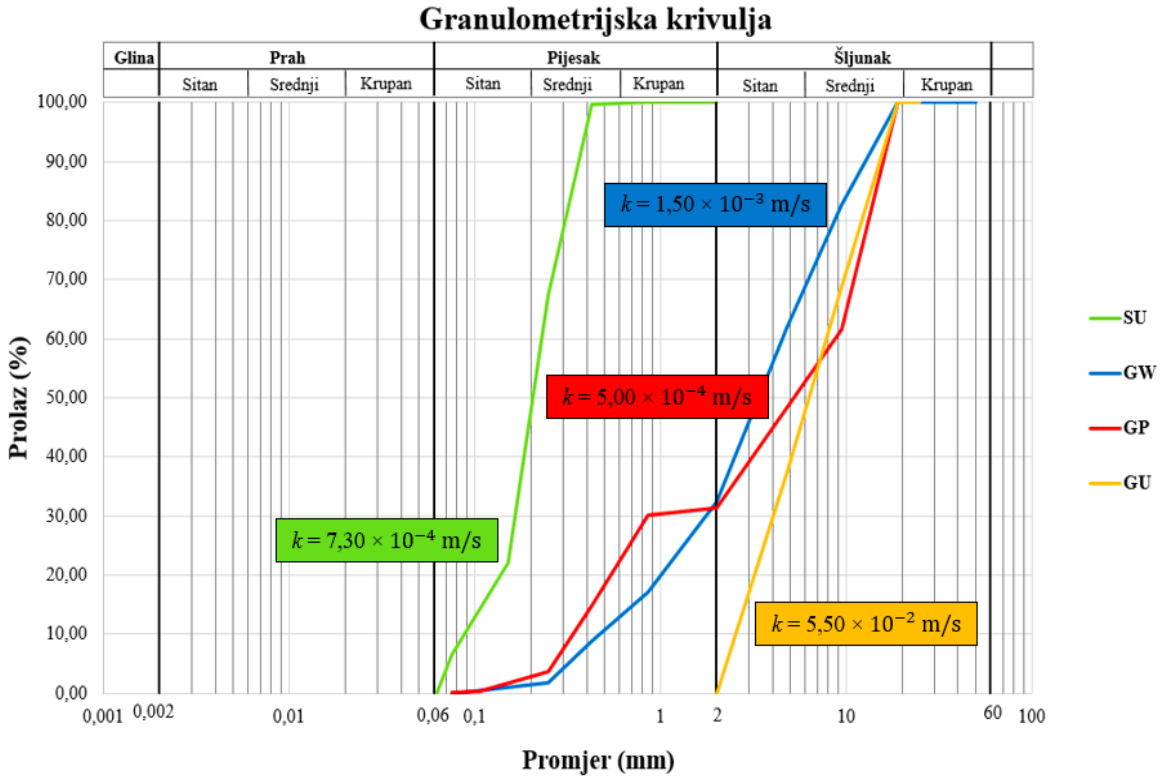
U tablici 6-2. prikazane su vrijednosti koeficijenta propusnosti za ispitne uzorke metodom permeametra sa stalnom razinom. Uzorke je moguće usporediti s obzirom na efektivni promjer zrna, oblik krivulje i graduiranosti. Granulometrijske krivulje ispitnih uzoraka prikazane su na slici 6-13.

Na slikama su crnim kružićima prikazane vrijednosti koeficijenta propusnosti za laminarno linearno tečenje, a crvenim kvadratićima su prikazne vrijednosti koeficijenta propusnosti u slučaju laminarnog nelinearnog tečenje koji potom prijelazi u turbulentno tečenje.

Za uzorak GU dobivena su najveća odstupanja mjerenih vrijednosti od pravca što je i očekivano s obzirom na velike brzine tečenja i veliki porozitet uzorka.

Tablica 6-1. Vrijednosti koeficijenta propusnosti ispitnih uzoraka metodom permeametra sa stalnom razinom

Uzorci	SU	GU	GW	GP
D_{10} (mm)	0,09	2,74	0,48	0,35
D_{30} (mm)	0,17	4,22	1,82	0,85
D_{60} (mm)	0,23	8,16	4,57	9,08
C_u (-)	2,56	2,98	9,46	26,02
C_c (-)	1,32	0,80	1,50	0,23
R^2	0,99	0,94	0,99	0,99
k (m/s)	0,00073	0,055	0,00150	0,00050



Slika 6-13. Granulometrijske krivulje ispitnih uzoraka i vrijednosti koeficijenta propusnosti

Prema dobivenim vrijednosti koeficijenta propusnosti kod uzoraka GW i GP vidljiv je utjecaj graduiranosti, vrijednosti maksimalne i minimalne veličine zrna približno su iste. Krivulje uzoraka GW i GP započinju i završavaju u istoj točki. Vrijednost koeficijenta propusnosti kod spomenutih uzoraka razlikuju se za jedan red veličine.

Vrijednosti koeficijenta propusnosti kod uzoraka SU i GU razlikuju se za sto puta tj. 2 reda veličina. Navedeni uzorci imaju slične raspone vrijednosti koeficijenta zakrivljenosti

i koeficijenta jednoličnosti. Promatrajući ta dva ispitna uzorka vidljiv je utjecaj maksimalne veličine zrna na vrijednosti koeficijenta propusnosti. Što je veličina zrna veća to je veća i propusnost uzorka.

Za usporediti je kako s porastom vrijednosti efektivnog promjera zrna, D_{10} kod uzoraka GP, GW i GU vrijednosti koeficijenta propusnosti proporcionalno rastu tj. što je veličina (promjer) čestice veći voda na jednostavniji način pronalazi put tečenja kroz uzorak, te se vremenski manje zadržava u njemu, odnosno tečenje se odvija brže. Kada se uspoređuju uzorci pijeska i šljunka, efektivni promjer zrna D_{10} kod uzorka SU je manji u odnosu na uzorak GU. Prema tome je i tečenje vode kroz uzorak teže, jer uzorak sadrži više sitnijih čestica. Analogno tome je i koeficijent propusnosti manji.

Što se tiče graduiranosti, kada je uzorak lošije graduiran, sadrži više sitnijih čestica vrijednost koeficijenta propusnosti je manja jer voda na teži način teče kroz ispitani uzorak, tj. vremenski se dulje zadržava u uzorku. Prema obliku krivulje nedostaje mu pojedina frakcija. Kada je uzorak dobro graduiran, sadrži sve čestice od najveće do najmanje približno jednako pa vrijednost *k* raste u odnosu na loše graduirani šljunak u kojemu su više zastupljene sitnije čestice. Prema obliku krivulje riječ je o uzorku koji zahvaća čestice u širem području. Kada govorimo o jednoliko graduiranom uzorku, takav uzorak sadrži sve čestice u jednakim omjerima, ali je oblik krivulje „uzak“, jer zahvaća samo određene frakcije jednolično. Ukoliko je riječ o jednolično graduiranom pijesku vrijednost koeficijenta propusnosti je manja u odnosu na jednoliko graduirani šljunak jer su čestice pijeska manjeg promjera u odnosu na šljunak. Kada je *k* manji voda teže protječe kroz uzorak. Veličine čestica šljunka su puno veće pa je i vrijednost *k* veća.

Vidljivo je kako se vrijednosti uzoraka GU i GP razlikuju sto puta, dok je vrijednost GW uzorka nalazi između. Vrijednosti SU i GU razlikuju se za sto puta, dok su vrijednosti uzoraka SU i GP gotovo slične. Još je interesantno porediti uzorke GW i GP čije granulometrijske krivulje imaju identičnu početnu i krajnju točku tj. isti raspon čestica. Međutim, kako uzorak GP sadrži puno više čestica veličine srednjeg i sitnog pijeska, to uzrokuje i manji koeficijent propusnosti.

Za zaključiti je kako s porastom efektivnog promjera zrna raste vrijednost koeficijenta propusnosti. Također, što je uzorak lošije graduiran vrijednost koeficijenta propusnosti se smanjuje. Što je manji promjer zrna i pore su manje, pa je time manji i

koeficijent propusnosti. Već i mala količina sitnih čestica (promjera manjeg od 0,06 mm) znatno smanjuje prosječni promjer pora, a time i koeficijent propusnosti.

7. KORELACIJA VRIJEDNOSTI DOBIVENIH METODOM PERMEAMETRA SA STALNOM RAZINOM I PODATAKA DOBIVENIH EMPIRIJSKIM IZRAZIMA

Nakon provedenih ispitivanja uspoređeni su podaci koji su dobiveni laboratorijskom pokusima primjenom metode permeametra sa stalnom razinom i procijenjene vrijednosti korištenjem korelacija na temelju interpretacije rezultata dobivenih ispitivanjem granulometrijskog sastava ispitnih uzoraka.

7.1. Obrada rezultata

U tablici 7-1. zbirno su prikazane vrijednosti koeficijenta propusnosti dobivene metodom permeametra sa stalnom razinom, te korištenjem različitih izraza poznatih iz literature. Definirane su vrijednosti koeficijenta propusnosti pri temperaturi od 20°C i uspoređene s empirijskim podacima. Prilikom ispitivanja permeametrom sa stalnom razinom bilježene su promjene koeficijenta propusnosti pri temperaturi od 17°C. Navedene vrijednosti korigirane su na temperaturu od 20°C, kako bi se prilikom izračuna mogla koristiti vrijednost kinematički koeficijent viskoznosti pri temperaturi od 20°C koja iznosi $1{,}01 \times 10^{-6}$ m^2/s. Dobiveni rezultati koeficijenta propusnosti, *k* prikazani su u m/s.

Za svaki empirijski izraz prikazana je korištena jednadžba, uvjeti u kojima se mogu primjenjivati i dobivene vrijednosti koeficijenta propusnosti. Prije samoga izračuna potrebno je zadovoljiti definirane uvjete tj. područje primjene.

Tablica 7-1. Usporedba vrijednosti dobivenih permeametrom sa stalnom razinom i podataka dobivenih empirijskim korelacijama

Usporedba koeficijenta propusnosti empirijskim izrazima i permeametrom sa stalnom razinom		SU	GU	GW	GP	
n (-)		0,413	0,401	0,299	0,257	
D_{10} (m)		$9{,}10\times10^{-5}$	$2{,}74\times10^{-3}$	$4{,}84\times10^{-4}$	$3{,}50\times10^{-4}$	
D_{20} (m)		$1{,}29\times10^{-4}$	$3{,}48\times10^{-3}$	$1{,}00\times10^{-3}$	$5{,}68\times10^{-4}$	
C_u (-)		2,56	2,98	9,46	26,02	
Autor	**Korelacijski odnos**	**Koeficijent propusnosti k pri 20°C (m/s)**				**Uvjet**
Hazen	$k = \frac{g}{v} \times (6\times10^{-4}) \times (1 + 10(n - 0{,}26)) \times d_{10}^{2}$	-	$1{,}05\times10^{-1}$	-	-	$0{,}1\ mm < d_{10} < 3\ mm$ $C_u < 5$
Breyer	$k = \frac{g}{v} \times (6\times10^{-4}) \times \log(\frac{500}{Cu}) \times d_{10}^{2}$	$1{,}11\times10^{-4}$	-	$2{,}35\times10^{-3}$	-	$0{,}06\ mm < d_{10} < 0{,}6\ mm$ $1 < C_u < 20$
Slichter	$k = \frac{g}{v} \times (1\times10^{-2}) \times n^{3.287} \times d_{10}^{2}$	-	-	$4{,}29\times10^{-4}$	$1{,}36\times10^{-4}$	$0{,}1\ mm < d_{10} < 0{,}5\ mm$
Terzaghi	$k = \frac{g}{v} \times C_t \times (\frac{n-0{,}13}{\sqrt[3]{1-n}})^2 \times d_{10}^{2}$	-	-	-	-	C_t – $8{,}3\times10^{-3}$ (srednja vrijednost); krupni pijesak
USBR	$k = \frac{g}{v} \times 4{,}8 \times 10^{-4} \times d_{20}^{0{,}3} \times d_{20}^{2}$	$5{,}28\times10^{-6}$	-	-	-	srednje graduirani pijesak $C_u < 5$
Kozeny - Carman	$k = \frac{g}{v} \times 8{,}3 \times 10^{-3} \times \left(\frac{n^3}{(1-n)^2}\right) \times d_{10}^{2}$	$3{,}31\times10^{-4}$	$1{,}09\times10^{-1}$	$1{,}02\times10^{-3}$	$1{,}79\times10^{-4}$	$d_{10} < 3\ mm$
Koeficijent propusnosti dobiven permeametrom sa stalnom razinom		**$7{,}30\times10^{-4}$**	**$5{,}50\times10^{-2}$**	**$1{,}50\times10^{-3}$**	**$5{,}00\times10^{-4}$**	

Hazenov izraz isključivo odgovara području sitnog pijeska do sitnog šljunka. Navedenom metodom dobivena je najveća vrijednost koeficijenta propusnosti kod uzorka GU u odnosu na vrijednosti *k* dobivene metodom permeametra sa stalnom razinom, a kod ostalih ispitnih uzoraka uvjet nije zadovoljen pa se izraz ne primjenjuje za izračun koeficijenta propusnosti. Riječ je o jednoliko graduiranom šljunku, gdje je efektivni promjer zrna D_{10} najveći u odnosu na druge ispitne uzorke. Prema tome je i vrijednost koeficijenta propusnosti najveća.

Breyerova metoda odgovara kod uzorka SU i GW jer zadovoljava područje primjene. Vrijednost *k* je manja u odnosu na vrijednost uzorka GU koji je dobiven Hazenovom metodom. Izračun Slichterove metode prema definiranim uvjetima moguć je kod uzoraka GW i GP.

Terzaghi-jevu metodu nije moguće koristiti niti za jedan od četiri ispitna uzorka jer se primjenjuje isključivo za krupni pijesak. U okviru ovog diplomskog rada prilikom ispitivanja koeficijenta propusnosti pripremljen je uzorak SU čija je veličina čestica u rasponu od 0,06 mm do 0,6 mm. S obzirom na veličinu čestica riječ je o srednjem do sitnom pijesku.

USBR metodom moguće je izračunati koeficijent propusnosti, ali isključivo za uzorak SU jer zadovoljava uvjete. Navedena metoda primjenjuje se kada je riječ o srednje graduiranom pijesku. Vrijednost koeficijenta propusnosti koji je dobiven pomoću USBR metode je najmanji u odnosu na druge vrijednosti dobivene empirijskim korelacijama.

Izračun koeficijenta propusnosti pomoću empirijskog izraza metodom Kozeny-Carman moguć je za sva četiri ispitna uzorka. Najveća vrijednost koeficijenta propusnosti navedenom metodom dobivena je kod uzorka GU. Vrijednosti *k* kod uzoraka SU i GP približno odgovaraju jedna drugoj, te predstavljaju najmanje vrijednosti dobivene metodom Kozeny-Carman. Vrijednosti *k* kod uzorka GW nalazi se između najveće i najmanje vrijednosti dobivene za ostale uzorke.

Vidljivo je kako su najveće vrijednosti koeficijenta propusnosti empirijskim metodama dobivene kod jednoliko graduiranog šljunka. Što je zrno krupnije voda na lakši način pronalazi put tečenja kroz ugrađeni uzorak, prema tome i koeficijent propusnosti veći.

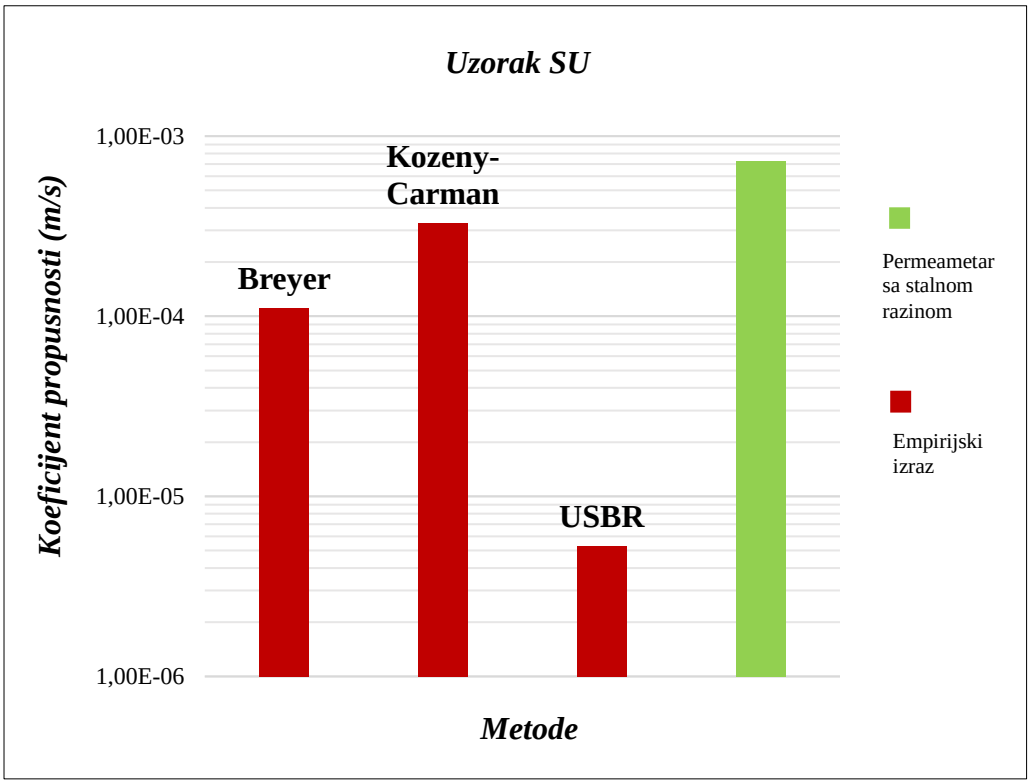
Navedene empirijske vrijednosti uspoređene su s rezultatima dobivenim permeametrom sa stalnom razlikom pri temperaturi od 20°C. Područja koja su označena

crvenom bojom u tablici 7-1. prikazuju loše preklapanje rezultata. Zelenom bojom označena su polja koja prikazuju približno jednake vrijednosti koeficijenta propusnosti.

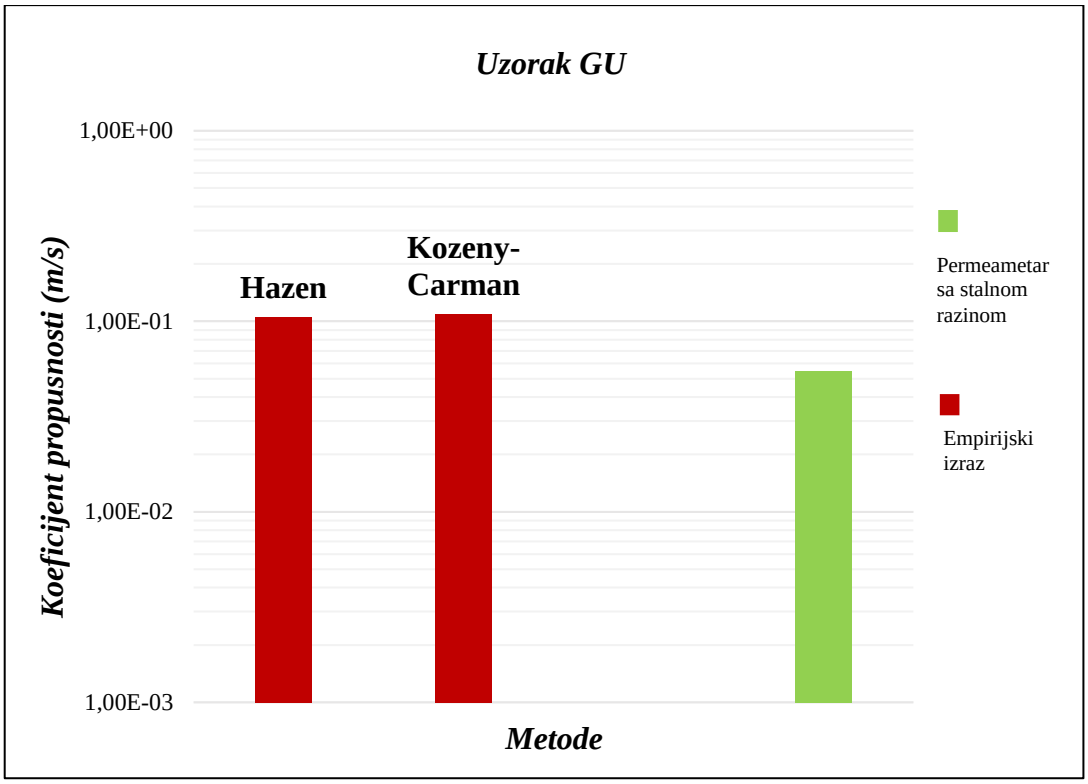
Kod GP uzorka dobivene su vrijednosti istog reda veličine. Vrijednosti GU uzorka približno su slične, razlikuju se za jedan red veličine. Kod uzorka GW vrijednosti su slične, kod Slichterovog empirijskog izraza razlikuju se za jedan red veličine. Najveće odstupanje vidljivo je proučavanjem rezultata za SU uzorak. Dobivena vrijednost koeficijenta propusnosti USBR metodom razlikuje se za dva reda veličine u odnosu na dobivenu vrijednost *k* koji je dobiven laboratorijskom metodom permeametra sa stalnom razinom.

Rezultate dobivene primjenom empirijskih izraza možemo usporediti i s dijagramima u poglavlju 6.5. Vidljivo je kako je i dalje najveće odstupanje upravo kod jednoliko graduiranog pijeska.

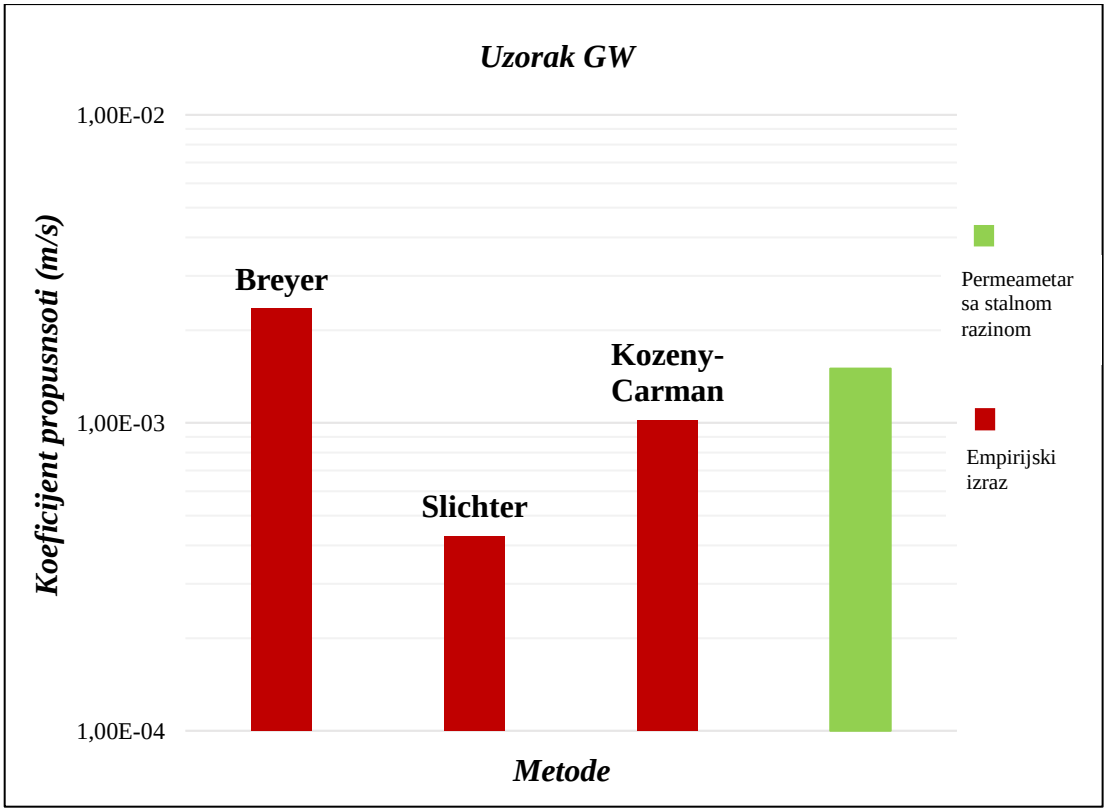
Prema tablici 7-1. grafički su prikazane vrijednosti koeficijenta propusnosti dobivenih primjenom empirijskih korelacija i laboratorijskom metodom permeametra sa stalnom razinom. Za pojedini uzorak prikazane su vrijednosti koeficijenta propusnosti samo za one empirijske izraze za koje je bilo moguće izračunati *k* s obzirom na područje primjene. Za metodu permeametra sa stalnom razinom proveden je jedan ciklus mjerenja podataka. Za svaki ispitni uzorak provedeno je devet mjerenja visine vode u cjevčicama, volumena vode i vrijeme tečenja vode kroz uzorak. Usporedba vrijednosti za uzorak SU prikazana je na slici 7-1, za uzorak GU na slici 7-2, za uzorak GW na slici 7-3 i uzorak GP na slici 7-4.



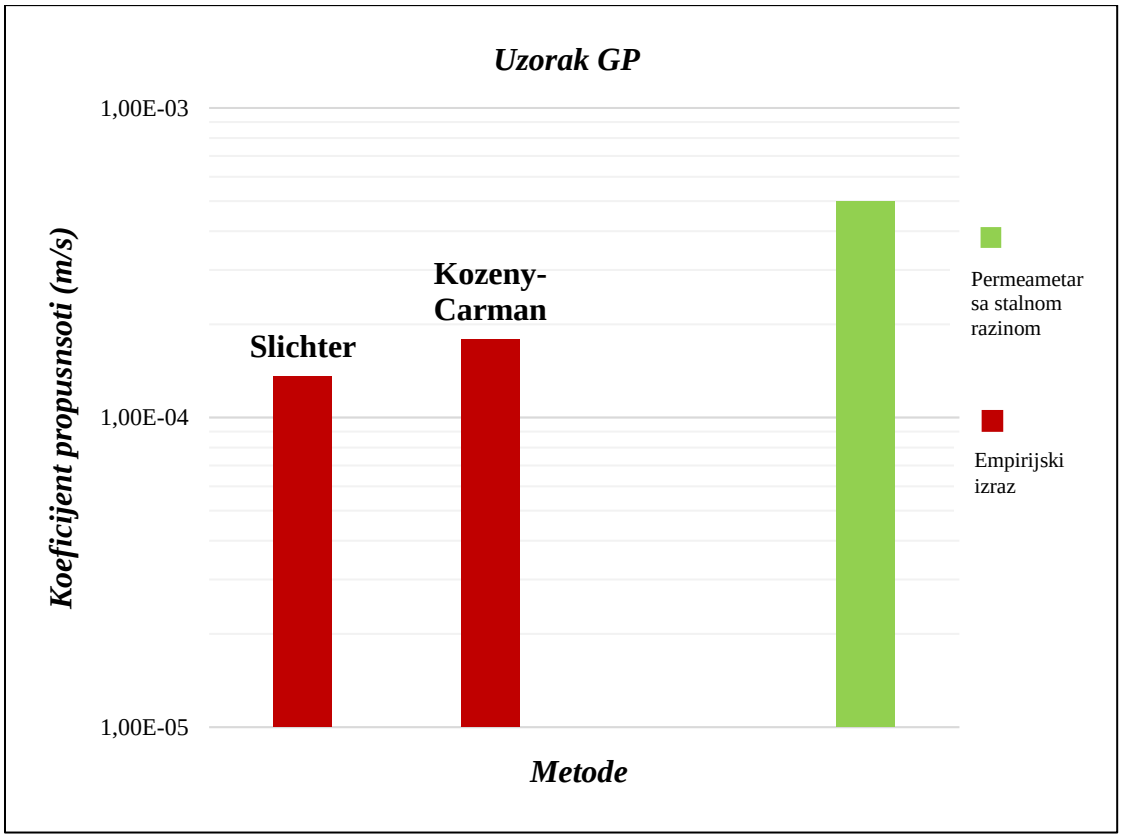
Slika 7-1. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak SU



Slika 7-2. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak GU



Slika 7-3. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak GW



Slika 7-4. Usporedba vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorak GP

Prema navedenim usporedbama vidljivo je kako u određenim vrstama tla empirijske formule daju veće vrijednosti u odnosu na one dobivene metodom permeametra sa stalnom razinom, i obrnuto za neke druge vrste tla.

Za uzorak SU može se zaključiti kako su najbliže vrijednosti koeficijenta propusnosti u usporedbi s vrijednosti permeametra sa stalnom razinom dobivene empirijskom metodom Kozeny – Carman, dok je najveće odstupanje vidljivo USBR metodom, vrijednost se razlikuje za dva reda veličine u odnosu na druge dobivene vrijednosti koeficijenta propusnosti.

Kod uzorka GU za primijetiti je kako su vrijednosti dobivene primjenom empirijskih izraza Hazen i Kozeny – Carman približno iste s vrijednostima koje su dobivene u laboratoriju metodom permeametar sa stalnom razinom.

Za uzorak GW vrijednosti koeficijenta propusnosti koje su dobivene laboratorijski nalaze se između korelacijskih izraza Breyer i Kozeny – Carman. Najveće odstupanje kod navedenog uzorka dobiva se primjenom empirijske formule po Slichteru.

Kod uzorka GP dobivene su vrijednosti istog reda veličine.

Promatrajući sva četiri ispitna uzorka istovremeno može se zaključiti kako uzorci SU i GP daju veće vrijednosti laboratorijskom metodom permeametra sa stalnom razinom u odnosu na empirijske izraze. Kod uzoraka GW i GU dobivene su nešto manje vrijednosti koeficijenta propusnosti pomoću metode permeametra sa stalnom razinom za razliku od empirijskih korelacija.

Promatrajući isključivo uzorke GU, GW i GP možemo zaključiti da je najbolje podudaranje empirijskih metoda vidljivo kod uzorka GU, jer je riječ o jednolično graduiranom uzorku, a u druga dva slučaja ta su odstupanja veća.

Koeficijent propusnosti koristi se kao projektni parametar u području hidrogeologije (na pr. za procjenu količina crpljenja) i u području geotehnike (na pr. za proračun stabilnosti kosina, količina protjecanja ili vododrživosti). Ovo istraživanje pokazalo je da se vrijednosti dobivene primjenom empirijskih izraza i izravnim mjerenjem u laboratoriju, mogu razlikovati i do sto puta za neke vrste tla. Drugim riječima, isključiva primjena empirijskih izraza može značajno utjecati na kvalitetu projektiranja hidrotehničkih i geotehničkih zahvata. Prema tome, preporučljivo je koeficijent propusnosti odrediti primjenom više različitih metoda, te projektni parametar odrediti na temelju takvih izračuna.

9. ZAKLJUČAK

Određivanje vrijednosti koeficijenta propusnosti i granica u kojem se te vrijednosti kreću potrebno je radi provođenje pouzdanih geotehničkih analiza koje uključuju procjeđivanje vode kroz tlo. Koeficijent propusnost za različite vrste tala može varirati više od deset redova veličine i teško ga je precizno odrediti. Definirati se kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene/tla jedinične površine uz jedinični hidraulički gradijent. Vrijednost koeficijenta propusnosti ovisi o brojnim parametrima kao što su: veličina i oblik zrna, granulometrijski sastav tla, specifična gustoća čestica tla, ukupna poroznost i saturiranost. Da bi se mogao proučavati koeficijent propusnost uzorka bitno je uspostaviti laminarni gravitacijski tok. Ukoliko brzina tečenja raste laminarni, linearni tok prelazi u laminarni nelinearni tok, a potom u turbulentni. Laminarno linearno strujanje vode kroz uzorak predstavlja tečenje vode malim brzinama u paralelnim slojevima, bez miješanja samih slojeva. Za tečenje vode u poroznom mediju smatra se da je brzina mala, pa je prema tome i strujanje vode laminarno. Samo pri kretanju vode velikim brzinama tečenje prelazi iz laminarnog toka u turbulentni, te u takvim slučajevima ne vrijedi Darcy-jev zakon. Laminarni gravitacijski tok opisuje se linearnim zakonom filtracije ili Darcy-jevim zakonom koji opisuje tok vode u poroznoj sredini.

Određivanje koeficijenta propusnosti provodi se raznim laboratorijskim ili terenskim metodama. U diplomskom radu korištena je laboratorijska metoda permeametra sa stalnom razinom. Rezultati dobiveni primjenom te metode uspoređeni su s empirijskim korelacijama koje se temelje na parametrima tla dobivenim pomoću granulometrijske krivulje. Proračun koeficijenta propusnosti empirijskim metodama moguć je jedino ukoliko je zadovoljeno područje primjene.

Cilj istraživanja bio je utvrditi vrijednosti koeficijenta propusnosti pomoću navedenih metoda i definirati koje od metoda se najbolje poklapaju tj. gdje su dobivene približno jednake vrijednosti koeficijenta propusnosti. Također, laboratorijski uzorci pripremljeni su kako bi se mogao utvrditi utjecaj graduiranosti tla i veličine čestica (efektivnog i maksimalnog promjera zrna) na koeficijent propusnosti.

U Geomehaničkom laboratoriju na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu uzorci su za ovo istraživanje umjetno pripremljeni miješanjem različitih frakcija tla dobivenih prethodnim sijanjem. Pripremljena su četiri ispitna uzorka i to: SU (jednoliko graduirani

pijesak), GU (jednoliko graduirani šljunak), GW (dobro graduirani šljunak) i GP (slabo graduirani šljunak).

Kao konačan rezultat dobivene su vrijednosti koeficijenta propusnosti prema gore navedenim metodama, te su međusobno uspoređene. Vrijednosti koeficijenta propusnosti dobivene metodom permeamertra sa stalnom razinom prikazane su grafički kao ovisnost o specifičnog protoka q o hidrauličkom gradijentu i. Iz navedenih pravaca dobivena je korelacijska vrijednost R^2. Kod uzorka GU dobivena je najlošija korelacijska vrijednost u odnosu na uzorke SU, GW i GP. Ispitni uzorak GU predstavlja krupnozrnato tlo približno jednakih zrnaca te većeg poroziteta. Stoga, kroz takvo tlo voda lakše teče, a tok vode brže prelazi iz laminarnog linearnog u laminarni nelinearani tok, a potom u turbulentni. Najveće odstupanje rezultata k vidljivo je kod SU uzorka i to kod empirijske metode, posebice USBR metode. Dobivena vrijednost razlikuje se za dva reda veličine u usporedbi s permeametrom sa stalnom razinom. Uzorak GW pokazao se najboljim zbog najmanje razlike koeficijenta propusnosti dobivene primjenom empirijskih izraza i laboratorijskom metodom permeametra sa stalnom razinom. Terzaghijeva metoda nije primjenjiva ni za jedan od četiri ispitna uzorka, jer ne zadovoljava područje primjene. Ta korelacijska veza primjenjuje se isključivo kod krupnog pijeska, dok je laboratorijski uzorak SU bio pijesak čija su zrnca srednje veličine.

Odnos između empirijskih izraza i metode permeametra sa stalnom razinom najbolje se može proučiti na slikama koje su opisane u prethodnom poglavlju. Najveće odstupanje empirijskih podataka i laboratorijskih rezultat vidljivo je kod uzorka SU gdje se vrijednosti razlikuju za dva reda veličine. Kod uzorka GU, GW i GP najlošije poklapanje rezultata vidljivo je kod uzorka GW zbog Slichterovog empirijskog izraza. Vrijednosti koeficijenta propusnosti za uzorke GU i GP usporedbom dviju metoda približno su iste.

Također, možemo reći kako na propusnost utječe veličina zrna (maksimalno i efektivno zrno), kao i graduiranost uzorka. Utjecaj graduiranosti može se primijetiti kod uzoraka GW i GP, gdje se dobivena vrijednost k razlikuje za jedan red veličine, a granulometrijske krivulje započinju i završavaju u istoj točki. Utjecaj veličine zrna može se primijetiti kod uzoraka SU i GU gdje se dobivena vrijednost koeficijenta propusnosti razlikuje za dva reda veličine. Spomenuti uzorci, SU i GU, imaju približno iste vrijednosti koeficijenta jednoličnosti i koeficijenta zakrivljenosti.

Općenito se može zaključiti da s povećanjem promjera zrna, voda na jednostavniji način pronalazi put tečenja kroz uzorak, te je time i koeficijent propusnosti veći. Kod uzoraka čija je veličina zrna manja, voda na teži način pronalazi put tečenja, brzina tečenja je mala, pa se time i vrijednost koeficijenta propusnosti smanjuje. Iz svega navedenog može se zaključiti kako vrijednost koeficijenta propusnosti ovisi o stupnju graduiranosti i veličini zrna (efektivnog i maksimalnog).

U praksi, koeficijent propusnosti je bitan parametar koji ima važnu ulogu kod brojnih hidrogeoloških i geotehničkih istraživanja. Moguće je definirati koliko vode protječe kroz vodonosnik ili odrediti moguće probleme prilikom procjene stabilnosti pokosa, prodora vode u građevinske jame, promjene volumena vode u tlu i brojnih drugih problema, koje za sobom mogu prouzročiti negativne posljedice. Kako bi se izbjegle moguće negativne posljedice poželjno je koeficijent propusnosti tla procijeniti ili odrediti korištenjem više različitih metoda, te uz primjenu inženjerske prosudbe na sigurniji način odrediti njegovu numeričku vrijednost, koja će se koristiti pri projektiranju hidrogeoloških, hidrotehničkih ili geotehničkih objekata.

10. LITERATURA

ASTM D 422 – Standard Test Method for Particle-Size Analysid of Soils. str. 1-8.

ASTM D 2487 – 06 – Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purpose (Unified Soil Classification System). str. 1-12.

ASTM D 2434 – 68 (Reapproved 2000) – Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). str. 1-5.

Bačani, A., 2006. Hidrogeologija I. Sveučilište u Zagrebu, 198 str.

Posavec, K., Kukolja A., Kocijan V., 2018. Constant head permeameter tests for hydraulic conductivity of unconsolidated sediments and associated terminology. Proceed. 2nd Croatian scientific congress from geomathematics and terminology in geology, Zagreb, October 6, 2018, 1-14.

Kvasnička P., Domitrović D., 2007. Mehanika tla: Interna skripta. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 261 str.

Nonveiller E., 1981. Mehanika tla i temeljenje građevina. II izdanje. Zagreb: Školska knjiga, 780 str.

Odong J., 2007. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. The Journal of American Science, 3(3), str. 54-60.

Petrinjek I., Štuhec D., Jeftić G., Strelec S., 2018. Usporedba različitih metoda određivanja koeficijenta propusnosti nekoherentnog tla. Inženjerstvo okoliša, Vol.5, No. 1-2, str. 99-108.

Urumović. K., 2003. Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, 334 str.

Veinović Ž., Kovačević-Zelić B., Kvasnička P., 2003. Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda. Zbornik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Vol. 15, str. 95-102.

Žugaj R., 2015. Hidrologija. Sveučilište u Zagrebu, 538 str.