

Laboratorijsko i terensko određivanje koeficijenta propusnosti

Marko Mance¹, Mladen Cvetković², izv.prof.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić³

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mmance@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mcvetkovic@grad.hr

³Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, djka@grad.hr

Sažetak

Koeficijent propusnosti je vrlo važan parametar tla za projektiranje u geotehnici. Propusnost tla može varirati, ovisno o vrsti tla, i do deset redova veličine i teško se može precizno izmjeriti. Za određivanje propusnosti tla, ključno je poznavati osnovne zakone tečenja vode u tlu. Danas postoje različite terenske i laboratorijske metode kojima se izravnim ili neizravnim putem može odrediti koeficijent propusnosti tla. U ovom radu su prikazane odabrane metode određivanja koeficijenta propusnosti pomoću granulometrijskog sastava tla, pokusa s konstantnim potencijalom u troosnoj ćeliji, pokusa s konstantnom razlikom tlaka u hidrauličkom edometru te pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa – CPT-a. Naveden je njihov osnovni princip, način određivanja vrijednosti koeficijenta propusnosti te njene prednosti i nedostaci.

Ključne riječi: koeficijent propusnosti, tečenje vode u tlu, laboratorijska i terenska ispitivanja, ispitivanje s konstantnim potencijalom, hidraulički edometar, CPT, disipacija pornog tlaka

Laboratory and field determination of hydraulic conductivity

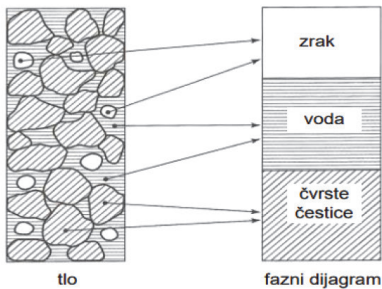
Abstract

Hydraulic conductivity is a soil parameter that is very important for geotechnical design. Soil permeability can vary by up to ten orders of magnitude, depending on the type of soil, and it can be difficult to measure accurately. To determine the soil permeability, it is crucial to know the basic laws of soil water flow. Various on-site and laboratory methods are currently available for direct or indirect determination of hydraulic conductivity. This paper presents selected methods for determining the coefficient of permeability using the grain size distribution, the constant head test in triaxial cell, the flow pump test in hydraulic oedometer, and the static penetration test (CPT). Their basic principles, the methods for determining hydraulic conductivity, and their advantages and disadvantages are specified.

Key words: hydraulic conductivity, soil water flow, laboratory and field tests, constant head permeability test, hydraulic oedometer, CPT, dissipation test

1 Uvod

U mehanici tla promatra se tlo kao trofazni materijal sastavljen od zrna i/ili čestica koje tvore skelet tla i pora koje mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom (slika 1.). S obzirom na postojanje pora u tlu, koje čine mrežu pora okruženu čvrstim česticama, tlo ima svojstvo propusnosti kojim je omogućeno tečenje fluida kroz tlo. U geotehničkom inženjerstvu se uglavnom ispituje tečenje vode kroz tlo [1]. Tečenje vode kroz tlo se ostvaruje kada postoji razlika u hidrauličkom potencijalu, i to sa strane većeg hidrauličkog potencijala prema manjem.



Slika 1. Fazni dijagram tla [2]

Propusnost tla se razlikuje za različite vrste tla i uvelike ovisi o veličini čestica u tlu. Na propusnost tla, osim veličine pora kao svojstva tla, utječu i oblik i tekstura zrna, mineraloški sastav tla, koeficijent pora, stupanj zasićenosti tla; struktura i građa tla te viskoznost, gustoća i temperatura fluida koji teče kroz tlo [3]. Također, zbog horizontalne uslojenosti tla, propusnost u horizontalnom smjeru često je znatno veća od propusnosti u vertikalnom smjeru. Okvirne vrijednosti koeficijenta propusnosti za različite vrste tla su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Okvirne veličine koeficijenta propusnosti k [1].

Grupa tla	k [m/s]
Šljunak	$10^{-3} - 10^{-1}$
Pijesak	$10^{-6} - 10^{-3}$
Prah	$10^{-8} - 10^{-6}$
Glina	$10^{-10} - 10^{-8}$

S obzirom na važnost koeficijenta propusnosti u geotehnici, razvijene su brojne metode, terenske i laboratorijske, kojima se on može odrediti. Prednost laboratorijskih ispitivanja koeficijenta propusnosti je to što se pokusi izvode u kontroliranim uvjetima te su znatno jeftiniji od pokusa koji se obavljaju na terenu. Nedostatak ovakvih ispitivanja su problemi tijekom prikupljanja neporemećenih reprezentativnih uzoraka, što rezultati

pokusa ovisi o ljudskom faktoru te su ispitivanja često dugotrajna. Osnovna prednost terenskih ispitivanja u odnosu na laboratorijska jest brzina ispitivanja i činjenica da se pokusi izvode *in-situ* pa su izbjegnuti problemi s vađenjem neporemećenih reprezentativnih uzoraka tla.

2 Laboratorijsko određivanje koeficijenta propusnosti

Za neizravno određivanje koeficijenta propusnosti najčešće se koristi granulometrijski sastav tla. Standardne metode za izravno određivanje koeficijenta propusnosti u laboratoriju ovisi o klasifikaciji tla. Tako se za krupnozrna tla zbog veće propusnosti koristi pokus s konstantnim potencijalom, a za sitnozrna tla pokus s promjenjivim potencijalom. Koeficijent propusnosti za sitnozrna tla može se pouzdanije izravno odrediti pomoću ispitivanja u hidrauličkom edometru primjenjujući tzv. "flow pump test".

2.1 Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću granulometrijskog sastava tla

Pokušaji povezivanja koeficijenta propusnosti i granulometrijskog sastava tla traju više od 130 godina. Ti pokušaji zasnivaju se na teoretskim razmatranjima i empirijskim izrazima nastalih provođenjem niza pokusa i uspostavljanjem korelacijskih odnosa. Prve pretpostavke za povezivanje koeficijenta propusnosti i granulometrijskog sastava tla temelje se na tome da propusnost tla treba biti povezana s kvadratom nekog karakterističnog promjera pora, odnosno zrna tla [4]. Vodeći se tim pretpostavkama, prvi empirijski izraz za određivanje koeficijenta propusnosti daje Hazen 1892. godine, koji se može smatrati temeljem za nastanak ostalih empirijskih izraza za određivanje koeficijenta propusnosti k pomoću granulometrijskog sastava tla [5]:

$$k = C \cdot d_{10}^2 \text{ [cm/s]} \quad (1)$$

gdje je:

C - Hazenov empirijski koeficijent materijala (1.0 do 1.5) i

d_{10} - promjer zrna od kojeg je 10 % zrna tla manje (mm).

Hazen je pretpostavio da koeficijent propusnosti ovisi jedino o kvadratu promjera karakterističnog zrna d_{10} [3]. Međutim, Shepherd je 1989. ustanovio da se ne radi o kvadratnoj vezi, već da eksponent u Hazenovom izrazu može biti od 1,11 do 2,05, a da je konstanta C najčešće između 0,05 i 1,18, ali da se može dostići i vrijednost do 9,85 [6]. Ispitivanjem na različitim tlima pokazalo se da koeficijent propusnosti, osim o veličini karakterističnog zrna, ovisi i o koeficijentu pora. Vrijednost koeficijenta pora u izrazu za određivanje koeficijenta propusnosti uveo je Kozeny 1927. godine [7], a proširio ga Carman, 1937. [8] i 1956. godine [9]. Velik broj kasnije provedenih ispitivanja na različitim

tlima rezultirao je velikim brojem publiciranih izraza koji u sebi sadrže karakteristični promjer zrna i koeficijent pora. Vuković i Soro (1992.) sažimaju nekoliko empirijskih izraza za koeficijent propusnosti k te predstavljaju opći izraz koji glasi [10]:

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C \cdot f(n) \cdot d_e^2 \quad (2)$$

gdje je:

- g - gravitacijsko ubrzanje (m^2/s)
- ν - kinematička viskoznost (m^2/s)
- C - koeficijent materijala
- $f(n)$ - funkcija poroznosti i
- d_e - efektivni promjer zrna tla (mm).

Pregled postojećih empirijskih formula za izračunavanje koeficijenta propusnosti iz granulometrijskog sastava tla prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Pregled empirijskih formula za proračun koeficijenta propusnosti iz granulometrijskog sastava tla [10]

Metoda	Koeficijent C	Funkcija poroznosti $f(n)$	Efektivni promjer zrna d_e	Područje primjene
HAZEN	$6 \cdot 10^{-4}$	$[1+10(n-26)]$	$d_e = d_{10}$	$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$, $U < 5$
SLICHTER	$1 \cdot 10^{-2}$	$n^{3,287}$	$d_e = d_{10}$	$0,1 \text{ mm} < d_e < 3 \text{ mm}$, $U < 5$
TERZAGHI	$10,7 \cdot 10^{-3} > C$ $C > 6,1 \cdot 10^{-3}$	$\left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2$	$d_e = d_{10}$	Krupnozrnati pijesak
BEYER	$6 \cdot 10^{-4} \log$	1	$d_e = d_{10}$	$0,06 \text{ mm} < d_e < 0,6 \text{ mm}$, $1 < U < 20$
SAUERBREI	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$\frac{n^3}{(1-n)^2}$	$d_e = d_{17}$	Pjeskovita tla $d_e < 0,5 \text{ mm}$
KRUGER	$4,35 \cdot 10^{-5}$	$\frac{n}{(1-n)^2}$	$\frac{1}{d_e} = \sum \Delta g_i \frac{2}{d_i^g + d_i^d}$	Srednjezrnati pijesak $U > 5$
KOZENY-CARMAN	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$\frac{n^3}{(1-n)^2}$	$\frac{1}{d_e} = \sum \Delta g_i \frac{2}{d_i^g + d_i^d}$	Krupnozrnati pijesak
ZUNKER	$0,7 \cdot 10^{-4} > C$ $C > 2,4 \cdot 10^{-4}$	$\left(\frac{n}{1-n}\right)^2$	$\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_1} + \sum \Delta g_i \frac{\frac{1}{d_i^d} - \frac{1}{d_i^g}}{\ln d_i^g - \ln d_i^d}$	Sitnozrnati i srednjezrnati pijesak
ZAMARIN	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$\frac{n^3}{(1-n)^2} (1,275 - 1,5n)^2$	$\frac{1}{d_e} = \frac{3}{2} \frac{\Delta g_i}{d_1} + \sum a_i \ln \frac{d_i^g}{d_i^d}$	Krupnozrnati pijesak
USBR	$4,8 \cdot 10^{-4} d_{20}^{0,3}$	1	d_{20}	Srednjezrnati pijesak, $U < 5$

Svi geotehnički istražni radovi uključuju određivanje granulometrijskog sastava tla pa je s obzirom dostupnost uzoraka, određivanje koeficijenta propusnosti iz granulometrijskog sastava pomoću navedenih izraza vrlo često i jednostavno. Primjenjivost tih izraza ovisi o vrsti tla za koju se želi odrediti koeficijent propusnosti, a budući da se temelje na empirijskim istraživanjima, rezultati nisu nužno prenosivi s lokacije na lokaciju [3]. Marčić i dr. 2012. su pokazali da se korištenjem nekih od navedenih formula na istom poroznom materijalu, mogu dobiti vrijednosti koeficijenta propusnosti koji se mogu razlikovati i do 25 puta [11].

2.2 Određivanje koeficijenta propusnosti pokusom s konstantnim potencijalom u troosnoj ćeliji

Ovaj pokus se koristi za određivanje koeficijenta propusnosti k za tla koja imaju propusnost manju od 10^{-5} m/s. Princip ispitivanja je u nanošenju konstantnog tlaka p , odnosno hidrauličkog potencijala h , na potpuno zasićeni uzorak koji se nalazi u troosnoj ćeliji. Koeficijent propusnosti se izračunava kada su volumen vode koja ulazi u uzorak i volumen vode koja izlazi iz uzorka jednaki. Rezultat ispitivanja je graf ovisnosti volumena vode V koja je istekla iz uzoraka i proteklog vremena t , a protok Q se računa koristeći ravni dio grafa pomoću izraza

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

gdje je:

ΔV - volumen vode prikupljen u odabranom vremenskom intervalu (m^3) i

Δt - odabrani vremenski interval (s).

Nametnuta razlika potencijala h računa se prema:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} \quad (4)$$

gdje je:

p - nametnuti tlak p u spremniku s komprimiranom deaeriranom vodom (kPa) i

γ_w - zapremninska težina deaerirane vode (kN/m^3).

Konačno, koeficijent propusnosti k se izračunava iz izraza:

$$k = \frac{Ql}{Ah} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (5)$$

gdje je:

Q - protok dobiven omjerom volumena prikupljene vode u odnosu na vremenski interval t

- h - nametnuta razlika potencijala (m)
- l - visina uzorka (m)
- A - površina poprečnog uzorka (m²).

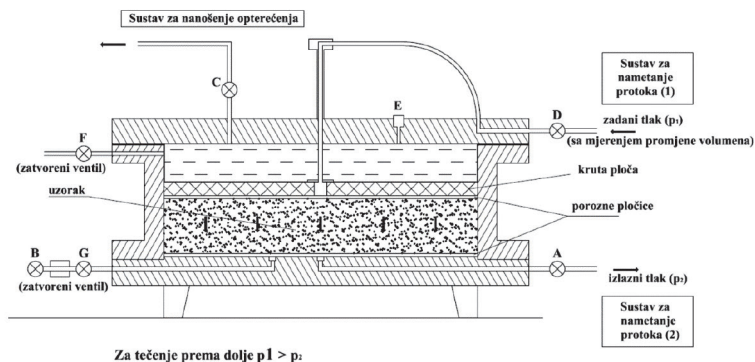
Dobivenu vrijednost koeficijenta propusnosti k je potrebno korigirati na referentnu temperaturu od 10 °C koja je jednaka prosječnoj temperaturi podzemne vode.



Slika 2. Uređaj s troosnom ćelijom na Građevinskom fakultetu u Zagrebu

2.3 Određivanje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru

Za razliku od standardnog edometra, hidrauličkim se edometrom, osim izvođenja standardnih edometarskih pokusa, ispitivanja deformacijskih i konsolidacijskih svojstava tla, mogu izvoditi ispitivanja s konstantnim prirastom deformacije ili s konstantnim prirastom opterećenja. Istovremeno je moguće mjeriti volumne i aksijalne deformacije, aksijalno opterećenje te povratni i porni tlak [3]. Brzina i veličina nanošenja opterećenja se kontroliraju računalno, hidrauličnim pumpama. Princip određivanja koeficijenta propusnosti pomoću hidrauličkog edometra je u nametanju protoka kroz uzorak i mjerenju konstantne razlike tlakova na krajevima uzorka. Na ovaj način se koeficijent propusnosti k može odrediti izravno te takav postupak predstavlja inverznu verziju pokusa s konstantnom razlikom tlaka, tzv. “flow pump test” [12]. Najveća prednost “flow pump testa” u odnosu na test s konstantnom razlikom tlaka je u tome da se protok kroz uzorak može preciznije nametnuti nego mjeriti [13]. Nakon nametanja zadanog protoka kroz uzorak, utiskivanjem tekućine pod konstantnom brzinom, prati se promjena razlike tlaka na krajevima uzorka.



Slika 3. Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću “flow pump testa” [12]

Koeficijent propusnosti se računa za svaki inkrement opterećenja uz poznate vrijednosti srednjeg hidrauličkog gradijenta i , specifičnog protoka q i površine poprečnog presjeka uzorka A . Izraz pomoću kojeg se računa srednji hidraulički gradijent i za svaki inkrement opterećenja i konstantnu razliku tlakova na gornjoj i donjoj strani uzorka je:

$$i = \frac{\Delta p}{\gamma_w H} \quad (6)$$

gdje je:

$\Delta p = p_1 - p_2$; p_1 i p_2 - zadani ulazni i izlazni tlak (kPa),

H - visina uzorka (m) i

γ_w - zapreminska težina vode (kN/m^3).

Uz poznatu se vrijednost hidrauličkog gradijenta i izračunava koeficijent propusnosti k prema izrazu:

$$k = \frac{q}{Ai} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

gdje je:

q - količina protoka u jedinici vremena, $q = \Delta Q / \Delta t$

A - površina poprečnog presjeka uzorka (m^2)

Q - zadani protok (m^3/s) i

t - vrijeme (s).

Zbog izravnog mjerenja, u potpuno kontroliranim laboratorijskim uvjetima određivanje koeficijenta propusnosti u hidrauličkom edometru može se uzeti kao referentni pokus u odnosu na kojeg se mogu baždariti sva druga ispitivanja. Jedini nedostatak ovog ispitivanja je, kao i kod ostalih laboratorijskih ispitivanja, vađenje neporemećenih uzoraka tla, njihova dostava u laboratorij, čuvanje uzoraka i pažnja pri ugradnji.

3 Terensko određivanje koeficijenta propusnosti

Najpoznatiji terenski pokus za određivanje koeficijenta propusnosti je probno crpljenje iz bunara. Crpljenjem određene količine vode iz bunara i mjerenjem sniženja razina podzemne vode u bunaru i pripadajućim piezometrima određuju se hidraulička svojstva vodonosnog sloja tla. Bržu i efikasniju alternativu predstavljaju određivanje koeficijenta propusnosti pomoću rezultata i statičkog penetracijskog pokusa – CPT-a i pokusa disipacije pornog tlaka.

3.1 Određivanje koeficijenta propusnosti pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa – CPT-a

Većina metoda za procjenu koeficijenta propusnosti tla su skupe i dugotrajne, stoga se teži jednostavnim, brzim i ekonomičnim penetracijskim testovima kao što je CPT. Princip izvođenja statičkog penetracijskog pokusa (Cone Penetration Test, CPT) ogleda se u utiskivanju posebne sonde u tlo određenom brzinom, uz konstantno mjerenje otpora utiskivanju na šiljku sonde (q_c), trenja na plaštu sonde (f_s), koje se aktivira prilikom utiskivanja sonde između plašta i okolnog tla te pornog tlaka koji nastaje utiskivanjem sonde u tlo (u_2). U koherentnim tlima se pri utiskivanju sonde pojavljuje dodatni otpor na šiljku zbog stvaranja dodatnog pornog tlaka pa je potrebno izmjeriti otpor na šiljku q_c korigirati (q_t) prema izrazu (8) [14]. U nekoherentnim materijalima uzima se da je $q_t = q_c$.

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \text{ [kPa]} \quad (8)$$

gdje je:

u_2 - izmjereni porni tlak pri utiskivanju sonde (kPa) i

a - koeficijent neto površine šiljka dobiven kalibracijom u laboratoriju, a može biti između 0,70 i 0,85.

Koristeći tri izmjerene veličine za vrijeme utiskivanja sonde u tlo (q_c , f_s i u_2) dugogodišnjim istraživanjima, temeljenim na numeričkoj simulaciji procesa utiskivanja sonde u tlo i usporedbi s rezultatima drugih terenskih i laboratorijskih ispitivanja, uspostavljene su procedure za određivanje profila tla i identifikaciju pojedinih slojeva tla, određivanje fizičkih i mehaničkih karakteristika tla, određivanje parametara tečenja i konsolidacije tla te indikaciju osjetljivosti tla na likvefakciju [15].

Za određivanje koeficijenta propusnosti iz rezultata CPT-a potrebno je izračunati parametre za određivanje identifikaciju tipa tla, normalizirani otpor na šiljku Q_{tn} i koeficijent trenja na plaštu F_r prema [15-17]:

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \left(\frac{p_a}{\sigma_{v0}} \right)^n \quad (9)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdje je:

- q_t - korigirani otpor na šiljku sonde pri utiskivanju u tlo (kPa)
- f_s - trenje izmjereno na plaštu sonde pri utiskivanju sonde u tlo (kPa)
- σ_{v0} - vertikalno totalno naprezanje u tlu (kPa)
- σ'_{v0} - vertikalno efektivno naprezanje u tlu (kPa)
- p_a - atmosferski tlak (100 kPa) i
- n - eksponent naprezanja ovisan o tipu tla i veličini naprezanja [18].

Pomoću normaliziranog otpora na šiljku Q_{tn} i normaliziranog koeficijenta trenja na plaštu F_r izračunava se indeks tipa ponašanja tla I_c :

$$I_c = [(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5} \quad (11)$$

Utvrđeno je da se normalizirani otpor na šiljku Q_{tn} smanjuje dok se normalizirani koeficijent trenja na plaštu F_r povećava s povećanjem udjela sitnih čestica u tlu [3]. Indeks tipa ponašanja tla I_c povećava se s povećanjem udjela sitnih čestica pa se prema tome koeficijent propusnosti k smanjuje [19]. Koeficijent propusnosti k izračunava se ovisno o vrijednosti indeksa tipa ponašanja tla I_c prema:

$$k = 10^{(-0,952 - 3,04I_c)} \text{ [m/s]} \text{ za } 1,00 < I_c < 3,27 \quad (12)$$

$$k = 10^{(-4,52 - 1,37I_c)} \text{ [m/s]} \text{ za } 3,27 < I_c < 4,00 \quad (13)$$

Budući da se prilikom izvođenja statičkog penetracijskog pokusa (CPT) utiskivanjem sonde u tlo dobivaju kontinuirana mjerenja po dubini, prednost je određivanja koeficijenta propusnosti CPT-om mogućnost dobivanja kontinuiranih vrijednosti koeficijenta propusnosti po dubini. Nedostatak takvih ispitivanja je činjenica da se radi o neizravnom određivanju koeficijenta propusnosti pomoću već uspostavljenih korelacija koje se temelje na empirijskim istraživanjima te rezultati nisu nužno prenosivi s lokacije na lokaciju.

3.2 Određivanje koeficijenta propusnosti pokusom disipacije pornog tlaka

Koeficijent propusnosti može se odrediti pokusom disipacije pornog tlaka. Za vrijeme statičkog penetracijskog pokusa CPTU, u koherentnim tlima, dolazi do povećanja pornog tlaka u okolini sonde. Zaustavljanjem penetriranja sonde, doći će do disipacije dodatnog pornog tlaka i izjednačavanjem pornog tlaka s početnim hidrostatičkim tlakom prije početka pokusa. Brzina disipacije je ovisna o koeficijentu konsolidacije tla, koji je

pak izravno ovisan o krutosti i koeficijentu propusnosti tla [16]. S obzirom na to da se radi o horizontalnom tečenju u tlu, dobiva se koeficijent propusnosti u horizontalnom smjeru k_h . Polazeći od teorije jednodimenzionalne konsolidacije, koeficijent propusnosti je definiran:

$$k_h = \frac{c_h \gamma_w}{M_s} \quad (14)$$

gdje je:

c_h - koeficijent konsolidacije tla u horizontalnom smjeru (m^2/s)

M_s - modul stišljivosti tla (kPa) i

γ_w - zapreminska težina vode (kN/m^3).

Koeficijent konsolidacije tla izračunava se pomoću pojednostavljenog izraza koji je predstavio Robertson 1992. godine. Prema njemu, koeficijent konsolidacije tla u horizontalnom smjeru je funkcija ovisna o vremenu 50 % konsolidacije t_{50} [min] očitano u dijagramu promjene pornog tlaka u vremenu dobivenog iz pokusa disipacije pornog tlaka [20].

$$c_h = (1,67 \times 10^{-6}) 10^{(1 - \log t_{50})} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (15)$$

Modul stišljivosti M_s izračunava se pomoću izraza [18]:

$$M_s = \alpha_M (q_t - \sigma_{v0}) \quad [\text{kPa}] \quad (16)$$

gdje je

q_t - otpor izmjeren na šiljku sonde pri utiskivanju u tlo (kPa) i

σ_{v0} - vertikalno totalno naprezanje u tlu (kPa).

Koeficijent α_M ovisi o vrijednosti indeksa tipa ponašanja tla I_c i normaliziranom otporu na šiljku Q_n :

$$\alpha_M = Q_{tn} \quad \text{za } I_c > 2,2, \quad Q_{tn} \leq 14 \quad (17)$$

$$\alpha_M = Q_{tn} \quad \text{za } I_c > 2,2, \quad Q_{tn} > 14 \quad (18)$$

$$\alpha_M = 0,188 \left(10^{(0,55I_c + 1,68)} \right) \quad \text{za } I_c < 2,2 \quad (19)$$

Koeficijent propusnosti tla može se i izravno, približno, izračunati nakon što je određeno vrijeme 50 % konsolidacije t_{50} prema [21]:

$$k_h \approx \left(\frac{1}{251t_{50}} \right)^{1,25} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (20)$$

Prednost određivanja koeficijenta propusnosti pokusom disipacije pornog tlaka je ispitivanje u stvarnim terenskim uvjetima i stanju naprezanja u kojima se tlo na ispitivanoj dubini nalazi. Nedostatak je što se radi o neizravnom ispitivanju za koje je potrebno poznavati krutost tla. Krutost tla, odnosno modul stišljivosti se opet neizravno određuje pomoću rezultata mjerenja statičkog penetracijskog pokusa pomoću postojećih korelacija. Također, pokus može biti vrlo dugotrajan jer disipacija pornog tlaka u koherentnim materijalima može trajati i do nekoliko dana, što je za terenske prilike vrlo otežavajuća činjenica.

4 Zaključak

Zbog prirode samog tla i nepravilnog rasporeda pora u tlu, odnosno nemogućnosti procjene točne duljine puta koji voda prijeđe kroz tlo, potpuno točnu vrijednost koeficijenta propusnosti je nemoguće izračunati. S vremenom su na temelju iskustva i mnogih istraživanja razvijene metode kojima je, idealiziranjem uvjeta u tlu, moguće procijeniti koeficijent propusnosti k . Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, te odabir svake od njih ovisi o dostupnosti uređaja, troškovima, brzini izvođenja i sl. No bez obzira na ograničenja, svaka od obrađenih metoda u radu daje zadovoljavajuće vrijednosti koeficijenta propusnosti tla, čije su vrijednosti u zadovoljavajućem rasponu za potrebe projektiranja u geotehnici.

Literatura

- [1] Jurić Kačunić, 14. Propusnost tla, Geotehnički laboratorij, URL: http://www.grad.unizg.hr/predmet/geolab_a
- [2] Szavits– Nossan, V., Strujanje vode kroz tlo, Mehanika tla i stijena, URL: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/5._Predavanje_MT.pdf
- [3] Marčić, D., Kovačević, M.S., Cvetković, M.: Ispitivanja koeficijenta propusnosti tla na kanalu za navodnjavanje Biđ-Bosutskog polja, *Dani gospodarenja vodama 2013, Napredak kroz znanost*, Zagreb, pp. 171-200, 2013.
- [4] Seelheim, F., *Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens*, Zeitschrift für analytische Chemie, 19, pp 387-402 (in German), 1880.
- [5] Hazen, A., Some physical properties of sands and gravels. *Massachusetts State Board of Health, Annual Report*, pp 539-556, 1892.
- [6] Shepherd, R.G., Correlations of Permeability and Grain Size. *Ground Water*, 27, no. 5, pp 633-638, 1989.
- [7] Kozeny, J., *Über Kapillare Leitung Des Wassers in Boden*. Sitzungsber Akad. Wiss.Wien Math.Naturwiss.Kl., Abt.2a, 136, pp 271-306 (In German), 1927.

- [8] Carman, P. C., *Fluid Flow through Granular Beds*. Trans.Inst.Chem. Eng.,15, 1937.
- [9] Carman, P.C., *Flow of Gases through Porous Media*. Butterworths Scientific Publications, London. 1956.
- [10] Vukovic, M., and Soro, A. 1992. Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. *Water Resources Publications, Littleton, Colorado*.
- [11] Marčić, D., Krstanović, D. and Cvetković, M., Usporedba laboratorijskih i terenskih ispitivanja koeficijenta propusnosti tla na području silosa za šećer u Županji, *Sabor hrvatskih graditelja*, 2012.
- [12] Head, K.H., *Manual of Soil laboratory testing*, vol. 3, Effective stress tests, Chicester: John Wiley and Sons, 1998.
- [13] Aiban,S.A., Znidarčić.D., Evaluation of the flow pump measurements, *Geotechnique* 39, 4, pp 655-666, 1989.
- [14] Robertson, P.K., Cabal, K.L., *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, Gregg Drilling & Testing Inc., 5th Edition, 2012.
- [15] Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M., *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publ., New York, 1997.
- [16] Robertson, P.K., *Soil classification using the cone penetration test*, Canadian Geotechnical Journal, 27(1), pp 151-158, 1990.
- [17] Robertson, P.K., Estimating in-situ soil permeability from CPT and CPTu, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, Vol.2., pp 535-542, 2010.
- [18] Robertson, P.K., *CPT interpretation—a unified approach*, Canadian Geotechnical Journal, 46, pp 1-19, 2009.
- [19] Cetin, K.O., Ozan, N.S., CPT-Based Probabilistic Soil Characterization and Classification, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 135, no.1, pp 84-107, 2009.
- [20] Robertson, P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M., Gillespie, D., Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 29(4), pp 539-550, 1992.
- [21] Parez L., Fauriel R., *Advantages from piezocone application to in-situ tests*, R'évue Française de Géotechnique, 44, pp 13–27 (in French), 1988.