

ZASTOSOWANIE URZĄDZENIA EQUI-PF DO OKREŚLENIA PARAMETRÓW RETENCYJNYCH I HYDRAULICZNYCH GLEBY CIĘŻKIEJ METODĄ ZADANIA ODWROTNEGO

APPLICATION OF EQUI-PF APPARATUS FOR RETENTION AND HYDRAULIC PROPERTIES DETERMINATION OF CLAY SOILS USING INVERSE METHOD

Daniel Szejba, Jan Szatyłowicz, Magdalena Jaczewska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Celem pracy była próba zastosowania danych pomiarowych uzyskanych za pomocą urządzenia Equi-pF do oceny zdolności retencyjnych i hydraulicznych gleby ciężkiej z wykorzystaniem zadania odwrotnego. Badanie wykonano w pracowni Fizyki Ośrodków Porowatych Centrum Wodnego SGGW w Warszawie, wykorzystując urządzenie Equi-pF. Zakresem badań objęto dwie próbki gleb ciężkich pochodzących z obiektu Lidzbark Warmiński. Do oceny zdolności retencyjnych i hydraulicznych badanych gleb na podstawie danych pomiarowych dotyczących odpływu wody z próbek glebowych w funkcji czasu wykorzystano procedurę zadania odwrotnego zawartą w modelu HYDRUS-1D. Przeprowadzone badania wykazały, że dane pomiarowe uzyskane za pomocą urządzenia Equi-pF umożliwiają ocenę właściwości retencyjnych i hydraulicznych gleb za pomocą zadania odwrotnego.

Abstract. The aim of this work was examination of Equi-pF device for determination of retention and hydraulic parameters of clay soils using inverse method. The measurements were performed in Porous Media Physics laboratory, Water Center WULS in Warsaw using Equi-pF device. Heavy clay soil samples were collected from Lidzbark Warmiński experimental site. For determination of retention and hydraulic properties inverse method included in HYDRUS-1D model was applied. Performed research shows that measured by

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Daniel Szejba, dr inż. Jan Szatyłowicz, Katedra Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: daniel_szejba@sggw.pl, jan_szatyłowicz@sggw.pl.

Niniejsze badania zostały przeprowadzone dzięki dofinansowaniu ze środków na naukę w latach 2008–2011 i 2011–2014, w ramach projektów badawczych: N N305 039234 i N N305 171840.

Equi-pF device data concerning water outflow from soil sample as a function of time can be used as input parameters for HYDRUS-1D model, which enables evaluation of soil water retention and hydraulic properties by inverse method.

Słowa kluczowe: właściwości retencyjne i hydrauliczne, Equi-pF, zadanie odwrotne

Key words: retention and hydraulic properties, Equi-pF, inverse solution

WSTĘP

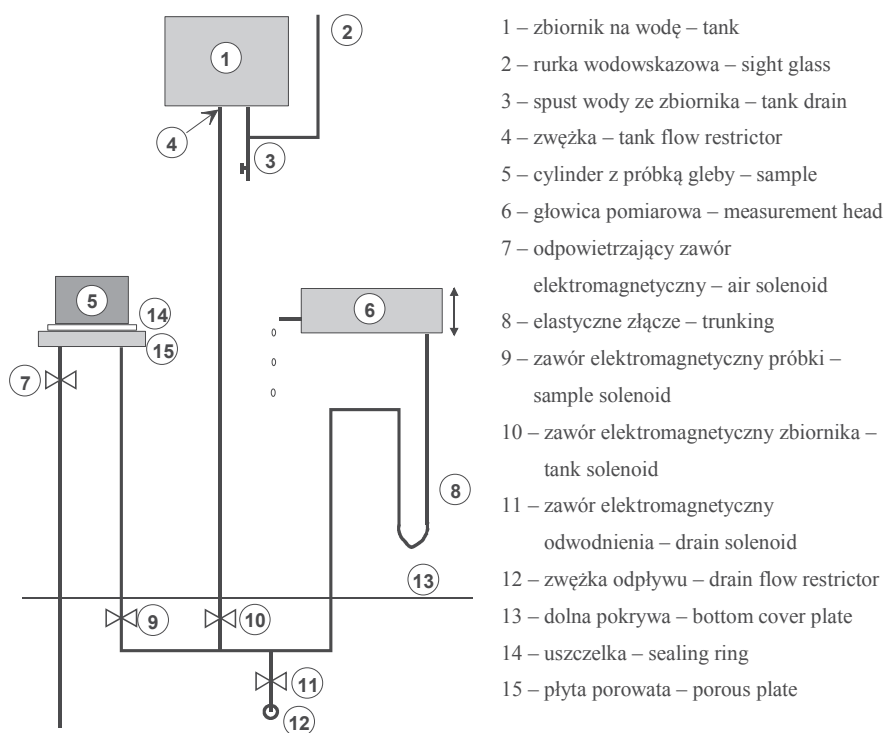
Woda glebowa zaspokaja potrzeby wodne roślin spowodowane głównie procesem transpiracji, a przez to warunkuje ich rozwój. Retencją wodną (pojemnością wodną) gleby nazywana jest jej zdolność do zatrzymywania określonych ilości wody w ściśle określonych warunkach. Rozpatrywać ją należy w powiązaniu z porowatością i średnicami porów glebowych oraz z przyciąganiem cząsteczek wody przez stałą fazę gleby, ponieważ od tych cech zależą takie zjawiska, jak poziomy i pionowy ruch wody w glebie, zdolność gleb do zatrzymywania wody, dostępność wody glebowej dla roślin. Jak podają Olszta i Zawadzki [1991], relacja pomiędzy ciśnieniem ssącym wody glebowej a zawartością wody w glebie stanowi wilgotnościową i retencyjną charakterystykę gleby. Zawartość wody (θ) jest podstawą wielu badań dotyczących bilansu wodnego profilu glebowego, natomiast ciśnienie ssące (h) stanowi ważny element niezbędny do określenia dostępności wody dla roślin. Retencję wodną gleby można przedstawić za pomocą krzywej retencyjności wodnej definiowanej jako zależność pomiędzy ciśnieniem ssącym gleby a jej wilgotnością objętościową. Do oznaczania krzywej retencyjności wodnej w zakresie ciśnień ssących od pF 0 do 2 powszechnie stosuje się metodę bloku pyłowego. Polega ona na wypieraniu wody z próbki gleby umieszczonej na materiale porowatym (w tym przypadku pyłu o ściśle określonych frakcjach) przy podciśnieniu od 1 do 100 cm słupa wody [Zawadzki 1973]. Do pomiaru krzywej pF w zakresie ciśnień ssących od pF 2 do 4,2 stosuje się komory ciśnieniowe [Klute 1986]. Pomiar w komorze ciśnieniowej przebiega podobnie z tym, że wartość podciśnienia zastępowana jest odpowiednią wielkością ciśnienia powietrza, które jest dostarczane do komory. Próbkę gleby umieszcza się w komorze na płycie ceramicznej (membranie), która jest przepuszczalna dla wody, a nieprzepuszczalna dla powietrza. Nad płytą wytwarzane jest nadciśnienie powietrza, podczas gdy pod płytą ceramiczną ciśnienie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Powstający gradient ciśnienia powoduje odpływ wody z próbek gleby związanej siłą mniejszą niż wartość nadciśnienia. Jedną z większych wad tych metod stanowi czasochłonność pomiaru. W zależności od gatunku badanej gleby pomiar dla jednego ciśnienia ssącego może trwać od kilku do kilkunastu dni. Szczególnie czasochłonne są pomiary właściwości retencyjnych i hydraulicznych w glebach ciężkich. Oprócz znajomości krzywej pF, do opisu ruchu wody w glebie istotna jest znajomość właściwości hydraulicznych. Jedną z najważniejszych właściwości jest nienasycona przewodność wodna, która opisuje zdolność ośrodka porowatego do przewodzenia wody w przypadku, gdy niecały przekrój poprzeczny jest nią wypełniony. Nienasycona przewodność wodna jest parametrem dosyć trudnym do określenia z uwagi na konieczność wykorzystania specjalistycznej aparatury, a ponadto jej pomiar okazuje się czasochłonnym. Pomierzone wartości nienasyconej przewodności wodnej przy zastosowaniu różnych metod mogą się różnić nawet w obrębie tego samego typu gleby [Dirksen 1991].

Alternatywą dla bezpośrednich metod pomiaru zdolności retencyjnych i hydraulicznych gleb są metody pomiaru z wykorzystaniem techniki identyfikacji (zadania odwrotnego), umożliwiające stosunkowo szybkie określenie tych charakterystyk w szerokim zakresie ciśnień ssących i uwilgotnienia gleby. Najbardziej rozpowszechnionymi metodami tego typu są metody „one-step” [Kool i in. 1985a, 1985b, Parker i in. 1985, van Dam i in. 1992, Brandyk i in. 1997] oraz „multi-step” [van Dam i in. 1990, 1994]. Należy zaznaczyć, że w celu określenia parametrów retencyjnych i hydraulicznych gleby należy zastosować opis analityczny tych charakterystyk. W metodach „one-step” i „multi-step” odpływ wody z próbki gleby umieszczonej w komorze ciśnieniowej (*Temple cell*) jest wymuszany za pomocą ciśnienia powietrza [Gnatowski 2000, Gnatowski i in. 2010]. Alternatywą „klasycznej” metody „multi-step” wydaje się być urządzenie do automatycznego pomiaru krzywej retencyjności w zakresie ciśnień ssących 0–100 cm o nazwie Equi-pF [Streat Instruments 2007], które umożliwia bardzo precyzyjny pomiar odpływu wody z próbki gleby w czasie przy zadanym podciśnieniu. Celem pracy była próba zastosowania danych pomiarowych uzyskanych za pomocą urządzenia Equi-pF do oceny zdolności retencyjnych i hydraulicznych gleby ciężkiej z wykorzystaniem zadania odwrotnego.

MATERIAŁ I METODYKA

Budowa i zasada działania urządzenia Equi-pF

Urządzenie Equi-pF ma automatyczny system do pomiaru krzywej pF (w zakresie ciśnień ssących od 0 do –100 cm) przy zastosowaniu krokowego zadawania ciśnienia dopływu i odpływu wody do ceramicznej płytki porowatej, na której ustawia się badaną próbkę gleby w cylindrze pomiarowym (rys. 1, fot. 1). Przed przystąpieniem do pomiaru, należy napełnić zbiornik wodą, płytkę ceramiczną doprowadzić do stanu pełnego nasycenia oraz odpowietrzyć urządzenie. Następnie na powierzchni płytki ceramicznej umieszcza się próbkę gleby pobraną do odpowiedniego cylindra. W celu zapewnienia odpowiedniej szczelności pomiędzy cylindrem z glebą a płytą ceramiczną stosuje się gumowy pierścień uszczelniający, który następnie dociska się do blatu za pomocą pierścienia zaciskowego. Urządzenie Equi-pF programuje się przy użyciu specjalistycznego oprogramowania zainstalowanego na komputerze. Pozwala ono na wybór parametrów, które określają zakres oraz przebieg badania. Można zaprogramować do dwunastu kroków pomiarowych dla różnych wartości ciśnień ssących, przy czym dla każdego z nich – niezależny limit czasowy pomiaru. Schemat z przykładowymi informacjami i parametrami dotyczącymi przebiegu badania został przedstawiony na rys. 2. Po zaprogramowaniu urządzenia można przystąpić do badania. Po uruchomieniu urządzenie zainicjuje fazę I oczyszczania – odpowietrzania systemu. Cykl oczyszczania przeprowadza się w sposób kompleksowy w celu pozbycia się powietrza, które znajduje się w systemie pomiarowym urządzenia. Po pomyślnym zakończeniu fazy I urządzenie przechodzi do fazy II, czyli nasycania próbki wodą ze zbiornika. Wraz z zakończeniem procesu odpowietrzania głowica pomiarowa przemieszcza się powyżej próbki w celu nasycenia gleby wodą. Po zakończeniu fazy II urządzenie przechodzi do fazy III, tj. procesów odprowadzenia wody z próbki (krokowego zadawania zaprogramowanych wartości ciśnienia ssącego). Dodatkowo

Rys. 1. Schemat ideowy urządzenia Equi-pF (za: www.streatahead.com)Fig. 1. The scheme of Equi-pF apparatus (after: www.streatahead.com)

Fot. 1. Urządzenie Equi-pF

Photo 1. The Equi-pF apparatus

1	Name: Accusand 60/50 Feb 30	4	Status: Drying									
2	Sample Height: 50 mm	5	Sequence: 1 of 2									
3	Saturation time limit: 60 min	6	Step: 3 of 5									
7	Step (cm)	10	20	30	40	50						
8	T. limit (min)	15	30	45	60	75						

v1.10

1 – nazwa pomiaru – name of experiment run, 2 – wysokość próbki – sample height, 3 – czas nasycania próbki – saturation time limit, 4 – aktualny proces pomiarowy (saturacja, odciek zwilżanie) – status of measurement process (saturating, drying, wetting), 5 – numer procesu pomiarowego, który ma miejsce w danym momencie – measurement process number, which has a place at certain moment, 6 – aktualnie zadawane ciśnienie ssące – actual suction step, 7 – wartości ciśnień ssących zaprogramowanych dla danego pomiaru – suction steps programmed for the experiment, 8 – limity czasowe przypisane poszczególnym wartościom ciśnień ssących – timeout limits for the suction steps.

Rys. 2. Schemat ekranu urządzenia Equi-pF z zaprogramowanymi, przykładowymi parametrami dotyczącymi przebiegu badania

Fig. 2. The scheme of Equi-pF apparatus screen with example parameters related to experiment progress

fazę III można rozszerzyć, programując proces nasycania próbki poprzez krokowy (dla tych samych wartości ciśnień ssących) powrót głowicy pomiarowej, co pozwala na pomiar histerezy krzywej pF. Opcja ta nie jest dalej opisywana, ponieważ nie stanowi ona przedmiotu niniejszego artykułu. Pomiar dla zadanego ciśnienia ssącego kończy się i głowica pomiarowa przemieszcza się na pozycję kolejnego ciśnienia ssącego, jeżeli w ciągu zaprogramowanego limitu czasowego przy danym ciśnieniu ssącym nie wystąpi odpływ wody z próbki (tj. jeżeli przepływ wody przez głowicę pomiarową jest mniejszy od 0,1 ml).

MATERIAŁ BADAWCZY

Badanie wykonano w pracowni Fizyki Ośrodków Porowatych Centrum Wodnego SGGW w Warszawie za pomocą urządzenia Equi-pF. Próbki gleby do badań laboratoryjnych zostały pobrane na obiekcie badawczym zlokalizowanym w obrębie gruntów miasta Lidzbark Warmiński i wsi Koniewo (54°08' N, 20°35' E), w województwie warmińsko-mazurskim. Profil glebowy zbudowany jest z gliny położonej na ile. Do badania właściwości retencyjnych i hydraulicznych pobrano do cylindrów dwie próbki gleby z warstw 5–7 cm (TOP) i 40–45 cm (SUB). Skład granulometryczny warstw profilu glebowego, z których pobrano próbki, przedstawiono w tabeli 1, natomiast podstawowe parametry fizyczne badanych próbek glebowych w tabeli 2. Pomiaru zdolności retencyjnych i hydraulicznych prowadzono tylko w trakcie sekwencji odwadniania zadając siedem kroków wartości ciśnień ssących: –10, –20, –30, –40, –50, –63 i –80 cm, oraz limit czasowy ustalenia stanu równowagi 60 min, a dla ciśnień –63 i –80 cm odpowiednio 90 i 120 min.

Tabela 1. Skład i grupa granulometryczna warstw profilu glebowego

Table 1. The soil texture and soil texture classes of soil layers

Warstwa Layer cm	Skład granulometryczny, % The soil texture, %			Grupa granulometryczna The soil texture classes		
	2–0,05 mm	0,05–0,002 mm	< 0,002 mm	PN-R-4033	PTG 2008	USDA
0–25	38	42	20	glina (g)	glina zwykła (gz)	loam (L)
25–70	11	35	54	ił (i)	ił zwykły (iz)	clay (C)

Tabela 2. Podstawowe parametry fizyczne badanych próbek glebowych

Table 2. Basic physical parameters of examined soil cores

Nazwa próbki Soil core description	Wymiary próbki Sample dimension			Gęstość objętościowa Bulk density g · cm ⁻³	Pełne nasycenie Saturated water content cm ³ · cm ⁻³
	Średnica Diameter cm	Wysokość Height cm	Objętość Volume cm ³		
TOP	10	2,2	172,70	1,383	0,470
SUB	7	4,4	169,25	1,247	0,513

ZADANIE ODWROTNE

Do oceny zdolności retencyjnych i hydraulicznych badanych gleb na podstawie danych pomiarowych uzyskanych za pomocą urządzenia Equi-pF wykorzystano model HYDRUS-1D [Šimůnek i in. 2009] oraz procedurę zadania odwrotnego zawartą w tym modelu. Do analitycznego opisu zdolności retencyjnych i hydraulicznych gleby wykorzystano równanie van Genuchtena–Mualema w następującej formie [van Genuchten 1980, Wösten i van Genuchten 1988]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \cdot h|^n)^m} \quad (1)$$

$$K(h) = K_s \cdot \frac{\left\{ [1 + |\alpha \cdot h|^n]^m - |\alpha \cdot h|^{n-1} \right\}^2}{[1 + \alpha \cdot h^n]^{m(l+2)}} \quad (2)$$

gdzie:

- θ – wilgotność aktualna gleby, cm · cm⁻³,
- θ_s – wilgotność przy stanie pełnego nasycenia, cm · cm⁻³,
- θ_r – wilgotność resztkowa, cm · cm⁻³,
- h – ciśnienie ssące, cm,
- α – parametr kształtu, cm⁻¹,
- $n, m = 1 - 1/n$ – parametry kształtu,
- K_s – przewodność wodna gleby przy stanie pełnego nasycenia, cm · d⁻¹,
- l – parametr kształtu zależny od rozkładów porów glebowych.

Model HYDRUS-1D wykorzystuje równanie Richardsa do opisu przepływu wody w glebie zarówno w strefie nasyconej, jak i nienasyconej. Rozwiązanie równania wymaga określenia warunku początkowego i warunków brzegowych (górnego i dolnego) oraz opisu geometrii próbki. Warunek początkowy został określony jako rozkład ciśnień ssących w rozpatrywanych próbkach glebowych przy stanie równowagi z zadaniem ciśnieniem ssącym na płycie porowatej w momencie rozpoczęcia pomiarów. Górny warunek brzegowy opisano w postaci przepływu przez powierzchnię próbki (założono przepływ równy zero, gdyż nie występowała ewaporacja). Dolny warunek brzegowy odpowiadał ciśnieniu ssącemu na dolnej powierzchni próbki. Do optymalizacji przyjęto za kryterium minimum sumy kwadratów odchyłeń pomiędzy wartościami parametrów, stosując następującą funkcję celu:

$$O(b) = \sum_{i=1}^{N_1} \{w_i [Q_0(t_i) - Q_c(t_i, b)]\}^2 + \sum_{i=1}^{N_2} \{v_i [\Theta_c(h_i) - \Theta_c(b, h_i)]\}^2 \quad (3)$$

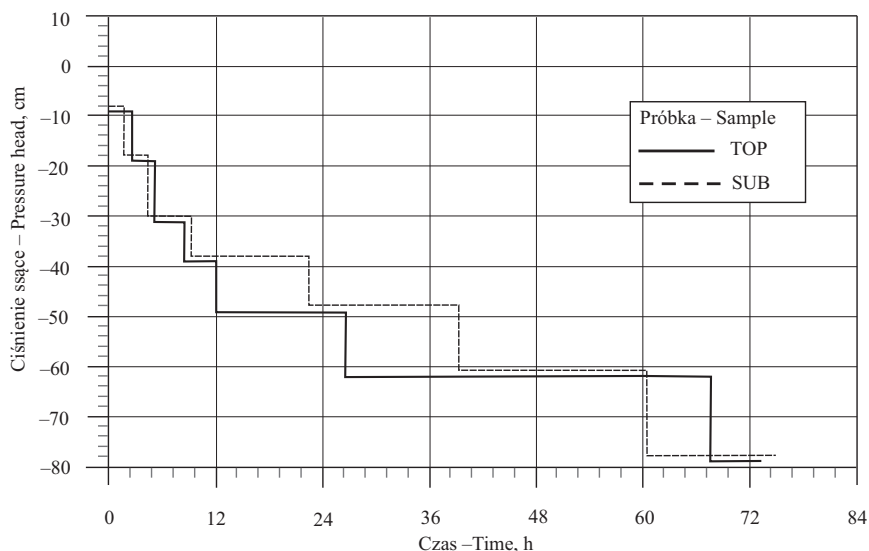
gdzie:

- b – wektor optymalnych wartości parametrów $(\theta_s, \theta_r, \alpha, n, K_s, l)$,
- Q_o, Q_c – pomierzona i obliczona wartość sumarycznego odpływu wody z próbki, cm,
- θ_o, θ_c – pomierzona i obliczona wartość uwilgotnienia gleby, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,
- h – ciśnienie ssące, cm,
- N_1 – liczba pomiarów sumarycznego odpływu,
- N_2 – liczba pomiarów (danych) krzywej retencyjności wodnej,
- w_i, v_i – współczynniki wagowe dla poszczególnych pomiarów odpływu wody z próbki i krzywej retencyjności wodnej.

Wartości wilgotności $\theta(h)$ określono na podstawie pomiarów wykonanych za pomocą urządzenia Equi-pF, zakładając, że przy braku odpływu wody z próbki przy danym ciśnieniu ssącym występuje stan równowagi. Dodatkowo, na podstawie wcześniejszych badań podobnych profili glebowych, przyjęto wartości wilgotności gleb przy ciśnieniu ssącym pF 4,2 [Szejba i in, 2009].

WYNIKI I DYSKUSJA

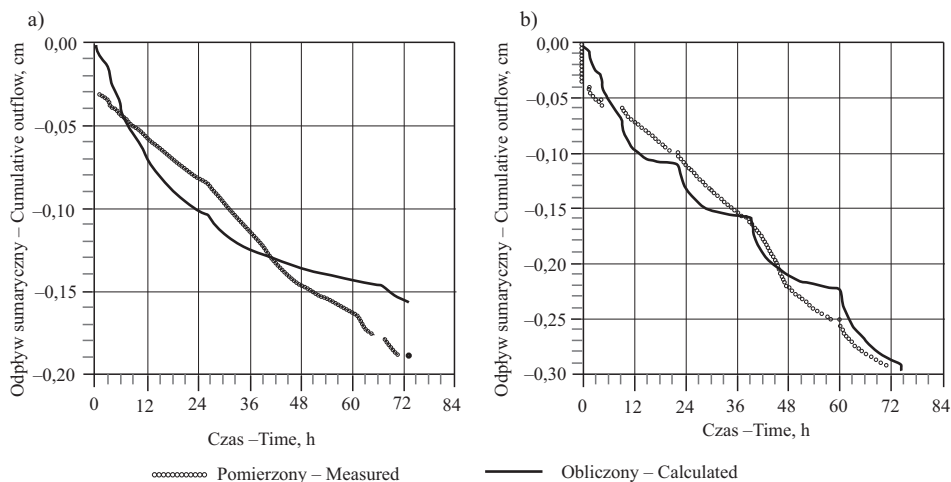
Wykres przedstawiony na rysunku 3 obrazuje dolny warunek brzegowy, czyli zadane wartości ciśnień ssących na dolnej powierzchni próbek względem czasu. Można zaobserwować, że cały cykl pomiarowy (dla siedmiu wcześniej podanych ciśnień ssących) w obydwu przypadkach trwał tylko nieco ponad trzy doby. Optymalizowane wartości parametrów funkcji van Genuchtena i van Genuchtena – Mualema dla badanych próbek glebowych zostały przedstawione w tabeli 3. Wyznaczone wartości parametrów pozwoliły na obliczenie sumarycznego odpływu wody z próbek względem czasu (rys. 4a–b) oraz określenie przebiegu krzywych retencyjności wodnej gleby (rys. 5a) i krzywych przewodnictwa wodnego gleby (rys. 5b).



Rys. 3. Dolny warunek brzegowy
Fig. 3. Bottom boundary condition

Tabela 3. Obliczone parametry funkcji van Genuchtena-Mualem dla badanych próbek glebowych
Table 3. Calculated parameters of van Genuchten-Mualem functions for examined soil cores

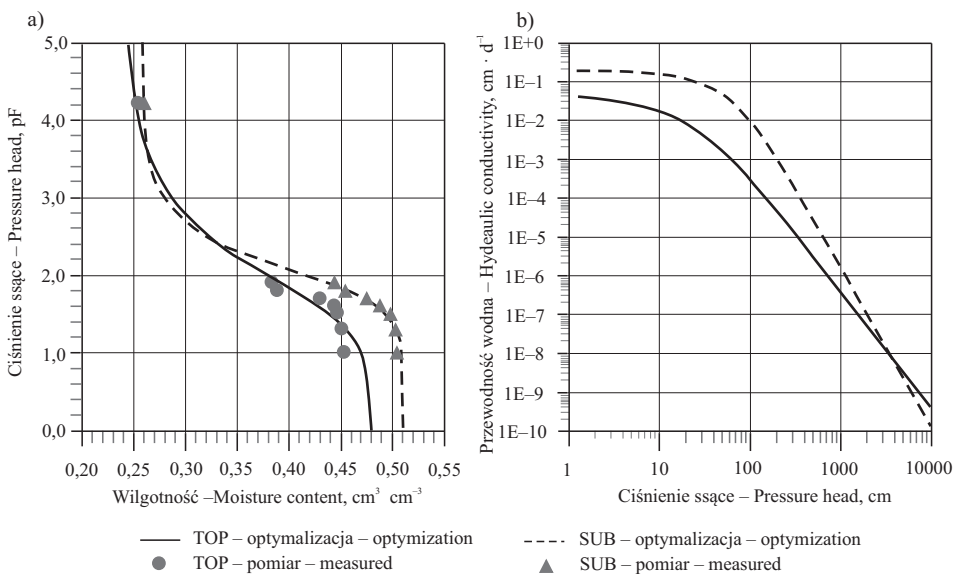
Opis próbki Soil core description	Parametry – Parameters					
	θ_r $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	θ_s $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n	l	K_s $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$
TOP	0,2391	0,4787	0,0256	1,4958	0,0116	0,0619
SUB	0,2580	0,5101	0,0120	2,0000	0,1010	0,1957



Rys. 4. Sumaryczny odpływ wody w funkcji czasu z próbek: TOP (a), SUB (b)
Fig. 4. Cumulative bottom flux as a function of time from soil cores: TOP (a), SUB (b)

Obliczone wartości sumarycznego odpływu wody wykazują dość dobrą zgodność w stosunku do wartości pomierzonych, przy czym lepszą zbieżność wyników można zaobserwować dla próbki SUB (rys. 4b). W przypadku próbki TOP (rys. 4a), w przedziale czasowym od ok. 8,5 do 41 h model przeestymowuje wartości odpływu, natomiast od 41 h do końca pomiaru niedoestymowuje wartości odpływu. Obliczona wartość odpływu sumarycznego dla próbki TOP wynosi 1,6 mm i jest mniejsza o 0,3 mm w stosunku do wartości pomierzonej. W przypadku próbki SUB zarówno obliczona, jak i pomierzona wartość sumarycznego odpływu wynosi 2,9 mm. W obydwu rozpatrywanych przypadkach dla wartości pomierzonych odnotowuje się dynamiczny odpływ wody w początkowym, kilkunastominutowym czasie pomiaru w przeciwieństwie do wartości obliczonych. Świadczyć to może o występowaniu w próbkach makroporów. Natomiast wartości wyznaczone na podstawie rozwiązania zadania odwrotnego uwzględniają przepływ tylko przez macierz glebową, co wynika z przyjętego modelu opisującego krzywą retencyjności i przewodności wodnej gleby.

Na rys. 5a przedstawiono przebiegi krzywych retencyjności wodnej badanych gleb opisane wzorem van Genuchtena (1) wraz z punktami pomiarowymi. Obserwuje się stosunkowo dobre wyrównanie wartości pomierzonych, przy czym znacznie lepszą zgodność uzyskano dla próbki ilu (SUB), co może być spowodowane mniejszą ilością makroporów w tej warstwie w porównaniu z warstwą gliny (TOP). Krzywe retencyjności wodnej gleb różnią się od siebie przebiegiem jedynie w zakresie ciśnień ssących od stanu pełnego nasycenia do ciśnienia ssącego $pF = 2,4$. W tym zakresie gleba ilasta (SUB) charakteryzuje się większymi wartościami wilgotności w porównaniu z glebą gliniastą (TOP), a wilgotność odpowiadająca pełnej pojemności wodnej wynosi odpowiednio dla TOP 47,9%_{obj}, a dla SUB 51,0%_{obj} (tab. 3). Obydwie gleby cechują się znaczną wartością wilgotności resztkowej (θ_r) przekraczającą 23%. Objętość wody dostępnej dla roślin w przedziale ciśnień



Rys. 5. Krzywe retencyjności wodnej (a) oraz krzywe przewodności wodnej gleby (b)
Fig. 5. Soil water retention (a) and soil hydraulic conductivity curves (b)

ssących od pF 2,7 do pF 4,2, [Mocek i in. 2000] w obydwu glebach są do siebie zbliżone i wynoszą odpowiednio 7,2% dla TOP i 6,4% dla SUB. Objętość wody grawitacyjnej (0–2,5 pF) w warstwie iltu jest większa (18,8%) w porównaniu z warstwą gliny (15,5%).

Obydwie badane gleby odznaczają się bardzo małą przewodnością wodną, o czym świadczą wartości przewodności wodnej przy stanie pełnego nasycenia (K_s), które wynoszą odpowiednio $0,62 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ dla warstwy gliny (TOP) i $1,96 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ dla warstwy iltu (SUB) (tab. 3). Określona przewodność wodna iltu w zakresie bezwzględnych wartości ciśnień ssących od 0 do 500 cm jest o jeden rząd wartości większa w porównaniu z przewodnością wodną gliny (rys. 5b). Przy bezwzględnych wartościach ciśnienia ssącego powyżej 3000 cm wartości przewodności wodnej badanych utworów są do siebie zbliżone.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że urządzenie pomiarowe Equi-pF pozwala na uzyskanie bardzo precyzyjnych danych dotyczących charakterystyki retencyjnej gleby ciężkiej w zakresie ciśnień ssących od 0 do $-80 \text{ cm H}_2\text{O}$. Dane pomiarowe dotyczące odpływu wody z próbki glebowej w funkcji czasu mierzone za pomocą urządzenia Equi-pF, mogą być wykorzystane jako parametry wejściowe do modelu HYDRUS-1D, który umożliwia ocenę właściwości retencyjnych i hydraulicznych gleb za pomocą zadania odwrotnego. Należy podkreślić, że czas cyklu pomiarowego w zakresie zadanych siedmiu ciśnień ssących (od -10 do -80 cm) w badanych glebach ciężkich wyniósł nieco ponad 3 doby co oznacza, że procedura pozwala na bardzo szybką ocenę właściwości retencyjnych i hydraulicznych gleb.

PIŚMIENNICTWO

- Brandyk T., Gnatowski T., Szatyłowicz J., 1997. Określanie właściwości hydraulicznych i retencyjnych gleb metodą „one-step”. Roczn. AR Pozn. 294, Melior. Inż. Środ. 19, cz. 1, 93–101.
- Dirksen C., 1991. Unsaturated hydraulic conductivity. [W:] K.A. Smith, C.A. Mullins (red.). Soil analysis, physical methods. Marcel Dekker New York, 209–269.
- Gnatowski T., 2000. Ocena właściwości retencyjnych i hydraulicznych w utworach torfowych i murszowych z obszaru doliny Biebrzy. Maszynopis rozprawy doktorskiej, Katedra Kształtowania Środowiska SGGW Warszawa.
- Gnatowski T., Szatyłowicz J., Brandyk T., Kechavarzi C., 2010. Hydraulic properties of fen peat soils in Poland. Geoderma 154(3–4), 188–195.
- Klute A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. [W:] Method of Soil Analysis. Cz. 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph 9, 635–662.
- Kool J.B., Parker J.C., van Genuchten M.Th., 1985a. ONESTEP: A nonlinear parameter estimation program for evaluating soil hydraulic properties from one-step outflow experiments. Wyd. 3. Bulletin 85. Virginia Agricultural Experiment Station Blacksburg, ss. 44.
- Kool J.B., Parker J.C., Van Genuchten M.Th., 1985b. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation. I. Theory and numerical studies. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49, 1348–1354.
- Olszta W., Zawadzki S., 1991. Właściwości retencyjne gleb, metody ich określania oraz sposoby wykorzystania w melioracji. Materiały Instruktarzowe 94. Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach.

- Mocek A., Drzymała S., Maszner P., 2000. Geneza, analiza i klasyfikacja gleb. Wyd. AR Poznań.
- Parker J.C., Kool J.B., van Genuchten M.Th., 1985. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation. II. Experimental studies. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49, 1354–1359.
- Šimůnek J., Šejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M.Th., 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.
- Streat Instruments, 2007. Equi-pF Operator Instructions – Version E.
- Szejba D., Cymes I., Szatyłowicz J., Szymczyk S., 2009. An impact of drainage system on soil water conditions at Lidzbark Warminski experimental site. Biologia 64(3), 565–569.
- Wösten J.H.M., van Genuchten M.Th., 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. Soil Sci. Soc. Am. J., 52, 1762–1770.
- van Dam J.C., Stricker J.N.M., Droogers P., 1990. From one-step to multi-step. Determination of soil hydraulic functions by outflow experiments. Report 7. Department of Water Resources, Agricultural University Wageningen.
- van Dam J.C., Stricker J.N.M., Droogers P., 1992. Inverse method for determining soil hydraulic functions from one-step outflow experiments. Soil Sci. Am. J. 56, 1042–1050.
- van Dam J.C., Stricker J.N.M., Droogers P., 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multi-step outflow experiments. Soil Sci. Am. J. 58, 647–652.
- van Genuchten M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892–898.
- Zawadzki S., 1973. Laboratoryjne oznaczanie zdolności retencyjnych utworów glebowych. Wiad. Inst. Melior. użyt. Ziel. 11(2), 14–23.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 5.11.2013