

Analiza porównawcza wybranych funkcji pedotransferu do określenia właściwości retencyjnych gruntów na przykładzie utworów pochodzących z obszarów osuwiskowych

Dr inż. Tymoteusz Zydróż – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Dr inż. Tomasz Zaleski – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Rozwój mechaniki gruntów, w tym dziedziny związanej z badaniami właściwości ośrodka nienasyconego, powoduje, że do analiz wielu zagadnień geotechnicznych niezbędna jest znajomość właściwości retencyjnych gruntów, która jeszcze do niedawna była wykorzystywana głównie w gleboznawstwie dla potrzeb rolnictwa. Zależność pomiędzy wilgotnością gruntu a wartością ciśnienia ssania, opisywana często jako krzywa pF, w mechanice gruntów również stanowi często podstawę dla wyznaczenia charakterystyki hydraulicznej gruntów nienasy-

conych, ich właściwości wytrzymałościowych, co w praktyce jest wykorzystywane do modelowania przepływu wody w gruncie czy też zmian warunków stateczności zboczy. Oznaczenie charakterystyki retencyjnej gruntów jest badaniem długotrwałym i w związku z tym dąży się do opracowania metod, które pozwoliłyby ograniczyć lub też pominąć tego rodzaju badania. Wśród metod, które umożliwiają określenie charakterystyki retencyjnej gruntów na podstawie ograniczonej liczby danych należą tzw. metody jednopunktowe [5, 6], gdzie charakterysty-

Tabl. 1. Właściwości fizyczne badanych gruntów

Lp.	Pochodzenie gruntu	Zawartość frakcji				Średnica zastępcza d_{10} [mm]	Wskaźnik różnoziarnistości C_u [-]	Granica płynności w_L [%]	Porowatość ϕ [-]	Gęstość właściwa ρ_s [g cm ⁻³]	Straty prażenia [%]	Nazwa gruntu według PN-EN ISO [11]
		Żwirowa (63 ÷ 2 mm)	Piaskowa (2 ÷ 0,063 mm)	Pyłowa (0,063 ÷ 0,002 mm)	Iłowa (< 0,002 mm)							
1	Targanice, Beskid Mały	24,3	22,8	42,2	10,7	0,0018	222,2	30,2	0,373	2,70	2,50	sagrSi
2	Szymbark, Beskid Niski	0,0	16,8	68,5	14,7	0,0013	10,8	34,7	0,379	2,72	2,81	clSi
3	Owczary, Beskid Niski	0,0	20,1	62,5	17,4	0,0009	23,3	31,9	0,421	2,68	5,17	sacSi
4	Szymbark, Beskid Niski	0,0	29,7	53,5	16,8	0,0009	28,9	33,7	0,456	2,66	3,46	sacSi
5	Podolany, Pogórze Wiśnickie	0,0	14,6	77,4	8,0	0,0022	13,6	26,8	0,365	2,65	1,40	clSi
6	Owczary, Beskid Niski	0,0	30,1	58,1	11,8	0,0013	26,2	27,0	0,425	2,66	2,62	sacSi
7	Szymbark, Beskid Niski	0,0	9,4	65,1	25,5	0,0004	27,5	46,5	0,372	2,78	2,88	siCl
8	Szymbark, Beskid Niski	0,0	24,0	57,3	18,8	0,0007	38,6	42,8	0,416	2,66	3,57	sasiCl
9	Siary, Beskid Niski	0	42,2	48,6	9,2	0,002	35,5	23,0	0,394	2,69	2,61	sacSi
10	Ropica Polska, Beskid Niski	2,4	8,3	60,7	28,5	0,0002	45,0	58,2	0,435	2,75	4,90	siCl
11	Ropica Polska, Beskid Niski	1,6	22,7	51,5	24,2	0,0004	75	40,7	0,411	2,67	4,85	siCl
12	Krynica, Beskid Sądecki	31,5	13,1	37,6	17,8	0,0005	400	44,75	0,334	2,75	2,95	grsiCl
13	Owczary, Beskid Niski	0,0	25,5	66,5	8,0	0,002	10	43,5	0,422	2,66	3,69	sacSi
14	Winiary, Pogórze Wielickie	0,0	23,0	68,5	8,5	0,0021	19,5	21,7	0,340	2,66	2,28	sacSi
15	Debrzeców, Pogórze Wiśnickie	0,0	37,0	50,1	12,9	0,0014	35,7	29,6	0,350	2,66	1,90	sacSi
16	Debrzeców, Pogórze Wiśnickie	0,0	4,4	84,5	11,0	0,0011	27,3	22,4	0,319	2,66	1,72	clSi

kę tę określa się na podstawie znajomości wartości wilgotności określonej przy jednej wartości ciśnienia ssania oraz podstawowych właściwości fizycznych badanego gruntu. Do innej grupy metod określenia właściwości retencyjnych gruntów należą tzw. funkcje pedotransferu [1, 8, 10, 13, 14, 16], gdzie właściwości retencyjne gruntów określa się na podstawie znajomości parametrów fizycznych gruntów. Wśród tych metod można wyróżnić modele, które oparte są na statystycznych zależnościach pomiędzy właściwościami fizycznymi przebadanych dużych grup populacji gruntów a zmierzonymi wartościami ciśnienia ssania. Część funkcji pedotransferu umożliwia określenie wartości wilgotności objętościowej gruntu dla pewnych charakterystycznych wartości ciśnienia ssania, a część z nich daje opis charakterystyki retencyjnej gruntów w postaci wartości parametrów równań np. funkcji van Genuchtena [15]. Inną grupę metod stanowią funkcje oparte częściowo na modelu fizycznym ośrodka gruntowego (rozkład jego uziarnienia), które nazywane są pośrednimi funkcjami pedotransferu [8] czy też modelami fizyczno-empirycznymi [1].

W pracy porównano i określono przydatności wybranych funkcji pedotransferu do opisu właściwości retencyjnych gruntów.

BADANIA LABORATORYJNE GRUNTÓW

W tabl. 1 zestawiono podstawowe właściwości geotechniczne badanych gruntów. Utwory te pochodziły z obszaru karpacciego i w większości przypadków pobrane były z nisz płytkich osuwisk. Skład granulometryczny badanych gruntów określono

na podstawie analizy sitowej i areometrycznej. Granice plastyczności określano metodą wałeczowania, a granice płynności według metody Cassagrande'a. Oznaczenie gęstości właściwej gruntów wykonano w kolbie piknometrycznej. Z kolei porowatość gruntu określono na podstawie znajomości gęstości właściwej oraz gęstości objętościowej szkieletu próbek gruntu uformowanych w pierścieniu tnącym.

Pod względem geotechnicznym [11] w większości przypadków analizowane grunty odpowiadały pyłom ilasto-piaszczystym, a tylko w trzech przypadkach były to utwory ilaste. Ponadto dwa spośród badanych gruntów zawierały znaczącą ilość frakcji żwirowej (grunt nr 1 i 12).

Badania przeprowadzono na próbkach gruntów zagęszczonych i pobranych do pierścieni tnących o objętości 50 cm³. Krzywe wodnej retencyjności gruntów – krzywe pF – wyznaczono metodą płyt porowatych w komorach ciśnieniowych w zakresie potencjałów pF od 1 do 4,2 (1 ÷ 15484 cm) na drodze osuszania, w aparaturze wyprodukowanej przez Eijkelkamp. Przy każdej wartości ciśnienia badanie prowadzono do momentu stabilizacji masy próbek, którą następnie przeliczano na wilgotność objętościową. Otrzymane wartości wilgotności objętościowej przy zadanych wartościach ciśnienia ssania zestawiono w tabl. 2. Na podstawie otrzymanych wyników określono wartości parametrów równania van Genuchtena, wykorzystując program RETC, przy czym jako reprezentatywną wartość wilgotności objętościowej przy pełnym nasyceniu przyjęto wilgotność przy ciśnieniu ssania równym 1 cm. Z kolei wartość rezydualnej wilgotności objętościowej określono następującą formułą Brooks-Coreya podaną w pracy [12]. We wzorze (1) zachowano oryginalne oznaczenia autorów.

Tabl. 2. Właściwości retencyjne badanych gruntów

Lp.	Wilgotność objętościowa przy wartości ciśnienia ssania [cm słupa wody]						Parametry van Genuchtena			
	1	19,5	100	501,9	1000	15848	α [cm ⁻¹]	n [-]	m [-]	R^2
1	0,346	0,344	0,342	0,327	0,326	0,257	0,00122	1,118	0,106	0,992
2	0,362	0,332	0,323	0,305	0,304	0,255	0,17702	1,049	0,047	0,954
3	0,390	0,369	0,367	0,357	0,347	0,215	0,00126	1,255	0,203	0,960
4	0,454	0,424	0,415	0,399	0,393	0,171	0,00105	1,456	0,313	0,949
5	0,366	0,343	0,334	0,312	0,305	0,211	0,00700	1,126	0,112	0,942
6	0,423	0,410	0,391	0,386	0,357	0,344	0,11581	1,033	0,032	0,943
7	0,388	0,387	0,386	0,369	0,368	0,264	0,00070	1,208	0,172	0,994
8	0,438	0,410	0,350	0,313	0,308	0,173	0,02557	1,178	0,151	0,952
9	0,388	0,338	0,311	0,294	0,291	0,195	0,13334	1,091	0,083	0,924
10	0,427	0,421	0,419	0,408	0,406	0,203	0,00041	1,564	0,361	0,995
11	0,400	0,394	0,391	0,380	0,378	0,247	0,00058	1,290	0,225	0,991
12	0,330	0,316	0,314	0,306	0,300	0,247	0,00517	1,082	0,076	0,930
13	0,420	0,399	0,391	0,368	0,358	0,240	0,00330	1,157	0,136	0,959
14	0,327	0,311	0,310	0,292	0,245	0,173	0,01000	1,200	0,167	0,968
15	0,349	0,287	0,256	0,236	0,218	0,183	0,49342	1,096	0,088	0,991
16	0,325	0,315	0,299	0,287	0,250	0,193	0,00797	1,127	0,113	0,973

$$\begin{aligned}\theta_r = & -0,0182482 + 0,00087269 \cdot Sa + \\ & + 0,00513488 \cdot Cl + 0,02939286 \cdot \phi - \\ & - 0,00015395 \cdot Cl^2 - 0,0010827 \cdot Sa \cdot \phi - \\ & - 0,00018233 \cdot Cl^2 \cdot \phi^2 + 0,00030703 \cdot Cl^2 \cdot \phi - \\ & - 0,0023584 \cdot \phi^2 \cdot Cl\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie:

ϕ – porowatość,

Sa – zawartość frakcji piaskowej,

Cl – zawartość frakcji ilowej.

FUNKCJE PEDOTRANSFERU

Do określenia właściwości retencyjnych analizowanych gruntów wykorzystano następujące funkcje pedotransferu:

- 1) model Arya-Paris [1],
- 2) zmodyfikowany model Kovaca [3],
- 3) model Vereeckena i in. [16],
- 4) model Minasny'ego i in. [10].

Dwa pierwsze modele pozwalają określić charakterystykę retencyjną gruntów w postaci zależności „wilgotność objętościowa-ciśnienie ssania” i uwzględniają związek pomiędzy uziarnieniem gruntu a wielkością porów i ich potencjalną kapilarnością. W modelu Arya-Paris [1] przyjmuje się, że kształt krzywej retencyjnej gruntu jest odzwierciedleniem krzywej uziarnienia. W metodzie tej krzywą granulometryczną gruntów dzieli się na przedziały obliczeniowe ($i = 1, \dots, n$), zakładając, że ziarna z danego przedziału są jednorodne pod względem kształtu oraz że gęstość objętościowa szkieletu dla każdego przedziału ziaren jest taka sama. Dla każdego przedziału ziaren wilgotność objętościowa określana jest równaniem:

$$\theta_i = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \cdot \sum_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

gdzie:

ρ_s – gęstość właściwa gruntu [g/cm^3],

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu [g/cm^3],

W_i – zawartość ziaren danego przedziału ziarnowego w odniesieniu do zawartości ziaren w całej masie gruntu [–].

Z kolei wielkość ciśnienia ssącego dla odpowiedniego przedziału obliczeniowego jest określana z formuły:

$$\psi_i = \frac{2 \cdot T \cdot \cos \omega}{\rho_w \cdot g \cdot r_i} \quad (3)$$

gdzie:

T – napięcie powierzchniowe wody, w temperaturze 10°C wynosi $0,07422 \text{ N/m}$,

ω – kąt kontaktu zwilżania wody, przyjmowany jako równy 0° ,

ρ_w – gęstość właściwa wody,

g – przyspieszenie ziemskie,

r_i – średnica porów.

Średnica porów zależna jest m.in. od wielkości ziarna danego przedziału uziarnienia R_i i ich liczby n_i w masie gruntowej:

$$r_i = R_i \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot e \cdot p_i^{(1-\alpha_{AP})}}{6}} \quad (4)$$

gdzie:

e – wskaźnik porowatości gruntu,

α_{AP} – parametr empiryczny, zależnie od rodzaju gruntu wynosi $1,16$ – $1,459$ [2]; najczęściej przyjmowany jako równy $1,38$.

Liczbę ziaren p_i można obliczyć ze wzoru:

$$p_i = \frac{3 \cdot W_i}{4 \cdot \pi \cdot R_i^3 \cdot \rho_s} \quad (5)$$

Model Aubertina i in. [3] stanowi rozwinięcie modelu Kovaca [8] i w porównaniu do pierwowzoru definiuje wszystkie parametry wejściowe modelu oraz umożliwia zastosowanie go do każdego rodzaju gruntu. W modelu tym podstawowy parametr stanowi ekwiwalent wzniosu kapilarnego, który dla gruntów ziarnistych określa się następująco:

$$h_{co,G} = \frac{b}{e \cdot d_{10}} \quad (6)$$

gdzie:

d_{10} – średnica zastępcza,

$$b = \frac{0,75}{1,17 \cdot \log(C_u) + 1} \quad (7)$$

C_u – wskaźnik różnoziarnistości.

W przypadku gruntów spoistych, utworów charakteryzujących się według autorów metody wartością granicy płynności ponad $30 \div 40\%$, wartość równoważnika wzniosu kapilarnego obliczać można według następującej formuły:

$$h_{co,P} = \frac{0,15 \cdot \rho_s}{e} \cdot w_L^{1,45} \quad (8)$$

gdzie:

ρ_s – gęstość właściwa,

w_L – granica płynności.

Równoważnik wzniosu kapilarnego jest używany do określenia zależności pomiędzy stopniem wilgotności a wartością ciśnienia ssania. W modelu Kovaca wartość nasycenia porów gruntowych jest pochodną od działania sił kapilarnych oraz sił adhezji, co wyrażono następującą formułą:

$$S_r = S_c + S_a^* \cdot (1 - S_c) \quad (9)$$

gdzie:

S_r – stopień wilgotności gruntu,

S_c – komponent związany jest z działaniem sił kapilarnych, a S_a dotyczy zjawiska adhezji.

$$S_a^* = 1 - \langle 1 - S_a \rangle \quad (10)$$

gdzie $\langle \rangle$ reprezentuje nawiasy Macauleya: $\langle y \rangle = 0,5 \cdot (y + |y|)$, co oznacza, że dla wartości $S_a > 1$ wartość $S_a^* = 1$, a w przypadku gdy $S_a < 1$ wartość $S_a^* = S_a$.

Wpływ sił kapilarnych i adhezji ujęto za pomocą następujących równań:

$$S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 + 1 \right]^{m_1} \cdot \exp \left[-m_1 \cdot \left(\frac{h_{co}}{\psi} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$S_a = a_c \cdot c_\psi \cdot \frac{(h_{co} / \psi_n)^{2/3}}{e^{1/3} \cdot (\psi / \psi_n)^{1/6}} \quad (12)$$

gdzie:

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi / \psi_r)}{\ln(1 + \psi_0 / \psi_r)} \quad (13)$$

m_1 – parametr określający rozkład porów gruntowych, według Aubertina i in. [3] dla gruntów ziarnistych stanowi odwrotność wskaźnika różnoziarnistości, a dla gruntów spoistych przyjmowany jest jako wartość stała $3 \cdot 10^{-5}$,

a_c – współczynnik adhezji, dla gruntów niespoistych według propozycji Aubertina i in. [3] równy $0,01$, a dla gruntów spoistych $7 \cdot 10^{-4}$,

ψ_n – parametr normalizujący jednostki,

ψ_0 – ciśnienie ssania gruntu absolutnie suchego, $\psi_0 = 10^7 \text{ cm}$ słupa wody,

ψ_r – ciśnienie ssania przy resztkowej wilgotności gruntu.

Z kolei funkcje pedotransferu wymienione w pkt. 3-4 zostały opracowane przez gleboznawców i służą głównie do określenia parametrów równania van Genuchtena [15]:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (a \cdot \psi)^n\right]^m} \quad (14)$$

θ – wilgotność objętościowa gruntu [-],
 θ_s – wilgotność objętościowa gruntu przy pełnym nasyceniu porów gruntowych [-],
 θ_r – rezydualna wilgotność objętościowa gruntu [-],
 ψ – ciśnienie ssania wyrażone w cm słupa wody [cm],
 α, n, m – stałe równania ($m = 1 - 1/n$), parametr α może być wyrażany w cm^{-1} .

W metodzie Vereecken'a i in. [16], opisanej w pracy Wagne-
 ra i in. [17], parametry równania van Genuchtena oblicza się na
 podstawie następujących wzorów:

$$\theta_r = 0,015 + 0,005 \cdot Cl + 0,014 \cdot OM \quad (15)$$

$$\theta_s = 0,81 - 0,283 \cdot \rho_d + 0,001 \cdot Cl \quad (16)$$

$$\ln(\alpha) = -2,486 + 0,025 \cdot Sa - 0,351 \cdot OM - 2,617 \cdot \rho_d - 0,023 \cdot Cl \quad (17)$$

$$\ln(n) = 0,053 - 0,009 \cdot Sa - 0,013 \cdot Cl + 0,00015 \cdot Sa^2 \quad (18)$$

$$m = 1 \quad (19)$$

gdzie:

OM – zawartość części organicznych.

Z kolei Minasny i in. [10] zaproponowali kilka równań na
 określenie wartości parametrów równania van Genuchtena, przy
 czym z punktu widzenia geotechniki najbardziej praktyczna wy-
 daje się następująca propozycja:

$$\theta_r = -0,00733 + 0,00427 \cdot Cl + 0,00267 \cdot f_{0,002-0,02} \quad (20)$$

$$\theta_s = 0,0011 \cdot Cl + 0,82607 \cdot \phi \quad (21)$$

$$\alpha = 0,1561 + 1,7046 \cdot d_g \quad (22)$$

$$n = 1,3978 + 0,0027 \cdot \sigma_g \quad (23)$$

oraz

$$\alpha = 0,1361 + 1,6929 \cdot d_g \quad (24)$$

$$n = 1,4062 - 0,005 \cdot \sigma_g \quad (25)$$

gdzie:

$$d_g = \exp\left(0,01 \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot \ln M_i\right) \quad (26)$$

$$\sigma_g = \exp\left(\sqrt{0,01 \cdot \sum_{i=1}^n f_i \ln^2(M_i) - a^2}\right) \quad (27)$$

n – numer frakcji gruntowej,

f_i – zawartość procentowa frakcji o średnicy równej lub mniejszej od M_i .

Do oceny dokładności analizowanych funkcji pedotransferu
 określano średnie odchylenie wartości obliczonej θ_m od pomie-
 rzanej wartości wilgotności objętościowej θ_b , wykorzystując
 następujący wzór:

$$RMSD = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\theta_b - \theta_m)^2 \right]^{1/2} \quad (28)$$

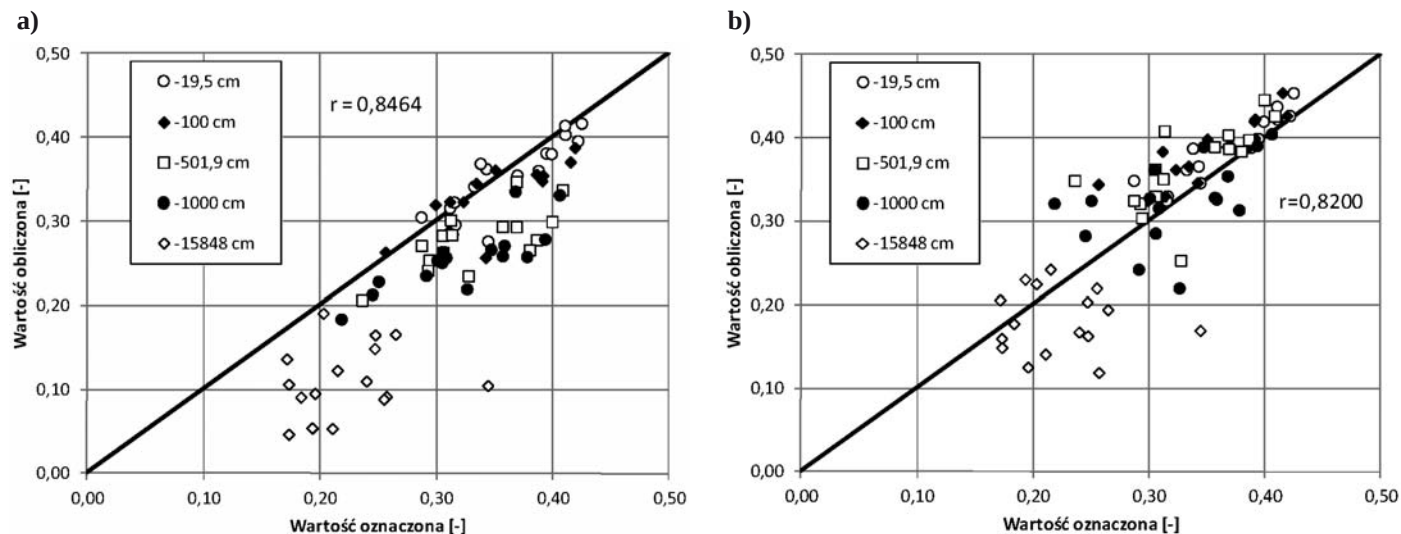
gdzie:

N – liczba próbek.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W tabl. 2 zestawiono wyniki badań oraz opracowane na
 ich podstawie wartości parametrów równania van Genuchtena.
 Wartości parametru α mieściły się w szerokim zakresie i wy-
 niosły od 0,00041 do 0,49 cm^{-1} , przy czym najmniejszą war-
 tość tego parametru uzyskano dla gruntu nr 10, a największą dla
 gruntu nr 15. W przypadku gruntów nr 7, 10 i 11 wartości tego
 parametru są typowe dla utworów ilastych [9], a dla większości
 pozostałych gruntów (poza gruntami nr 2, 6, 8, 9 i 13) wartości
 parametru α odpowiadają gruntom pylastym. Z kolei wartości
 parametru n zawierały się w stosunkowo niewielkim zakresie
 (1,06 ÷ 1,54), który według danych podanych w pracy Lu i Grif-
 fiths [9] odpowiada gruntom ilastym.

Na rys. 1 porównano wyniki oznaczeń oraz obliczeń wil-
 gotności objętościowej z użyciem modelu Arya-Paris [1] oraz



Rys. 1. Porównanie pomierzonych oraz wyznaczonych wartości wilgotności objętościowej za pomocą modelu Arya-Paris [1] (a) oraz Aubertina i in. [3] (b)

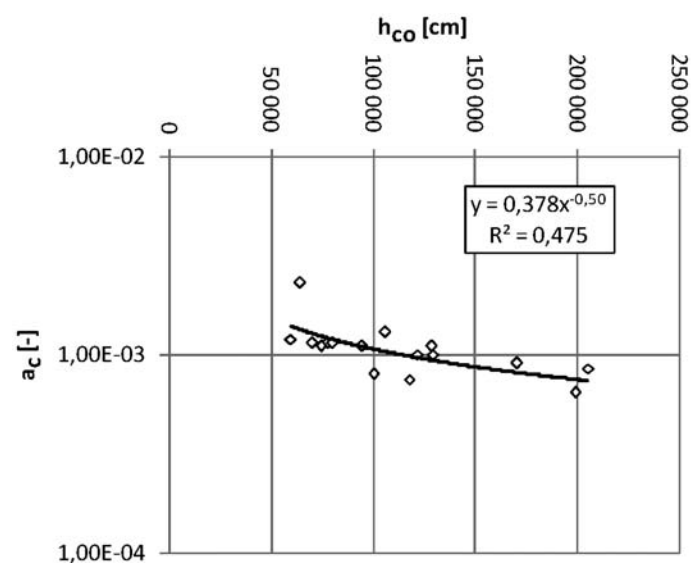
Aubertina i in. [3]. W przypadku modelu Aubertina, określając charakterystykę retencyjną gruntów, przyjęto podział gruntów na ziarniste i spoiste, gdzie kryterium podziału stanowi wartość granicy płynności równa 40%. Z otrzymanych wyników porównań obu modeli wynika, że nieco lepsze dopasowanie wyników obliczeń do rezultatów badań w całym zakresie stosowanych wartości ciśnienia ssania otrzymano stosując model Arya-Paris, gdzie współczynnik korelacji wyniósł 0,85. Należy jednak zwrócić uwagę, że im większa wartość ciśnienia ssania, tym większa była rozbieżność pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń. Wartości wilgotności objętościowej oszacowane modelem Arya-Paris są z reguły zaniżone w stosunku do wyników pomiarów. Podobną zależność przedstawiono również w pracy Huanga i in. [7]. Z kolei, w przypadku modelu Aubertina szacowane wartości wilgotności objętościowej są w dużej części zawyżone w stosunku do wartości określonych z badań. Biorąc jednak pod uwagę niski zakres wartości ciśnienia ssania (do 500 cm), stosowany np. przy modelowaniu stateczności zboczy, model Aubertina (współczynnik korelacji $r = 0,78 \div 0,85$) wykazał nieco lepsze dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych niż model Arya-Paris (współczynniki korelacji $0,74 \div 0,81$).

W przypadku obu modeli stopień dokładności dopasowania modelu do wartości wyników pomiarów zależy w znaczącym stopniu od wartości współczynników dopasowania. W modelu Arya-Paris parametrem tym jest współczynnik α_{Ap} , który najczęściej jest przyjmowany jako równy 1,38, ale jak pokazują wyniki analiz m.in. pracy Basile i D'Urso [4] parametr ten powinien być uzależniany od wielkości ciśnienia ssania. Z kolei w modelu Aubertina parametrami dopasowania modelu są współczynniki m_1 oraz a_c . Stąd też dalsze prace autorów miały na celu dopasowanie współczynników m_1 oraz a_c tak, aby odchylenie obliczonych i zmierzonych wilgotności objętościowych (wzór 23) było jak najmniejsze. Rezultaty tych prac przedstawiono na rys. 2 i wskazują one na wysoką zgodność pomierzonych oraz obliczonych wartości wilgotności objętościowej. W dalszej części pracy poszukiwano zależności pomiędzy wartościami przyjętymi współczynników m_1 i a_c . W przypadku współczynnika

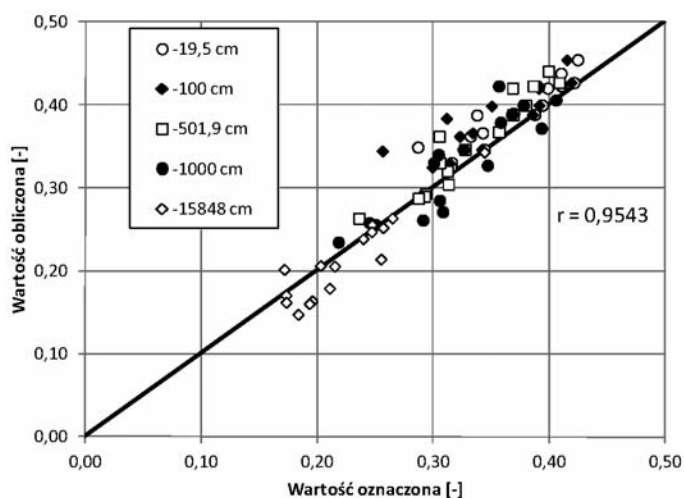
adhezji a_c stwierdzono, że jest on wyraźnie zależny od wartości ekwiwalentu wzniosu kapilarnego określonego wzorem (7) (rys. 3). Współczynnik korelacji pomiędzy tymi parametrami wyniósł 0,68, a równanie regresji miało postać:

$$a_c = 0,378 \cdot h_{co}^{-0,50} \quad (29)$$

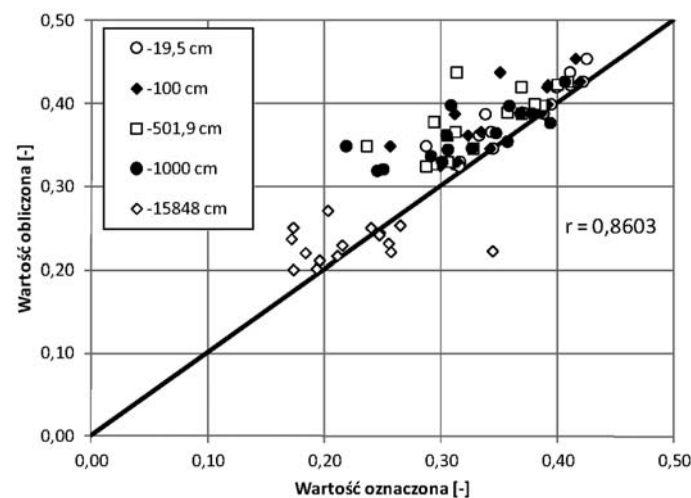
Z kolei nie stwierdzono istotnej zależności pomiędzy współczynnikiem m_1 a parametrami fizycznymi badanych gruntów. Do dalszej analizy autorzy przyjęli wartość tego parametru równą $1 \cdot 10^{-7}$. Wartość ta była o ponad dwa rzędy wielkości mniejsza od podanej w pracy Aubertina, ale w przypadku analizowanych gruntów umożliwiała uzyskanie lepsze dopasowania wyników z modelu do danych pomiarowych w stosunku do propozycji Aubertina. Korzystając ze wzoru (26), określono ponownie wartości wilgotności objętościowej i porównano z wynikami pomiarów (rys. 4). Stwierdzono, że dopasowanie wyników pomiarów z obliczeniami wartości wilgotności objętościowej jest nieco lepsze w porównaniu do pierwotnej propozycji Aubertina



Rys. 3. Zależność współczynnika a_c od ekwiwalentu wzniosu kapilarnego h_{co}



Rys. 2. Porównanie pomierzonych oraz wyznaczonych modelem Aubertina i in [3] wartości wilgotności objętościowej z dopasowaniem parametrów modelu a_c i m



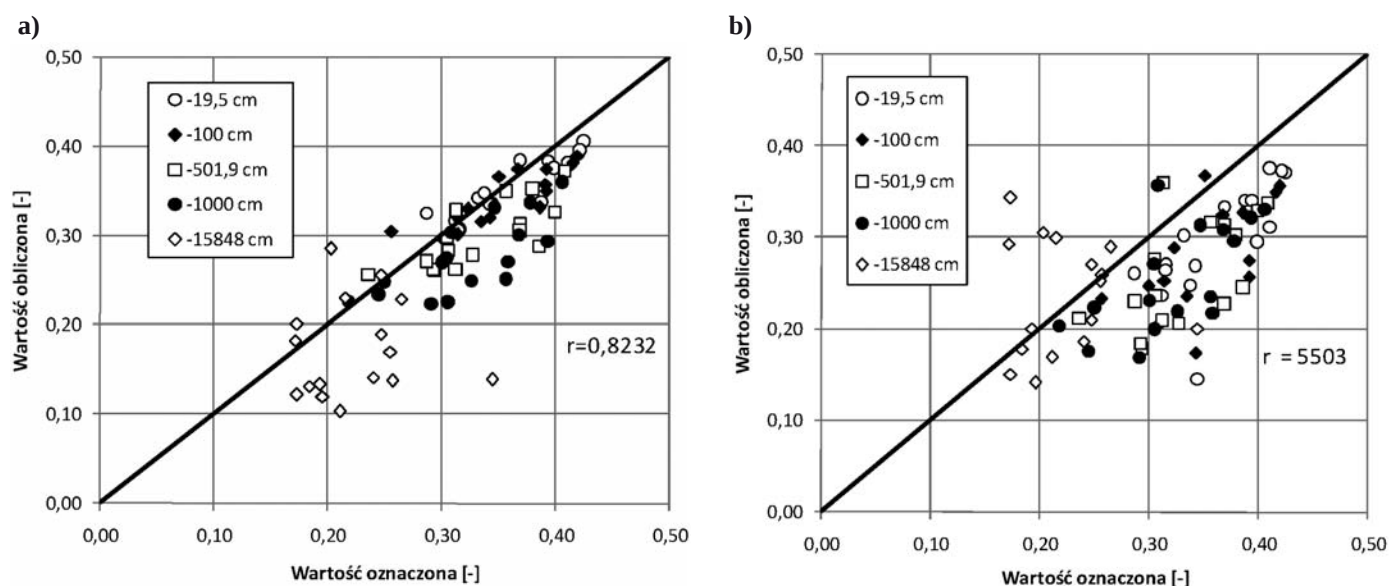
Rys. 4. Porównanie pomierzonych oraz wyznaczonych modelem Aubertina i in [3] wartości wilgotności objętościowej z dopasowaniem a_c i m według propozycji autorów

i in. [3] (por. rys 1b), zwłaszcza w przypadku wyników uzyskanych przy wysokich wartościach ciśnienia ssania.

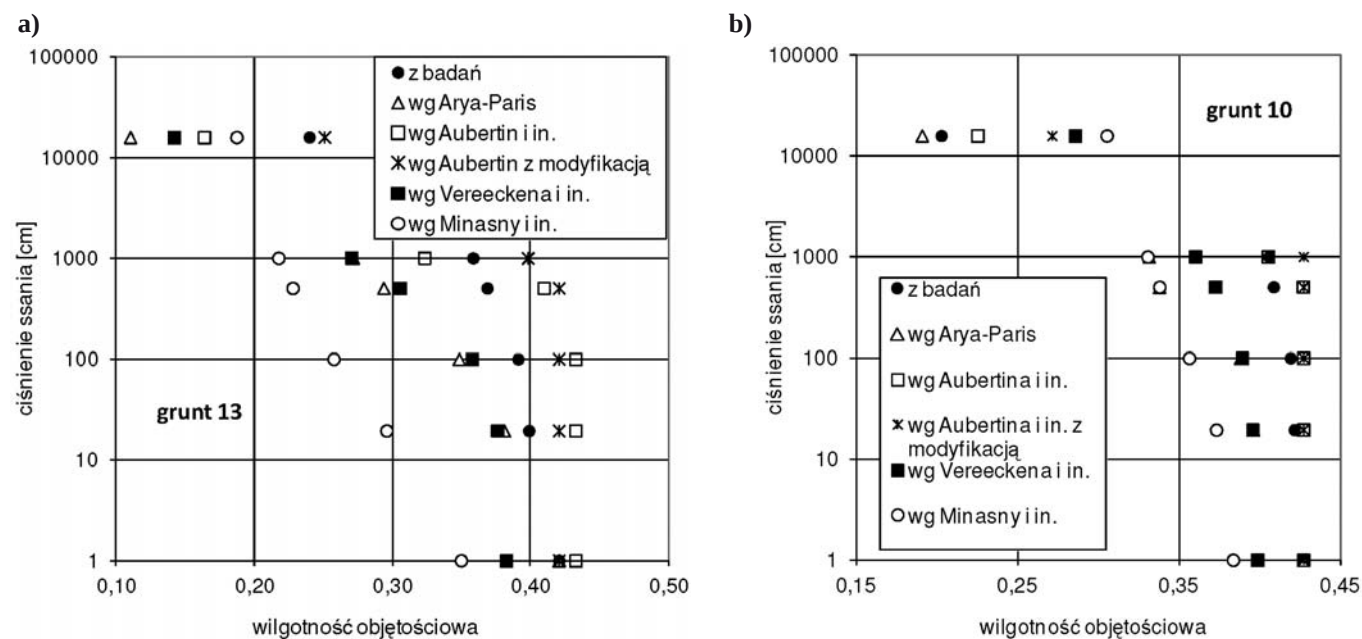
Wśród kolejnych modeli porównywanych w pracy była propozycja Vereeckena i in. [16] opisana równaniami 15 ÷ 19, które umożliwiają określenie wartości parametrów równania van Genuchtena [15]. Wyniki obliczeń wykazały stosunkowo dobre dopasowanie modelu do wyników pomiarów, przy czym obliczone wartości wilgotności objętościowej, podobnie jak w przypadku modelu Arya-Paris, były z reguły zaniżone w stosunku do odpowiednich wartości tego parametru określonych z badań. Należy zwrócić uwagę, że stopień dopasowania obliczonych metodą Vereeckena i in. oraz pomierzonych wartości wilgotności objętościowej, wyrażony wartością współczynnika korelacji, był podobny jak w przypadku obliczeń za pomocą modeli Arya-Paris i Aubertina i in. [1, 3].

W kolejnym etapie pracy do określenia parametrów równania van Genuchtena zastosowano równania zaproponowane w pracy Minasny'ego i in. [10]. Parametry równania wykorzystano do określenia wartości wilgotności objętościowej badanych gruntów i porównano z wynikami badań w komorze ciśnieniowej (rys. 5b). Stwierdzono, że model Minasny'ego daje znacząco gorsze dopasowanie rezultatów obliczeń (współczynniki korelacji 0,55) do danych pomiarowych w stosunku do wyników obliczeń uzyskanych z wykorzystaniem modeli Arya-Paris, zespołu Aubertina czy też Vereeckena.

Na rys. 6 przedstawiono porównawczo wyniki obliczeń wartości wilgotności objętościowej uzyskane na podstawie analizowanych funkcji pedotransferu dla dwóch przykładowych gruntów reprezentujących według kryterium Aubertina i in. [3] utwory ziarniste (rys. 6a) oraz spoiste (rys. 6b). Porównując



Rys. 5. Porównanie pomierzonych oraz wyznaczonych wartości wilgotności objętościowej za pomocą metody Vereeckena i in. [16] (a) oraz Minasny'ego i in. [10] (b)



Rys. 6. Zależność wilgotności objętościowej od ciśnienia ssania według wybranych metod

otrzymane zależności pomiędzy wilgotnością objętościową a ciśnieniem ssania dla gruntu nr 13, można stwierdzić, że najlepsze dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych uzyskano stosując model Aubertina z doбором parametrów równania a_c i m według propozycji autorów, gdzie średnie odchylenie rezultatów wilgotności objętościowej od wartości pomierzonych wyniosło 0,034. Nieco gorsze wyniki dopasowania otrzymano stosując model Aubertina według założeń jego autorów (średnie odchylenie standardowe wyniosło 0,042), a najmniej dokładne dopasowanie uzyskano stosując model Minasny'ego (średnie odchylenie standardowe 0,12). Z kolei w przypadku utworu spoistego (grunt nr 10) najlepsze dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych uzyskano stosując model Aubertina (średnie odchylenie standardowe 0,014), a nieco gorsze dla modelu Aubertina z modyfikacją (średnie odchylenie standardowe 0,033). Analizując wyniki obliczeń dla obu przykładowych gruntów można również zauważyć, że charakterystyka wilgotność objętościowa – ciśnienie ssania, określona modelem Aubertina, ma w początkowym zakresie ciśnienia pionowy przebieg, a następnie zaznacza się wyraźny punkt przegięcia krzywej (wartość ciśnienia wejścia powietrza – AEV). Nieco trudniej interpretowalny jest ten punkt w przypadku pozostałych modeli.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki porównań oznaczeń właściwości retencyjnych kilkunastu próbek gruntów pochodzących z obszaru karpackiego z wynikami obliczeń z wykorzystaniem wybranych funkcji pedotransferu opartych na znajomości podstawowych właściwości fizycznych gruntów. Na podstawie uzyskanych wyników analiz można stwierdzić, że funkcje pedotransferu oparte na zależnościach statystycznych pomiędzy właściwościami gruntów a ich właściwościami retencyjnymi w przypadku analizowanych gruntów nie potwierdziły w pełni swej przydatności. Wartości wilgotności objętościowej obliczone jedną z metod proponowanych w pracy Minasny'ego i in. [10] dały niedużą zgodność z wynikami badań, natomiast stosunkowo dobre wyniki obliczeń uzyskano korzystając z metody Vereeckena i in. [16]. Podobnie dobre dopasowanie wyników obliczeń do danych pomiarowych otrzymano w przypadku modeli Arya-Paris oraz modelu Aubertina [3]. Modele te oraz model Vereeckena dały porównywalną dokładność oznaczeń wilgotności objętościowej w całym zakresie stosowanych wartości ciśnienia ssania, przy czym modele Arya-Paris oraz Vereeckena z reguły zaniżały, a model Aubertina zawyżał wartości wilgotności objętościowej w stosunku do wyników pomiarów. Biorąc jednak pod uwagę niskie zakresy ciśnienia ssania (do 50 kPa), nieco lepsze wyniki obliczeń uzyskano stosując model Vereeckena.

Przedstawiona w pracy propozycja modyfikacji sposobu doboru współczynnika adhezji a_c oraz współczynnika związanego z rozkładem porów m_1 stosowanych w modelu Aubertina pozwala w lepszym stopniu dopasować wyniki obliczeń wilgotności objętościowej w zakresie dużych wartości ciśnienia ssania. Jednakże, ze względu na nieduży zakres analiz, związany ze stosunkowo niewielką liczbą danych pomiarowych, metoda ta wymaga weryfikacji na większej liczbie próbek gruntów.

LITERATURA

1. Arya L. M., and Paris J. F.: A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 1981, 1023-1030.
2. Arya L. M., Leij F. J., van Genuchten M. T., Shouse P. J.: Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 5 1999, 10-519.
3. Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussi re, B., Chapuis, R. P.: A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 2003, 1104-1122.
4. Basile A., D'Urso G.: Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination. *Soil Technology*, 10, 1997, 261-272.
5. Chin K-B., Leong E-C., Rahardjo H.: A simplified method to estimate the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 47, 2010, 1382-1400.
6. Houston, W. N., Dye, H. B., Zapata, C. E., Perera, Y. Y., Harraz, A.: Determination of SWCC using one point suction measurement and standard curves. *Geotechnical Special Publication*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA 20191-4400, United States, Carefree, AZ, United States, 2006, 1482-1493.
7. Huang M., Fredlund D. G., Fredlund M. D.: Comparison of Measured and PTF Predictions of SWCCs for Loess Soils in China. *Geotech Geol Eng*, DOI 10.1007/s10706-009-9284-x, 2006.
8. Kovacs G.: *Seepage hydraulics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1981.
9. Lu N., Griffiths D. V.: Profiles of steady-state suction stress in unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 10, 2004, 1063-1076.
10. Minasny B., McBratney A. B., Bristow K.: Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93, 1999, 225-253.
11. PN-EN ISO 14688-2. *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikacja gruntów. Cz    2: Zasady klasyfikowania*. PKN, Warszawa, 2006.
12. Rawls W. J., Brakensiek D. L.: Estimation of soil water retention and hydraulic properties. w: Morel-Seytous H.J. (red) *Unsaturated flow in hydrologic modeling – theory and practice*, Kluwer, 1989, 275-300.
13. Scheinost A. C., Sinowski W., Auerswald K.: Regionalization of soil water curves in a highly variable soilscape. I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, 78, 1997, 129-143.
14. Sinowski W., Scheinost A.C., Auerswald K.: Regionalization of soil water curves in a highly variable soilscape. II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. *Geoderma*, 78, 1997, 145-149.
15. Van Genuchten M. T.: A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, 44, 1980, 892-898.
16. Vereecken H., Maes J., Feyen J., Darius P.: Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148, 1989, 389-403.
17. Wagner B., Tarnawski V. R., Hennings V., M  ller U., Wessolek, Plagge R.: Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102, 2001, 275-297.
18. Walczak R. T., Moreno F., S  lwi nski C., Fernandez E., Arrue J. L.: Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *Journal of Hydrology*, 329, 2006, 527-533.