

OBLICZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNICTWA
HYDRAULICZNEGO METODĄ VAN GENUCHTENA-MUALEMA
W ZALEŻNOŚCI OD PARAMETRÓW KRZYWEJ RETENCJI WODNEJ

Małgorzata Iwanek, Dariusz Kowalski, Wanenty Olszta

Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
e-mail: KZWUS@fenix.pol.lublin.pl

Streszczenie. Metoda van Genuchtena-Mualema obliczania współczynnika przewodnictwa hydraulicznego bazuje na krzywej retencji wodnej, aproksymowanej funkcją trójparametrową. Parametry te stanowią podstawę obliczeń wspomnianego współczynnika w pełnym zakresie uwilgotnienia. W pracy określono wpływ dokładności ich oszacowania na zgodność dopasowania wyników obliczeniowych do wartości empirycznych rozpatrywanego współczynnika. Badania przeprowadzono dla czterech monolitów gleb organicznych (Mt I aa, ab, bb i bc). Analizując uzyskane wyniki wykazano znaczący wpływ niedokładności oszacowania dwóch spośród trzech rozpatrywanych parametrów funkcji aproksymujących krzywą retencji wodnej na uzyskiwane wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego.

Słowa kluczowe: współczynnik przewodnictwa hydraulicznego, krzywa retencji wodnej, gleby hydrogeniczne

WSTĘP

Coraz powszechniejsze w ostatnich latach stosowanie metod numerycznych do symulacji dynamiki uwilgotnienia nienasyconego profilu glebowego oraz migracji wprowadzanych do niego zanieczyszczeń wymaga na wstępie parametryzacji właściwości fizyko-wodnych badanego ośrodka. Jednym z jej podstawowych elementów jest współczynnik przewodnictwa hydraulicznego $k(h)$ obejmujący pełny zakres zmian uwilgotnienia. Według zestawienia skatalogowanych przez Instytut Agrofizyki PAN symulacyjnych modeli numerycznych opisujących ruch wody i zanieczyszczeń w glebie [21] około 40% z nich wymaga bezpośrednio tego parametru. Następne 53% modeli wylicza go na podstawie różnych algorytmów, najczęściej uzależnionych od krzywej retencji.

Istnieje obecnie kilka sposobów wyznaczania zależności współczynnika przewodnictwa hydraulicznego od wysokości tzw. ciśnienia ssącego lub wilgotności. Jednym z nich jest algorytm van Genuchtena-Mualem [9,10,17,19]. Metoda ta polega na aproksymacji, stosunkowo łatwej do empirycznego uzyskania, charakterystyki retencyjnej gleby, a następnie na jej podstawie oszacowania względnego współczynnika przewodnictwa wodnego. Umożliwia on, przy znanym współczynniku przewodnictwa w warunkach pełnego nasycenia, zwanym powszechnie współczynnikiem filtracji, określenie poszukiwanych wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego w pełnym zakresie zmian uwilgotnienia.

Trudność wykorzystania tej metody polega na prawidłowym oszacowaniu parametrów zawartej w algorytmie funkcji, opisującej krzywą charakteryzującą zdolności retencyjne gleby [1], szczególnie wtedy, gdy dysponuje się, jak to ma często miejsce w praktyce, zaledwie kilkoma punktami pomiarowymi tej charakterystyki. W takich przypadkach określenie dopuszczalnego błędu estymowanych parametrów staje się niezbędne.

Celem pracy jest określenie wpływu dokładności oszacowania wspomnianych parametrów aproksymacji krzywej retencji wodnej na zgodność dopasowania wyników obliczeniowych współczynnika przewodnictwa hydraulicznego, uzyskiwanych metodą van Genuchtena, do wyników oznaczeń empirycznych tego parametru.

OBIEKT BADAŃ

Jako podstawę badań przyjęto wyniki oznaczeń laboratoryjnych, obejmujących charakterystyki zdolności retencyjnych (tzw. krzywych pF) oraz współczynnika przewodnictwa hydraulicznego, zarówno w strefie nasyconej jak i nienasyconej, wybranych monolitów gleb torfowo-murszowych. Wyniki oznaczeń empirycznych oraz opisy profili zostały udostępnione przez Instytut Melioracji i Użytków Zielonych Oddział w Lublinie [11]. W badaniach wykorzystano następujące profile gleb: Krowie Bagno 15 (Mt I aa), Krowie Bagno 7 (Mt I ab), Krowie Bagno 476 (Mt I bb) oraz Hanna – Holeszów 64/80 (Mt I bc). Opisy profili zestawiono w tabelach 1-4.

Oznaczenia laboratoryjne przeprowadzono z wykorzystaniem obowiązującej w IMUZ metodyki: charakterystyki zdolności retencyjnych wyznaczono metodą bloku pyłowego, współczynnik przewodnictwa wodnego przy pełnym nasyceniu – metodą Wita, współczynnik przewodnictwa hydraulicznego w strefie nienasyconej metodą osuszanych monolitów [12].

Porównanie wyników oznaczeń współczynnika filtracji gleb hydrogeniczych dokonane przez IMUZ w Lublinie, IMUZ w Bydgoszczy oraz Instytut Gleboznawstwa AR w Lublinie wskazuje, że wykorzystanie metody Wita do oznaczeń współczynnika filtracji powoduje często zawyżenie jego wartości w stosunku do wyników badań polowych. Fakt ten sygnalizowany już był we wcześniejszych pracach i analizach [8].

OBLICZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNICTWA HYDRAULICZNEGO

Tabela 1. Charakterystyka profilu Krowie Bagno 15 [11]
Table 1. Characteristics of Krowie Bagno 15 soil monolith [11]

Typ glib Soil type	Poziom Level (cm)	Opis warstw profilu Specification of monolith levels	Barwa Colour	Stopień rozkładu Decompositon degree
Mt I aa	0–10	M ₁ – poziom darniowy, silnie uwodniony, stopień rozziarnienia (2) Z ₁ M ₁ – strong moisturized turf level, degree of graining (2) Z ₁	ciemno-brunatna dark brown	
	10–45	torf mechowiskowy, struktura drobnowłóknista moss peat, fine-fibre structure	jasno-brunatna light brown	30%
	45–75	torf mechowiskowy, struktura włóknista moss peat, fibre structure	???	25–30%
	75–100	torf mechowiskowy z mchami moss peat and moss	jasno-brunatna light brown	15%
	100–150	torf mechowiskowy moss peat	jasno-brunatna light brown	>30%

Tabela 2. Charakterystyka profilu Krowie Bagno 7 [11]
Table 2. Characteristics of Krowie Bagno 7 soil monolith [11]

Typ glib Soil type	Poziom Level (cm)	Opis warstw profilu Specification of monolith levels	Barwa Colour	Stopień rozkładu Decompositon degree
Mt I ab	0–10	M ₁ – poziom darniowy, plastyczny, uwodniony M ₁ – moisturized, plastic turf level		(2)
	10–20	torf mechowiskowy , z przeoraną darnią, struktura amorficzno-włóknista moss peat with ploughed turf, amorphous and fibre structure		
	20–50	torf mechowiskowy z niewielkim udziałem trzciny widocznej w przełomie, woda wyciska się lekko, mętna z niewielką ilością humusu, struktura włóknista moss peat with a bit of reed visible in the gorge, wrung out water – murky with a bit of humus	ciemno-brunatna dark brown	30%
	50-75	torf mechowiskowy , struktura włóknista moss peat, fibre structure		30%
	75-100	torf mechowiskowy z wyraźnym udziałem szerokich kłączy trzciny moss peat with distinct presence of wide reed rhizomes		35–40%
	100-130	torf trzcinowo-turzycowy, struktura amorficzno-włóknista reed-sedge peat, amorphous and fibre structure		35–40%

OBLICZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNICTWA HYDRAULICZNEGO

Tabela 3. Charakterystyka profilu Krowie Bagno 476 [11]

Table 3. Characteristics of Krowie Bagno 476 soil monolith [11]

Typ glib Soil type	Poziom Level (cm)	Opis warstw profilu Specification of monolith levels	Barwa Colour	Stopień rozkładu Decomposition degree
Mt I bb	0-10	poziom darniowy, dość zwarty korzeniami traw, struktura gruzelkowa, rozziarnienie niewyczuwalne Z_2 turf level, compact by grass roots, flocculated structure, unperceptible graining Z_2	ciemno-brunatna o czarnym odcieniu dark brown with grey tint	
	10-20	torf amorficzny amorphous peat	ciemnobrunatna dark brown	80%
	20-30	torf mechowiskowy, struktura drobnowłóknista moss peat, fine-fibre structure	ciemnobrunatna dark brown	30%
	30-50	torf mechowiskowy, struktura drobnowłóknista moss peat, fine-fibre structure	ciemnobrunatna dark brown	35%
	50-65	torf mechowiskowy, struktura drobnowłóknista amorficzna, z nieznaczną domieszką kłączy trzciny moss peat, fine-fibre and amorphous structure with a bit of reed rhizomes		50%
	65-125	torf szuwarowy, struktura amorficzno – grubowłóknista rushes peat, amorphous and thick-grain structure		45%
	125-150	torf szuwarowy, struktura amorficzno – grubowłóknista rushes peat, amorphous and thick-grain structure		45%

W związku z tym dla celów artykułu w późniejszych obliczeniach zamiast wartości współczynnika filtracji k_s wyznaczonej według metody Wita przyjęto wartość wyznaczoną metodą osuszanych monolitów dla niskich wartości matrycowego potencjału wody glebowej h [3,12] (dla próbki Krowie Bagno 15 najmniejsza wartość h , dla której wyznaczono współczynnik przewodnictwa hydraulicznego wynosiła 4 cm, dla pozostałych profili: Krowie Bagno 7 – $h = 0,4$ cm, Krowie Bagno 476 – $h = 1$ cm, Hanna Holeszów 64/80 – $h = 2,5$ cm).

OBLICZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNICTWA HYDRAULICZNEGO

Tabela 4. Charakterystyka profilu Hanna Holesszów 64/80 [11]

Table 4. Characteristics of Krowie Hanna Holesszów 64/80 soil monolith [11]

Typ glib Soil type	Poziom Level (cm)	Opis warstw profilu Specification of monolith levels	Barwa Colour	Stopień rozkładu Decomposition degree
Mt I bc	0-15	mursz skrytogrzuźkowy, z korzeniami traw hidden lump dry rot with grass roots	brunatna dark brown	35%
	15-40	torf mechowiskowy, zbity, struktura drobnowłóknista packed moss peat, fine-fibre structure		
	40-50	torf mechowiskowy z wkładką namułu mineralnego, piaszczystego; w masie drobnoziarnistej występują również fragmenty trzciny moss peat with the insert of mineral, sandy silt; piece of reed in the fine-grain mass	ciemno-brunatna dark brown	40%
	50-100	torf olesowy, konsystencja pastowata wood peat, polish consistency	ciemno-brunatna z czarnym odcieniem dark brown with black tint	60-70% wzrasta z głębokością increases in depth
	100-125	torf olesowy, struktura amorficzno-kawałkowa, liczne drobne fragmenty drewna (olchy) wood peat, amorphous and pieces structure, a lot of pieces of wood – alder		
	100-125	torf olesowy, w bezpostaciowej uwodnionej masie występują liczne drobne włókienka wood peat; there are numerous fine fibres in the hydrated mass	prawie czarna almost black	80%

METODYKA OBLICZEŃ

Do badań numerycznych przyjęto algorytm obliczeniowy wyznaczania współczynnika przewodnictwa wodnego oparty o metodę van Genuchtena-Mualemę [9,10,13,17,19]:

$$k(h) = k_r \cdot k_s \quad (1)$$

$$k_r = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \right]^{(1-\frac{1}{n}) \cdot L} \left\{ 1 - \left[\frac{(\alpha \cdot h)^n}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \right]^{(1-\frac{1}{n})} \right\}^2 \quad (2)$$

gdzie: $k(h)$ – współczynnik przewodnictwa hydraulicznego w strefie nienasyconej ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), zależny od wartości matrycowego potencjału wody glebowej, wyrażonego w jednostkach wysokości ciśnienia słupa wody h (cm) (zwanego

także siłą ssącą [26], ciśnieniem ssącym [7] lub ssaniem macierzystym [7]), k_s – współczynnik filtracji ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$), k_r – względny współczynnik przewodnictwa hydraulicznego, L – bezwymiarowy współczynnik uwzględniający układ połączeń porów, α (cm^{-1}) ($\alpha > 0$) – współczynnik zależny od ciśnienia wejścia powietrza, n ($n > 1$) – bezwymiarowy współczynnik będący miarą rozkładu wielkości porów [13,18].

Parametry α , n , opisujące krzywą zdolności retencyjnych gleby, estymowane są na drodze nieliniowej analizy regresji w oparciu o funkcję:

$$\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} = \left[1 + (\alpha \cdot h)^n \right]^{\left(1 - \frac{1}{n} \right)} \quad (3)$$

w której: θ – zawartość wody ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) odpowiadająca ciśnieniu ssącemu o wysokości h (cm), θ_s – zawartość wody w nasyconym profilu glebowym ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), θ_r – tzw. resztowa zawartość wody ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Ta często stosowana do wyznaczania $k(h)$ metoda [1,2,5,14,23] wymaga wcześniejszego określenia współczynnika L . Przeprowadzone badania [13,15,20,25] wskazują, że jego wartości mogą być różne, ale najczęściej zakłada się zaproponowaną przez Mualema wartość $L = 0,5$ [6, 9, 16, 22], którą również przyjęto w niniejszej pracy.

Obliczenia statystyczne przeprowadzono w Katedrze Ogrzewnictwa, Wentylacji i Automatykacji Politechniki Lubelskiej wykorzystując program STATISTICA. Przeprowadzono analizę regresji wewnętrznie nieliniowej przyjmując jako procedurę estymacji parametrów algorytm quasi – Newtona, z funkcją straty postaci sumy najmniejszych kwadratów.

Istotność aproksymowanych współczynników oceniano porównując poziom prawdopodobieństwa p (tzw. p -wartość) wystąpienia nieistotności tych parametrów z przyjętym poziomem istotności 0,05. Wartość $p < 0,05$ oznacza, że należy odrzucić hipotezę o nieistotności danego parametru i uznać go za istotny statystycznie na poziomie ufności 95%.

Zgodność dopasowania wyników obliczeniowych do empirycznych badano za pomocą tzw. średniego względnego błędu, obliczanego za pomocą wzoru:

$$s = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (4)$$

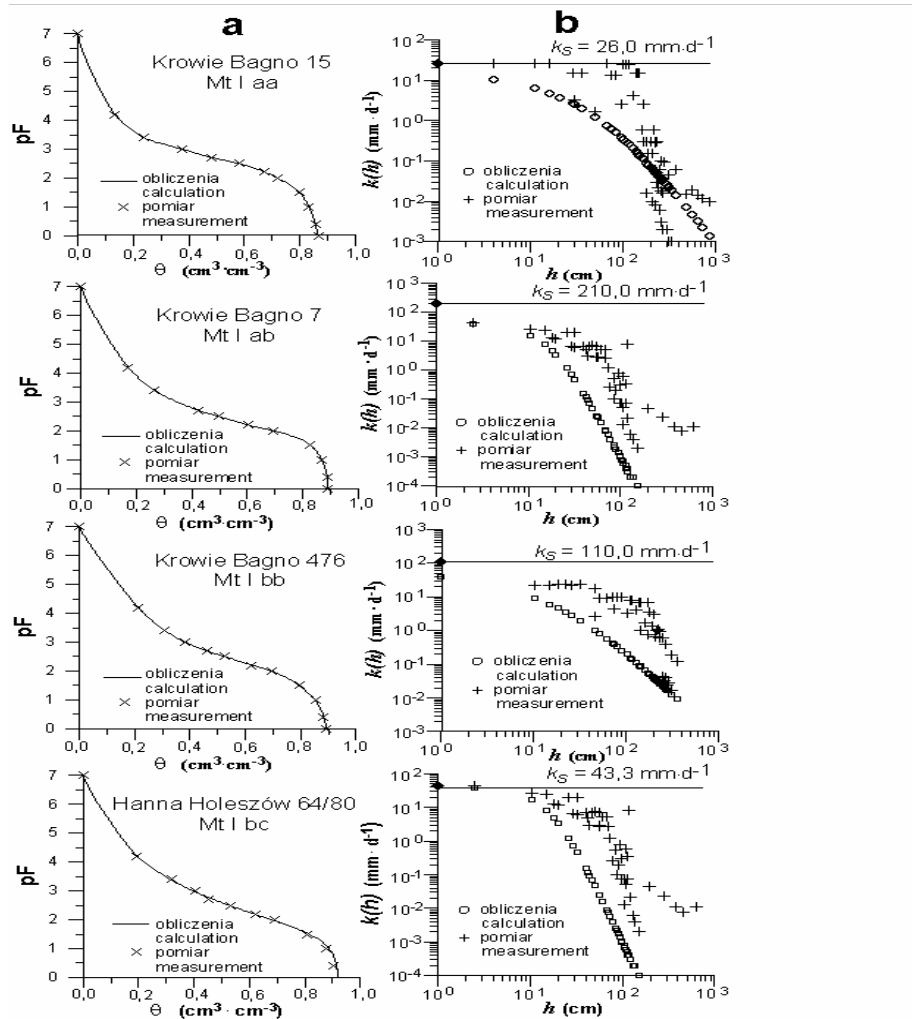
gdzie: n_p – liczba pomiarów, δ_i – względny błąd pomiaru według wzoru:

$$\delta_i = \left| \frac{k_{pom_i} - k_{obl_i}}{k_{pom_i}} \right| \cdot 100\% \quad (5)$$

gdzie: k_{pom} – pomiarowa wartość współczynnika przewodnictwa, k_{obl} – obliczeniowa wartość współczynnika przewodnictwa hydraulicznego.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń numerycznych, obejmujących krzywe pF oraz przewodnictwo hydrauliczne, przedstawiono na rysunku 1. Obliczenia zrealizowano w oparciu o przedstawioną wcześniej metodykę.



Rys. 1. Krzywe retencji wodnej dla badanych profili glebowych (a). Wykres obliczeniowych i empirycznych wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego w zależności od wysokości ciśnienia ssącego h dla badanych profili glebowych (b)

Fig. 1. The retention curves for investigated profiles (a). The diagram of calculation and empirical hydraulic conductivity coefficient values depending on soil suction head for investigated profiles (b)

Przebieg krzywych retencji wodnej, uzyskanych na podstawie nieliniowej analizy regresji, wskazuje na dobre dopasowanie zastosowanych funkcji aproksymujących do wartości zdolności retencyjnych uzyskanych z pomiarów. Niewielka rozbieżność wystąpiła tylko dla monolitu Krowie Bagno 15 w zakresie zawartości wilgotności zbliżonych do $1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

Porównanie zmierzonych i obliczonych wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego (rys. 1b) wykazało dla wszystkich przypadków rozbieżności w całym rozpatrywanym zakresie ciśnień ssących.

Przeprowadzone analizy wskazują na konieczność zastosowania złożonych obliczeń matematycznych w celu określenia wartości parametrów θ_r , α i n do wzoru (2) szacowanych na podstawie charakterystyki zdolności retencyjnych. Dokładność ich określania była zróżnicowana, przy czym błąd estymacji parametru θ_r dla wszystkich rozpatrywanych próbek był największy. Prowadzi to do wniosku, że w przypadku ograniczonej liczby punktów określających krzywą retencji wodnej, może zaistnieć sytuacja, w której niemożliwe będzie przyjęcie jego wyznaczonych wartości za istotne statystycznie. W praktyce inżynierskiej, ze względu na koszty i czas, dąży się do minimalizacji ilości realizowanych pomiarów. Należy więc odpowiedzieć na pytanie o wpływ błędnego oszacowania parametrów θ_r , α i n na wiarygodność całej przyjętej metody obliczeń współczynnika przewodnictwa hydraulicznego.

Uzyskane na podstawie analizy regresji, nieliniową metodą najmniejszych kwadratów, rezultaty oszacowania parametrów θ_r , α i n przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry funkcji (3) aproksymującej krzywą retencji wodnej

Table 5. The parameters of the function (3) approximating the retention curve

Próbka – Sample	Estymowane parametry – Estimated parameters		
	θ_r	α	n
KB 15 – Mt I aa	0,000	0,013	1,343
KB 7 – Mt I ab	0,086	0,016	1,413
KB 476 – Mt I bb	0,006	0,029	1,252
HH 64/80 – Mt I bc	0,000	0,027	1,256

Dla wszystkich badanych przypadków współczynnik determinacji R^2 przekroczył wartość 0,97. Poziom prawdopodobieństwa p weryfikującego test o nieistotności aproksymowanego współczynnika nie przekroczył przyjętego poziomu istotności 0,05 – dla parametru n był znacznie mniejszy niż 0,001, a dla parametru α tylko dla próbki Krowie Bagno 15 osiągnął wartość 0,04, w pozostałych przypadkach nie przekroczył wartości 0,006. Można więc stwierdzić, że parametry α i n okazały się wysoce istotne. Natomiast nieistotny statystycznie okazał się parametr θ_r – poziom

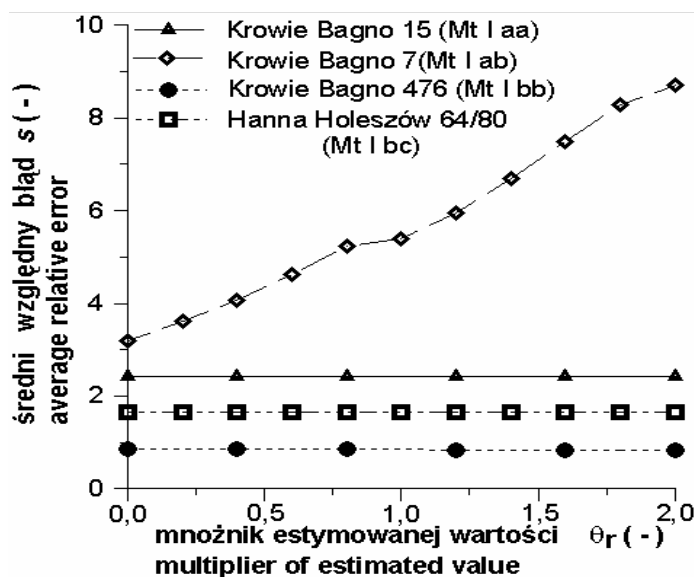
prawdopodobieństwa p we wszystkich przypadkach znacznie przekroczył 0,05, czyli założoną wartość poziomu istotności.

Dalsze badania, zgodnie z przyjętą metodyką, prowadzono w kierunku określenia wpływu błędu w wyznaczeniu parametrów θ_r , α i n na zgodność dopasowania rezultatów obliczeniowych do pomiarowych współczynnika przewodnictwa hydraulicznego $k(h)$.

Jako pierwszy badany był parametr θ_r . Najpierw zakładano wartości tego parametru i przeprowadzano standardową, 2-parametrową analizę regresji w celu wyznaczenia pozostałych parametrów, a następnie obliczano wg wzoru (4) błąd oszacowania s rezultatów obliczeń w stosunku do wartości pomiarowych. Przyjęte wartości θ_r odpowiadały oszacowanej wcześniej wartości (z trójparametrowej analizy) pomnożonej przez współczynniki od 0 do 2,0 co 0,2 (tzn. 0, 0,2, 0,4, ..., 2,0).

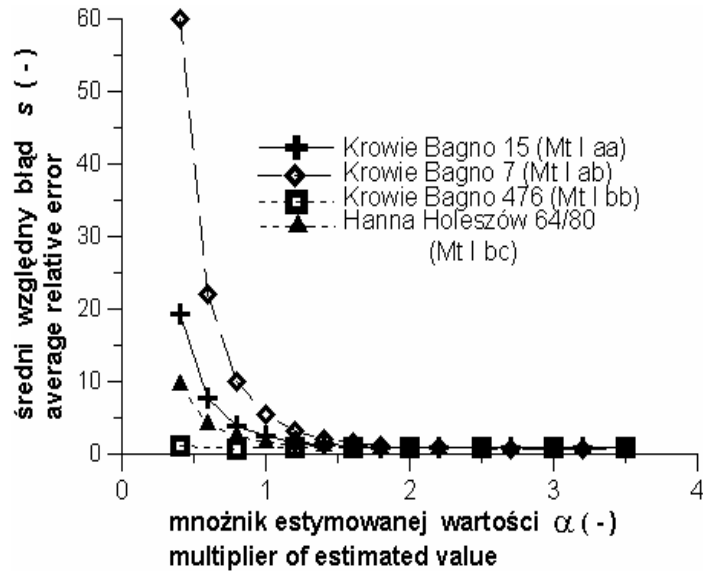
Ten sam tok postępowania został powtórzony dla parametrów α i n , z tym, że zakładając wartość α przyjęto współczynniki od 0,4 do 2,2 co 0,2 oraz 2,5, 2,7, 3,0, 3,2, 3,5, natomiast dla zakładanego n przyjęto współczynniki od 0,8 (co dla wszystkich próbek w przybliżeniu odpowiada wartości $n = 1$) do 2,4 co 0,2.

Wyniki analiz przedstawiają wykresy na rysunkach 2-4.



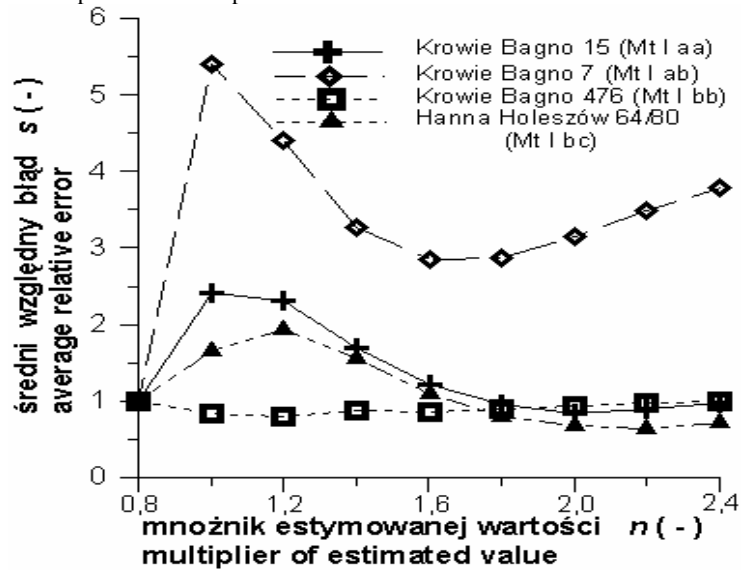
Rys. 2. Wpływ względnej zmiany zawartości wody resztkowej θ_r na błąd oszacowania s obliczeń modelowych w stosunku do oznaczeń empirycznych

Fig. 2. The influence of relative change of residual water contents θ_r value on the estimation error s of modelling calculations in comparison with empirical measurements



Rys. 3. Wpływ względnej zmiany wartości parametru α na wartość błędu oszacowania s obliczeń modelowych w stosunku do oznaczeń empirycznych

Fig. 3. The influence of relative change of parameter α value on the estimation error s of modelling calculations in comparison with empirical measurements



Rys. 4. Wpływ względnej zmiany wartości parametru n na wartość błędu oszacowania s obliczeń modelowych w stosunku do oznaczeń empirycznych

Fig. 4. The influence of relative change of parameter n value on the estimation error s of modelling calculations in comparison with empirical measurements

W przypadku próbek Krowie Bagno 15 i Hanna Holeszów 64/80 widoczny jest brak wpływu wartości θ_r w badanym zakresie na wartość błędu oszacowania s (rys. 2). W przypadku próbki Krowie Bagno 476 wpływ ten jest nieznaczny (ze wzrostem wartości θ_r maleje wartość s od 0,849 do 0,838). Mogłoby to sugerować, że dokładność oszacowania parametru θ_r nie wpływa znacząco na jakość wyników $k(h)$ uzyskiwanych metodą van Genuchtena – Mualema. Można byłoby wówczas przyjąć $\theta_r = 0$, co sugerują niektórzy autorzy [4,22], i funkcję (3) traktować jako 2 – parametrową. Byłoby to korzystne biorąc pod uwagę fakt, iż dla wspomnianych próbek parametr θ_r okazał się wysoce nieistotny pod względem statystycznym.

Inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku próbki Krowie Bagno 7. Obserwowano tu wyraźny wzrost błędu oszacowania s wraz ze wzrostem wartości θ_r (od 3,20 do 8,70), co sugeruje większy wpływ dokładności oszacowania parametru θ_r na obliczeniowe wartości $k(h)$. Prowadzi to do wniosku, że należy prowadzić dalsze badania z większą liczbą próbek gleb hydrogenicnych, zwłaszcza typu Mt I ab.

Rozpatrując wpływ wartości parametru α na wielkość błędu s (rys. 3) zauważono, że dla α zwiększonego co najmniej 2-krotnie w stosunku do wartości wcześniej oszacowanej błąd s przyjmuje we wszystkich przypadkach zbliżone wartości, znacznie mniejsze od tych dla parametru α pomnożonego przez współczynnik mniejszy od 2.

Bardzo podobna sytuacja występuje w przypadku parametru n (rys. 4). Dla n zwiększonego co najmniej 2-krotnie w stosunku do wartości wcześniej oszacowanej błąd s przyjmuje minimalne, zbliżone do siebie wartości (około 3,0 dla próbki Krowie Bagno 7, około 0,9 dla pozostałych przypadków).

Biorąc pod uwagę przeprowadzone badania należy stwierdzić, iż wpływ dokładności oszacowania rozpatrywanych parametrów jest zróżnicowany i znaczący w przypadku współczynników α i n . Liczba punktów pomiarowych określających krzywą pF powinna więc być jak największa.

Powyższe rozważania mogłyby sugerować, że dwukrotne zwiększenie wartości współczynników α i n w stosunku do wartości aproksymowanych na podstawie krzywej pF powodowałoby zwiększenie dokładności wyznaczania $k(h)$. Podstawienie do wzoru (2) podwojonych wartości α i n powoduje wprawdzie dla większości rozpatrywanych profili znaczne zmniejszenie średniego względnego błędu s , obliczonego z zależności (4) (tylko dla próbki Krowie Bagno 476 nastąpił nieznaczny wzrost s), jednak przeprowadzone analizy wykazały znaczne pogorszenie dopasowania wyników pomiarów i obliczeń $k(h)$. Wydaje się, że rozbieżności te wynikają z wartości błędów δ_i według wzoru (5) poszczególnych pomiarów dla każdego z profili glebowych. Po zmodyfikowaniu wzoru (2) przez podwojenie α i n dla niektórych pomiarów (zwłaszcza tych, dla których przed modyfikacją wzoru (2) $\delta_i > 100\%$) wartość δ_i bardzo maleje, natomiast dla pozostałych, stanowiących większość – rośnie. Jednak wartość bezwzględna różnicy błędów δ_i przed i po modyfikacji wzoru (2) dla pomiarów w pierwszym z wymienionych przypadków jest znacznie większa

(nawet kilkunastokrotnie) w porównaniu z pomiarami odpowiadającymi drugiemu przypadkowi. W efekcie, po modyfikacji wzoru (2), zsumowaniu wszystkich wartości δ_i dla danego profilu i obliczeniu średniego relatywnego błędu s według wzoru (4), uzyskuje się mniejszy wynik. Ponieważ jednak dla większości pomiarów w każdym z profili podwojenie współczynników α i n powoduje pogorszenie dopasowania wartości obliczeniowych do pomiarowych $k(h)$ nie można modyfikować wzoru (2) zwiększając wspomniane parametry α i n .

Należy więc szukać innych możliwości poprawienia zgodności wyników pomiarów i obliczeń $k(h)$. Znaczenie może mieć tutaj parametr L równania (2) tym bardziej, że niektórzy autorzy [24] zwracają uwagę na wpływ udziału części organicznych w profilu glebowym na jego wartość. Problem ten będzie tematem naszych dalszych prac.

WNIOSKI

Przeprowadzone obliczenia i analizy, w zakresie badanych próbek gleb torfowo-murszowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Istnieje potrzeba poprawy zgodności dopasowania wyników pomiarowych i obliczeniowych $k(h)$ wybranych profili glebowych z uwzględnieniem innych parametrów niż te aproksymowane na podstawie krzywej pF,
2. Ocena wpływu dokładności oszacowania parametrów θ , α i n na zgodność dopasowania wyników modelowych do empirycznych współczynnika przewodnictwa hydraulicznego k dla rozpatrywanych gleb wykazała, że jest on istotny statystycznie tylko w przypadku parametrów α i n ,
3. W przypadku parametrów α i n stwierdzono istnienie wartości granicznej błędu dopasowania s przy relatywnym zwiększeniu wartości wspomnianych parametrów co najmniej dwukrotnie,
4. Analiza regresji wykazała, że prawidłowe oszacowanie parametru θ jest celem trudnym do osiągnięcia,
5. Przedstawione wyniki badań, choć wykazują pewne prawidłowości, zostały uzyskane dla czterech wybranych prób glebowych i do pełnego wnioskowania konieczne są dalsze badania na poszerzonym materiale badawczym gleb organicznych.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bohne K., Olszta W.:** Application of the van Genuchten's relations to determine the hydraulic properties of an unsaturated soils. Pol. J. Soil Sci., XXI/2, 83 - 88, 1988.
2. **Bruckler L., Bertuzzi P., Angulo-Jaramillo R., Ruy S.:** Testing an infiltration method for estimating soil hydraulic properties in the laboratory. Soil Sci. Soc. Am. J., 667, 384-395, 2002.
3. **Durner W.:** Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogenous pore structure. Water Resour. Res., 30, 211-223, 1994.

4. **Hopmans J. W., Overmars B.:** Presentation and application of an analytical model to describe soil hydraulic properties. *J. Hydrol.*, 87, 135-143, 1986.
5. **Jones S. B. Or D.:** Microgravity effects on water flow and distribution in unsaturated porous media: Analyses of flight experiments. *Water Resour Res.*, 35, 929-942, 1999.
6. **Kodešová R., Gribb M. M., Šimůnek J.:** Estimating soil hydraulic properties from transient cone permeameter data. *Soil Sci.*, 163, 436-453, 1998.
7. **Kowalik P.:** Zarys fizyki gruntów. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1973.
8. **Kowalski D., Widomski M., Iwanek M.:** Aproksymacja charakterystyki zdolności retencyjnych gleb hydrogeniczných typu Mt I aa. Materiały konferencyjne III Forum inżynierii ekologicznej, 216-221, Nałęczów, 2000.
9. **Mualem Y.:** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 513-522, 1976.
10. **Mualem Y.:** A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Research Project no. 442. Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1976.
11. **Olszta W. red.:** Opracowanie fizyko-wodnej charakterystyki wyróżnionych rodzajów gleb hydrogeniczných jako podstawy parametrów do projektowania melioracji 1976-1980. Raport z programu PR 7.06.02.04.01, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Lublin, 1980.
12. **Olszta W., Zaradny H.:** Pomiarowe i obliczeniowe metody określania współczynnika przewodności hydraulicznej gleb przy niepełnym nasyceniu. Wydawnictwo IMUZ, Materiały instruktażowe '95, Falenty, 1991.
13. **Schaap M. G., Leij F. J.:** Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem van Genuchten model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 843-851, 2000.
14. **Schmalz B., Lenartz B., van Genuchten M. Th.:** Analysis of unsaturated water flow in a large sand tank. *Soil Sci.*, 168, 3-14, 2003.
15. **Schuh W. M., Cline R. L.:** Effect of soil properties on unsaturated hydraulic conductivity pore-interaction factors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1509-1519, 1990.
16. **Schwartz R. C., Evett S. R.:** Estimating hydraulic properties of a fine-textured soil using a disc infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 1409-1423, 2002.
17. **van Genuchten M. Th.:** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898, 1980.
18. **van Genuchten M. Th., Nielsen D. R.:** On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophysicae*, 3, 615-628, 1985.
19. **van Genuchten R.:** Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new, closed-form analytical model. Research Report No. 1978-WR-08. Water Resources Program, Dep. of Civil Engineering, Princeton Univ., Princeton, N. J., 1979.
20. **Vereecken H.:** Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma*, 65, 81-92, 1995.
21. **Walczak R., Baranowski P., Sławiński C.:** Parametry i procesy glebowe jako czynniki determinujące wzrost i rozwój roślin – modelowanie. Materiały konferencyjne. Modelowanie i monitorowanie procesów agrofizycznych w środowisku glebowym, 107-113. Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1999.
22. **Wessolek G., Plagge R., Leij F. J., van Genuchten M. Th.:** Analysing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties. *Geoderma*, 64, 93-110, 1994.
23. **Wildenschild D., Jensen K. H.:** Laboratory investigations of effective flow behaviour in unsaturated heterogenous sands. *Water Resour Res.*, 35, 17-27, 1999.
24. **Wösten J. H. M., Finke P. A., Jansen M. J. W.:** Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma*, 66, 227-237, 1995.

25. **Yates S. R., van Genuchten M. Th., Warrick A. W., Leij F. J.:** Analysis of measured, predicted, and estimated hydraulic conductivity using the RETC computer program. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 347-354, 1992.
26. **Zawadzki S. red.:** *Gleboznawstwo*. PWRiL, Warszawa 1999.

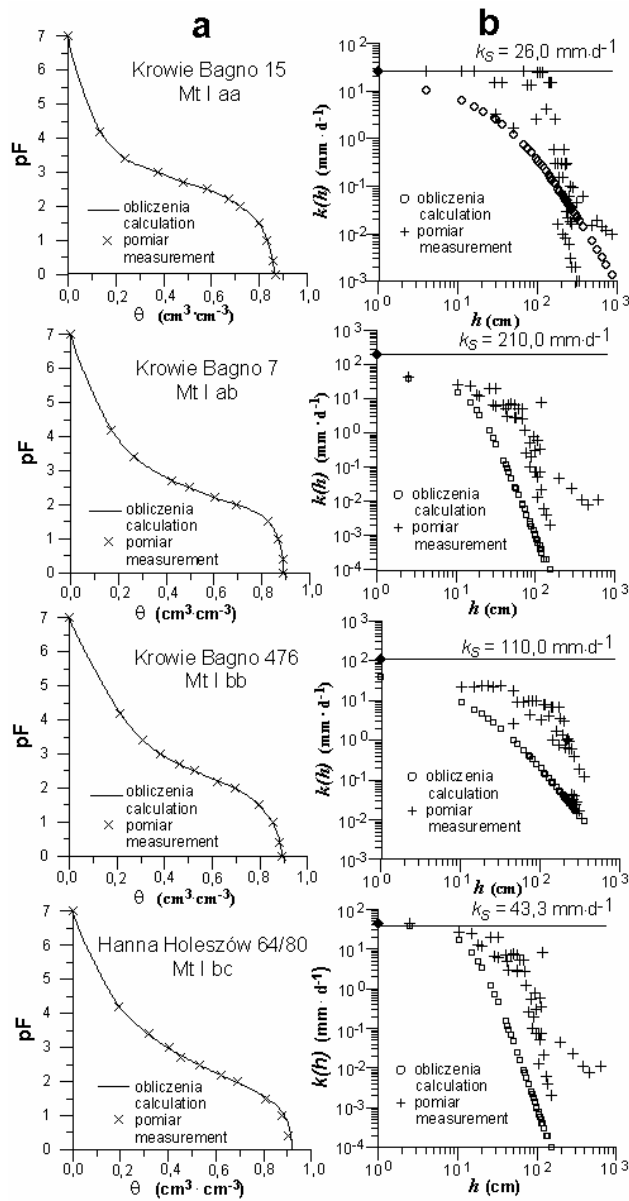
CALCULATION OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY COEFFICIENT
WITH THE VAN GENUCHTEN-MUALEM METHOD
IN DEPEND ON THE pF CURVE PARAMETERS

Małgorzata Iwanek, Dariusz Kowalski, Wanenty Olszta

Department of Water Supply and Sewage Disposal, Technical University of Lublin
ul. Nadbystrzycka 4, 020-618 Lublin
e-mail: KZWUS@fenix.pol.lublin.pl

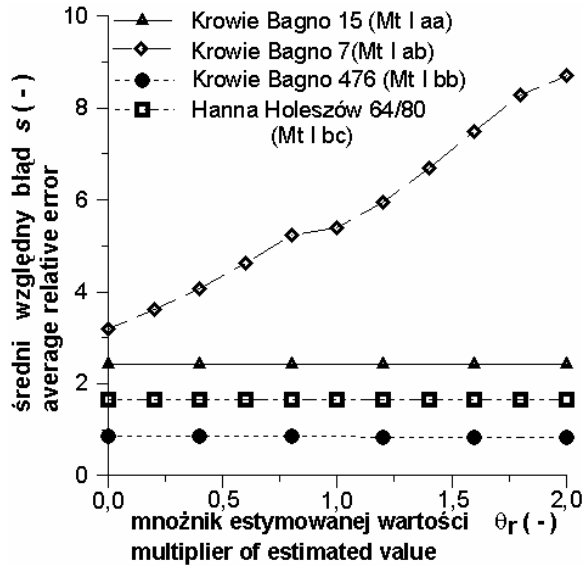
Abstract. The van Genuchten-Mualem method of the hydraulic conductivity coefficient determination bases on water retention curve – pF, approximated by 3 – parameter function. These parameters allow to calculate the mentioned coefficient in full range of soil moisture. The aim of the paper is to estimate the influence of precision in the determination of these parameters on the calculation accuracy in comparison with empirical measured values. The values are presented for 4 hydrogenic soil monoliths – Mt I aa, ab, bb, bc. The analysis of the obtained results allowed the authors to indicate that estimation inaccuracy of the two of the examined pF function parameters influences obtained values of hydraulic conductivity coefficient very essentially.

Keywords: hydraulic conductivity coefficient, retention curve, hydrogenic soil



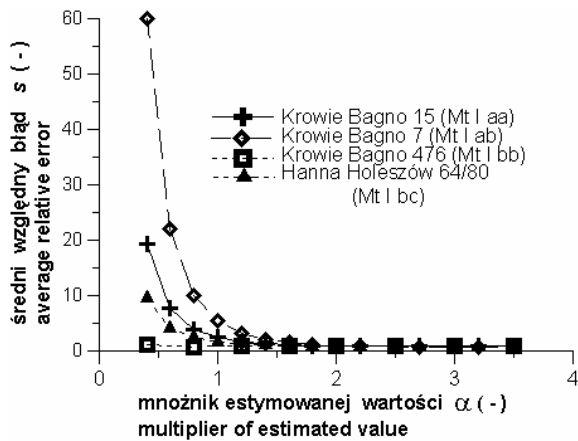
Rys. 1. Krzywe retencji wodnej dla badanych profili glebowych (a). Wykres obliczeniowych i empirycznych wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego w zależności od wysokości ciśnienia ssącego h dla badanych profili glebowych (b)

Fig. 1. The retention curves for investigated profiles (a). The diagram of calculation and empirical hydraulic conductivity coefficient values depending on soil suction head for investigated profiles (b)



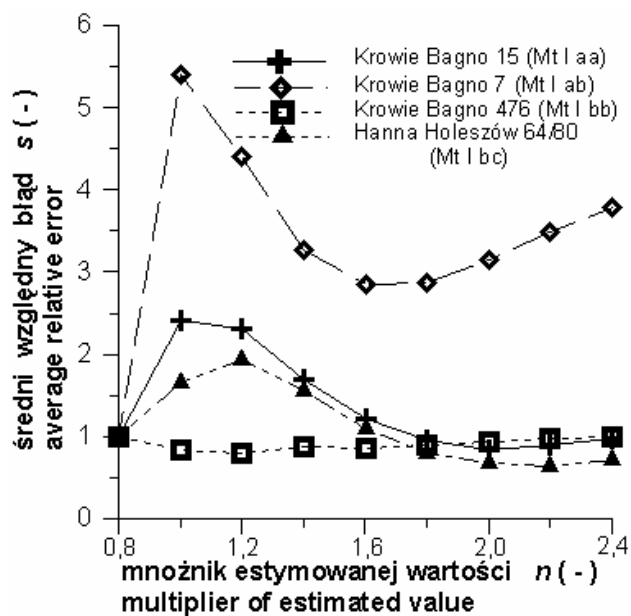
Rys. 2. Wpływ względnej zmiany zawartości wody resztywnej θ_r na błąd oszacowania s obliczeń modelowych w stosunku do oznaczeń empirycznych

Fig. 2. The influence of relative change of residual water contents θ_r value on the estimation error s of modelling calculations in comparison with empirical measurements



Rys. 3. Wpływ względnej zmiany wartości parametru α na wartość błędu oszacowania s obliczeń modelowych w stosunku do oznaczeń empirycznych

Fig. 3. The influence of relative change of parameter α value on the estimation error s of modelling calculations in comparison with empirical measurements



Rys. 4. Wpływ względnej zmiany wartości parametru n na wartość błędu oszacowania s obliczeń modelowych w stosunku do oznaczeń empirycznych

Fig. 4. The influence of relative change of parameter n value on the estimation error s of modelling calculations in comparison with empirical measurements