

ANALIZA ZDOLNOŚCI RETENCJONOWANIA WODY PRZEZ MINERALNE UTWORY GLEBOWE

THE ANALYSIS OF WATER RETENTION CAPACITY OF MINERAL SOILS

Piotr Hewelke, Tomasz Gnatowski, Stanisław Żakowicz
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę właściwości retencyjnych mineralnych utworów glebowych oraz podjęto próbę opracowania zależności statystycznych między podstawowymi parametrami fizycznymi gleby a charakterystycznymi stanami uwilgotnienia. Ze względu na stosunkowo skomplikowany i czasochłonny proces bezpośredniego pomiaru wilgotnościowej i retencyjnej charakterystyki gleby (tzw. krzywej pF), coraz częściej poszukuje się metod pośrednich wykorzystujących zależność pomiędzy podstawowymi właściwościami fizycznymi gleby a charakterystycznymi stanami uwilgotnienia. W pracy badano związek pomiędzy poszczególnymi frakcjami uziarnienia, gęstością gleby i zawartością substancji organicznej a ilością wody zatrzymywanej w glebie przy zadanej sile ssącej (pF). Badaniom poddano 59 gleb mineralnych o zróżnicowanym składzie mechanicznym, od piasków do gleb ciężkich. Zależność pomiędzy badanymi cechami a wilgotnością przy określonej wartości pF została udowodniona statystycznie.

Abstract. The paper presents the analysis of retention properties of mineral soils, and an attempt to establish statistical relationships of the soil basic physical properties and characteristic moisture contents. Because of a relatively complicated and time-consuming process of a direct measurement of moisture and retention soil characteristics (e.g. pF curves), more often indirect methods are sought, such that utilize relationships between basic physical properties of the soil, and characteristic moisture contents. In this paper, the relationships between individual soil texture classes, soil density and the content of organic matter with water retention at certain soil suction values (pF values) were analysed. The research was performed on 59 mineral soils of a diverse textural composition, from sands to heavy clays. The relationship between examined properties and the soil moisture at certain pF value was proved statistically.

Słowa kluczowe: retencja wody, potencjał macierzysty, wilgotność gleby, gęstość gleby, skład mechaniczny.

Key words: water retention, soil matrix potential, soil moisture, soil density, textural classes

WSTĘP

Krzywa retencyjności wodnej gleb jest funkcyjną zależnością pomiędzy potencjałem macierzystym i uwilgotnieniem utworu glebowego. Charakterystyka ta znajduje zastosowanie w modelowaniu obiegu wody w glebie, jak również stanowi podstawę do wyznaczania dawek polewowych w nawodnieniach. Do klasycznych metod pomiaru krzywej pF zalicza się metody stanu ustalonego, tj. blok pyłowy i komory ciśnieniowe [Klute 1986]. W Polsce metody pomiaru krzywej pF zostały opisane m. in. przez Zawadzkiego [1973]. Osiągnięcie stanu równowagi hydraulicznej w próbkach glebowych przy predefiniowanej wartości ciśnienia ssącego jest czasochłonne. Rzutuje to na całkowity czas opracowania charakterystycznych stanów uwilgotnienia składających się na krzywą retencyjności gleby.

Ze względu na skomplikowany i czasochłonny proces bezpośredniego pomiaru krzywej pF zaczęto stosować metody pośrednie wykorzystujące zależność pomiędzy podstawowymi właściwościami fizycznymi gleby a charakterystycznymi stanami uwilgotnienia. W praktyce badawczej metody tego typu nazywane są funkcjami „pedotransfer”. Ślusarczyk [1979] zaproponował metodę obliczeniową umożliwiającą prognozowanie polowej pojemności wodnej (PPW) oraz wilgotności trwałego wędnięcia (WTW) na podstawie pomierzonych krzywych uziarnienia oraz zawartości substancji organicznej. Zastosowaniem regresji wielokrotnej do szacowania charakterystycznych stanów uwilgotnienia krzywej pF na podstawie znajomości składu mechanicznego i właściwości fizycznych gleb zajmowali się również następujący autorzy: Trzecki [1974, 1976], Varallyay i Mironienko [1979], Rawls i Brakensiek [1982] oraz Shaap i in. [2001]. Zestawienie modeli opisujących krzywe pF w sposób pośredni (tzw. punktowe funkcje pedotransferu) przedstawiono m.in. w pracy Walczaka i in. [2004] oraz Żakowicza i in. [2009]. W przypadku znajomości analitycznego opisu funkcji retencjonowania wody w glebie możliwe jest przewidywanie krzywej pF w funkcji uwilgotnienia w całym zakresie zmienności ciśnień ssących. Tego typu metody pośrednie nazywane są ciągłymi funkcjami pedotransfer. Dla gleb mineralnych modele ciągłe krzywej pF opracowane zostały między innymi przez Wösten i in. [1999]. Wyniki badań nad ciągłymi funkcjami pedotransfer dla gleb torfowych przedstawiają w swoich pracach Gnatowski i in. [2006, 2010]. Zastosowanie wielowymiarowego rozkładu normalnego do szacowania parametrów krzywej pF było tematem badań i analiz Carsela i Parrisha [1988].

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy było oszacowanie funkcji pedotransfer dla mineralnych utworów glebowych o zróżnicowanym składzie mechanicznym oraz zawartości substancji organicznej. Proponowane modele zostały zweryfikowane poprzez porównanie obliczonych wartości wody ogólnie dostępnej (WOD) z wartościami wyznaczonymi na podstawie pomiarów.

METODYKA

Badaniom poddano 59 gleb mineralnych o zróżnicowanym składzie mechanicznym od piasków do gleb ciężkich. Pomiary charakterystycznych stanów uwilgotnienia w zakresie ciśnień ssących nieprzekraczających 100 cm słupa wody wykonano na bloku pyłowym [Zawadzki 1973]. Dla uzyskania wilgotności utworów glebowych przy ciśnieniach ssących pF od 2,7 do 4,2 zastosowano komory nisko i wysoko ciśnieniowe. Po wykonaniu pomiarów krzywych retencyjności wodnej oznaczano podstawowe właściwości fizyczne, tj. gęstość objętościową, gęstość fazy stałej oraz skład mechaniczny zgodnie z normą gleboznawczą BN-78/9180-11. Ponadto dla każdego z analizowanych utworów glebowych oznaczone zostały zawartości części organicznych metodą strat podczas prażenia w temperaturze 550°C. Do analizy statystycznej podstawowych właściwości fizycznych zastosowano metodę analizy regresji prostej [Zieliński 1998]. W pracy rozpatrywano modele liniowe i wykładnicze umożliwiające oszacowanie zależności regresyjnych pomiędzy zbadanymi zmiennymi charakteryzującymi podstawowe właściwości fizyczne gleb. Zdolności retencyjne gleb wyrażone zostały w postaci charakterystycznych stanów uwilgotnienia przy predefiniowanych wartościach potencjałów macierzystych. W celu możliwości predykcji właściwości retencjonowania wody w glebie zastosowano analizę regresji wielokrotnej [Elandt 1964]. Ogólną postać równania regresji wielokrotnej można zapisać następująco [Zieliński 1998]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon$$

gdzie:

- Y – zmienna objaśniana reprezentująca charakterystyczny stan uwilgotnienia,
- β_i – współczynniki regresji wielokrotnej,
- x_1, x_2, \dots, x_p – zmienne objaśniające reprezentujące właściwości fizyczne gleb.

Każdy ze stanów uwilgotnienia traktowany był jako zmienna objaśniana (Y) natomiast zmiennymi objaśniającymi były wartości cech fizycznych (x_1, x_2, \dots, x_p), tj. gęstość objętościowa, gęstość fazy stałej oraz zawartość substancji organicznej. Ponadto w równaniach regresji wielokrotnej uwzględniono zawartości poszczególnych frakcji glebowych. Wektor błędów losowych (ε) powinien reprezentować niezależne zmienne losowe o rozkładzie normalnym. W praktyce wartości ε_i interpretowane są, jako błędy losowe związane są z dokonywaniem obserwacji.

Krzywe retencyjności wodnej mają charakter zależności nieliniowych pomiędzy ciśnieniem ssącym a wilgotnością. Zatem do opracowania modeli pośrednich koniecznym było wyrażenie zmiennych objaśniających w postaci związków prosto lub krzywoliniowych oraz interakcji pomiędzy właściwościami fizycznymi. Dla wszystkich stanów uwilgotnienia reprezentujących krzywe pF rozpatrywano dwa typy modeli umożliwiające bezpośrednie określenie charakterystycznego stanu uwilgotnienia bądź też wartości transformowane (transformata pierwiastkowa). Kryterium doboru danego typu równania wynikało z dwóch założeń: maksymalnej zdolności predykcyjnej modelu reprezentowanej

przez poprawiony współczynnik determinacji oraz zgodności reszt modelu z rozkładem normalnym. Rozkład czynnika losowego sprawdzano przy zastosowaniu testu Shapiro-Wilka [Zieliński 1998].

WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 zestawiono dane charakteryzujące analizowaną populację danych. Średnie wartości uwilgotnienia zmniejszały się wraz ze wzrostem siły ssącej. Przy stanie bliskim nasycenia ($pF = 0, 4$) średnie wartości uwilgotnienia wynosiły około 45,5% i stopniowo się zmniejszały, osiągając w punkcie trwałego wędnięcia około 21%. Jednocześnie zaobserwowano wzrost rozstępu wilgotności wraz ze zwiększaniem się potencjału macierzystego wody glebowej. Zróżnicowanie to uwidoczniło się wyraźnie w wartościach współczynnika zmienności (CV). Na rysunku 1 przedstawiono wybrane krzywe retencyjności wodnej dla utworów glebowych zróżnicowanych pod względem składu mechanicznego. W grupie utworów piaszczystych większość objętości wody występuje w obrębie makroporów, co koreluje ze zmniejszeniem się uwilgotnienia w zakresie dostępności wody dla roślin.

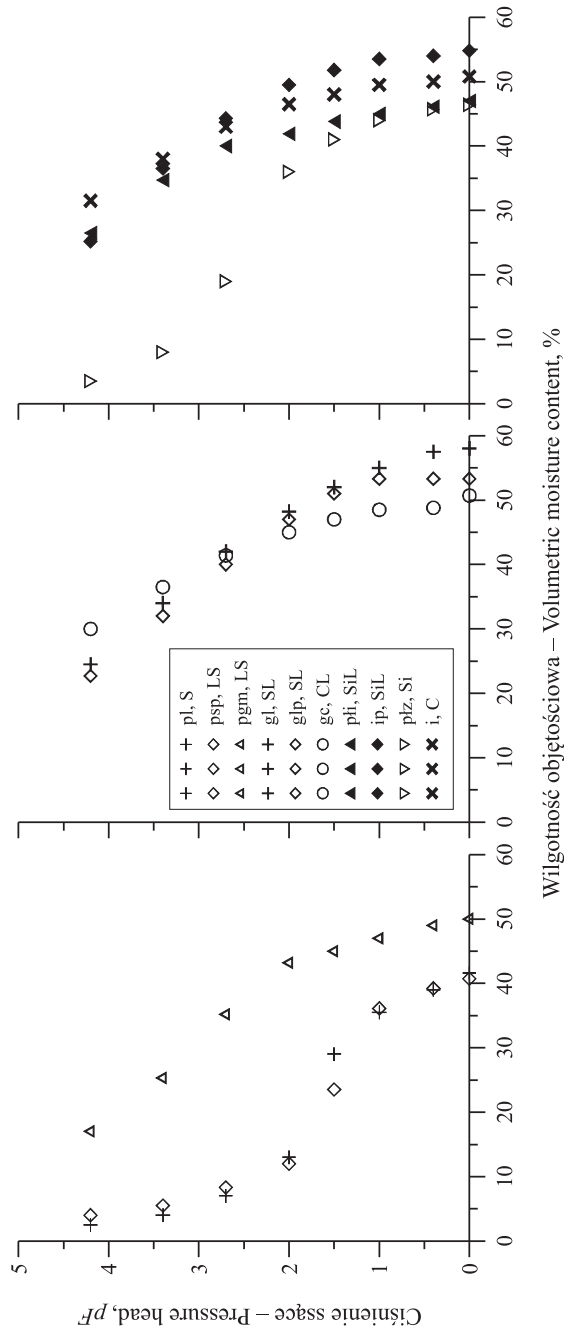
Tabela 1. Wartości podstawowych statystyk właściwości retencyjnych analizowanych utworów glebowych

Table 1. Basic statistics for water retention properties of analysed soils

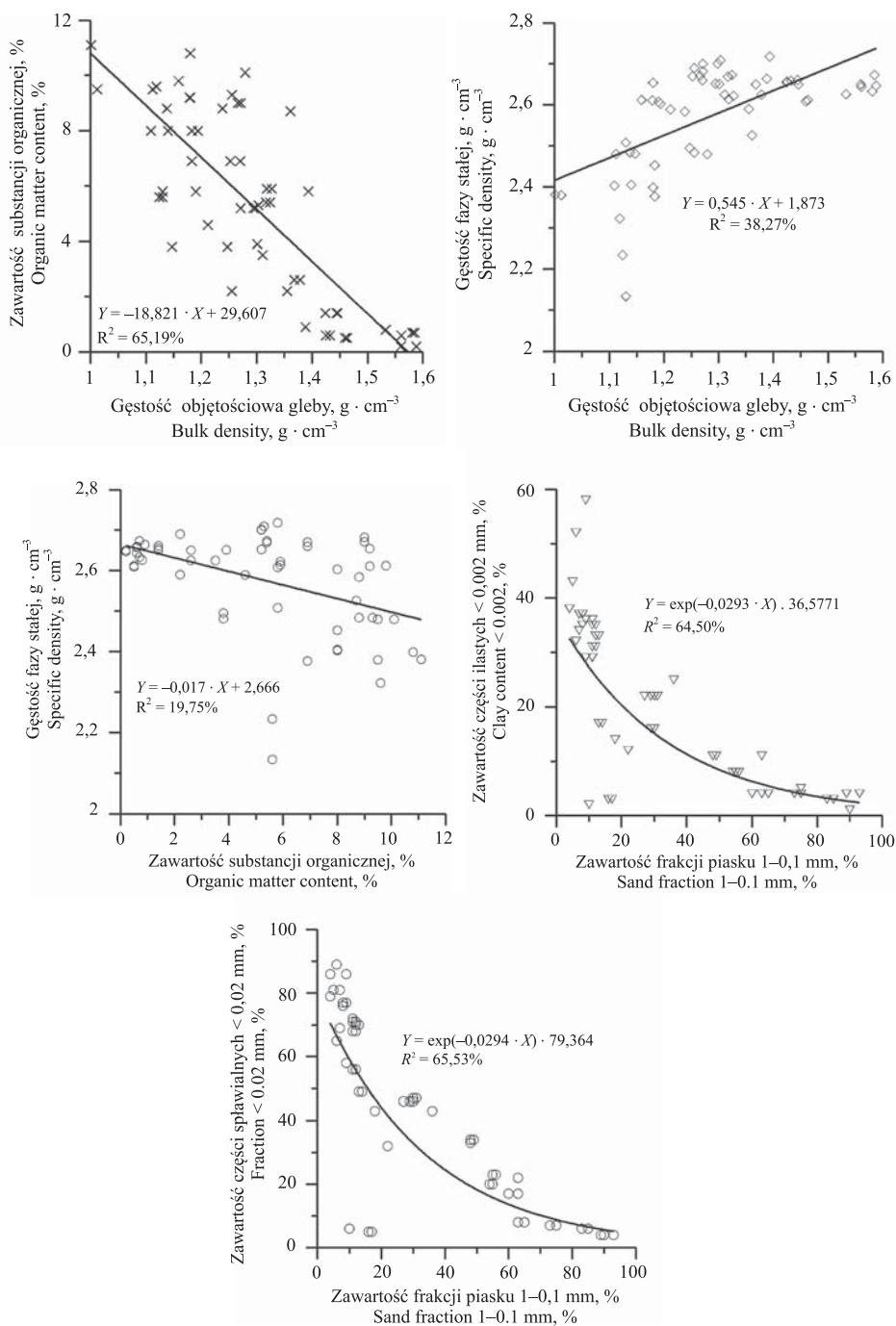
Miara statystyczna Statistics	Wartości pomierzone charakterystycznych stanów uwilgotnienia (q) krzywej pF , %						
	Measured volumetric moisture contents at predefined values of pF , %						
	$\theta_{pF=0,4}$	$\theta_{pF=1,0}$	$\theta_{pF=1,5}$	$\theta_{pF=2,0}$	$\theta_{pF=2,7}$	$\theta_{pF=3,4}$	$\theta_{pF=4,2}$
x_s	45,56	46,91	43,72	39,88	34,19	27,75	21,12
σ	4,68	6,06	9,22	11,77	12,47	12,32	10,61
min.	38,00	31,00	15,00	6,00	3,50	2,00	1,00
maks. – max	57,50	55,00	52,50	50,00	45,00	38,80	33,00
CV (%)	9,63	12,91	21,09	29,52	36,48	44,39	50,23

x_s – wartość średnia – average, %; σ – odchylenie standardowe – standard deviation, %; min. – wartość minimalna – minimum value, %; maks. – max – wartość maksymalna – maximum value, %; CV – współczynnik zmienności – coefficient of variability, %

Wraz ze wzrostem zawartości części pylastych oraz ilastych zmniejsza się ilość wody grawitacyjnej i jednocześnie wzrasta wartość pełnej pojemności wodnej. Przedstawione dane wskazują, że wybrana populacja danych obejmuje znaczne zróżnicowanie krzywych retencyjności wodnej gleb mineralnych. Potwierdzeniem zmienności uwilgotnienia były analizowane właściwości fizyczne i mechaniczne analizowanych utworów glebowych (rys. 2). Z przedstawionych na rysunku danych wynika, że istnieją związki liniowe pomiędzy gęstością gleby, gęstością fazy stałej i zawartości substancji organicznej.



Rys. 1. Przykładowe krzywe retencyjności wodnej reprezentujące analizowaną populację danych
 Fig.1. Examples of water retention curves representing analyzed data population



Rys. 2. Zależności statystyczne pomiędzy właściwościami fizycznymi analizowanych utworów glebowych

Fig. 2. Statistical relationships between physical properties of analysed soils population

Zależności pomiędzy poszczególnymi frakcjami uziarnienia dla analizowanych gleb miały charakter nieliniowy. Do opisu zależności pomiędzy frakcjami piasku i łu oraz piasku i części spławianych zastosowano modele wykładnicze. Przedstawione na rysunku 2 współczynniki determinacji wskazują na istotną zależność statystyczną pomiędzy sumarycznymi zawartościami frakcji charakteryzującymi analizowane utwory glebowe.

Wstępna analiza danych wykazała, że badana populacja utworów mineralnych reprezentuje szerokie spektrum zmienności właściwości retencyjnych i fizycznych (tab. 1 i rys. 2). Zakres materiału badawczego pozwolił na zastosowanie analizy regresji wielokrotnej do opracowania modeli empirycznych umożliwiających predykcję charakterystycznych stanów uwilgotnienia krzywej retencyjności wodnej. Wyniki analiz statystycznych zestawiono w postaci równań w tabeli 2. Zdolności odtwarzania zmiennych objaśnianych mierzone były wartościami poprawionego współczynnika determinacji (R_{adj}^2) uwzględniającego liczbę stopni swobody.

Tabela 2. Modele statystyczne charakterystycznych stanów uwilgotnienia
Table 2. Statistical models of moisture contents at predefined values of pF

Lp. No	Równanie regresji wielokrotnej Multiple regression equation	R_{adj}^2 , %
1	$\theta_{pF=0,4} = 52,1221 - 38,1506 \cdot \rho_b + 17,7467 \cdot \rho_p + 0,0127525 \cdot OC^2 - 0,0223535 \cdot IL$	97,56
2	$\theta_{pF=1,0} = 9,27685 + 64,6517 \cdot \rho_b + 0,265719 \cdot OC - 0,0358511 \cdot PIA - 0,197228 \cdot IL + 3,90265 \cdot \rho_p^2 - 41,2088 \cdot \rho_b^2 + 0,00253417 \cdot IL^2$	96,45
3	$\theta_{pF=1,5} = (-6,35665 + 25,7615 \cdot \rho_b - 13,0799 \cdot \rho_b^2 - 0,00827101 \cdot IL + 0,184544 \cdot \rho_b^2 \cdot \rho_p^2 - 0,0000159634 \cdot PIA^2 \cdot IL)^2$	95,04
4	$\theta_{pF=2,0} = (-18,7247 + 47,3855 \cdot \rho_b - 21,073 \cdot \rho_b^2 - 0,0855538 \cdot SPLAW + 0,000200187 \cdot SPLAW^2 - 0,00000689571 \cdot PIA^2 \cdot SPLAW + 0,0240447 \cdot \rho_p \cdot SPLAW)^2$	92,75
5	$\theta_{pF=2,7} = (-15,0855 + 39,7289 \cdot \rho_b - 18,0998 \cdot \rho_b^2 - 0,0490608 \cdot SPLAW - 0,00000580255 \cdot PIA^2 \cdot SPLAW + 0,0207037 \cdot \rho_p \cdot SPLAW)^2$	93,09
6	$\theta_{pF=3,4} = (-10,3594 + 29,1203 \cdot \rho_b - 13,6578 \cdot \rho_b^2 + 0,00771627 \cdot \rho_p \cdot SPLAW)^2$	91,69
7	$\theta_{pF=4,2} = (-3,87197 + 17,8961 \cdot \rho_b - 9,75799 \cdot \rho_b^2 - 0,000323457 \cdot SPLAW^2 + 0,00618455 \cdot \rho_b^2 \cdot PIA - 0,0000108911 \cdot PIA^2 \cdot SPLAW + 0,0433843 \cdot \rho_p \cdot SPLAW)^2$	91,08

ρ_b – gęstość objętościowa gleby – bulk density, $g \cdot cm^{-3}$; ρ_p – gęstość fazy stałej – specific density, $g \cdot cm^{-3}$; OC – zawartość substancji organicznej – organic matter contents, %; PIA – zawartość frakcji piaszczystej w zakresie średnic zastępczych 1–0,1 mm – sand fraction contents for equivalent diameters 1–0.1 mm, %; $SPLAW$ – zawartość cząstek mniejszych od 0,02 mm – content of particles smaller than 0.02 mm, %; IL – zawartość części ilastych dla średnic zastępczych < 0,002 mm – clay fraction contents for equivalent diameters < 0.002 mm

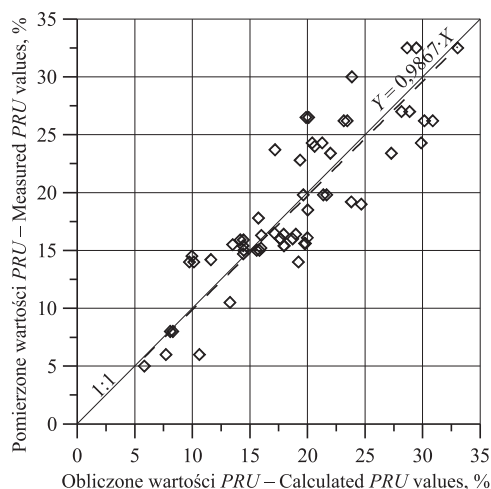
Opracowane równania regresji wielokrotnej wykazują, że przy niskich ciśnieniach ssących istotny wpływ na retencjonowanie wody w glebie miały podstawowe właściwości fizyczne (ρ_b , ρ_p , OC), jak również frakcja piasku i łu. Przy wyższych wartościach potencjału macierzystego ($pF > 1,5$) oprócz podstawowych cech gleby uwidocznił się wpływ zawartości części spławianych na utrzymywanie wody w glebie. Zawartości cząstek < 0,02 mm miały znaczenie przy szacowanych przez Somorowskiego i Szuniewiczza [1964] zapasach wody w profilach glebowych z tzw. płytkim zwierciadłem wody. Dla każdego

z opracowanych równań wartości współczynników determinacji charakteryzują się wartościami powyżej 90%. Oznacza to, że dla utworów glebowych o cechach podobnych do analizowanych w pracy można stosować zaproponowane równania empiryczne do pośredniego szacowania zdolności retencyjnych. Oprócz oceny, jakości dopasowania dla każdego z zaproponowanych modeli empirycznych wykonano analizę resztową. Miało to na celu sprawdzenie hipotezy o rozkładzie normalnym wektora błędów losowych (ϵ_i). Wyniki testu Shapiro-Wilka zestawiono w tabeli 3. Dla każdego z równań wartość krytyczna testu okazała się mniejsza od empirycznej. Pozwoliło to w konsekwencji na przyjęcie hipotezy, że wektory reszt były niezależnymi zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym.

Weryfikacji opracowanych równań regresji dokonano na podstawie potencjalnej retencji użytecznej (*PRU*), rozumianej jako różnica wilgotności przy ciśnieniach ssącym *pF* równym 2,0 oraz 4,2. Dla potrzeb powadzonych analiz wartości *PRU* zostały obliczone na podstawie danych pomiarowych oraz przy zastosowaniu równań 4 i 7 (tabela 2). Wyniki obliczeń (rys 3) wykazały, że współczynnik nachylenia zależności liniowej pomiędzy obliczonymi i pomierzonymi wartościami *PRU* wyniósł 0,9867. Współczynnik korelacji (*r*) dla opracowanej zależności wyniósł około 0,87. Można, zatem stwierdzić, że modele regresyjne uwzględniające właściwości fizyczne gleb mineralnych mogą być stosowane do opracowania potencjalnej retencji użytecznej.

Tabela 3. Statystyki testowe Shapiro-Wilka w analizie resztowej opracowanych równań regresji
Table 3. Statistics of Shapiro-Wilk test in the analysis of residual for developed regression equations

Statystyka testowa Statistics	Zmienne zależne – Dependent variables							
	$\theta_{pF=0,4}$	$\theta_{pF=1,0}$	$\theta_{pF=1,5}$	$\theta_{pF=2,0}$	$\theta_{pF=2,7}$	$\theta_{pF=3,4}$	$\theta_{pF=4,2}$	
Statystyka testowa Shapiro-Wilka Statistic of Shapiro-Wilk test	W_a	0,966	0,971	0,954	0,969	0,979	0,983	0,976
Wartość krytyczna Shapiro-Wilka Critical value of Shapiro-Wilk	W	0,95332						



Rys. 3. Obliczone i pomierzone wartości *PRU*
Fig. 3. Calculated and measured values of *PRU*

WNIOSKI

1. Badane gleby mineralne charakteryzują się szerokim zakresem zmienności właściwości fizycznych i retencyjnych. Wyznaczone równania regresji wielokrotnej wykazują, że istotny wpływ na retencjonowanie wody w badanych glebach miała gęstość objętościowa, gęstość fazy stałej, zawartość substancji organicznej oraz skład mechaniczny reprezentowany przez frakcję piasku, części sypawiane i ilaste.
2. Wysoki współczynnik determinacji ($R^2 > 90\%$) dla wszystkich równań oraz potwierdzenie hipotezy o normalności rozkładu wektora błędów losowych wskazuje, że mogą być one stosowane do pośredniego szacowania zdolności retencyjnych w utworach glebowych o podobnych właściwościach.
3. Porównanie pomierzonych i obliczonych za pomocą równań 4 i 7 wartości potencjalnej retencji użytecznej wykazało, że nachylenie zależności liniowej zbliżone jest do jedności (współczynnik kierunkowy prostej wynosi 0,99), a współczynnik korelacji wynosi 0,87. Przeprowadzona weryfikacja potwierdza, że zaproponowane modele regresyjne mogą być stosowane do wyznaczania charakterystyk retencyjnych gleb.

PIŚMIENNICTWO

- Carsel R.F., Parrish R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24, 755–769.
- Elandt R., 1964. *Statystyka matematyczna w zastosowaniu do doświadczeń rolniczych*. PWN Warszawa.
- Gnatowski T., Szatyłowicz J., Brandyk T., Kechavarzi C., 2010. Hydraulic properties of fen peat soils in Poland. *Geoderma* 154(3–4), 188–195.
- Gnatowski T., Szejba D., Oleszczuk R., Brandyk T., Sosulski T., 2006. Wpływ właściwości fizycznych i chemicznych utworów torfowych z obszaru Doliny Biebrzy na zdolności retencjonowania wody. [W:] Brandyk T., Szajdak L., Szatyłowicz J. (red.). *Właściwości fizyczne i chemiczne gleb organicznych*. Wyd. SGGW Warszawa, 65–74.
- Klute A., 1986. *Methods of soil analysis. Cz. 1. Physical and mineralogical methods*. Agron. Monogr. 9. ASA & SSA Madison (Wisconsin).
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., 1982. Estimation soil water retention from soil properties. *J. Irrig. Drain. Div.* 108(2), 166–171.
- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th., 2001. Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *J. Hydrol.* 251, 163–176.
- Ślusarczyk E., 1979. Określenie retencji użytecznej gleb mineralnych dla prognozowania i projektowania nawodnień. *CBSiPWM Bipromel 10/75. Melior. Rol. Biur. Inf.* 3.
- Somorowski Cz., Szuniewicz J., 1964. Dyspozycyjne rezerwy wilgoci glebowej w bilansie wodnym łąk nawadnianych. *Gosp. Wodna* 8.
- Trzecki S., 1974. Determination of water capacity of soils on the basis of their mechanical composition. *Rocz. Glebozn.* 25 (dodatek), 33–44.
- Trzecki S., 1976. Możliwości wyznaczania wilgotności trwałego wędnięcia roślin na podstawie maksymalnej higroskopijności i zawartości części sypawianych w glebach mineralnych. *Rocz. Glebozn.* 27, 11–17.
- Varallyay G., Mironenko E.V., 1979. Soil water relationships in saline and alkali conditions. [W:] V.A. Kovda, I. Szabolcs (red.), *Modeling of Salinization and Alkalinization*. *Agrokemia es Talatjan* 28 (Suppl.), 33–82.

- Walczak R., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2004. Pedotransfer studies in Poland. [W:] Ya. Pachepsky, W.J. Rawls (red.). *Developments in Soil Science*. T. 30. Elsevier, 449–463.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169–185.
- Żakowicz S., Hewelke P., Gnatowski T., 2009. *Podstawy infrastruktury technicznej w przestrzeni rolniczej*. Wyd. SGGW Warszawa.
- Zawadzki S., 1973. Laboratoryjne oznaczanie zdolności retencyjnej utworów glebowych. *Wiad. IMUZ* 11(2), 11–30.
- Zieliński W., 1998. *Analiza regresji*. Fundacja Rozwój SGGW Warszawa.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.03.2013