

problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK · ZAKŁAD AGROFIZYKI



Ossolineum zeszyt 41 rok 1984

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
ZAKŁAD AGROFIZYKI

PROBLEMY AGROFIZYKI 41

RYSZARD WALCZAK

MODELOWE BADANIA ZALEŻNOŚCI RETENCJI WODNEJ OD PARAMETRÓW FAZY STAŁEJ GLEBY

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

1984

Komitet redakcyjny

prof. dr JAN GLIŃSKI (redaktor naczelny)

prof. dr IGNACY DECHNIK, doc. dr BOGUSŁAW SZOT

Rozprawa habilitacyjna

(Streszczenie)

Okładkę projektował Zygmunt Ziemka

Redaktor Wydawnictwa Jacek Sikora

Redaktor techniczny Bożena Pojasek

© Copyright by Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1984
Printed in Poland

PL ISSN 0137-6586

ISBN 83-04-01752-0

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1984.
Nakład: 500 egz. Objętość: ark. wyd. 4,10, ark. druk. 4,50. Papier
offsetowy kl. V, 70 g, 61 x 86. Oddano do drukarni 16 I 1984.
Druk ukończono w czerwcu 1984. Wrocławska Drukarnia Naukowa.
Zam. 1016 84 — U-6. Cera zł 35.—

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie	5
Metodyka badań	12
Założenia	12
Materiał glebowy	15
Procedura wykonywania pomiarów	16
Wyniki badań, omówienie i interpretacja	21
Analiza jakościowa wyników eksperymentalnych	21
Analiza statystyczna uzyskanych wyników	29
Opis programu analizy regresji wielokrotnej	29
Dobór optymalnego zespołu parametrów fazy stałej gleby w modelu do wyliczania przebiegu krzywej retencji wodnej	34
Podsumowanie	58
Wnioski	62
Literatura	63

WPROWADZENIE

Gleba jako środowisko rozwoju systemu korzeniowego roślin jest obiektem zróżnicowanych zabiegów agrotechnicznych, których celem jest zapewnienie roślinie możliwie zbliżonych do optymalnych warunków z punktu widzenia jej potrzeb. Do wzrostu i rozwoju roślina wymaga między innymi dostarczenia systemowi korzeniowemu odpowiedniej ilości wody przy właściwych warunkach aeracji i wystarczającej ilości substancji pokarmowych [27, 36, 76, 77].

W trójfazowym ośrodku, jakim jest gleba, konfiguracja fazy stałej decyduje o ogólnej porowatości i rozkładzie porów glebowych wg ich wymiarów, co oznacza, że warunkuje tym samym przebieg krzywej retencji wodnej gleby. Konfiguracja fazy stałej gleby determinowana jest rozkładem granulometrycznym oraz zawartością substancji organicznej, mającymi wpływ na zgrużenie gleby, co z kolei decyduje o zagęszczeniu naturalnym i wymuszonym. O ilości retencjonowanej wody przez glebę decyduje również zdolność adsorbowania jej na powierzchni cząstek glebowych. Wymienione właściwości, poza zagęszczeniem, są stabilnymi cechami gleby.

Gleba w warunkach naturalnych dąży do pewnego, określonego stanu zagęszczenia warunkowanego właściwościami fizycznymi fazy stałej, chemizmem i procesami biologicznymi. Zmiany zagęszczenia najintensywniej występują w trakcie obróbki mechanicznej - w wyniku zamierzonych zabiegów uprawowych oraz towarzyszących im mimowolnym naciskom kół ciągników i maszyn rolniczych. Po wykonaniu zabiegów agrotechnicznych następuje ponownie proces naturalnego samozagęszczenia się gleby, tzw. osiadanie gleby [20, 69].

Określenie przebiegu krzywej retencji wodnej na podstawie parametrów fazy stałej oraz jej zagęszczenia, jako parametru zmiennego w cza-

sie, umożliwia przewidywanie stosunków powietrzno-wodnych w glebie, będących następstwem zabiegów agrotechnicznych. Może też znaleźć zastosowanie w symulacyjnych i prognostycznych modelach matematycznych ruchu i zużycia wody [15, 19, 21, 27, 35, 81/.

Badania obejmujące budowę fazy stałej gleby i jej charakterystyki wodno-powietrzne, determinujące wzrost i rozwój roślin można podzielić na:

- dotyczące wpływu budowy fazy stałej gleby i różnych poziomów uwilgotnienia na plonowanie roślin,
- dotyczące wpływu budowy fazy stałej gleby na jej charakterystyki hydrofizyczne,
- dotyczące poznania ilościowych związków między parametrami fazy stałej gleby a jej charakterystykami wodnymi.

W licznych badaniach uprawowych uwzględniano rozkład granulometryczny gleb, zawartość próchnicy oraz zagęszczenie i agregację przy różnym uwilgotnieniu jako czynniki determinujące stosunki wodno-powietrzne gleb. Wykazano wyraźny wpływ zagęszczenia gleby na plonowanie roślin oraz określono wartości krytyczne, których przekroczenie powoduje wyraźne zmniejszenie plonów. Stwierdzono, że wartości krytyczne zagęszczenia zależne są od rozkładu granulometrycznego gleby i zawartości próchnicy, a ponadto są charakterystyczne dla konkretnych kultur uprawowych. Małych zagęszczeń wymagają m.in. ziemniak, burak cukrowy, kukurydza, natomiast dużych - rośliny zbożowe [5, 6, 8, 24, 51, 55, 59, 62, 65, 79/.

Wiele prac badawczych dotyczyło rozwoju systemu korzeniowego w różnych rodzajach gleb w zależności od zagęszczenia i uwilgotnienia. Stwierdzono, że istnieją pewne krytyczne wartości zagęszczenia, zależne od rodzaju gleby, ograniczające wzrost korzeni. Uzyskane wyniki, bardzo cenne z punktu widzenia uprawy roli, nie wyjaśniają, które z bezpośrednich czynników (wilgotność, możliwość dyfuzji tlenu, aktywność biologiczna, opór na penetrację) determinowanych rozkładem granulometrycznym, zawartością próchnicy i zagęszczeniem gleby ograniczają rozwój systemu korzeniowego roślin, warunkującego ich plonowanie [8, 46, 53, 54, 60, 61, 63, 64, 66/.

W celu wyjaśnienia obserwowanych reakcji roślin na efekty przeprowadzonych zabiegów agrotechnicznych badano związki między rozkładem granulometrycznym, powierzchnią właściwą, zawartością próchnicy i zagęszczeniem a wielkościami fizycznymi określającymi warunki panujące w glebie, takimi jak: krzywa retencji wodnej, rozkład porów wg wymiarów, współczynniki transportu wody, makro- i mikrodryfuzji gazów oraz opór na penetrację. Krzywa retencji wodnej jest podstawową charakterystyką fizyczną, opisującą warunki panujące w glebie, ponieważ na jej podstawie wylicza się rozkład porów ekwiwalentnych, a zawartość wody w sposób zasadniczy wpływa na pozostałe parametry opisujące transport wody, wymianę gazową i właściwości mechaniczne gleby [27, 35, 36, 76].

Nieliczne prace dotyczyły badania związków parametrów fazy stałej gleby (powierzchnia właściwa, zawartość poszczególnych frakcji granulometrycznych, zagęszczenie i próchnica) z zawartością wody przy wybranych wartościach pF, a także ilością wody dostępnej roślinom. Wyniki tych prac, w większości analizowane jakościowo, dotyczyły badania wpływu poszczególnych parametrów na kształtowanie się krzywej retencji wodnej gleby.

Stwierdzono, że powierzchnia właściwa istotnie wpływa na zdolności retencyjne gleby oraz że wpływ innych parametrów fazy stałej na przebieg krzywej retencji wodnej zależy od wielkości powierzchni właściwej. Zawadzki, Michałowska i Stawiński [82, 84] badali wpływ powierzchni właściwej gleb mineralnych o zróżnicowanej zawartości próchnicy i różnym rozkładzie granulometrycznym na zawartość wody przy wybranej wartości pF. Stwierdzili ścisłą zależność pomiędzy powierzchnią właściwą a zawartością wody przy pF równym: 1,5; 2; 2,5; 3; 4,2. Domżał [17] badał wpływ zagęszczenia oraz powierzchni właściwej na zawartość wody przy wybranych wartościach pF oraz zawartości wody użytecznej i produkcyjnej. Dowiódł, że spadek pojemności wodnej przy $pF < 3$ i wzrost przy $pF > 3$ wywołane wzrostem zagęszczenia gleby są istotnie skorelowane z wielkością powierzchni właściwej. Również zmiany retencji wody produkcyjnej i użytecznej wywołane wzrostem zagęszczenia korelują istotnie z powierzchnią właściwą. Wykazał ponad-

to, że gdy powierzchnia właściwa gleby przekracza wartość $70-80 \text{ mg}^{2-1}$, to wzrost zagęszczenia wywołuje nieproporcjonalnie wysokie zmiany pojemności i retencji wodnej w glebie. Oniszczenko i Miczurin [40, 41, 42] udowodnili, że wraz ze wzrostem powierzchni właściwej gleby i jej zagęszczenia zwiększa się stosunek powierzchni porów do ich objętości, co powoduje wzrost ilości wody adsorbowanej dużymi siłami, podkreślając, że przy powierzchni właściwej większej od $150 \text{ m}^2 \text{ cm}^{-3}$ cała woda w glebach bez struktury agregatowej staje się wodą powierzchniowo adsorbowaną.

Jakościowe związki pomiędzy rozkładem granulometrycznym a przebiegiem krzywej retencji wodnej gleby badano głównie jako zależności między zawartościami poszczególnych frakcji granulometrycznych a ilością wody przy różnych wartościach pF [17, 18, 37, 44, 70, 71, 80]. Turski, Domżał i Słowińska-Jurkiewicz [70, 71] stwierdzili, że frakcja iłu koloidalnego wywiera istotny dodatni wpływ na maksymalną higroskopijność oraz zawartość wody niedostępnej dla roślin. Determinując właściwości mechaniczne gleby, wpływa na ich charakterystyki wodne. Domżał [17, 18] opisał wpływ zawartości koloidów i frakcji spławialnych na przebieg krzywych retencji wodnej, podkreślając jednocześnie, że wpływ zagęszczenia na gromadzenie wody zależy od rodzaju gleby, tj. jej rozkładu granulometrycznego - szczególnie w zakresie pF 2-2,7. W celu określenia wpływu rozkładu granulometrycznego na wzajemną zależność wilgotności i potencjału wody Oniszczenko i Miczurin [44] zbadali związki między 4 wybranymi frakcjami granulometrycznymi czarnoziemiu a wilgotnością, potencjałem wody i współczynnikami transportu wody. Wykazali oni różny wpływ badanych frakcji granulometrycznych na wymienione parametry wodne gleby. Zawadzki [80] stwierdził istotny wpływ rozkładu granulometrycznego na przebieg krzywych retencji wodnej gleb, jak również na wielkość potencjalnej retencji użytecznej, uwzględniając przede wszystkim frakcję o średnicy mniejszej od 0,02 mm.

Wpływ zagęszczenia na przebieg krzywych retencji wodnej gleb, jak wykazały liczne badania, jest bardzo istotny, lecz równocześnie uwarunkowany rodzajem gleby i wielkością jej powierzchni właściwej [1, 2, 3, 7, 9, 10, 17, 28, 32, 38, 43, 57, 72, 73, 74]. Udokumentowano,

że wzrost zagęszczenia fazy stałej wywołuje we wszystkich glebach zmniejszenie pojemności wodnej w zakresie pF 0-2 oraz prowadzi do zwiększenia ilości wody silnie związanej ($pF > 3,4$), w tym również ilości wody przy $pF = 4,2$ - o 0,2-0,3% w glebach piaszczystych, 4-6% w najcięższych glinach [17]. Związek zagęszczenia gleby z charakterystyką potencjału wody w funkcji wilgotności, z uwzględnieniem efektu histerezy, badali Clausnitzer [9, 33] i Walczak [72, 73, 74]. Wykazali, że zagęszczenie istotnie wpływa na wielkość efektu histerezy zależności potencjału wody glebowej od wilgotności, szczególnie dla niskich wartości zagęszczeń gleby.

Rola próchnicy w kształtowaniu retencji wodnej gleb wiązana jest zwykle z jej właściwościami hydrofizycznymi oraz wpływem na mikrostrukturę gleby. Bezpośrednie związki próchnicy i wilgotności, przy wybranych wartościach pF , są trudne do uchwycenia, niemniej jako czynnik modyfikujący fizyczne właściwości gleby próchnica jest zwykle uwzględniana, będąc jednym z parametrów wpływających na retencję wodną [14, 17, 25, 47, 70, 71].

Znajomość przebiegu krzywych retencji wodnej gleb jest szczególnie ważna z punktu widzenia praktyki rolniczej, ponieważ na ich podstawie można jednoznacznie określić zawartość wody w glebie odpowiadającą danej wartości pF , zarówno z pominięciem, jak i uwzględnieniem efektu histerezy. W tym ostatnim przypadku korzysta się ze specjalnych programów pozwalających wyznaczyć wilgotność po dowolnych zmianach potencjału wody. Krzywe retencji wodnej są używane również do wyliczania rozkładu (wg wymiarów) porów w glebie, z tym, że w procesie osuszania określa się rozkład porów, zakładając ich regularne kształty. Natomiast biorąc pod uwagę efekt histerezy (domenowa teoria histerezy), wyliczać można rozkład porów z uwzględnieniem nieregularności ich kształtów [20, 26, 31, 34, 74].

Wyniki badań zależności przebiegu krzywej retencji wodnej gleby od parametrów jej fazy stałej były podstawą do dalszych prac, mających na celu opracowanie modeli matematycznych, ujmujących te związki ilościowo. Modele takie umożliwiają wyliczenie ilości wody przy poszczególnych wartościach pF na podstawie znajomości parametrów fazy stałej

gleby. Twórcy modeli uwzględniali w analizie statystycznej wyników badań eksperymentalnych różne parametry charakteryzujące budowę fazy stałej gleby i w zależności od ich wyboru uzyskiwali równania o zróżnicowanej zgodności wartości wyliczonych ze zmierzonymi.

Jong i Loebell [30/], posługując się metodą regresji określili wzory do wyliczania zawartości wody przy ciśnieniach wynoszących 0,33 i 15 atmosfery ($pF = 2,5 : 4,2$) jako funkcję zawartości frakcji pylastej i ilastej oraz próchnicy. Autorzy jednak odnieśli się z ostrożnością do uniwersalnego stosowania uzyskanych równań.

Rivers i Ship [50/] zaproponowali równania regresji, z których wyliczali połowę pojemności wodną oraz zawartość wody przy ciśnieniach 0,1; 0,15 i 0,20 bara ($pF = 2; 2,2; 2,3$) jako funkcję ilości drobnego piasku, pyłu i ilu oraz kombinacji ich sum. Badania przeprowadzili na piaskach i piaskach gliniastych.

Skalaban [56/], na przykładzie 8 prób glebowych, stwierdził, że zależność między potencjałem wody a wilgotnością można wyrazić w postaci równania uwzględniającego (w formie parametrów) zawartości: frakcji o średnicy mniejszej od 0,01 mm, węglanów oraz innych związków rozkładanych przez HCl w glebie.

Ghosh [22/] zaproponował do wyliczania krzywej retencji równanie wykładnicze, gdzie wykładnikiem jest skomplikowane wyrażenie o parametrach takich, jak obecność poszczególnych frakcji granulometrycznych i ich kombinacji czy wartość tzw. ciśnienia wejścia powietrza.

Trzecki [68/] przedstawił równanie do wyliczania połowej pojemności wodnej, punktu początku hamowania wzrostu roślin i punktu trwałego więdnienia roślin jako funkcji zawartości 6 frakcji granulometrycznych gleb i zawartości związków organicznych.

Varallyay i inni [78/] dokonali wyliczenia współzależności między potencjałem wody glebowej a wilgotnością, ujmującego równaniem regresji kwadratowej zawartość frakcji 0,25-0,05 mm i mniejszej od 0,002 mm oraz zagęszczenie. Proponują również, w celu uzyskania lepszej dokładności, stosowanie różnych postaci równań dla poszczególnych poziomów genetycznych czarnoziemów.

Reeve i inni [48] zbadali wpływ zagęszczenia na ilość wody dostępnej, pojemność wodną i powietrzną poszczególnych poziomów genetycznych w profilu glebowym i opracowali dla nich równania regresji liniowej, których parametrami były: zagęszczenie i zawartości poszczególnych frakcji granulometrycznych gleby.

Salter i Williams [52], korzystając z zawartości w glebie pyłu, ilu, substancji organicznej oraz piasku (grubego i drobnego) ujętych w równanie regresji wielokrotnej, wyznaczyli górną i dolną granicę wody dostępnej roślinom, zastrzegając ograniczone stosowanie zaproponowanych wzorów. Formuły zostały opracowane dla dwóch różnych systematyk rozkładu granulometrycznego.

Gupta i Larson [25] na podstawie analizy 13 gleb zaproponowali, wykorzystując metodę regresji wielokrotnej, model wyliczania wilgotności (wyrażonej w jednostkach objętości) dla 12 punktów krzywej retencji. Danymi wyjściowymi były: zawartości frakcji piaszczystej, pylastej i ilastej, substancji organicznej oraz zagęszczenie. Na uwagę zasługuje fakt nieuwzględnienia składu mineralogicznego iłów, mimo że autorzy wiedzieli o znaczącej obecności montmorylonitu, kaolinitu, illitu, chlorytu i wermikulitu w materiale badawczym.

Rawls i inni [47] z danych dotyczących ponad 5 tysięcy poziomów genetycznych gleb, cytowanych w piśmiennictwie, metodą wielokrotnej regresji liniowej wyznaczyli równania do wyliczania zawartości wody (w jednostkach objętości) dla 12 wartości potencjału wody glebowej. Parametrami równania były: zawartość frakcji piaszczystej, pylastej i ilastej, zawartość próchnicy, zagęszczenie oraz wilgotność - wyrażona w jednostkach objętości - dla ciśnień 0,33 i 15 bara ($pF = 2,5; 4,2$). Zależności dla poszczególnych potencjałów wody uwzględniały różną liczbę parametrów, a skorzystanie z nich przy zmiennym zagęszczeniu wymagało eksperymentalnego wyznaczenia retencji przy ciśnieniu 0,33 bara ($pF = 2,5$).

Zacytowane prace dotyczyły głównie badań jakościowych i ilościowych związków retencji wodnej z poszczególnymi parametrami charakteryzującymi fazę stałą, tj. zawartością poszczególnych frakcji granulometrycznych, powierzchnią właściwą, zagęszczeniem i zawartością próchnicy.

Wielu badaczy dociekało ilościowych związków zespołu właściwości fazy stałej gleby z jej zdolnością retencyjną, opracowując wieloparametryczne modele matematyczne opisujące krzywe retencji. Modele te nie uwzględniały jednak optymalnego kompleksu istotnych parametrów fazy stałej gleby, co potwierdza fakt nieuwzględniania przez nie powierzchni właściwej gleby, chociaż jej bardzo istotna rola w kształtowaniu przebiegu krzywej retencji została wykazana w licznych pracach [12, 13, 16, 17, 39, 40, 82]. Ponadto we wszystkich proponowanych równaniach rozkład granulometryczny jest wyrażany w postaci procentowych zawartości wybranych frakcji. Nie podjęto natomiast próby znalezienia wskaźnika, który w sposób kompleksowy wyrażałby rozkład granulometryczny w całości i byłby w sposób istotny związany z przebiegiem krzywej retencji.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie na modelowym materiale glebowym wpływu kompleksu parametrów charakteryzujących stan fizyczny fazy stałej gleby na przebieg krzywej retencji wodnej gleby z uwzględnieniem efektu histerezy oraz opracowanie modelu matematycznego, tzn. układu równań do wyliczenia wybranych punktów krzywej retencji, zawierającego najistotniejsze parametry z punktu widzenia kształtowania zdolności do gromadzenia wody w glebie.

METODYKA BADAŃ

Założenia

W ramach realizacji założonego celu pracy postanowiono:

- przeprowadzić badania eksperymentalne wpływu parametrów fazy stałej gleb mineralnych na ich zdolność gromadzenia wody dla sztucznie zagęszczonych próbek glebowych, zawierających jedynie części ziemiste;
- stosować w badaniach standardowe metody wyznaczania fizycznych charakterystyk gleb oraz przedstawiać wilgotność w procentach wagowych, a potencjał wody w jednostkach pF, logarytmując ciśnienie "ssące" gleby wyrażone w hPa. Zasada stosowania rozpowszechnionych standardowych metod pomiarowych spowodowała pewne ograniczenia w wyborze materiału glebowego do badań, wynikające z niemożliwości oznaczenia wpływu za-

gęszczenia na zawartość wody przy $pF = 3,7$ i $4,2$. Trudność polega na tym, że stosowane cylinderki w komorach ciśnieniowych nie pozwalają dokładnie wyznaczyć objętości próbki [17]. Z dotychczasowych badań wynika, że dla gleb o powierzchniach właściwych mniejszych od $80 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (17, 18/ oraz $150 \text{ m}^2 \text{ cm}^{-3}$ [40, 42/ wpływ zagęszczenia na zawartość wody przy wysokich wartościach pF jest praktycznie nieistotny;

- uwzględnić parametry charakteryzujące budowę fazy stałej gleb, które na podstawie analizy dotychczasowych badań istotnie wpływają na charakterystyki hydrofizyczne gleb. Są to: powierzchnia właściwa (jako wskaźnik uwzględniający zarówno rozwinięcie powierzchni cząstek glebowych, jak też jakość minerałów ilastych), nakład granulometryczny z podziałem frakcji wg normy Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego (jako charakterystyka przestrzennej konfiguracji cząstek glebowych z założeniem znalezienia kompleksowego wskaźnika liczbowego rozkładu granulometrycznego istotnie związanego z przebiegiem krzywych retencji wodnej), zagęszczenie gleby (jako wskaźnik upakowania cząstek glebowych, obrazujący zmiany porowatości ogólnej i rozkładu porów wg wymiarów) oraz zawartość próchnicy (jako wskaźnik ilości substancji organicznej, wpływających na powiązanie cząstek glebowych);

- przeanalizować statystycznie, na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych, interakcję parametrów fazy stałej gleby i przebiegu krzywych retencji, wykorzystując metodę liniowej regresji wielokrotnej;

- opracować model matematyczny, tj. układ równań opisujący przebieg krzywej retencji wodnej, i wprowadzić do niego (poza stosowanymi) nie używane dotychczas w tego typu modelach dwa parametry: powierzchnię właściwą mierzoną metodą adsorpcji pary wodnej i syntetyczny liczbowy wskaźnik rozkładu granulometrycznego.

W ramach poszukiwania optymalnego wskaźnika kompleksowego, obrazującego rozkład granulometryczny gleby, istotnie związanego z przebiegiem krzywej retencji, przyjęto do analizy cztery wielkości: powierzchnię geometryczną (S), wskaźnik rozkładu wymiaru cząstek (f), średnią statystycznie średnicę cząstek (D) oraz średnią statystycznie średnicę cząstek (R).

Powierzchnia geometryczna (S) jako parametr jest to powierzchnia właściwa cząstek glebowych, wyliczana przy założeniu kulistości wszystkich cząstek glebowych w następujący sposób:

$$S = \frac{\sum_i^k \frac{4\pi \left(\frac{\bar{D}_i}{2}\right)^2}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\bar{D}_i}{2}\right)^3 \rho} \cdot P_i}{100\%} = \frac{\sum_i^k \frac{6}{\rho \bar{D}_i} \cdot P_i}{100\%} =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^K \frac{12 P_i}{\rho (\bar{D}_{i_{\max}} + \bar{D}_{i_{\min}})}}{100\%} \quad [m^2 g^{-1}], \quad (1)$$

gdzie:

P_i - procentowa zawartość i -tej frakcji [%],

K - ilość frakcji,

$\bar{D}_{i_{\max}}$; $\bar{D}_{i_{\min}}$ - maksymalna i minimalna średnica i -tej frakcji [m],

ρ - gęstość fazy stałej wyrażona w $g\ cm^{-3}$, przyjęta w obliczeniach jako $2,65\ g\ cm^{-3}$ i po wyrażeniu w odpowiednich jednostkach wstawiona do wzoru,

$$\bar{D}_i = \frac{\bar{D}_{i_{\max}} + \bar{D}_{i_{\min}}}{2} \text{ - średnia średnica cząstek } i\text{-tej frakcji,}$$

$$4\pi \left(\frac{\bar{D}_i}{2}\right)^2 \text{ - powierzchnia cząstki } i\text{-tej frakcji, o średniej średnicy } \bar{D}_i,$$

$$\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\bar{D}_i}{2}\right)^3 \cdot \rho \text{ - masa cząstki } i\text{-tej frakcji, o średniej średnicy } \bar{D}_i.$$

Wskaźnik rozkładu wymiaru cząstek (f) został wyliczony wg wzoru zaproponowanego przez Giesela i innych [4, 23] w postaci:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^K (P_{i+1} - P_i) \log \frac{S_{i+1}}{S_i}}{P_K - P_i} \cdot \frac{\log \frac{P_{i+1}}{P_i}}{P_i} \quad (2)$$

gdzie:

P_i - zawartość i -tej frakcji, odczytana z kumulatywnej krzywej rozkładu granulometrycznego, i frakcji mniejszych,

S_i - maksymalny wymiar i -tej frakcji,

K - ilość frakcji.

Wskaźnik rozkładu wymiaru cząstek (f) jest bezwymiarowy, średnicę cząstek można wyrażać w obliczeniach w dowolnych jednostkach.

Środkową statystycznie średnicę cząstek glebowych (D) wyznaczono graficznie z kumulatywnej krzywej rozkładu granulometrycznego, odczytując jej wartość w milimetrach dla 50% zawartości cząstek.

$$D_M = D(50%) \quad [\text{mm}]. \quad (3)$$

Średnia statystycznie średnica cząstek (R) została wyliczona ze wzoru:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^K \left(\frac{D_{i\max} + D_{i\min}}{2} \right) P_i}{100\%} \quad [\text{mm}], \quad (4)$$

gdzie:

P_i - zawartość frakcji [%],

K - ilość frakcji,

$D_{i\max}$; $D_{i\min}$ - maksymalne i minimalne średnice i -tej frakcji [mm]

Materiał glebowy

Określenie wpływu parametrów fazy stałej gleby na przebieg krzywej retencji przeprowadzono na modelowym materiale glebowym pobranym z 39 warstw 14 profili glebowych. Próbkę, z wyjątkiem dwóch, miały powierzchnię właściwą mniejszą niż $80 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, co pozwoliło przyjąć, że wartości wilgotności przy $pF = 3,7$ i $4,2$ są nieistotnie zależne od zagęszczenia. Umożliwiło to stosowanie standardowych komór wysokociśnieniowych.

Pobrane gleby reprezentowały następujące jednostki systematyczne: bielcowe, brunatne, czarnoziemy, czarne ziemie i rędziny utworzone ze

zróżnicowanych utworów o składzie granulometrycznym od piasków po gliny ciężkie. Pochodziły one z warstw na głębokościach: 0-30, 30-60 i 60-90 cm. Zachowano zasadę pobierania całej próbki z jednego poziomu genetycznego znajdującego się w danej warstwie. W dwóch przypadkach nie pobrano próbek ze wszystkich warstw, tj. dla jednej z gleb brunatnych, gdyż poniżej 30 cm znajdowała się skała wapienna, oraz czarnej ziemi właściwej, gdzie na głębokości 70 cm było położone zwierciadło wód gruntowych.

Pobrany materiał glebowy o naruszonej strukturze suszono w laboratorium do stanu powietrznie suchego, a następnie przesiewano przez sito o średnicy oczek 1 mm. Po tych wstępnych czynnościach wykonano podstawowe oznaczenia:

- rozkładu granulometrycznego metodą Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego,
- zawartości próchnicy metodą Tiurina,
- powierzchni właściwej metodą adsorpcji pary wodnej wg Dechnicka i Stawińskiego [11, 12].

Charakterystykę badanego materiału glebowego przedstawiono w tabeli 1, natomiast wyliczone na jej podstawie wartości wskaźników obrazujących rozkład granulometryczny wg wzorów (1), (2), (3) i (4) - w tabeli 2.

Procedura wykonywania pomiarów

Zróżnicowane zagęszczenia gleby w badanych próbkach o objętości 100 cm^3 uzyskiwano zgodnie z metodyką stosowaną w Instytutach ICW (Wageningen, Holandia), polegającą na odważaniu stosownej ilości powietrznie suchej gleby i zagęszczaniu jej do określonej objętości w standardowym cylindrze siłownikiem hydraulicznym. Jednorazowo preparowano taką ilość gleby, aby uzyskać zaprogramowane zagęszczenie w warstwie 1 cm. Następnie, w celu uzyskania jednolitego zagęszczenia, naruszano warstwę około 2 mm, bezpośrednio pod tłokiem, i wysypywano kolejną porcję. Ostatnią, górną warstwę gleby zagęszczano, używając dodatkowego cylindra. Takie postępowanie umożliwiało uzyskanie niemal jednolitego zagęszczenia gleby w całej objętości cylindra.

Minimalne zagęszczenie osiągano przez usypywanie gleby warstwami - z użyciem wibratora - i poddawaniu jej działaniu wody, powodując osiadanie gleby. Po takich zabiegach otrzymane minimalne zagęszczenie było niezmiennie podczas wykonywania dalszych pomiarów.

Za maksymalną uznawano taką wartość zagęszczenia, przekroczenie której wymagało dużego wzrostu ciśnienia, nawet o kilkadziesiąt atmosfer.

Należy zaznaczyć, że efekt ściskania gleb zależy od rodzaju gleby, stanu jej uwilgotnienia, prędkości prowadzonych deformacji oraz wielkości przykładanych sił. Dlatego też w badaniach przyjęto jednolitą metodę - wszystkie próbki zagęszczano w stanie powietrznie suchym, wymuszając założoną zmianę objętości próbki.

Stosując opisaną powyżej procedurę przygotowywano w standardowych cylindrach (100 cm^3) próbki do wyznaczenia charakterystyk potencjału wody w zależności od wilgotności z uwzględnieniem efektu histerezy w przyjętym zakresie pF. Uzyskano w ten sposób ogółem 390 próbek o zróżnicowanych zagęszczeniach dla materiału glebowego pochodzącego z 39 poziomów 14 profili glebowych.

Badanie charakterystyk potencjału wody glebowej w zależności od wilgotności z uwzględnieniem efektu histerezy wymagało wykonania dla każdej próbki oznaczenia wilgotności dla następujących wartości pF: 0; 1; 1,5; 1,6; 2; 2,2; 2,3; 2,7 w procesie osuszania oraz 2,3; 2,2; 2; 1,6; 1,5; 1 w procesie nawilżania. Ze względu na dużą liczbę próbek opracowano technologię wykonywania płyt gipsowych oraz zaprojektowano i wykonano zestaw, w skład którego wchodzi 13 sztuk płyt oraz system automatycznej regulacji podciśnienia [75]. Układ pomiarowy stanowią manometry z czujnikami tensometrycznymi, mierzące podciśnienie pod daną płytą gipsową. Zastosowanie tensometru umożliwiło przetworzenie wartości ciśnienia na sygnał elektryczny, który w układzie sterującym porównywany jest z sygnałem z układu programującego wartość podciśnienia i szerokość histerezy. Występująca różnica sygnałów powoduje automatyczne wyłączenie próżniowej pompy rotacyjnej, podtrzymującej zadane podciśnienia pod płytą gipsową.

Tabela 1. Podstawowe właściwości badanych gleb

Jednostka systematyczna gleby	Numer	Grupa granulometryczna	Średnica cząstek (mm)						Próchnica (%)			Powierzchnia właściwa (m ² g ⁻¹)
			<0,002	0,002-0,005	0,005-0,02	0,02-0,05	0,05-0,1	0,1-0,5	0,5-1,0	1,0-2	2-12	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Bielicowa	1	pgl	12	1	1	3	2	48	33	1,07	14,6	
	2	ps	4	0	5	3	2	54	32	0,16	13,3	
	3	pgm	4	0	12	5	5	53	21	0,12	8,1	
Bielicowa	4	phi	12	9	25	46	7	1	0	2,11	65,5	
	5	glp	12	6	12	22	8	32	8	0,10	27,0	
	6	glp	16	2	12	28	10	26	6	0,02	34,7	
Bielicowa	7	glp	11	2	15	25	7	31	9	1,68	25,3	
	8	gsp	16	10	13	24	8	23	6	0,29	35,1	
	9	phi	11	6	26	36	13	6	2	0,20	27,7	
Bielicowa	10	glp	8	4	14	25	12	31	6	2,43	34,3	
	11	glp	12	4	11	20	11	33	9	0,04	19,3	
	12	glp	8	5	9	19	12	38	9	1,08	21,4	
Bielicowa	13	pgl	4	2	5	9	10	47	23	1,03	16,7	
	14	ps	3	1	6	11	9	60	10	0,23	13,3	
	15	glp	8	9	12	26	14	23	8	0,08	24,0	
Brunatna wyługowana	16	phi	14	7	27	39	8	3	2	1,88	48,4	
	17	ip	23	12	23	30	4	6	2	0,42	73,7	
	18	phi	14	7	26	33	12	7	1	0,00	41,0	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Brunatna wyługowana	19	ip	38	7	19	25	7	3	1	2,30	113,1
Brunatna wyługowana	20	pgl	8	3	4	3	2	52	28	1,71	15,4
	21	pgm	9	1	10	11	8	46	15	0,34	12,4
	22	pgm	8	5	4	10	5	60	8	0,13	18,8
Brunatna właściwa	23	pli	10	6	28	43	9	3	1	2,11	44,1
	24	plg	10	6	19	50	13	2	0	0,84	34,3
	25	phi	10	7	20	47	11	4	1	0,46	45,8
Czarna ziemia właściwa	26	gp	12	3	10	16	7	33	19	2,03	30,8
	27	glp	17	2	10	21	7	34	9	1,99	24,0
	28	pgl	7	1	5	5	6	48	28	2,52	15,0
Czarna ziemia właściwa	29	phi	13	6	21	37	17	4	2	3,30	53,0
	30	pgl	5	2	4	8	4	60	17	2,75	21,4
	31	ps	4	2	3	6	8	66	11	0,38	17,6
Czarna ziemia właściwa	32	ps	3	0	5	5	3	66	18	2,32	36,4
	33	pl	2	0	2	3	4	72	17	0,19	9,4
Czarno- ziem	34	pli	13	9	24	45	7	2	0	3,36	76,2
	35	pli	11	8	24	47	8	2	0	2,98	71,5
	36	pli	11	11	20	43	10	3	2	1,90	66,5
Rędzina wyługowana	37	pli	10	4	28	44	10	3	1	1,50	42,8
	38	pli	18	9	16	44	8	3	2	0,38	73,7
	39	gop	34	8	20	19	6	9	4	0,21	143,5

Tabela 2. Wartości wskaźników składu granulometrycznego dla badanych gleb wg wskaźników (1-4)

Jednostka systematyczna gleby	Numer	S	f	D	R
Bielicowa	1	0,293	0,656	0,380	0,390
	2	0,109	0,782	0,185	0,410
	3	0,124	2,193	0,160	0,320
Bielicowa	4	0,415	0,698	0,022	0,03
	5	0,359	0,357	0,048	0,170
	6	0,430	0,391	0,042	0,140
Bielicowa	7	0,316	0,411	0,046	0,180
	8	0,482	0,328	0,035	0,130
	9	0,370	0,531	0,026	0,059
Bielicowa	10	0,261	0,433	0,048	0,158
	11	0,343	0,356	0,064	0,183
	12	0,254	0,406	0,086	0,199
Bielicowa	13	0,128	0,530	0,267	0,325
	14	0,102	0,621	0,230	0,266
	15	0,290	0,433	0,044	0,150
Brunatna wyługowana	16	0,444	0,530	0,210	0,047
	17	0,675	0,364	0,014	0,050
	18	0,444	0,461	0,022	0,053
Brunatna wyługowana	19	0,978	0,257	0,008	0,034
Brunatna wyługowana	20	0,219	0,625	0,354	0,370
	21	0,247	0,425	0,194	0,260
	22	0,238	0,544	0,218	0,248
Brunatna właściwa	23	0,354	0,631	0,024	0,042
	24	0,343	0,721	0,030	0,036
	25	0,349	0,667	0,028	0,047
Czarna ziemia właściwa	26	0,331	0,353	0,124	0,250
	27	0,443	0,339	0,080	0,180
	28	0,187	0,561	0,316	0,360
Czarna ziemia właściwa	29	0,409	0,520	0,042	0,056
	30	0,148	0,635	0,280	0,314
	31	0,123	0,702	0,266	0,289
Czarna ziemia właściwa	32	0,088	0,817	0,306	0,338
	33	0,059	1,025	0,316	0,348
Czarnoziem	34	0,436	0,599	0,264	0,03
	35	0,385	0,650	0,024	0,032
	36	0,395	0,589	0,260	0,050
Rędzina wyługowana	37	0,342	0,663	0,024	0,043
	38	0,537	0,540	0,025	0,048
	39	0,890	0,218	0,011	0,070

Konstrukcja płyt gipsowych jest odmienna od dotychczas znanych, albowiem zasilanie w wodę odbywa się wewnątrz płyty, co eliminuje jedną z podstawowych trudności konstrukcyjnych, a mianowicie uszczelnianie. Każda z 13 płyt zestawu przeznaczona była do pomiaru jednej wartości pF. Zdjęcie pełnej charakterystyki potencjału wody w funkcji wilgotności z uwzględnieniem efektu histerezy następowało po przejściu próbki (w odpowiedniej kolejności) przez cały zestaw płyt.

Do wyznaczenia zawartości wody przy pF równym 3,7 i 4,2 stosowano komory wysokociśnieniowe /49, 58, 83/, których cylinderki (o wysokości 1 cm) napełniano glebą bliską nasycenia. Wilgotność mierzono w stosunku do jednostkowej masy gleby.

W przypadku tych dwóch wartości pF, ze względu na niemożliwość modyfikacji zagęszczenia, ogólna liczba zróżnicowanych próbek wynosiła 39 - tzn. była równa ilości badanych poziomów 14 profili glebowych.

WYNIKI BADAŃ, OMÓWIENIE I INTERPRETACJA

Analiza jakościowa wyników eksperymentalnych

Ze względu na niemożliwość zaprezentowania w niniejszej pracy wszystkich uzyskanych wyników w postaci tabel i wykresów, przedstawiono 5 syntetycznych wykresów przebiegu pętli histerezy charakterystyk potencjału wody glebowej w funkcji wilgotności dla minimalnego, środkowego i maksymalnego zagęszczenia dla danej gleby.

Wybrane gleby są zróżnicowane pod względem rozkładu granulometrycznego i przedstawione wg ich rosnącej powierzchni właściwej. Są to (wg tab. 1):

1 - bielkowa, wytworzona z piasku gliniastego lekkiego, o powierzchni właściwej $14,6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, zawartości próchnicy 1,07% i zagęszczeniach: 1,60; 1,73 i $1,80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

26 - czarna ziemia właściwa, wytworzona z gliny lekkiej piaszczystej, o powierzchni właściwej $30,8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, zawartości próchnicy 2,03% i zagęszczeniach: 1,45; 1,65 i $1,70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

16 - brunatna wyługowana, wytworzona z pyłu ilastego, o powierzchni właściwej $48,4 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, zawartości próchnicy 1,88% i zagęszczeniach:

1,26; 1,41 i 1,52 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

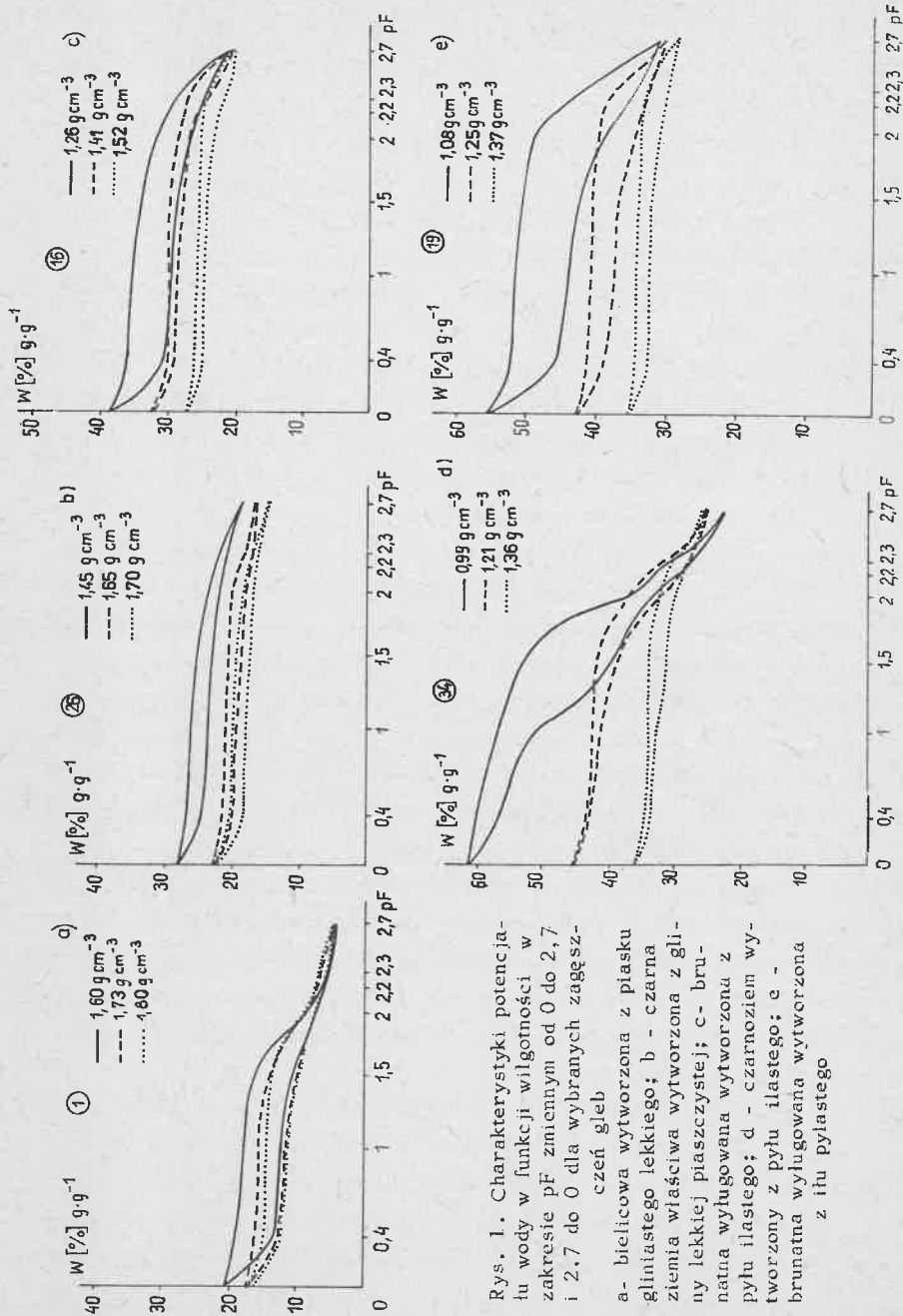
34 - czarnoziem, wytworzony z pyłu ilastego, o powierzchni właściwej 76,2 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, zawartości próchnicy 3,36% i zagęszczeniach: 0,99; 1,21 i 1,36 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

19 - brunatna wylugowana, wytworzona z ilu pylastego, o powierzchni właściwej 113,1 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, zawartości próchnicy 2,3% i zagęszczeniach: 1,08; 1,25 i 1,37 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Przedstawione na rysunku 1(a-e) zależności potencjału wody glebowej od wilgotności wykazują w swym przebiegu pewne tendencje - a mianowicie wraz ze wzrostem powierzchni właściwej obserwowany jest wzrost zdolności badanych gleb do retencjonowania wody. Trudno jest jednak dokonać analitycznego porównania obserwowanych tendencji, ponieważ różne gleby mają odmienne wartości zagęszczeń skrajnych, ilość próchnicy i powierzchnię właściwą. Tak właśnie jest z glebami pylastymi 16 i 34 (rys. 1c, d). Bardzo wysoka zdolność gromadzenia wody - przy niskich wartościach pF - gleby 34 spowodowana jest najprawdopodobniej minimalnym, najmniejszym wśród wszystkich badanych utworów zagęszczeniem (0,99 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Z przebiegu krzywych retencji można również zauważyć, że efekt zagęszczenia w różny sposób modyfikuje kształt krzywych pF. Dla gleb 26, 16 i 19 wzrost zagęszczenia spowodował zmniejszenie zawartości wody przy wszystkich wartościach pF, z tym że spadek ten jest większy przy niskich wartościach pF. W glebach 1 i 34 wzrost zagęszczenia spowodował spadek ilości retencjonowanej wody przy $\text{pF} \leq 2,2$; 2,3 (znacznie wyraźniej efekt ten jest widoczny dla gleby 34) i wzrost ilości wody zatrzymywanej przy $\text{pF} \geq 2,2$; 2,3.

Przedstawione przykłady uzyskanych wyników wykazują, że wielkość efektu histerezy charakterystyk potencjałów wody glebowej-wilgotność, mierzona polem pętli histerezy, jest zależna od rodzaju gleby, powierzchni właściwej i zagęszczenia. Jednoznaczne określenie charakteru wpływu poszczególnych czynników na wielkość efektu histerezy jest trudne, ponieważ oddziaływanie jednego jest uzależnione od wartości pozostałych. Analizując wpływ zagęszczenia dla każdej gleby oddzielnie można stwierdzić, że wraz z jego wzrostem pole powierzchni pętli



Rys. 1. Charakterystyki potencjału wody w funkcji wilgotności w zakresie pF zmiennym od 0 do 2,7 i 2,7 do 0 dla wybranych zagęszczeń gleb

a - biellicowa wytworzona z piasku gliniastego lekkiego; b - czarna ziemia właściwa wytworzona z gliny lekkiej piaszczystej; c - brunatna wylugowana wytworzona z pyłu ilastego; d - czarnoziem wytworzony z pyłu ilastego; e - brunatna wylugowana wytworzona z ilu pylastego

histerezy maleje. Uzyskane rezultaty wykazały, że efekt histerezy zależności potencjał wody-wilgotność gleby jest znaczny i jego uwzględnienie jest konieczne.

Zagęszczenie w różny sposób dla różnych gleb modyfikuje przebieg ich krzywych retencji i wielkość efektu histerezy. Wraz z zagęszczaniem następuje zmiana upakowania cząstek glebowych oraz niszczenie występujących w niej elementów strukturalnych, co powoduje zmiany udziału porów o różnych wymiarach w stosunku do ogólnej porowatości próbki. Zmiany te są również warunkowane innymi parametrami gleby, jak np. jej powierzchnią właściwą lub zawartością próchnicy.

Przedstawione interpretacje jakościowe wyników wybranych próbek glebowych dowodzą, że istnieją zależności między parametrami fazy stałej gleby a przebiegiem krzywych ich retencji wodnej; jednak znalezienie jednoznacznych zależności dla wybranego parametru jest możliwe jedynie w przypadku próbek o identycznych pozostałych parametrach, np. badanie wpływu zagęszczenia na przebieg krzywych retencji wodnej dla jednej gleby. W trakcie poszukiwania bardziej ogólnych zależności, przy szerokiej zmienności parametrów gleb, konieczna jest interpretacja wykresów syntetycznych dla poszczególnych parametrów oraz posługiwanie się elementami statystyki matematycznej. Inaczej wpływ kilku parametrów na mierzoną wielkość fizyczną jest niemożliwy do określenia. Graficzny sposób przedstawienia wyników umożliwia jakościową ocenę oddziaływania najwyżej dwóch parametrów na trzeci.

Jakościowa interpretacja wyników badań eksperymentalnych pokazana na przykładzie 15 pętli histerezy 5 wybranych gleb, jak również wyniki znanych badań pozwalają na stwierdzenie istotnego wpływu wielkości powierzchni właściwej gleby, zagęszczenia i rozkładu granulometrycznego na kształtowanie się retencji wodnej. Rola próchnicy jest trudniejsza do jednoznacznej oceny.

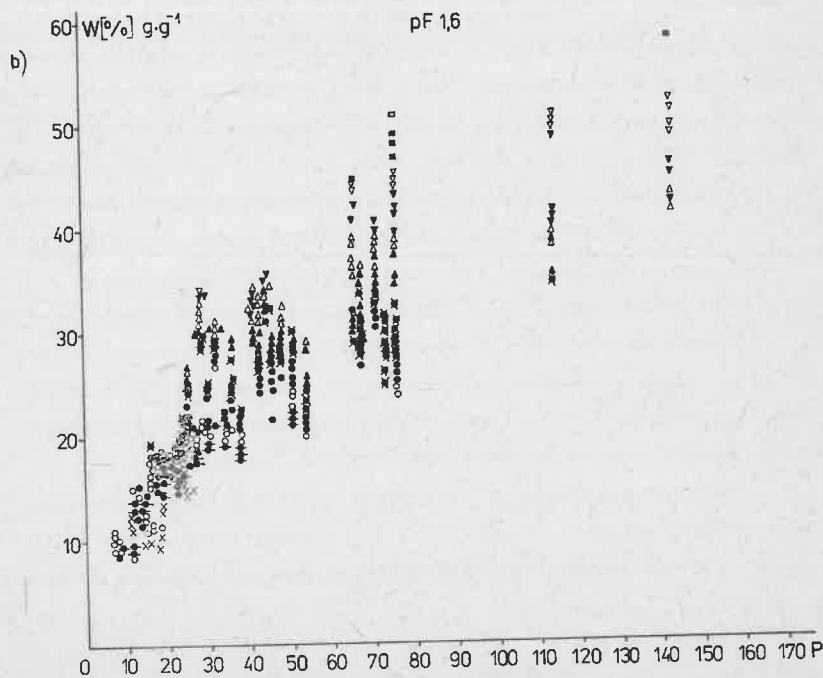
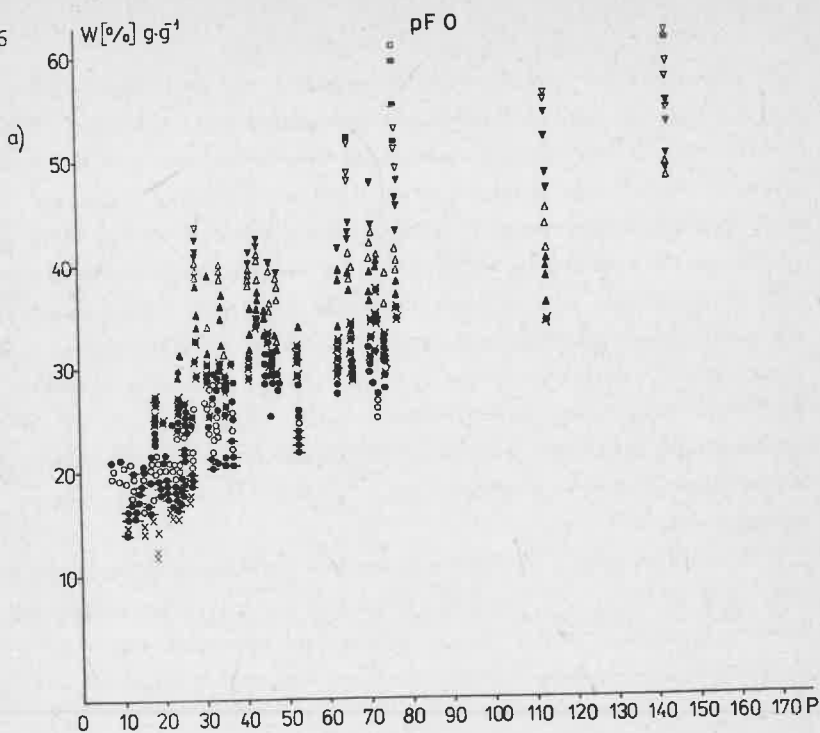
Rozmiar powierzchni właściwej oraz zagęszczenie wyrażane są za pomocą konkretnych liczb, zatem istnieje możliwość graficznego przedstawienia ich wpływu na krzywą retencji wodnej, co umożliwia interpretację zachodzących związków. Natomiast rozkład granulometryczny gleby jest wyrażany za pomocą zespołu liczb, pokazujących procentową zawar-

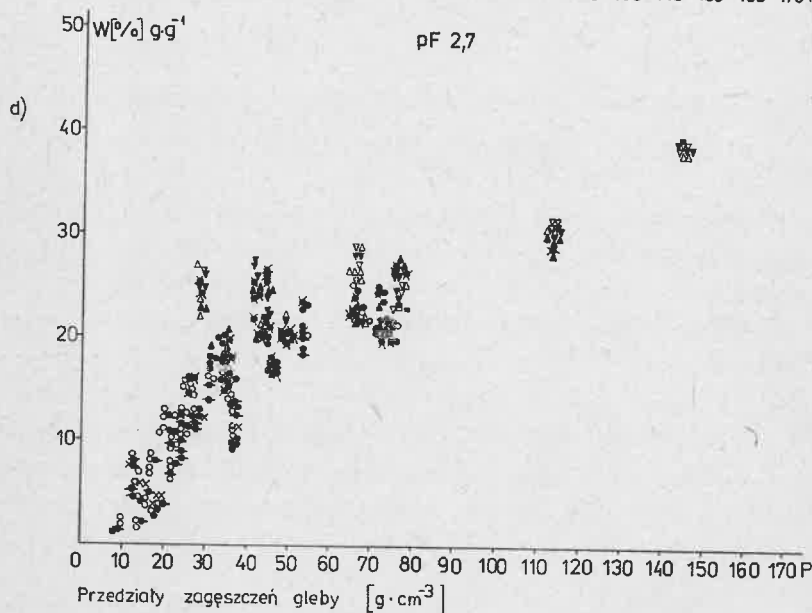
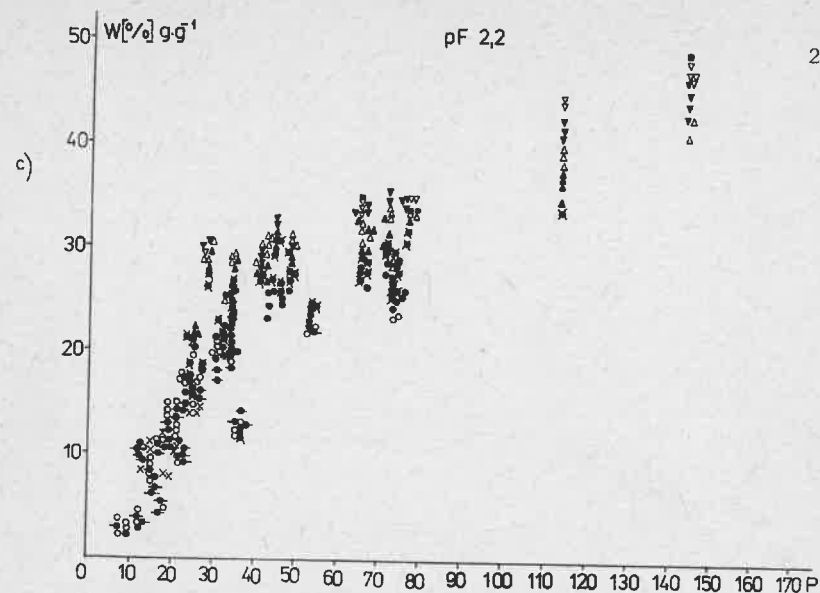
tość poszczególnych frakcji. Konsekwencją jest brak możliwości wykonania, poddającego się interpretacji, obrazu graficznego. Dla określenia jakościowego, a tym bardziej ilościowego wpływu rozkładu granulometrycznego na przebieg krzywych retencji wodnej konieczna jest znajomość jednego kompleksowego parametru, który w sposób istotny byłby skorelowany z przebiegiem krzywej retencji wodnej gleby. Wielkością taką uwzględniającą równocześnie zawartość wszystkich frakcji może być np. powierzchnia geometryczna, średnia lub środkowa statystycznie średnica cząstek, wskaźnik rozkładu wymiarów ziarna itp. Oceny przydatności poszczególnych wskaźników można dokonać, analizując wykresy ich zależności od zawartości wody przy danych wartościach pF lub posłużyć się metodami statystyki matematycznej. W pracy wybrano drugą wersję postępowania.

Zależności między wielkością powierzchni właściwej a zawartością wody przy pF = 0; 1,6; 2,2 i 2,7 w 12 klasach zagęszczenia przedstawiono na rysunku 2 (a-d). Wynika z niego, że zawartość wody przy wszystkich przedstawionych wartościach pF rośnie krzywoliniowo wraz ze wzrostem powierzchni właściwej, przy czym nachylenie tej krzywej maleje wraz ze wzrostem powierzchni właściwej. Oznacza to, że takie same zmiany rozmiaru powierzchni właściwej powodują większe zmiany zawartości wody dla mniejszej powierzchni właściwej. Zawartości wody przy danych wartościach powierzchni właściwej maleją ze wzrostem zagęszczenia dla pF = 0; 1,6 i 2,2, a dla pF = 2,7 (rys. 2d) zależność ta jest mniej istotna i niejednoznaczna. Wpływ zagęszczenia maleje wraz ze wzrostem potencjałów wody glebowej. Wpływ powierzchni właściwej na zawartość wody przy pF 3,7 i 4,2 ma charakter quasi-liniowy - wzrostowi powierzchni właściwej towarzyszy wzrost ilości wody (rys.3).

W omówieniu powyższych wyników ograniczono się jedynie do jakościowej analizy uzyskanych współzależności, ponieważ dokładne związki ilościowe w układzie wieloparametrycznym (niemożliwe do graficznego zobrazowania) zostaną przedstawione w dalszej części pracy.

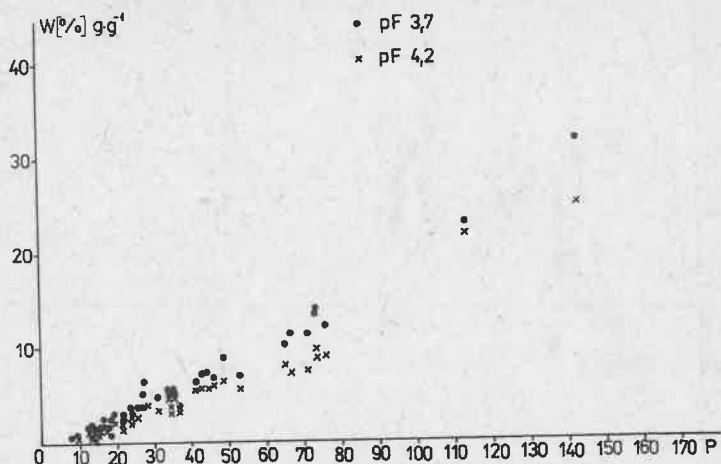
Zależność zagęszczenia i zawartości wody w procesie osuszania przy wartościach pF = 0; 1,6; 2,2 i 2,7 przedstawiono na rysunku 4(a-d). W celu zobrazowania charakteru wpływu zagęszczenia na prze-





- | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| $\square$ 0,91 - 1,0 | $\triangle$ 1,31 - 1,4 | $\circ$ 1,71 - 1,8 |
| $\blacksquare$ 1,01 - 1,1 | $\blacktriangle$ 1,41 - 1,5 | $\bullet$ 1,81 - 1,9 |
| ∇ 1,11 - 1,2 | $\otimes$ 1,51 - 1,6 | $\times$ 1,91 - 2,0 |
| $\blacktriangledown$ 1,21 - 1,3 | $\bullet$ 1,61 - 1,7 | $+$ 2,01 - 2,1 |

Rys. 2. Zależność między wielkością powierzchni właściwej badanych gleb i zagęszczeniem a zawartością wody: a- $pF=0$; b- $pF=1,6$; c- $pF=2,2$; d- $pF=2,7$



Rys. 3. Zależność między wielkością powierzchni właściwej a zawartością wody przy $pF = 3,7$ i $4,2$

bieg krzywej retencji w zależności od rodzaju gleby ponownie skorzysta-
no z reprezentacji wybranych już raz gleb, tj. 1, 16, 19, 26, 34
(tab. 1).

Interpretując te wykresy jedynie jako zależność zawartości wody
od zagęszczenia przy różnych wartościach pF i traktując punkty dla
wszystkich gleb równorzędnie, tzn. nie uwzględniając podziału na 5 wy-
branych gleb, można wysnuć wniosek, że dla wszystkich wartości pF
zawartość wody maleje wraz z zagęszczeniem. Jest to stwierdzenie fał-
szywe, ponieważ charakter wpływu zagęszczenia dla różnych gleb jest
różny, co można stwierdzić analizując konfigurację punktów przypisa-
nych poszczególnym glebom. Układają się w taki charakterystyczny spo-
sób, że wraz ze wzrostem rozmiaru powierzchni właściwej gleb zbiory
punktów dla tych samych zagęszczeń odpowiadają wyższym zawartościom
wody (rys. 4a-d).

Wpływ zagęszczenia na zawartość wody przy pF równych 0 i 1,6
jest znaczniejszy dla gleb o większej powierzchni właściwej (P), tzn.
takie same bezwzględne zmiany wartości zagęszczenia powodują wielo-
krotnie większe zmiany zawartości wody niż w glebie o małej wartości P .

Dla gleby 1 (najlżejszej), szczególnie przy pF 1,6, zagęszczenie niemal nie wpływa na zawartość wody. Jeszcze bardziej zależny od rodzaju gleby jest wpływ zagęszczenia na zawartości wody przy $pF = 2,2$ i $2,7$. Przykładowo dla gleb 19, 16 i 27 zawartość wody przy $pF = 2,2$ maleje ze wzrostem zagęszczenia, a dla gleby 1 ma tendencję odwrotną. Gleby 19 i 27, przy $pF = 2,7$, wykazują tendencję spadku zawartości wody, w miarę wzrostu zagęszczenia, natomiast dla gleby 35 następuje wzrost ilości wody wraz ze wzrostem zagęszczenia.

Analiza przedstawionych na rysunkach wyników jest kolejnym dowodem, że jedynie słusznym rozwiązaniem jest możliwie najbardziej kompleksowe badanie związków wpływu zespołu parametrów fazy stałej gleby na kształtowanie się przebiegu krzywych retencji. Jakościowe i ilościowe interpretacje poszczególnych parametrów lub też niepełnego ich zespołu prowadzić mogą do błędnych wniosków ogólnych.

Analiza statystyczna uzyskanych wyników

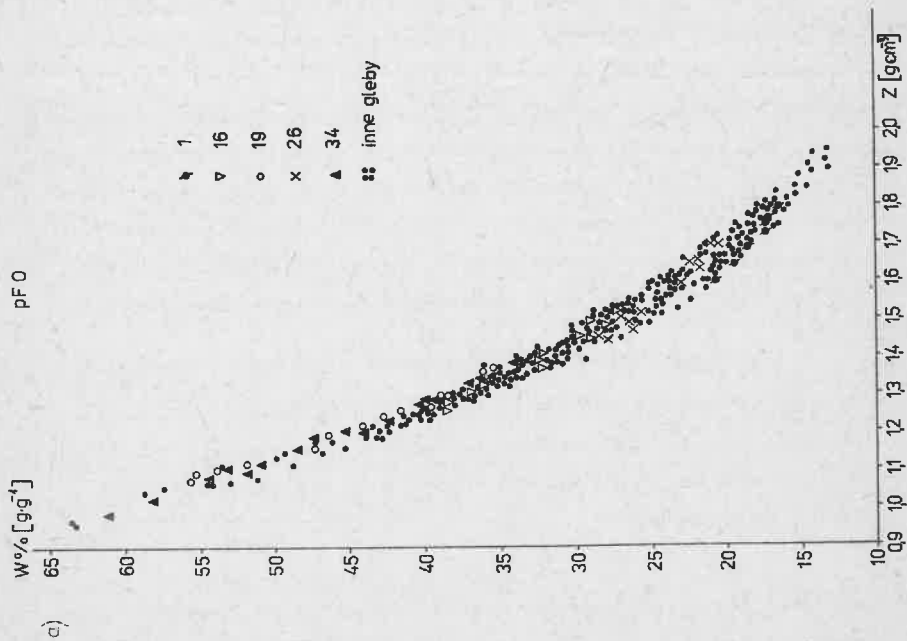
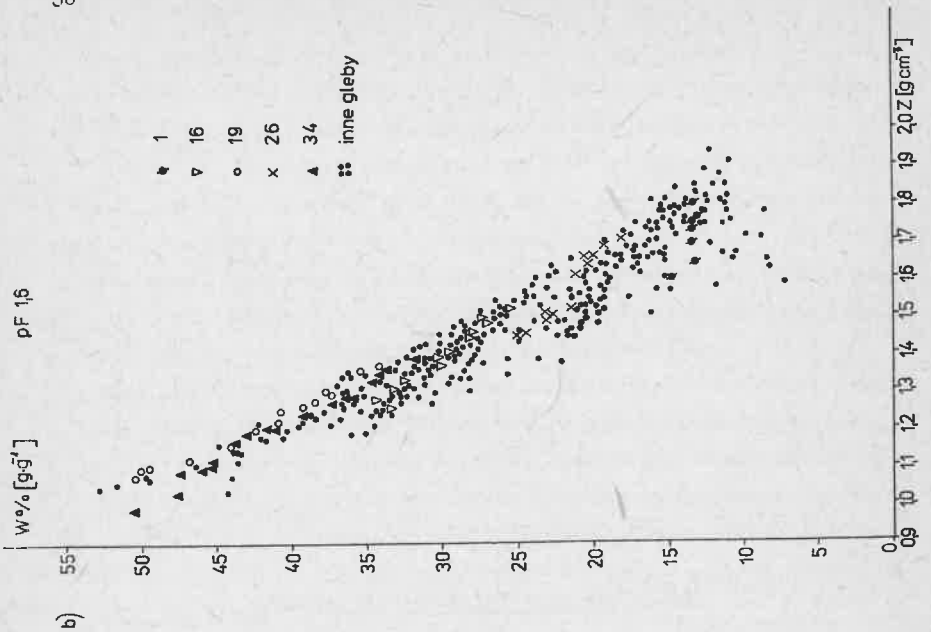
W pracy, do kompleksowego zbadania ilościowych zależności między zawartością wody przy poszczególnych wartościach pF a zespołem parametrów opisujących budowę fazy stałej gleby, zastosowano analizę regresji wielokrotnej, wprowadzając do proponowanych modeli matematycznych jako parametry: zawartość próchnicy, wielkość powierzchni właściwej oraz rozkład granulometryczny wyrażony za pomocą różnych wskaźników, a także zagęszczenie. Wybór optymalnego modelu oparty był na analizie obliczeń statystycznych, dlatego też uznano za celowe przedstawienie krótkiego opisu stosowanej w pracy procedury obliczeń.

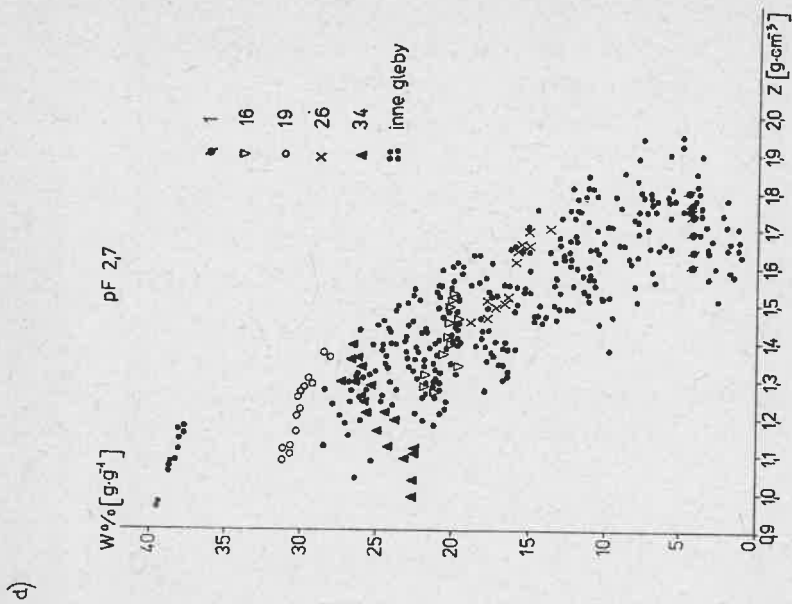
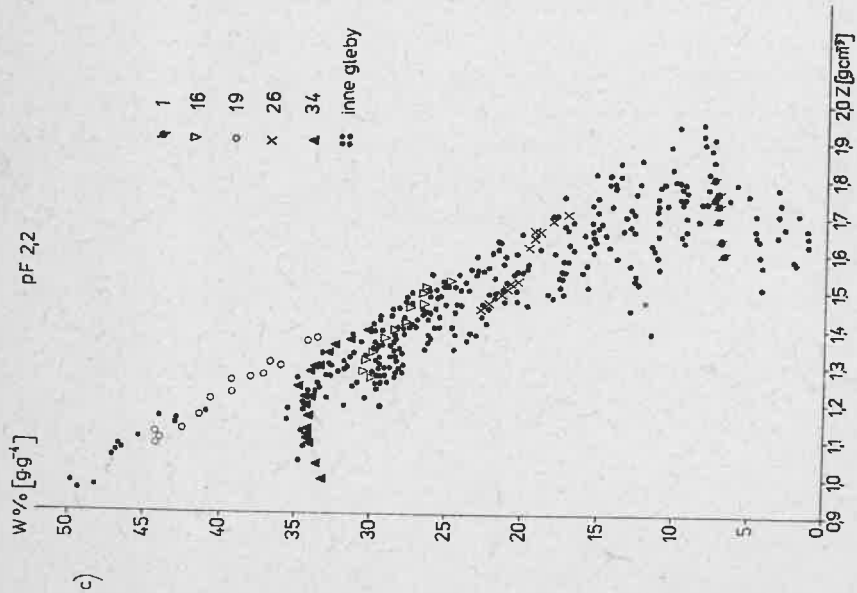
Opis programu analizy regresji wielokrotnej

Dla zadeklarowanej zmiennej wynikowej Y (wilgotność przy danej wartości pF) oraz zadeklarowanych zmiennych objaśniających $X_1, X_2 \dots X_p$ (parametry fazy stałej gleby) współczynniki regresji wielokrotnej oblicza się z zależności:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_p X_p + e \quad (5)$$

gdzie: $b_0, b_1, \dots, b_p$ są współczynnikami regresji; e - błędem doświadczalnym.





Rys. 4. Zależność między zagęszczeniem i zawartością wody dla wybranych gleb
a - pF = 0; b - pF = 1,6; c - pF = 2,2; d - pF = 2,7

Jednocześnie z współczynnikami regresji oblicza się (dla oceny ich istotności) wskaźnik t Studenta oraz kwadrat współczynnika korelacji wielokrotnej wraz z oceniającym jego istotność testem F Snedecora.

Zmienne objaśniające są wprowadzane do równania regresji tak, aby nowo wprowadzona zmienna łącznie ze zmiennymi znajdującymi się już w równaniu regresji dawała największy przyrost współczynnika korelacji wielokrotnej.

Współczynnik $b' = (b_1, b_2, \dots, b_p)$ znajduje się z układu równań normalnych

$$X'Xb = X'Y \quad (6)$$

gdzie: $X'X = C$ jest macierzą kowariancji zmiennych $X_1, X_2, \dots, X_p$, a $X'Y$ jest wektorem kowariancji zmiennej Y ze zmiennymi $X_1, X_2, \dots, X_p$.

Stałą b_0 wyznacza się z warunku

$$\bar{Y} = b_0 + b_1 \bar{X}_1 + \dots + b_p \bar{X}_p, \quad (7)$$

gdzie: $\bar{Y}; \bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p$ oznaczają średnie arytmetyczne obliczanych wartości zmiennej wynikowej Y i zmiennych objaśniających $X_1, X_2, \dots, X_p$.

Jako miarę dobroci regresji można przyjąć różnicę między zmiennością całkowitą zaobserwowanych wartości zmiennej Y , a zmiennością resztową, pozostałą po wyeliminowaniu ze zmiennej Y jej najlepszej oceny przy pomocy liniowej funkcji zmiennych $X_1, X_2, \dots, X_p$. Aby tego dokonać oblicza się zmienność całkowitą ZC :

$$ZC = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (8)$$

na podstawie której wyznacza się odchylenie standardowe całkowite obliczanych wartości zmiennej wynikowej Y

$$sc = \sqrt{\frac{ZC}{n-1}} \quad (9)$$

oraz zmienność resztową ZR , czyli sumę kwadratów odchyłeń zaobser-

wowanych wartości zmiennej Y oraz wartości oczekiwanych wynikających z wyznaczonego równania regresji:

$$ZR = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{b}_0 - \hat{b}_1 X_{i1} - \dots - \hat{b}_p X_{ip})^2, \quad (10)$$

gdzie: $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_p$ są rozwiązaniami układu równań normalnych (6).

Na podstawie zmienności resztowej ZR oblicza się dyspersję resztową SBE (błąd standardowy oszacowania), określającą błąd aproksymacji w równaniu (5):

$$SBE = \sqrt{\frac{ZR}{n-p-1}} \quad (11)$$

oraz kwadrat współczynnika korelacji wielokrotnej między zmienną wynikową Y a zmiennymi objaśniającymi, wchodzącymi do rozważanego równania regresji:

$$R^2_{Y(1, \dots, p)} = \frac{ZC - ZR}{ZC} \quad (12)$$

Testowanie istotności pojedynczych współczynników regresji $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_p$ odbywa się współczynnikiem t Studenta:

$$t = \frac{\hat{b}_i}{s(\hat{b}_i)} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (13)$$

gdzie: $s(\hat{b}_i)$ jest pierwiastkiem z wariancji estymatora $\hat{b}_i$ obliczanym z i -tego elementu przekątniowej c^{ii} macierzy odwrotnej od macierzy c :

$$s(\hat{b}_i) = c^{ii} SBE \quad (14)$$

Hipotezą testowaną jest hipoteza zerowa $H_0: b_i = 0$. Jeśli hipoteza ta jest prawdziwa, to t określone poprzednio ma rozkład Studenta, z $n-p-1$ stopniami swobody.

Istotność współczynnika korelacji wielokrotnej sprawdzano przy pomocy testu F . Snedecora określanego wzorem (12). Weryfikowaną hipotezą jest hipoteza zerowa H'_0

$$b_1 = b_2 = \dots = b_p = 0, \quad (15)$$

redukująca model $Y = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_p X_p + e$ do $Y = b_0 + e$.

Hipotezę H_0 , określoną wzorem (15), weryfikujemy testem F obliczanym według wzoru:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - p - 1}{p} \quad (16)$$

Jeśli testowana hipoteza jest prawdziwa, to wartość F obliczona według wzoru (12) ma rozkład F Snedecora z p stopniami swobody dla licznika ($r_1 = p$) i $n - p - 1$ stopniami swobody dla mianownika ($r_2 = n - p - 1$).

Dobór optymalnego zespołu parametrów fazy stałej gleby w modelu do wyliczania przebiegu krzywej retencji wodnej

W hipotezie roboczej pracy, przedstawionej w założeniach metodycznych, za istotne z fizycznego punktu widzenia uznano: zawartość próchnicy, wielkość powierzchni właściwej mierzonej metodą adsorpcji pary wodnej, rozkład granulometryczny i zagęszczenie.

Zawartość próchnicy świadczy o udziale substancji organicznej w badanych glebach mineralnych, wielkość powierzchni właściwej i rozkład granulometryczny są właściwościami fazy stałej gleby praktycznie stałymi w czasie, natomiast zagęszczenie jest parametrem zmiennym, warunkowanym procesami obróbki mechanicznej gleby i naturalnym jej osiadaniem. Zawartość próchnicy, powierzchnię właściwą i zagęszczenie gleby można łatwo wprowadzić jako parametry do modelu, ponieważ każdy z nich wyrażany jest za pomocą jednej liczby. Rozkład granulometryczny jako zespół liczb wymaga w tym celu analizy pod kątem znalezienia optymalnego wskaźnika.

Pierwszym, poddanym analizie regresji wielokrotnej, był model, w którym jako parametry wprowadzone są: zawartość próchnicy (H), wielkość powierzchni właściwej mierzona metodą adsorpcji pary wodnej (P), zawartość procentowa 7 frakcji granulometrycznych ($1 \rightarrow 7$) i zagęszczenie (Z). Dotychczas znane modele kompleksowe nie zawierały - wprowadzonego w tej pracy parametru - powierzchni właściwej.

Charakteryzowały się natomiast przedstawieniem rozkładu granulometrycznego w postaci zawartości różnych frakcji lub ich zespołów /22, 25, 29, 30, 45, 47, 48, 50, 52, 68, 78/. Interesującym było więc przeanalizowanie modelu tego typu po wprowadzeniu nowego parametru, tzn. powierzchni właściwej.

Wyniki analizy regresji wielokrotnej modelu

$$Y (pFX) = b_0 + b_H X_H + b_P X_P + b_1 X_1 - b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_7 X_7 + b_Z X_Z \quad (17)$$

przedstawiono w tabeli 3, gdzie zamieszczono wartości współczynników regresji (A), wartości t Studenta (B), współczynniki korelacji (C), odpowiadające poszczególnym współczynnikom regresji, oraz współczynnik korelacji wielokrotnej i wartość F Snedecora, obrazujące istotność współczynnika korelacji wielokrotnej.

Wartości krytyczne testu t Studenta wynoszą odpowiednio: $t_{0,01} = 2,59$ dla pF zmiennego od 0 do 2,7 i 2,7 do 0, a dla pF 3,7 i 4,2 ze względu na inną liczebność prób $t_{0,01} = 2,76$. Znaczy to, że gdy wartość t Studenta jest większa od podanych wyżej to hipotezę H_0 ($b_1 = 0$) odrzucamy, a zatem dany współczynnik regresji jest niezerowy, czyli istotny.

Wartości krytyczne F Snedecora są równe: $F_{0,01} = 2,38$ dla pF zmiennych od 0 do 2,7 i 2,7-0 oraz $F_{0,01} = 3,03$ dla wartości pF 3,7 i 4.2. Zatem, gdy wartość F Snedecora jest większa od cytowanych, wówczas odrzucamy hipotezę H_0' ($b_1 = b_2 = \dots = b_p = 0$), a kompleks współczynników regresji i współczynnik korelacji wielokrotnej są istotne.

We wszystkich 16 równaniach badanego modelu współczynnik korelacji wielokrotnej jest bardzo wysoki i przyjmuje wartości $> 0,96$, a wszystkie wartości F Snedecora są o trzy rzędy wielkości większe od krytycznej, zatem równania regresji dobrze estymują wartość mierzoną. Analizując natomiast istotność poszczególnych 10 parametrów w modelu (17) stwierdzono, że powierzchnia właściwa (P) i zagęszczenie (Z) we wszystkich przypadkach posiadają istotne współczynniki regresji i wysokie wartości współczynników korelacji, z tym że dla P są one dodatnie, a dla Z - ujemne.

Tabela 3. Współczynniki równania regresji (A), wartości i studenta (B) i współczynnika korelacji (C) dla modelu wyliczenia wilgotności $Y(pFX) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 + b_6 X_6 + b_7 X_7 + b_8 X_8 + b_9 X_9 + b_{10} X_{10} + b_{11} X_{11} + b_{12} X_{12} + b_{13} X_{13} + b_{14} X_{14} + b_{15} X_{15} + b_{16} X_{16} + b_{17} X_{17}$ (model 17)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	-76,00	0,06	0,127	1,06	0,58	1,30	0,88	1,25	0,88	0,91	-7,79			
2,7	B	0,46	11,50	3,64	2,23	4,49	3,10	4,40	3,10	3,24	7,06		0,96	464
C	0,26	0,85	0,67	0,64	0,81	0,67	0,22	0,16	0,84	-0,74	-0,84			
A	-18,43	-0,55	0,213	0,22	0,12	0,22	0,12	0,22	0,16	0,77	-			
3,7	B	3,71	19,03	0,65	0,41	0,67	0,35	0,67	0,50	0,53	-		0,99	246
C	0,16	0,98	0,86	0,63	0,58	0,46	0,02	0,04	-0,65	-0,55	-			
A	3,41	-0,19	0,164	0,05	-0,16	0,01	-0,12	0,02	-0,05	-0,06	-			
4,2	B	1,14	13,21	0,14	0,48	0,01	0,33	0,07	0,14	0,16	-		0,99	131
C	0,18	0,97	0,87	0,56	0,54	0,40	0,02	0,02	-0,61	-0,51	-			
A	-67,17	-0,05	0,120	1,05	0,65	1,16	0,96	1,16	0,86	0,93	-11,47			
2,3'	B	0,45	12,43	4,16	2,86	4,60	3,89	4,71	3,47	3,78	11,93		0,97	727
C	0,26	0,85	0,66	0,68	0,83	0,73	0,22	0,22	-0,88	-0,76	-0,88			
A	-62,51	-0,04	0,118	1,02	0,65	1,12	0,94	1,09	0,83	0,89	-11,90			
2,2'	B	0,36	12,00	3,97	2,83	4,38	3,73	4,34	3,30	3,56	12,19		0,97	726
C	0,27	0,85	0,65	0,69	0,83	0,73	0,21	0,21	-0,88	-0,77	-0,88			
A	-58,68	0,18	0,105	1,06	0,74	1,12	0,98	1,04	0,86	0,88	-14,88			
2'	B	1,59	11,30	4,32	3,37	4,57	4,06	4,38	3,61	3,71	16,01		0,98	868
C	0,28	0,85	0,65	0,69	0,83	0,74	0,20	0,20	-0,87	-0,77	-0,90			
A	-27,52	0,31	0,103	0,79	0,54	0,88	0,75	0,78	0,68	0,66	-19,61			
1,6'	B	3,00	12,15	3,58	2,75	4,00	3,45	3,61	3,12	3,08	23,32		0,96	1026
C	0,31	0,86	0,63	0,68	0,82	0,72	0,16	0,16	-0,85	-0,75	-0,92			
A	-23,12	0,33	0,103	0,76	0,52	0,86	0,73	0,75	0,67	0,63	-20,86			
1,5'	B	3,26	12,21	3,43	2,62	3,91	3,35	3,50	3,10	2,97	24,82		0,98	1029
C	0,31	0,85	0,62	0,67	0,81	0,71	0,15	0,15	-0,84	-0,75	-0,93			
A	20,30	0,53	0,103	0,36	0,26	0,51	0,37	0,39	0,37	0,29	-26,27			
1'	B	4,68	1,05	1,46	1,20	2,10	1,56	1,63	1,56	1,22	28,35		0,98	855
C	0,33	0,84	0,58	0,62	0,67	0,78	0,67	0,11	-0,97	-0,72	-0,95			

Analizując współczynniki regresji oraz korelacji dla poszczególnych 7 frakcji (1 $\rightarrow$ 7) rozkładu granulometrycznego stwierdzono, że około połowa z nich jest statystycznie istotna. Ułożone są jednak w sposób uniemożliwiający zauważenie regularności. Występujące przypadki różnicy znaków współczynnika regresji i współczynnika korelacji, jak również nieistotność współczynnika regresji przy wysokiej wartości współczynnika korelacji świadczą o ścisłym związku między występującymi w modelu parametrami. Przypadki takie mają miejsce w odniesieniu do najdrobniejszych frakcji, które są silnie skorelowane z wielkością powierzchni właściwej, dominującej pod względem istotności współczynników regresji i korelacji [67].

Nie istnieje więc możliwość wyboru takiej frakcji, która występująca w uproszczonym modelu w sposób regularny determinowałaby położenie poszczególnych punktów krzywej retencji wodnej. Spowodowane jest to, z fizycznego punktu widzenia, tym że o konfiguracji porów nie decydują zawartości poszczególnych frakcji oddzielnie, a kompleksowy rozkład granulometryczny ze wzajemnymi relacjami poszczególnych frakcji. Programy analizy regresji nie traktują zespołu tych parametrów jako całości, ale równorzędnie z pozostałymi parametrami w modelu. W wyniku analizy statystycznej badanego modelu (17) można otrzymać układ szesnastu równań, w których stale występowałyby powierzchnia właściwa i zagęszczenie oraz nieregularnie, dla poszczególnych pF, pozostałe parametry - w różnej liczebności. Niektóre z tych równań byłyby, jak już wspomniano, nawet 10-parametryczne.

Zdecydowano więc przeanalizować modele uwzględniające właściwości fizyczne fazy stałej gleby identyczne z modelem (17), z tą różnicą, że rozkład granulometryczny wyrażono w postaci syntetycznego wskaźnika. W otrzymanych 4-parametrycznych modelach, każda uwzględniana właściwość fizyczna wyrażona jest za pomocą jednego parametru. W modelach tych nie pominięto zawartości próchnicy, chociaż z testów statystycznych pierwotnego modelu (17) wynika, że w części równań parametr ten może być nieuwzględniany.

Do wyliczenia wilgotności przy różnych wartościach pF, przyjęto cztery modele, zawierające jako parametry różne syntetyczne wskaźniki rozkładu granulometrycznego:

$$Y(pFX) = b_o + b_H X_H + b_P X_P + b_S X_S + b_Z X_Z, \quad (18)$$

gdzie rozkład granulometryczny reprezentowany jest przez powierzchnię geometryczną S wyliczoną ze wzoru (1);

$$Y(pFX) = b_o + b_H X_H + b_P X_P + b_f X_f + b_Z X_Z, \quad (19)$$

gdzie jako parametr występuje wskaźnik rozkładu wymiaru ziaren f wyliczony wg wzoru (2);

$$Y(pFX) = b_o + b_H X_H + b_P X_P + b_D X_D + b_Z X_Z, \quad (20)$$

gdzie występuje jako parametr statystycznie środkowa średnica cząstek glebowych D wyznaczona graficznie wg zależności (3);

$$Y(pFX) = b_o + b_H X_H + b_P X_P + b_R X_R + b_Z X_Z, \quad (21)$$

z parametrem w postaci średniej statystycznie średnicy cząstek glebowych R wyliczone ze wzoru (4).

Współczynniki równań regresji (A), wartości t Studenta (B) i współczynniki korelacji (C) dla wyżej wymienionych modeli przedstawiono w tabelach 4-7. Wartości t Studenta i F Snedecora wynoszą odpowiednio: $t_{0,01} = 2,59$ i $F_{0,01} = 3,38$ dla pF zmiennego od 0 do 2,7 i 2,7 do 0 oraz $t_{0,01} = 2,73$ i $F_{0,01} = 3,93$ dla pF równego 3,7 i 4,2.

W badanych modelach (18-21) współczynniki regresji dla powierzchni właściwej (P) istotne są w całym zakresie pF , natomiast dla zagęszczenia (Z) - tylko w przedziałach pF : 0-2,7 i 2,7-0. Istotność współczynników regresji zawartości próchnicy jest różna; ich przydatność zostanie oceniona w optymalnym, z 4 prezentowanych, modelu.

Porównując poszczególne modele stwierdzono, że jedynie w przypadku modelu (21), występująca jako wskaźnik rozkładu granulometrycznego, średnia statystycznie średnica cząstek (R) posiada w zakresach pF : 0-2,7 i 2,7-0 zawsze istotne współczynniki regresji oraz najwyższe współczynniki korelacji przy najwyższych wartościach t Studenta. Przy $pF = 3,7$ i 4,2 współczynniki regresji dla R są nieistotne. Model (21), z R jako wskaźnikiem rozkładu granulometrycznego, posiada najwyższe spośród wszystkich czterech (18-21) współczynniki korelacji wielokrotnej przy najwyższych wartościach F Snedecora.

Tabela 2. Współczynnik równania regresji (A_0 , wartości i studenta (B , i współczynniki korelacji C , dla modelu wyliczenia wilgotności $Y(pfX) = b_0 + b_{11}X_{11} + b_pX_p + b_sX_s + b_zX_z$ model 18.

pH	A	b_0	b_{11}	b_p	b_s	b_z	Współczynnik korelacji wielokrotnej		Studenta
							8	9	
1	2	3	4	5	6	7			
0	A	70,78	0,01	0,061	-0,78	-42,80			
	B		0,03	7,33	0,71	58,70	0,98		2565
	C		0,26	0,80	0,65	-0,98			
1	A	79,66	0,37	0,071	-0,04	-37,74			
	B		3,65	8,83	0,04	53,81	0,98		2262
	C		0,30	0,82	0,66	-0,97			
1,5	A	75,35	0,64	0,065	3,90	-36,53			
	B		5,61	7,27	3,34	46,73	0,98		2076
	C		0,31	0,84	0,69	-0,96			
1,6	A	73,94	0,68	0,060	5,57	-36,17			
	B		5,74	6,39	4,55	44,11	0,98		1902
	C		0,31	0,84	0,70	-0,95			
2	A	66,15	0,85	0,026	15,11	-33,72			
	B		5,02	1,98	8,74	29,12	0,95		970
	C		0,28	0,83	0,75	-0,92			
2,2	A	58,39	0,86	0,031	17,26	-30,25			
	B		4,89	2,18	9,53	24,93	0,95		842
	C		0,27	0,84	0,77	-0,90			
2,3	A	55,44	0,71	0,027	18,10	-28,91			
	B		3,89	1,86	9,65	23,00	0,94		742
	C		0,25	0,84	0,78	-0,89			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,7	A	38,53	0,59	0,062	12,46	-19,96		
	B		2,25	4,31	6,73	16,09	0,92	506
	C		0,26	0,85	0,77	- 0,85		
3,7	A	- 1,58	-0,59	0,212	2,06	-		
	B		3,96	19,15	1,33	-	0,99	641
	C		0,16	0,98	0,88	-		
4,2	A	- 1,99	0,27	0,153	4,01	-		
	B		1,36	10,60	1,97	-	0,98	240
	C		0,18	0,97	0,89	-		
2,3'	A	47,15	0,53	0,063	11,91	-24,15		
	B		3,10	4,62	6,73	20,38	0,93	667
	C		0,26	0,85	0,77	- 0,88		
2,2'	A	48,76	0,54	0,065	11,66	-24,79		
	B		3,09	4,71	6,54	20,75	0,94	677
	C		0,26	0,85	0,76	- 0,88		
2'	A	53,29	0,69	0,064	11,36	-27,05		
	B		4,20	4,87	6,71	23,87	0,95	827
	C		0,28	0,85	0,76	- 0,90		
1,6'	A	59,45	0,70	0,071	7,62	-29,26		
	B		5,10	6,56	5,44	31,18	0,96	1223
	C		0,31	0,86	0,74	- 0,92		
1,5'	A	60,83	0,68	0,074	6,21	-29,59		
	B		5,22	7,24	4,67	33,21	0,97	1340
	C		0,31	0,86	0,73	- 0,93		
1'	A	67,07	0,69	0,087	1,32	-32,02		
	B		5,79	9,24	1,08	39,01	0,97	1629
	C		0,33	0,84	0,69	- 0,95		

Tabela 5. Współczynnik równania regresji (A), wartości t studenta (B) i współczynniki korelacji (C) dla modelu wyliczenia wilgotności $Y(pFX) = b_0 + b_H X_H + b_P X_P + b_f X_f + b_Z X_Z$ (model 19)

pF	A B C	b ₀	b _H	b _P	b _f	b _Z	Współczynnik korelacji wielokrotnej		F Snedecora
							8	9	
1	2	3	4	5	6	7			
0	A	90,48	0,03	0,057	0,20	-42,77	0,98	2562	
	B		0,20	10,64	0,43	57,83			
	C		0,26	0,80	-0,11	- 0,98			
1	A	78,47	0,34	0,075	1,11	-37,43	0,98	2504	
	B		3,66	14,59	2,51	53,08			
	C		0,30	0,82	-0,09	- 0,97			
1,5	A	78,25	0,55	0,080	-2,29	-37,03	0,98	2135	
	B		5,35	14,09	4,68	47,35			
	C		0,31	0,84	-0,17	- 0,96			
1,6	A	78,08	0,56	0,082	-3,27	-36,88	0,98	2006	
	B		5,24	13,83	6,44	45,49			
	C		0,31	0,84	-0,19	- 0,95			
2	A	75,93	0,46	0,090	-7,53	-35,27	0,96	1054	
	B		3,09	10,93	10,63	31,22			
	C		0,28	0,83	0,29	- 0,92			
2,2	A	68,34	0,38	0,108	-7,45	-31,71	0,95	848	
	B		2,36	12,04	9,69	25,86			
	C		0,27	0,84	-0,30	- 0,89			
2,3	A	65,31	0,19	0,110	-7,29	-30,30	0,94	721	
	B		1,10	11,67	9,02	23,49			
	C		0,25	0,84	-0,30	- 0,88			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,7	A	46,12	0,25	0,116	-5,76	-21,12		
	B		1,53	12,74	7,39	16,98	0,92	519
	C		0,26	0,85	-0,30	-0,85		
3,7	A	- 0,95	-0,66	0,22	-0,48	-		
	B		4,68	40,27	0,99	-	0,99	627
	C		0,16	0,98	-0,34	-		
4,2	A	- 1,25	-0,40	0,17	-0,23	-		
	B		2,11	23,56	0,35	-	0,97	215
	C		0,18	0,97	-0,33	-		
2,3'	A	54,75	0,22	0,114	-5,84	-25,35		
	B		1,44	13,21	7,91	21,52	0,94	698
	C		0,26	0,85	-0,29	-0,88		
2,2'	A	56,28	0,23	0,114	-5,79	-25,99		
	B		1,51	13,16	7,78	21,89	0,94	709
	C		0,27	0,85	-0,29	-0,88		
2'	A	60,61	0,40	0,112	-5,63	-28,21		
	B		2,69	13,59	7,98	25,08	0,95	867
	C		0,28	0,85	-0,27	-0,89		
1,6'	A	64,10	0,49	0,104	-3,50	-29,98		
	B		3,97	15,07	5,97	31,73	0,96	1243
	C		0,31	0,86	-0,22	-0,92		
1,5'	A	64,69	0,51	0,101	-2,95	-30,19		
	B		4,35	15,41	5,25	33,66	0,97	1361
	C		0,31	0,86	-0,21	-0,93		
1'	A	68,70	0,68	0,090	-1,38	-32,36		
	B		6,29	14,93	2,68	29,18	0,97	1651
	C		0,33	0,84	-0,16	-0,95		

Tabela 6. Współczynnik równania regresji (A), wartości t studenta (B) i współczynnik korelacji (C) dla modelu wyliczania wilgotności $Y(pFX) = b_0 + b_1X_H + b_PX_P + b_DX_D + b_ZX_Z$ (model 20)

pF	A	B	C	b ₀	b ₁	b _P	b _D	b _Z	Współczynnik korelacji wielokrotnej		F
1	2	3	4	5	6	7	8	9			
0	A	92,02	-0,14	0,061	5,92	-44,06			0,98		2569
	B		1,45	12,22	5,50	59,78					
	C		0,26	0,80	0,42	- 0,96					
1	A	80,47	0,26	0,074	3,65	-38,50			0,98		2541
	B		2,75	15,02	3,45	52,14					
	C		0,30	0,82	0,42	- 0,97					
1,5	A	75,33	0,54	0,088	2,07	-35,97			0,98		2030
	B		4,88	15,69	1,71	43,39					
	C		0,31	0,83	0,46	- 0,96					
1,6	A	73,47	0,60	0,091	4,95	-34,94			0,98		1877
	B		5,22	15,56	3,92	40,35					
	C		0,31	0,84	0,48	- 0,95					
2	A	63,14	0,85	0,104	21,18	-28,76			0,96		1391
	B		5,80	13,96	13,11	26,02					
	C		0,28	0,83	0,59	- 0,92					
2,2	A	54,44	0,92	0,118	26,47	-24,11			0,96		1226
	B		6,55	16,30	16,92	22,50					
	C		0,27	0,84	0,63	- 0,90					
2,3	A	51,14	0,80	0,118	28,47	-22,33			0,96		1147
	B		5,60	16,17	18,01	20,63					
	C		0,25	0,84	0,64	- 0,86					

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,7	A B C	34,87	0,74 5,00 0,26	0,122 16,09 0,85	-22,72 13,83 - 0,62	-14,78 13,14 - 0,85	0,94	711
3,7	A B C	- 1,47	-0,69 4,69 0,16	0,224 35,67 0,98	1,04 0,71 - 0,52	- - -	0,99	619
4,2	A B C	- 1,87	-0,48 2,44 0,18	0,181 21,90 0,97	2,55 1,31 - 0,48	- - -	0,98	226
2,3'	A B C	42,92	0,78 6,00 0,26	0,119 17,88 0,85	-24,96 17,37 - 0,64	-18,51 18,81 - 0,88	0,96	1123
2,2'	A B C	44,47	0,80 6,11 0,26	0,119 17,81 0,85	-25,12 17,39 - 0,64	-19,13 19,35 - 0,88	0,96	1147
2'	A B C	49,46	0,90 7,02 0,28	0,117 17,93 0,85	-22,92 16,19 - 0,61	-21,86 22,55 - 0,89	0,96	1293
1,6'	A B C	56,78	0,85 7,48 0,31	0,106 18,37 0,86	-15,84 12,62 - 0,56	-25,68 29,89 - 0,92	0,97	1636
1,5'	A B C	58,55	0,82 7,33 0,31	0,103 18,17 0,86	-13,36 10,88 - 0,55	-26,58 31,63 - 0,93	0,97	1682
1'	A B C	66,40	0,74 6,59 0,33	0,093 16,12 0,84	- 3,65 2,93 - 0,47	-31,21 36,58 - 0,95	0,97	1662

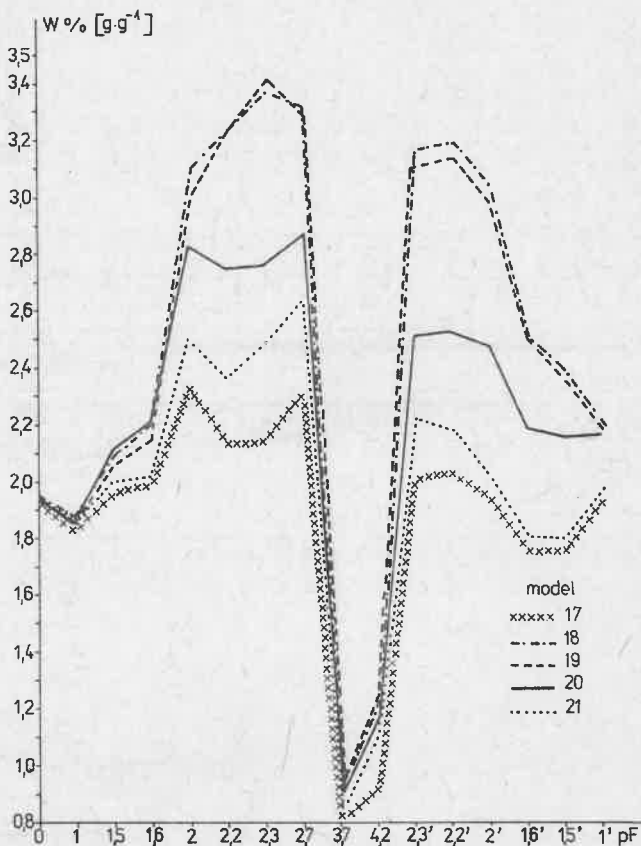
Tabela 7. Współczynnik równania regresji (A), wartości t studenta (B) i współczynniki korelacji (C) dla modelu wyliczenia wilgotności $Y(pFX) = b_o + b_H X_H + b_P X_P + b_R X_R + b_Z X_Z$ (model 21)

pF	A B C	2	b _o	b _H	b _P	b _R	b _Z	Współczynnik		F
								korelacji wielokrotnej	Snedecora	
1			3	4	5	6	7	8	9	
0	A		91,54	0,03	0,059	-1,22	-43,75			
	B			0,34	11,34	2,59	51,45	0,98	2591	
	C			0,26	0,80	-0,74	-0,98			
1	A		79,11	0,37	0,069	-1,41	-37,15			
	B			4,09	13,71	3,17	45,31	0,98	2574	
	C			0,30	0,82	-0,77	-0,97			
1,5	A		72,79	0,48	0,080	-7,83	-33,12			
	B			4,96	14,83	7,18	37,95	0,98	2297	
	C			0,31	0,83	-0,80	-0,96			
1,6	A		70,53	0,46	0,082	-10,55	-31,57			
	B			4,67	14,92	9,50	35,55	0,98	2247	
	C			0,31	0,84	-0,82	-0,95			
2	A		58,41	0,25	0,089	-24,63	-22,88			
	B			2,02	13,21	18,05	20,92	0,97	1547	
	C			0,28	0,83	-0,87	-0,92			
2,2	A		49,14	0,18	0,101	-29,26	-17,42			
	B			2,52	15,77	22,56	16,79	0,97	1666	
	C			0,27	0,87	-0,89	-0,90			
2,3	A		45,95	-0,01	0,101	-30,12	-15,69			
	B			0,08	15,11	22,12	14,41	0,97	1437	
	C			0,25	0,84	-0,89	-0,88			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,7	A	30,9	0,09	0,109	-23,60	- 9,66		
	B		0,70	14,79	15,74	8,06	0,94	790
	C		0,26	0,85	- 0,86	- 0,84		
3,7	A	- 2,01	-0,67	0,233	2,55	-		660
	B		4,87	33,67	1,68	-	0,99	
	C		0,16	0,98	- 0,64	-		
4,2	A	- 2,66	-0,42	0,195	4,39	-		245
	B		2,32	21,19	2,20	-	0,98	
	C		0,18	0,87	- 0,60	-		
2,3'	A	38,11	0,07	0,103	-27,10	-12,40		1480
	B		0,64	17,32	22,42	12,83	0,97	
	C		0,26	0,85	- 0,89	- 0,88		
2,2'	A	39,51	0,08	0,103	-27,58	-12,85		1562
	B		0,78	17,45	23,06	13,44	0,97	
	C		0,26	0,85	- 0,89	- 0,88		
2'	A	44,35	0,25	0,101	-26,71	-15,49		1976
	B		2,52	18,46	24,09	17,47	0,98	
	C		0,28	0,85	- 0,89	- 0,89		
1,6'	A	52,60	0,40	0,93	-20,11	-20,59		2436
	B		4,54	19,04	20,26	25,92	0,98	
	C		0,31	0,86	- 0,87	- 0,92		
1,5'	A	54,73	0,44	0,91	-17,72	-21,96		2390
	B		4,94	18,57	17,86	27,67	0,98	
	C		0,31	0,86	- 0,86	- 0,93		
1'	A	63,29	0,65	0,83	-10,24	-27,69		2021
	B		6,68	15,51	9,42	31,88	0,98	
	C		0,33	0,84	- 0,81	- 0,94		

Analiza wykazuje, że najlepszym kompleksowym wskaźnikiem granulometrycznego rozkładu w tego typu modelach (18-21) jest właśnie wielkość R.

Jako ostateczną weryfikację opisywanych modeli przyjęto porównanie standardowych błędów estymacji (SBE) wyliczanych wg wzoru (11). Na rysunku 5 przedstawiono wartości SBE dla wszystkich wartości pF, określające błąd aproksymacji modeli. Najniższe SBE wykazuje wieloparametryczny model (17). Z czteroparametrycznych modeli najlepszym w całym zakresie krzywej pF, zarówno w procesie osuszania, jak i nawilżania,



Rys. 5. Wielkości standardowych błędów estymacji zawartości wody dla wszystkich wartości pF wg modeli (17-21)

okazał się model (21). Modele 18 i (20) wykazują o wiele większe standardowe błędy estymacji w części krzywej retencji, a model (19) w całym jej zakresie.

Z punktu widzenia wielkości standardowych błędów estymacji konkurencyjne wydają się modele (17) i (21). Pierwszy z wymienionych wykazuje mniejsze SBE dla wszystkich wartości pF. Różnice między modelami zawiera się w przedziale 0,2-0,34%. Model (17) wykazuje minimalnie lepszą aproksymację z powodu występowania w nim dużej ilości parametrów. Te znikome różnice w wielkości standardowych błędów estymacji między modelami oraz fakt, że model (21) zawiera jedynie cztery parametry, z których każdy reprezentuje inną właściwość fizyczną, decydują o jego wyborze jako najbardziej optymalnym z porównywanych.

Analizując model (21) można stwierdzić, że istnieje możliwość dalszego jego uproszczenia - przez pominięcie zawartości próchnicy jako parametru najmniej istotnego z występujących w tym modelu. Zawartość próchnicy charakteryzuje się tu bowiem najniższymi współczynnikami korelacji - w porównaniu z pozostałymi parametrami - i tylko w połowie przypadków wykazuje istotność współczynnika regresji. Przy pF = 3,7 i 4,2 pominąć można również wielkość R. Powyższe uproszczenia prowadzą do uzyskania 3-parametrycznego modelu dla wartości pF: 0-2,7 i 2,7-0 oraz 1 parametrycznego (pominięto zagęszczenie, patrz rozdział "Założenia") dla wartości pF 3,7 i 4,2. Należy wspomnieć, że model zawierający powierzchnię właściwą jako parametr do wyliczania wilgotności trwałego wędnięcia roślin (pF = 4,2) był już wcześniej opracowany i stosowany [12, 84/.

Wyniki analizy statystycznej modelu w postaci:

$$Y(pFX) = b_0 + b_P X_P = b_R X_R + b_Z X_Z \quad (22)$$

dla wartości pF zmiennych od 0 do 2,7 i 2,7 do 0.

$$X(pFX) = b_0 + b_P X_P \quad (23)$$

dla wartości pF 3,7 i 4,2 przedstawiono w tabeli 8. Wartości krytyczne t Studenta i F Snedecora dla modelu (22) wynoszą $t_{0,01} = 2,59$ i $F_{0,01} = 3,85$, a dla modelu (23) - $t_{0,01} = 7,35$ i $F = 2,72$.

Tabela 8. Współczynniki równania regresji (A), wartości t studenta (B) i współczynniki korelacji (C) dla modelu wyliczania wilgotności $Y(pFX) = b_0 + b_p X_p + b_R X_R + b_Z X_Z$ w zakresie $pF = 0-2,7-0$ (model 22) i $Y(pFX) = b_0 + b_p X_p$ dla pF 3,7 i 4,2 (model 23)

pF	A			B			Współczynnik korelacji wielokrotnej		F	
	1	2	3	b_p	b_R	b_Z	7	8	Snedecora	8
0	A		91,60	0,060	- 0,93	-43,77				
	B			11,52	2,61	51,64	0,98			3462
	C			0,80	- 0,74	- 0,98				
1	A		79,79	0,072	- 1,34	-37,36				
	B			14,16	3,29	44,76	0,98			3164
	C			0,82	- 0,77	- 0,97				
1,5	A		73,66	0,084	- 7,75	-33,40				
	B			15,24	6,90	37,22	0,98			2879
	C			0,84	- 0,80	- 0,96				
1,6	A		71,37	0,085	-10,47	-31,83				
	B			15,34	9,19	34,99	0,98			2836
	C			0,84	- 0,82	- 0,95				
2	A		58,86	0,091	-24,64	-23,02				
	B			13,59	17,96	21,01	0,97			2045
	C			0,83	- 0,87	- 0,92				
2,2	A		49,46	0,102	-29,23	-17,52				
	B			16,12	22,50	16,89	0,97			2213
	C			0,84	- 0,89	- 0,90				
2,3	A		45,93	0,101	-30,13	-15,69				
	B			15,27	22,16	14,45	0,97			1921
	C			0,84	- 0,89	- 0,89				

2,7	A	31,07	0,110	-23,59	-	9,72	0,94	1055
	B		15,06	15,75	-	8,12		
	C		0,85	-	0,86	-		
3,7	A	- 1,81	0,212	-	-	-	0,98	1183
	B		34,41	-	-	-		
	C		0,98	-	-	-		
4,2	A	- 1,74	0,175	-	-	-	0,97	599
	B		24,48	-	-	-		
	C		0,97	-	-	-		
2,3'	A	38,23	0,104	-27,09	-12,44	-12,44	0,97	1976
	B		17,61	22,43	12,91	12,91		
	C		0,85	-	0,89	-		
2,2'	A	39,66	0,103	-27,57	-12,90	-12,90	0,97	2084
	B		17,75	23,06	13,52	13,52		
	C		0,85	-	0,89	-		
2'	A	44,80	0,103	-26,66	-15,63	-15,63	0,98	2597
	B		18,89	23,90	17,55	17,55		
	C		0,85	-	0,89	-		
1,6'	A	53,33	0,096	-20,05	-20,82	-20,82	0,98	3085
	B		19,41	19,70	25,62	25,62		
	C		0,86	-	0,87	-		
1,5'	A	55,53	0,094	-17,65	-22,21	-22,21	0,98	2997
	B		18,92	17,27	27,22	27,22		
	C		0,86	-	0,86	-		
1'	A	64,46	0,088	-10,13	-28,06	-28,06	0,97	2408
	B		15,77	8,84	30,69	30,69		
	C		0,84	-	0,81	-		

Zaproponowane koncepcje (22, 23) wykazują we wszystkich przypadkach istotność współczynników regresji. Występująca jedność znaków współczynników regresji i korelacji dowodzi poprawnego wyboru nieskorelowanych ściśle między sobą parametrów fizycznych. Różnice wartości współczynników korelacji wielokrotnej w obu ostatnich modelach, w porównaniu ze współczynnikami w modelu (21), nie przekraczają 0,01.

W celu porównania dokładności aproksymacji modeli (22) i (23) z uprzednio wybranym (21) należy zestawić wartości ich standardowych błędów estymacji, co uczyniono w tabeli 9. Wynika z niej, że SBE dla uproszczonych modeli (22) i (23) są znikomo wyższe niż dla modelu (21), a różnice nie przekraczają 0,09%, co jest przesłanką do uznania ich za najbardziej przydatne do praktycznego stosowania.

Po to, aby zobrazować dokładności aproksymacji wybranych optymalnych modeli dokonano graficznego i liczbowego przedstawienia ich funkcjonowania dla wybranych wartości pF. Wykorzystano do tego specjalnie opracowany program komputerowy, wymagający jako danych źródłowych wyników badań eksperymentalnych oraz parametrów badanego modelu (tab. 8). Efektem przedsięwzięcia jest obraz współzależności zawartości wody mierzonej (Y_M) oraz zawartości wody wyliczanej za pomocą wybranego modelu (Y_P). Wykresy wykonano na drukarce monochromowej. Widoczne cyfry informują o ilości punktów znajdujących się w prostokącie zajmowanym przez tę cyfrę. W przypadku idealnej dokładności estymacyjnej modelu wszystkie punkty winny być położone idealnie na prostej przechodzącej przez początek układu i będącej dwusieczną kąta zawartego między osiami współrzędnych.

Nad wykresami umieszczono: równania regresji ze współczynnikami; współczynnik korelacji r oraz współczynniki a i b równania prostej $Y_P = a + bY_M$ - w celu zobrazowania, jak dalece ta prosta obliczona metodą najmniejszych kwadratów odbiega od prostej $Y_P = Y_M$ w przypadku idealnej zdolności aproksymacyjnej równania. Nad rysunkami umieszczono także standardowy błąd estymacji SBE oraz względny błąd średni RAE wyliczony wg wzoru:

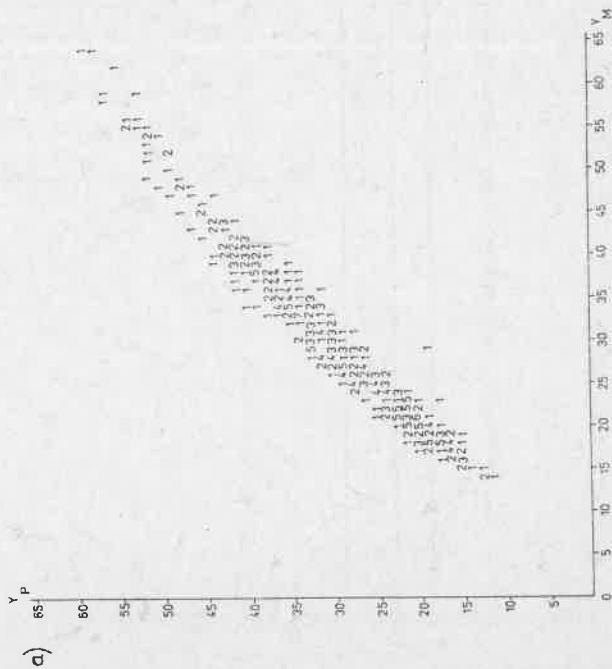
$$RAE = \sum_{i=1}^n \frac{Y_{Mi} - Y_{Pi}}{n Y_{Mi}} \cdot 100\% \quad (24)$$

Tabela 9. Standardowe błędy estymacji dla modeli (21-23) wyliczone wg wzoru (11)

Model	pF													
	0	1	1,5	1,6	2	2,2	2,3	2,7	3,7	4,2	2,3 ^b	2,2 ^b	2 ^b	1,6 ^b 1 ^a
(21)	1,94	1,87	2,00	2,03	2,50	2,37	2,49	2,64	0,86	1,13	2,21	2,18	2,03	1,81 1,81 1,98
(22)	1,94	1,91	2,05	2,08	2,51	2,38	2,49	2,64	~	~	2,21	2,19	2,04	1,86 1,87 2,07
(23)	~	~	~	~	~	~	~	~	1,08	1,22	~	~	~	~ ~ ~

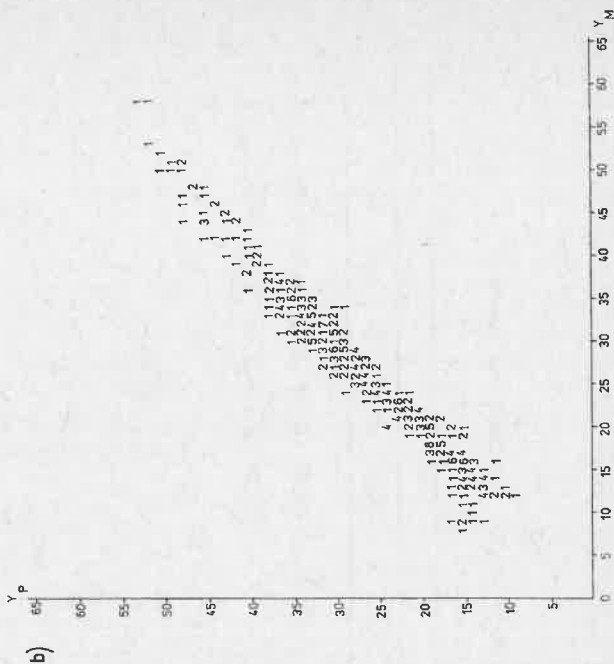
$$Y(10) = + 91.60 + 0.050 \cdot Y_P - 0.33 \cdot X_R - 43.77 \cdot X_Z$$

$$r = 0.9819 \quad \text{C.R.: } a = 1.2325 \quad b = 0.9569 \quad \text{SBE} = 1.941 \quad \text{RAE} = 5.7242$$



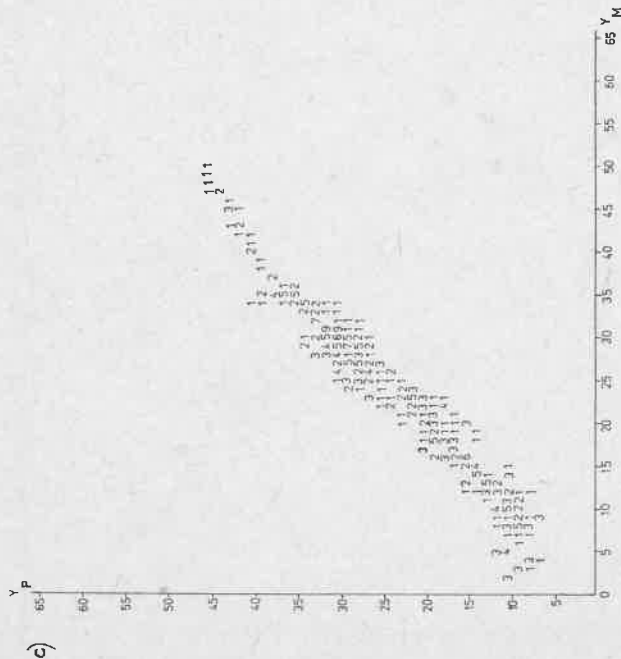
$$Y(11.6) = + 71.37 + 0.085 \cdot Y_P - 10.47 \cdot X_R - 31.83 \cdot X_Z$$

$$r = 0.9781 \quad \text{C.R.: } a = 1.0575 \quad b = 0.9592 \quad \text{SBE} = 2.083 \quad \text{RAE} = 7.5326$$



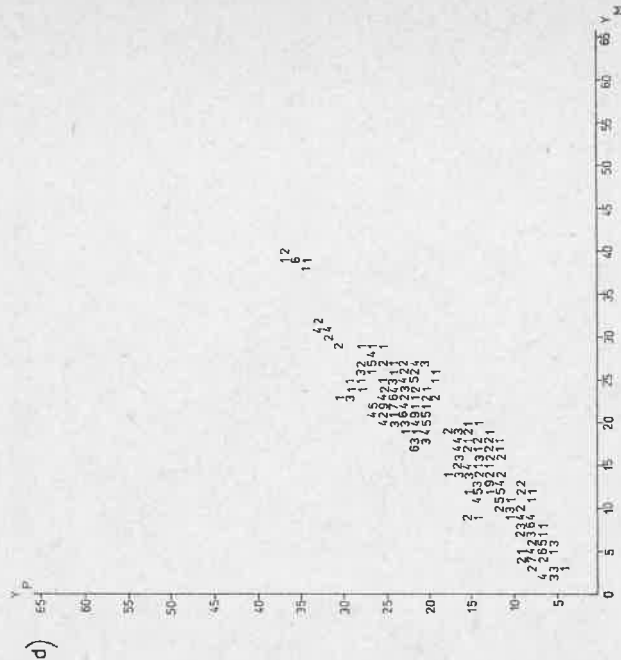
$$Y(2.2) = -49.46 + 0.102 \cdot X_p - 25.23 \cdot X_R - 17.52 \cdot X_Z$$

$$r = 0.9721 \quad C.R.: a = 1.2532 \quad b = 0.9449 \quad SBE = 2.375 \quad RAE = 15.0023$$



$$Y(2.7) = +31.07 + 0.110 \cdot X_p - 23.58 \cdot X_R - 9.72 \cdot X_Z$$

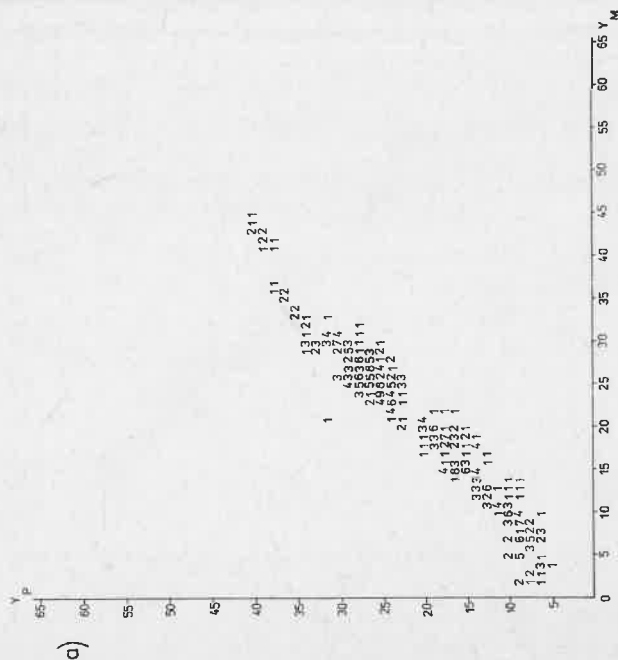
$$r = 0.9441 \quad C.R.: a = 1.9450 \quad b = 0.6878 \quad SBE = 2.730 \quad RAE = 19.2534$$



Rys. 6. Współzależność zawartości wody mierzonej (Y_M) i wyliczonej (Y_p) przy użyciu modelu (22) w procesie osuszania
 $a - pF = 0$; $b - pF = 1.6$; $c - pF = 2.2$; $d - pF = 2.7$

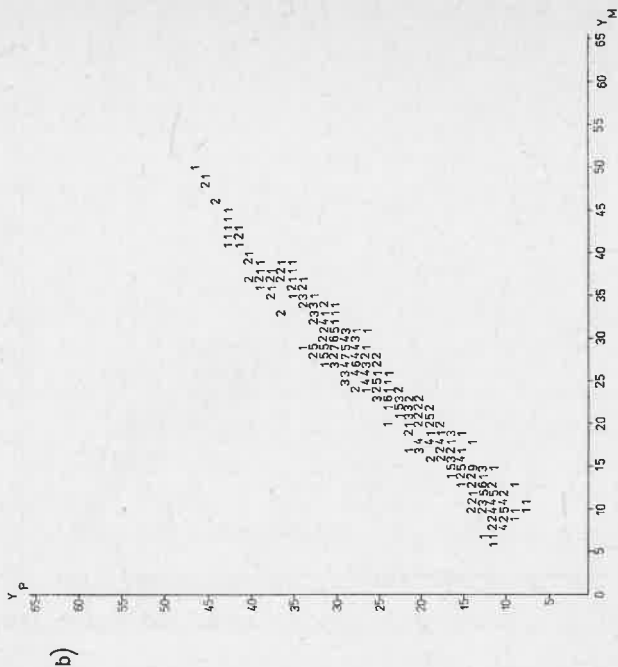
$$Y(2.2') = + 39.66 + 0.103 \cdot X_P - 27.57 \cdot X_R - 12.90 \cdot X_Z$$

$$r = 0.9705 \quad C.R.: a = 1.2466 \quad b = 0.9382 \quad SBE = 2.165 \quad RAE = 14.5173$$



$$Y(1.6') = + 53.33 + 0.086 \cdot X_P - 20.65 \cdot X_R - 20.82 \cdot X_Z$$

$$r = 0.9798 \quad C.R.: a = 0.9521 \quad b = 0.9580 \quad SBE = 1.860 \quad RAE = 7.3484$$



Rys. 7. Współzależność zawartości wody mierzonej (Y_M) i wyliczanej (Y_P) przy użyciu modelu (22) w próbie nawilżania: a - $pF = 2.2$; b - $pF = 1.6$

gdzie: Y_{Mi} - zmierzona zawartość wody i-tej próbki;

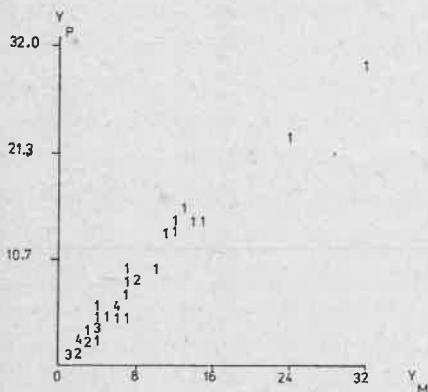
Y_{Pi} - wyliczona z modelu zawartość wody dla i-tej próbki;

n - ilość próbek.

Wykresy, o których mowa, przedstawiono na rysunkach: 6(a-d), 7(a, b) i 8. Ilustrują one wyraźnie to, o czym pisano wyżej - punkty obrazujące zależność Y_M od Y_P układają się blisko dwusiecznej kąta między osiami.

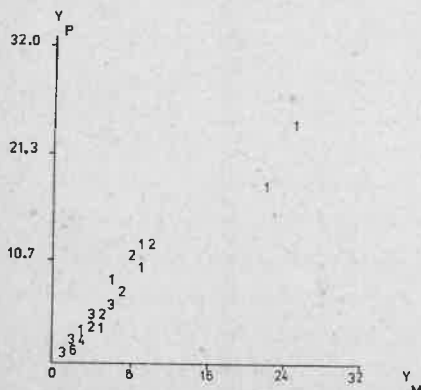
$$Y(3.7) = -1.81 + 0.212 \cdot X_P$$

$$r = 0.9847 \quad \text{C.R.:} \quad a = 0.1936 \quad b = 0.9695 \quad \text{SBE} = 1.076 \quad \text{RAE} = 18.8448$$



$$Y(4.2) = -1.74 + 0.175 \cdot X_P$$

$$r = 0.9705 \quad \text{C.R.:} \quad a = 0.2831 \quad b = 0.9419 \quad \text{SBE} = 1.217 \quad \text{RAE} = 26.6002$$



Rys. 8. Współzależność zawartości wody mierzonej (Y_M) i wyliczanej (Y_P) przy użyciu modelu (23) dla $pF = 3,7$ i $4,2$ w procesie osuszania

Współrzędne a i b równania $Y_P = a + bY_M$ wskazują, że proste opisane metodą najmniejszych kwadratów również zbliżone są do dwusiecznej.

PODSUMOWANIE

Zawartość i stan energetyczny wody w glebie są najistotniejszymi czynnikami środowiska glebowego, decydującymi o możliwościach zaopatrzenia roślin w wodę i wykorzystaniu substancji pokarmowych oraz kształtującymi warunki termiczne, wymianę gazową i właściwości mechaniczne gleby. Dlatego też znajomość charakterystyk potencjału wody w funkcji wilgotności, a szczególnie umiejętność ich przewidywania i kształtowania - przez regulację właściwości gleby determinujących przebieg tych charakterystyk - jest podstawowym problemem agrotechniki. Jego rozwiązanie uzależnione jest od poznania zespołu parametrów gleby istotnie związanych z jej zdolnością retencjonowania wody. Na tej podstawie można stosować zabiegi agrotechniczne, zwłaszcza pod kątem optymalizacji stosunków wodno-powietrznych w glebie.

Określenie takiego zespołu i ocena istotności wpływu poszczególnych parametrów na przebieg krzywej retencji mogą być prowadzone drogą znalezienia zależności funkcyjnych między wielkościami tych parametrów i zawartością wody dla różnych energii jej wiązania w glebie.

W ostatnich latach nieliczne prace dotyczyły opracowania modeli matematycznych służących do wyliczania przebiegu krzywych retencji wodnej gleby, wprowadzających jako zmienne różne zespoły parametrów jej fazy stałej. O zdolności aproksymacyjnej i przydatności praktycznej modeli decydował dobór występujących w nich parametrów.

Analiza znanych koncepcji wykazała, że nie zawierają one wszystkich fizycznie uzasadnionych parametrów oraz nie uwzględniają bardzo istotnego wpływu efektu histerezy, co w dużym stopniu ogranicza stosowalność tych modeli w badaniach teoretycznych i praktyce rolniczej.

W niniejszej pracy, korzystając z fizycznych podstaw teoretycznych, analizy danych literaturowych, prac własnych oraz statystycznej oceny wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych na zróżnicowanym materiale glebowym, zaproponowano zespół parametrów do modelu.

W hipotezie roboczej założono sprawdzenie istotności parametrów modelu za pomocą liniowej regresji wielokrotnej jako pierwszego przybliżenia zależności retencji wodnej od tych parametrów. Ze względu na wysokie współczynniki korelacji ($> 0,94$) i pozytywne wyniki testów istotności oraz niewysokie standardowe błędy estymacji ($< 2,64\%$) zdecydowano uznać przybliżenie liniowe jako wystarczające, chociaż możliwe są aproksymacje za pomocą innych funkcji.

Opracowany model w zakresach pF: 0-2,7 i 2,7-0 ma postać:

$$Y(pFX) = b_0 + b_P X_P + b_R X_R + b_Z X_Z,$$

a dla wartości pF 3,7 i 4,2:

$$Y(pFX) = b_0 + b_P X_P.$$

Wprowadzenie - po raz pierwszy - powierzchni właściwej do wieloparametrycznego modelu umożliwia określenie w jego ramach wpływu składu mineralogicznego i ilości cząstek ilastych na przebieg charakterystyk potencjału w funkcji wilgotności. Wyniki analizy statystycznej (istotność wszystkich współczynników regresji) potwierdziły konieczność wprowadzenia do modelu powierzchni właściwej jako parametru, przez co uzyskano na zdolnościach przewidywania.

Rozkład granulometryczny i miara upakowania cząstek - zagęszczenie, wraz z powierzchnią właściwą stanowią fizycznie uzasadniony i udokumentowany wynikami własnych badań zespół parametrów determinujący wodne właściwości gleby. Zagęszczenie charakteryzuje się zawsze istotnymi współczynnikami regresji i jego rola w modelu jest pierwszorzędna.

Dokonana analiza modeli, w których rozkład granulometryczny wyrażany był w postaci stabelaryzowanej, i wybranych liczbowych wskaźników rozkładu wykazała, że użycie średniej statystycznie średnicy cząstek pozwoliło na opracowanie prostego modelu dobrze nadającego się do prognozowania, umożliwiającego interpretację stwierdzonych zależności. Rola czwartego rozpatrywanego parametru - próchnicy, w przypadku badanych gleb okazała się mało istotna i jej pominięcie w modelu nie zmniejszyło praktycznie zakresu jego stosowności.

Dla zaproponowanego zespołu trzech zmiennych, obrazujących liczbę oraz trzy wybrane cechy fizyczne, możliwe jest prowadzenie badań teoretycznych (w celu uściślenia zależności funkcyjnych) oraz ich empiryczna weryfikacja - np. sprawdzanie przez zmianę wartość jednej z nich, dla ustalonych wartości dwóch pozostałych.

Wyniki badań własnych sugerowały konieczność uwzględnienia efektu histerezy w modelu wieloparametrycznym. Jego równania uwzględniają to zjawisko w zakresach pF: 0-2,7 i 2,7-0. Pozwala to na jednoznaczne określenie stanu wody w glebie (potencjał, wilgotność) po dowolnych zmianach potencjału lub zmianach zawartości wody (konsumpcja wody przez rośliny, procesy nawilżania i odwadniania). Do operacji rachunkowych można zaadaptować opracowany przez autora program numeryczny służący wyliczaniu zmian wilgotności po dowolnych zmianach potencjału wody [74].

Zawartość wody w glebie Y (pFX) w wymienionych wyżej zakresach pF można wyznaczyć podstawiając do poniższych równań wielkość powierzchni właściwej (P), średnią średnicę cząstek (R) oraz zagęszczenia (Z), a dla wartości wilgotności przy pF 3,7 i 4,2 - wystarcza tylko wielkość powierzchni właściwej (P). Równania te dla poszczególnych wartości pF przyjmują postać:

$$\begin{aligned} Y(pF 0) &= 91,60 + 0,060 X_P - 0,93 X_R - 43,77 X_Z, \\ Y(pF 1) &= 79,79 + 0,072 X_P - 1,34 X_R - 37,36 X_Z, \\ Y(pF 1,5) &= 73,66 + 0,084 X_P - 7,75 X_R - 33,40 X_Z, \\ Y(pF 1,6) &= 71,37 + 0,085 X_P - 10,47 X_R - 31,83 X_Z, \\ Y(pF 2) &= 58,86 + 0,091 X_P - 24,64 X_R - 23,02 X_Z, \\ Y(pF 2,2) &= 49,46 + 0,102 X_P - 29,23 X_R - 17,52 X_Z, \\ Y(pF 2,3) &= 45,93 + 0,101 X_P - 30,13 X_R - 15,69 X_Z, \\ Y(pF 2,7) &= 31,07 + 0,110 X_P - 23,59 X_R - 9,72 X_Z, \\ Y(pF 3,7) &= -1,81 + 0,212 X_P, \\ Y(pF 4,2) &= -1,74 + 0,175 X_P, \\ Y(pF 2,3') &= 38,23 + 0,104 X_P - 27,09 X_R - 12,44 X_Z, \\ Y(pF 2') &= 44,80 + 0,103 X_P - 26,66 X_R - 15,63 X_Z, \\ Y(pF 1,6') &= 53,33 + 0,096 X_P - 20,05 X_R - 20,82 X_Z, \end{aligned}$$

$$Y (pF 1,5') = 55,53 + 0,094 X_P - 17,65 X_R - 22,21 X_Z,$$

$$Y (pF 1') = 64,46 + 0,088 X_P - 10,13 X_R - 28,06 X_Z.$$

Opracowane modele mają duże znaczenie praktyczne ponieważ pozwalają łatwo ocenić kształtowanie się warunków wodno-powietrznych w glebie jako skutków jej deformacji w wyniki obróbki mechanicznej, uszkodzeń kołami ciągników i maszyn rolniczych oraz naturalnego osiadania. Jednocześnie umożliwiają ekonomiczne prognozowanie procesów nawadniania i odwadniania gleby.

Dalsze badania winny dotyczyć opracowania modelu do przewidywania przewodnictwa wodnego gleby w strefie nasyconej na podstawie znajomości parametrów jej fazy stałej. Umożliwiłby on - wraz z koncepcją przedstawioną w niniejszej pracy - oszacowanie wszystkich hydrofizycznych właściwości gleb.

WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań i ich analiza statystyczna pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Przebieg krzywej retencji wodnej gleb determinowany jest wielkością ich powierzchni właściwej, rozkładem granulometrycznym i zagęszczeniem; związki ilościowe między tymi właściwościami a zawartością wody w poszczególnych wartościach pF w procesach osuszania i nawilżania można określić, uwzględniając w modelach matematycznych jako najbardziej optymalny zespół tych właściwości;
2. Zastosowana statystyczna metoda analizy liniowej regresji wielokrotnej pozwoliła na testowanie i opracowanie modeli matematycznych opisujących z dobrą aproksymacją krzywą retencji wodnej gleb;
3. Wprowadzenie do modelu jako parametrów powierzchni właściwej i średniej statystycznie średnicy cząstek w charakterze kompleksowego wskaźnika rozkładu granulometrycznego umożliwiło opracowanie dokładnego, i prostszego od dotychczas znanych, modelu do wyliczania zawartości wody w poszczególnych wartościach pF ;
4. Optymalny model matematyczny zawiera jako parametry: wielkość powierzchni właściwej wyznaczanej metodą adsorpcji pary wodnej, średnią statystycznie średnicę wymiaru cząstek glebowych i zagęszczenie, a dla wartości $pF = 3,7$ i $4,2$ - jedynie wielkość powierzchni właściwej;
5. Opracowany model matematyczny do wyliczania przebiegu krzywej retencji wodnej, zawierający dwa stałe parametry gleby (wielkość powierzchni właściwej i średnią statystycznie średnicę cząstek) oraz jeden parametr zmienny (zagęszczenie) może znaleźć praktyczne zastosowanie do przewidywania zmian przebiegu krzywej retencji w czasie wraz ze zmianą zagęszczenia gleby oraz może być wykorzystany w symulacyjnych i prognostycznych modelach matematycznych ruchu i zużycia wody w profilu glebowym.

LITERATURA

1. Abrol J.P., Palta P.A., A study of the effect of aggregate size and bulk density on moisture retention characteristics of selected soils, *Agrochim.*, 1970, XIV, 2.
2. Alexander E.B., Bulk densities of California soils in relation to other soil properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44, 689.
3. Archer J.R., Smith P.D., The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soil, *J. Soil Sci.*, 1972, 23, 4, 475.
4. Bloemen G.W., Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 1980, 143, 581.
5. Błagojew W.W., Malijenko A.M., Majronowski A.E., Wlijanije razlicznich sposobow osnovnoj obrabotki na płodorodije poczwy i urożaj ozimój rżi, *Tr. AFI, Leningrad* 1982, 16.
6. Borowiec M., Wpływ zagęszczenia roli na właściwości fizyczne gleby oraz plonowanie ziemniaków, *Rocz. Nauk Rol.*, 1972, t. 69-C-3.
7. Box J.E., Taylor S.A., Influence of soil bulk density on matrix potential, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1962, 119.
8. Cieśła W., Zagadnienia gęstości gleb, *Post. Nauk Rol.* 1975, 1, 11.
9. Clausnitzer J., Die hysteresse der Wasserretentionskurve in Sandboden, *Arch. Acker-u. Pflanzenban u. Bodenk.*, 1978, 22, 2, 79.
10. Czurajew N.W., Swiatcew M.J., Zawisimost potencjalu włagi torfow ot włagosodierżanija i stiepieni upłatnienija, *Pocz.*, 1970, 5, 103.
11. Dechnik I., Stawiński J., Determination of the total surface area of soils on the basis of one measurement, *Pol. J. Soil Sci.*, 1970, III, 2, 15.

12. Dechnik I., Stawiński J., Powierzchnia właściwa w badaniach fizykochemicznych i fizycznych właściwości gleb, *Probl. Agrofiz.*, 1973, 6.
13. Dobrzański B., Dechnik I., Gliński J., Pondel H., Stawiński J., Powierzchnia właściwa gleb Polski, *Rocz. Nauk Rol.*, (monografia), S.D., 1977, t. 165.
14. Dobrzański B., Dechnik I., Stawiński J., Correlation between the soil surface-area and humus compounds in the soil, *Pol. J. Soil Sci.*, 1972, 5, 2, 99.
15. Dobrzański B., Domżał H., Wpływ melioracyjnej orki na wilgotność i zapas wody w glebie wytworzonej z piasku, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1968, 77b, 75.
16. Dobrzański B., Stawiński J., Walczak R., The availability of the method of thermal desorption of nitrogen for estimation of the surface area of soil material., *Pol. J. Soil Sci.*, 1971, IV, 2, 81.
17. Domżał H., Wpływ zagęszczenia gleby na zawartość wody silnie związanej oraz retencji wody produkcyjnej i użytkowej. *Rocz. Gleb.*, 1979, XXX, 3, 45.
18. Domżał H., Compaction of the solid phase and its role in the formation of the water-air properties of soil. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 1983, 220 II, 137.
19. Domżał H., Martyn W., Słowińska-Jurkiewicz A., Wykorzystanie oznaczeń wodno-powietrznych właściwości rędzin do określania wilgotności początku nawadniania oraz wielkości dawek polewanych, *Rocz. Gleb.*, 1975, t. XXVI, 3, 183.
20. Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Wpływ nacisku na strukturę porów i pojemność wodną gleby, *Rocz. Gleb.*, 1975, t. XXVI, 1, 49.
21. Feddes R.A., Kowalik P., Zaradny H., Simulation of field water use and crop field, *Sin. Monographs*, Wageningen 1978.
22. Ghosh R.K., Estimation of soil-moisture characteristics from mechanical properties of soil, *Soil Sci.*, 1980, 130, 2, 60.

23. Giesel W., Renger M., Strebel O., Berechnung des kapillaren Aufstiegs aus der Grundwasser in der Warzelraum unter stationaren Bedingungen, Z. Pflanzenern. u. Bodenkd., 1972, 132, 1; 9.
24. Grimes D.W., Biskop J.C., The influence of some soil physical properties on potato yields and grade distribution, Am. Potato, J., 1971, 48, 11, 414.
25. Gupta S.C., Larson W.E., Estimation soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter, Percent and bulk density, Water Resources Res., 1979, 1633.
26. Haman K., Biological effects of soil compaction, Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1979, 220 I, 151.
27. Haman J., Pukos A., The influence of agricultural engineering on the condition of soils. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1976, 168, 21.
28. Hill J.N.S., Sumner M.E., Effect of bulk density on moisture characteristics of soils, Soil Sci., 1967, 103, 234.
29. Husz G. von, Ermittlung der pF-Kurve aus der Textur mit Hilfe von multiplen Regression, Z. Pflanzenernahr, Düng. Bodenkd., 1967, 116, 2, 115.
30. Jong R. de, Loebel K., Empirical relations between soil components and water retention at 1/3 and 15 atmospheres, Can. J. Soil Sci., 1982, 62, 343.
31. Kaniewska J., Walczak R., A numerical interpretation of the analysis of the hysteresis phenomenon in the drying and wetting processes of soil, Pol. J. Soil Sci., 1974, 7, 1, 63.
32. Kimpe C.R., Bernier-Cardon M., Jolicoeur P., Compaction and settling of Quebec soils in relation to their soil water properties, Can. J. Soil Sci., 1982, 62, 165.
33. Kłaušnicer J., Wlajanije plotnosti na ispolzowanie włagi w liosowych poczwach GDR, Pocz. 1976, 8, 81.
34. Konstankiewicz K., The influence of determation on pore size distribution in the soil of various moisture, Zesz. Probl. Post. Rol., 1976, 168, 211.

35. Kowalik P., Kaniewska J., Numeryczne równania przepływu wody w glebie, *Probl. Agrofiz.*, 30, 1979.
36. Kowalik P., Stępniewski W., The significance of soil aeration for plants, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1979, 220 I, 61.
37. Kowaliński S., Giedrojć B., Wpływ składu mechanicznego gleby na dostępność wody dla roślin uprawnych, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1968, 86, 23.
38. Miczurin B.N., Swiaz sodierżanija włagi so wsasywajuszczim dawleniem i plotnostiu poczwy, *Teor. Wopr. Obrab. Poczw.*, 1968, 1, 5.
39. Miczurin B.N., Oniszczenko W.G., Zawisimost mieźdu wsasywajuszczim dawleniem i wlaźnostiu w poczwach s raznuju udielnuju powierzchnostiu i plotnostiu, *SB. Tr. AFI.*, 1970, 22, 25.
40. Miczurin B.N., Oniszczenko W.G., Izobarnoje izmienienie wodoudierżajuszczej sposobnosti poczw w zawisimosti od ich udielnoj powierzchnosti, *Teor. Wopr. Obr. Poczw.*, 1972, 3, 134.
41. Miczurin B.N., Oniszczenko B.G., Zawisimost priwiedienogo dawlenija od sodierżanija swobodnoj włagi w poczwie, *Poczw.*, 1975, 6, 76.
42. Oniszczenko W.G., Issledowanie wlijanija udielnoj powierzchnosti i plotnosti na rawnowiesie i pieriedwiženije włagi w nienasyszczennych poczwach, dysertacja doktorska AFI. Leningrad 1971.
43. Oniszczenko W.G., Miczurin B.N., Wlijanije uplotnienija na wodnyje swojstwa poczwy, *Poczw.*, 1971, 5, 42.
44. Oniszczenko W.G., Miczurin B.N., Obobszczenie zawisimosti dawlenija włagi i wlażoprowodnosti ot wlaźnosti w odnorodnych miechanicznych frakejach, *Poczw.*, 1976, 4, 82.
45. Pidgeon J.D., The measurement and prediction of available water capacity of ferrallitic soils in Uganda, *J. Soil Sci.*, 1972, 23, 431.
46. Prusinkiewicz Z., Microbiological activity of soils as a function of the soil water potential, *Pol. J. Soil Sci.*, 1974, VII, 1, 81.
47. Rawls W.J., Brakensiek D.L., Saxton K.E., Estimation of soil water properties, *Trans. ASAE*, 1982, 25, 5, 1316.
48. Reeve M.J., Smith P.D., Thomasson A.J., The effect of

- density on water retention properties of field soils, *Soil Sci.*, 1973, 24, 3, 355.
49. Richards L.A., Pressure - membrane apparatus construction and use, *Agric. Eng.*, 1947, 28, 451.
 50. Rivers E.D., Shipp R.F., Soil water retention as related to particle size in selected sands and loamy sands, *Soil Sci.*, 1978, 126, 2, 94.
 51. Rząsa S., Bender J., Wyniki wstępnych badań nad wpływem niektórych roślin uprawnych na zwięzłość gleby, *Pr. Komis. Nauk Rol. i Leś. Pozn. Tow. Przyj. Nauk*, 1972, t. 12, 3.
 52. Salter P.J., Williams J.B., The influence of texture on the moisture characteristics of soil. V. Relationships between particle size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available water, *Soil Sci.*, 1969, 20, 1, 126.
 53. Schurman J.J. Boer J.J.H. de, The effect of soil compaction at various depths on root and shoot growth of oats, *Neth. J. Agric. Sci.*, 1974, 22, 133.
 54. Scott Russel R., Gos M.J., Compaction and root growth in relation to cultivation, *Proc. 7th Conf. Int. Soil Tillage Res. Org. (ISTRO)*, Uppsala, Sweden 1976.
 55. Sienkiewicz J., Gonet I., Wpływ ciężaru objętościowego gleby na plonowanie zbóż jarych, *Mater. Międzyn. Konf. Nauk. "Współczesne kierunki w uprawie roli"*, Warszawa 1972, 39.
 56. Skałaban W.D., O swiazi formy zawisimosti potencjała wody ot włazności poczwy s miechaniczeskim sostawem, *Poczw.*, 1971, 8, 114.
 57. Sokołowska B.A., O roli plotnosti poczwy w uswojenii dostupnoj włagi rastieniami, *Sb. Tr. AFI*, 1970, 22, 32.
 58. Stakman W.P., Harst G.G. van der, Determination of soil moisture retention curve. II. Pressure membrane apparatus range pF 3 to 4,2, *Inst. for Land and Water Management Res. Wageningen*, 1969.
 59. Sudakow A.W., Ochotin A.A., Wlijanije uplotnienija podpachotnyh gorizontow na dinamiku objemnoj massy dielniowo-podzolistych poczw i urożaj jaczmiennija i ozimój pszenicy, *Tr. AFI Leningrad*, 1982, 3.

60. Sudakow A.W., Pietruszenko S.E., Wlijanije plotnosti poczwy na rost korniewych system i nakoplienije nadziemnoj massy kukuryzy, Tr. AFl Leningrad, 1982, 10.
61. Suskevic M., Stranak A., Vliv fizikalniko stavu pudy na rust korenu jarniko jecmene, Rostl. Wyroba, 1971, 17, 10, 1055.
62. Świerchalski L., Wpływ zagęszczenia gleby na plonowanie niektórych roślin zbożowych i okopowych, Mater. Międzyn. Konf. Nauk. "Współczesne kierunki w uprawie roli", Warszawa 1972 23.
63. Taylor H.M., The effect of soil compaction on rooting patterns and water uptake of cotton, Proc. 7th Conf. Int. Soil Tillage Res. Org. (ISTRO), Uppsala, Sweden, 1976.
64. Taylor H.M., Gardner H.R., Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strenght of soil, Soil Sci. 1963, 96, 3, 153.
65. Trietiakow N.N., Iwanow W.K., Ob optimalnoj plotnosti poczwy dla propaszhnykh kultur, Teor. Vopr. Obr. Poczw., 1968, 1, 292.
66. Trowse A.C. jr., Effect of soil bulk density on root elongation, Zesz. Probl. Podst. Nauk Rol., 1979, 220 I, 349.
67. Trzecki S., An attempt of calculate the total area of several differēnt soils from the mechanical composition, Pol. Soil Sci., 1973, VI, 1, 21-26.
68. Trzecki S., Determination of water capacity of soils on the basis of their mechanical composition, Rocz. Gleb., 1974, t. XXV(dod.), 33,
69. Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Badania właściwości wodno-powietrznych gleb ugniatanych kołami ciągników i narzędzi rolniczych podczas wykonywania prac polowych, Rocz. Nauk Rol. 1974, A-100-3, 97.
70. Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Wpływ frakcji koloidalnej z uwzględnieniem próchnicy na maksymalną higroskopijność, granice konsystencji i pęcznienia gleb lessowych, Rocz. Gleb. 1974, XXV, 3, 85.
71. Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Martyn W., Wpływ frakcji iłu koloidalnego, węgla wapnia i próchn-

- nicy na zawartość wody silnie związanej, plastyczność i pęcznienie
rędzin, Rocz. Gleb. 1975, XXVI, 3, 35.
72. Walczak R., A talajtömbvodes hatása a víz kotesi energijára,
Agraratudományi Egyeten Kozlemenyci, 1975, 329.
 73. Walczak R., The effect of soil compaction on water bounding
energy, Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1976, 168, 187.
 74. Walczak R., Model investigations of water binding energy in soils
of different compaction, Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1977, 197, 11.
 75. Walczak R., Witkowska B., Doliński A., Usowicz B.,
Aparatura do wyznaczania charakterystyk potencjału wody glebowej
wilgotność z automatycznym układem wytwarzania podciśnienia, Pr.
Komis. Fiz. Gleb PTGleb., 1983 (w druku).
 76. Walczak R., Zawadzki S., Soil water as a basic factor of
the growth and crop field of plants, Zesz. Probl. Podst. Nauk Rol.,
1979, 220 I, 53.
 77. Varallyay G., Soil factors limiting optimum water supply of plants,
Zesz. Probl. Podst. Nauk Rol., 1979, 220 I, 371.
 78. Varallyay G., Rajkaj K., Mironienko J.W., Paczepszki
J., Szczerbakow R.A., Matematyckieskoje opisanije osnovnych
wodnofizyckieskich charakteristik poczw, Poczw., 1982, 4, 77.
 79. Zatywarenko L.S., Płotność poczw i urożaj lna, Len i konop.,
1973, 3, 21.
 80. Zawadzki S., The influence of mechanical composition of soils
on soil moisture retention, Pol. J. Soil Sci., 1970, III, 1, 11.
 81. Zawadzki S., An aproximate method of determining water reten-
tion capacity of soils, Pol. J. Soil Sci., 1970, III, 2, 9.
 82. Zawadzki S., Michałowska K., The relationship between pF
values and soil-surface area, Pol. J. Soil Sci., 1974, VII, 1, 47.
 83. Zawadzki S., Michałowska K., Określenie w komorach ciś-
nieniowych czasu utrwalania się stanu równowagi wilgotności gleb
dla poszczególnych wartości pF, Rocz. Nauk Rol., 1974, S.F.,
78, 3, 69.
 84. Zawadzki S., Michałowska K., Stawiński J., The application
of surface area measurements of soils for determination of the content
of water unavailable for plants, Pol. J. Soil Sci., 1971, IV, 2, 89.

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty
PROBLEMÓW AGROFIZYKI

1. Jan Gliński, Witold Stępniewski - Zastosowanie chromatografii gazowej w badaniach gleboznawczych. 1972.
2. Piotr Kowalik - Podstawy teoretyczne pomiarów potencjału wody glebowej. 1972.
3. Jan Gliński, Jerzy Duliban - Potencjał oksydoredukcyjny w glebach. 1972.
4. Małgorzata Dąbek-Szreniawska - Mikrobiologiczne aspekty tworzenia się agregatów glebowych. 1972.
5. Bogusław Szot - Rozwój badań właściwości fizycznych materiałów rolniczych. 1972.
6. Ignacy Dechnik, Janusz Stawiński - Powierzchnia właściwa w badaniach fizykochemicznych i fizycznych właściwości gleb. 1973.
7. Adam Pukos, Ryszard Walczak - Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb. 1973.
8. Bogusław Szot, Grażyna Kolemba - Metody oceny wylegania zbóż. 1973.
9. Janusz Haman, Bogusław Szot, Wanda Woźniak - Zagadnienie wymiany ciepła i masy w materiałach roślinnych. 1973.
10. Materiały seminarium poświęconego fizyce wody glebowej. Praca zbiorowa. 1973.
11. Henryk Czachor, Ryszard Walczak - Zamknięte źródła radioizotopowe w badaniach fizycznych właściwości gleb. 1974.
12. Zastosowanie analizy spektralnej w badaniach rolniczych. Praca zbiorowa. 1974.
13. Krystyna Konstankiewicz, Adam Pukos, Ryszard Walczak - Dome-