

## WYZNACZANIE RETENCJI WODNEJ NA PODSTAWIE WIRTUALNEJ STRUKTURY OŚRODKA GLEBOWEGO

H. Czachor

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego, Polska Akademia Nauk, ul. Doświadczalna 4,  
P.O. Box 201, Lublin 27

**Streszczenie:** Przedstawiono metodę wyznaczania retencji wodnej na podstawie wirtualnej struktury 2D i 3D badanego ośrodka glebowego. Opiera się ona o model pojedynczego wieloparametrowego poru i metodę tesselacji ośrodka dwu i trójwymiarowego. Przeanalizowano wpływ rodzaju mechanizmu osuszania poru na wynik retencji wodnej ośrodka, a wyniki porównano z danymi eksperymentalnymi dla ośrodków o składzie piasku i piasku pylastego.

**Słowa kluczowe:** retencja wodna, wirtualny ośrodek granularny, perkolacja, tesselacja

### WSTĘP

Retencja wodna ośrodka glebowego jest wynikiem oddziaływań atrakcyjnych między powierzchnią jego fazy stałej i cząsteczkami roztworu glebowego. Ilościowo stan energetyczny roztworu określany jest przez potencjał całkowity  $\Psi_t$ , który liczbowo równy jest pracy związanej z izotermicznym, odwracalnym przeniesieniem jednostki masy wody z gleby do warunków standardowych, tzn. do czystej, nie związanej wody znajdującej się na tym samym poziomie pod tym ciśnieniem atmosferycznym. Na ogół uważa się, że jest on sumą kilku niezależnych składowych [1,8-10,15]:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_s + \Psi_z \quad (1)$$

gdzie:  $\Psi_p$  - potencjał ciśnienia  $p$ ,  $\Psi_m$  - potencjał matrycowy wilgotności  $\theta$ ,  $\Psi_s$  - suma potencjałów osmotycznych składników roztworu o koncentracji  $n_j$ ,  $\Psi_z = \rho_w * g * z$  - potencjał grawitacyjny,  $\rho_w$  - gęstość wody,  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $z$  - pionowa odległość od punktu pomiaru do poziomu odniesienia.

W praktyce pomiar potencjału wody glebowej sprowadza się na ogół do określenia jego składowej matrycowej (czyli potencjału macierzystego), ponieważ pozostałe z nich są często bardzo małe lub łatwo je określić niezależnymi metodami. Potencjał matrycowy [7] związany jest z istnieniem w ośrodku powierzchni rozdziału między fazą stałą, ciekłą i gazową (powietrzem). Roztwór glebowy tworzy w nienasyconym ośrodku meniski i błonki wodne, z czym związane są zjawiska kapilarne pierwszego i drugiego rodzaju. Pierwsze z nich wynika z geometrii menisku, która określona jest przez napięcia

powierzchniowe na granicy rozdziału faz oraz przez geometrię fazy stałej. Z kształtem menisku związane jest ciśnienie kapilarne  $p_{c1}$ , którego wartość określona jest przez równanie Young'a-Laplace'a:

$$p_{c1} = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cos(\alpha_w) \quad (2)$$

gdzie:  $\sigma$  - napięcie powierzchniowe wody,  $\alpha_w$  - graniczny kąt zwilżania,  $r_1$  i  $r_2$  - główne promienie krzywizny menisku.

Promienie krzywizny mają wartość dodatnią, jeśli środek okręgu z nim związany znajduje się wewnątrz cieczy zwilżającej. Suma  $1/r_1 + 1/r_2$  jest krzywizną menisku w danym punkcie menisku. Analityczne określenie krzywizny menisku jest możliwe jedynie dla nielicznych, stosunkowo prostych kształtów kapilar, np. kapilary cylindrycznej o przekroju kołowym. Jeśli przyjąć, że kąt zwilżania  $\alpha_w = 0$ , wówczas ciśnienie kapilarne jest ujemne, gdyż oba promienie są również ujemne i równe, a ich wartości bezwzględne równają się promieniowi geometrycznemu kapilary:

$$p_{c1} = \frac{2\sigma}{r_k} \quad (3)$$

Ciśnienie kapilarne drugiego rodzaju  $p_{c2}$  jest związane z istnieniem stosunkowo cienkiej warstwy wodnej na powierzchni fazy stałej. Ma ono istotne znaczenie przy grubościach błonek wodnych rzędu  $10^{-9}$  m, tzn. odgrywa istotną rolę dla gleb o znacznej zawartości cząstek ilastych, charakteryzujących się znaczną powierzchnią właściwą i dla niskich ich wilgotności. Na przykład przy powierzchni właściwej  $40 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$  ciśnienie błonkowe  $p_{c2} = 500 \text{ cm H}_2\text{O}$  co odpowiada grubości błonki  $4 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  (40Å) lub wilgotności wagowej 0,12 kg H<sub>2</sub>O/kg gleby. Powierzchnia właściwa gleb piaszczystych jest co najmniej o rząd wielkości mniejsza i znaczenie wody błonkowej jest niewielkie.

Chcąc określić wartość liczbową całkowitego ciśnienia kapilarnego  $p_{c1} + p_{c2}$ , porównuje się je z ciśnieniem hydrostatycznym,

$$\rho_w g h = p_{c1} + p_{c2} \quad (4)$$

gdzie:  $h$  - wysokość słupa wody o gęstości  $\rho_w$ .

Składowa macierzysta potencjału wody glebowej związana jest więc z rozwinięciem powierzchni ( $p_{c2}$ ) i jej geometrią ( $p_{c1}$ ). W glebach piaszczystych i pyłowych, przy wilgotnościach średnich i wysokich, zdecydowana większość wody wiązana jest przy pomocy menisków.

### WIRTUALNY OŚRODEK GRANULARNY

Rutynowo wyznaczanie retencji wodnej gleb wykonywane jest przy pomocy płyt porowatych i tensjometrów. W obu przypadkach procedura pomiarowa polega na

określeniu wilgotności odpowiadającej określonego potencjałowi (ciśnieniu). Podstawowa wada tych metod wiąże się z koniecznością posiadania odpowiedniej aparatury pomiarowej, a same pomiary - z bardzo długimi czasami osiągnięcia stanu równowagi układu płyta porowata - próbka glebowa. W przypadku gleb ciężkich i niskich wilgotności czas osiągnięcia równowagi może wynosić nawet kilkanaście dni.

Upraszczając problem można założyć, szkielet gleby składa się z cząstek mineralnych, które stykając się ze sobą tworzą jej strukturę. Między cząstkami istnieje układ porów określony przez geometrię cząstek glebowych. Rozkład wielkości porów i struktura ich wzajemnych połączeń decyduje z kolei o większości charakterystyk fizycznych ośrodków w tym retencji wodnej. Poznanie tak rozumianej struktury nie jest realne w odniesieniu do ośrodków rzeczywistych. Można jednak utworzyć ośrodek wirtualny będący komputerową rekonstrukcją układu rzeczywistego, który będzie posiadał wybrane, najważniejsze jego cechy.

Pokazano [2-4], że ośrodek taki można stworzyć metodą symulacji upakowania pojedynczych cząstek polidispersyjnych wykorzystując jako dane wejściowe jedynie skład granulometryczny i porowatość badanego ośrodka. W pracach tych przyjęto, że równość składów granulometrycznych i porowatości dwóch ośrodków: rzeczywistego i wirtualnego jest warunkiem ich podobieństwa. Oznacza to możliwość odnoszenia wyników uzyskanych z analizy ośrodka wirtualnego do ośrodka rzeczywistego. W Tabeli 1 przedstawiono wyniki porowatości dla kilku ośrodków o składzie piasku i piasku pylastego. Wyniki z badań symulacyjnych są bardzo zbliżone do wartości zmierzonych (różnica względna  $\leq 5\%$ ). Ponadto opracowano metodę podziału ośrodka na pojedyncze pory, z których każdy został sparametryzowany poprzez określenie objętości (3D)/powierzchni (2D) i ciśnień kapilarnych związanych z przewężeniami.

**Tabela 1.** Porównanie zmierzonych i przewidywanych porowatości teksturalnych dla wybranych ośrodków piaszczystych i piaszczysto-pylastych [3].

**Table 1.** Measured and calculated porosity values of investigated sandy and sandy loam materials

Opis ośrodka (frakcje granulometryczne w mikrometrach)	Porowatość objętościowa (%)	
	z symulacji $P_{sym}$	zmierzona $P_{pom}$
kulki szklane:(10-31)-1,3%, (31-50)-16,0%, (50-62,5)-66,4%, (62,5-80,0)-14,1%	36,1	34,9
frakcja piasku 1, (125-250)-100%	37,1	37,0
frakcja piasku 2, (88,5-105,0) -100%	36,6	36,5
frakcja piasku 3; (52,0-62,5)- 100%	40,1	39,0
piasek rzeczny: (<25)-4,0%, (25-40)-1,0%, (40-50) -1,5%, (50-70)-3,0%, (75-100) -4,0%, (100-150) -15,5%, (150-250)- 25,0%, (250-350) -16,5%, (350-500) -14,3%, (500 -600)-5,2%, (600-750)-5,5%, (750-1000)-4,2%	34,7	34,2

Prace symulacyjne prowadzono dla wirtualnych ośrodków dwu- i trójwymiarowych. Ośrodek trójwymiarowy (3D) powstawał w wyniku symulacji upakowania cząstek w przestrzeni, a ośrodek dwuwymiarowy (2D) otrzymywano wykonując przekrój ośrodka 3D.

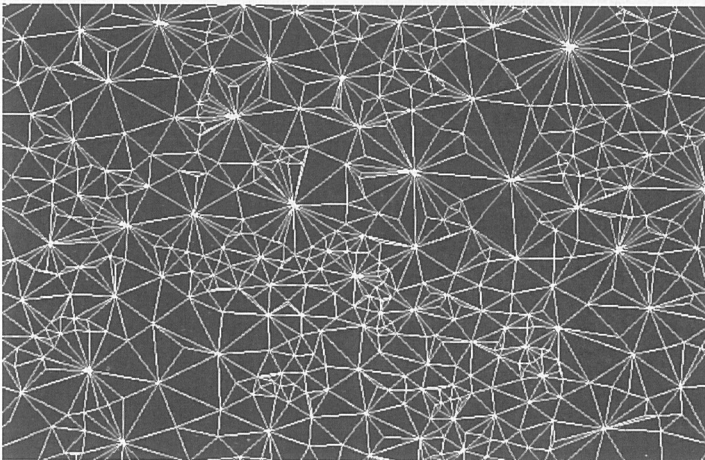
Znajomość wirtualnej struktury pozwala więc na podjęcie próby określenia retencji wodnej gleby zarówno na podstawie geometrii ośrodka trójwymiarowego, jak i na podstawie jego przekroju.

#### OKREŚLANIE ZALEŻNOŚCI POTENCJAŁ KAPILARNY - WILGOTNOŚĆ NA PODSTAWIE PRZEKROJU WIRTUALNEGO OŚRODKA GLEBOWEGO (2D)

Na Rys. 1 przedstawiono sieć porów dwuwymiarowych, która może być podstawą wyznaczenia zależności wilgotność objętościowa - potencjał kapilarny osuszania. Każdy trójkąt zawiera jeden por i 3 fragmenty tworzących go cząstek. Wilgotność ośrodka przy danym potencjale jest wypadkową stanów wszystkich porów i równa się stosunkowi powierzchni porów "wilgotnych" do całkowitej powierzchni przekroju ośrodka,

$$\theta(h) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{p_i}(h_i \geq h)}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (5)$$

gdzie:  $S_{p_i}(h_i > h)$  - powierzchnia i-tego poru "wilgotnego", którego ciśnienie kapilarne  $h_i$ , związane z największym przewężeniem równaniem Younga- Laplace'a, jest większe od ciśnienia  $h$  (tzn. ciśnienia wymuszającego osuszanie),  $S_i$  - powierzchnia trójkąta, którego



Rys. 1. Przykład triangulacji ośrodka 2D z Tabeli 1 (piasek rzeczny).

Fig. 1. An example of the triangulation of 2D pore medium from Table 1 (river sand).

część stanowi por  $i$ -ty, suma ich równa się powierzchni przekroju,  $n$  - liczba porów ośrodka.

Ponieważ nie wiadomo dokładnie jak zachodzi proces osuszania na poziomie pojedynczego poru, zbadano więc dwa prawdopodobne jego mechanizmy:

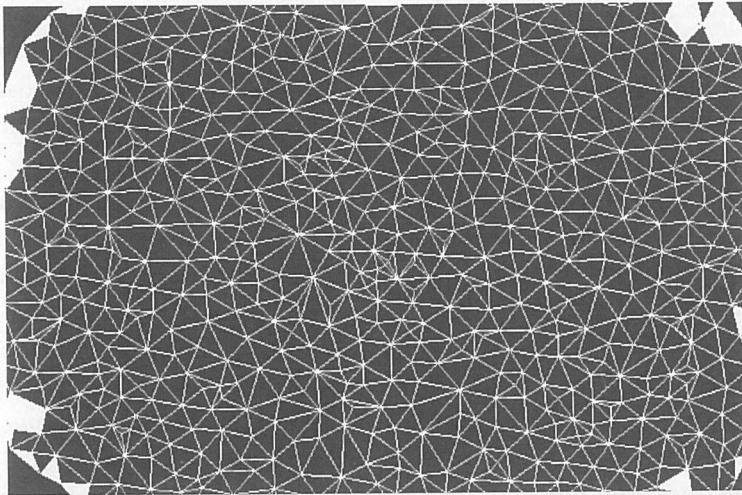
- 1) klasyczny, w którym por  $i$ -ty ulega osuszeniu jeśli ciśnienie zewnętrzne  $h$  jest większe od ciśnienia największego, "najsłabszego" spośród 3-ch istniejących, przewężeń,
- 2) perkolacyjny, w którym por  $i$ -ty ulega osuszeniu, jeśli co najmniej jeden por sąsiedni jest "suchy" i jeśli ciśnienie kapilarne przewężenia łączącego oba pory ze sobą, jest mniejsze od ciśnienia zewnętrznego.

W pierwszym przypadku założono całkowitą niezależność osuszania poszczególnych porów od siebie.

W drugim - osuszanie danego poru jest zależne od stanu porów sąsiednich. Osuszanie całego ośrodka porowatego traktowane jest tu jak propagacja (perkolacja) fazy gazowej, krok po kroku zajmującej miejsce cieczy. W takim ujęciu faza gazowa tworzy układ połączonych ze sobą kanalików, mających zawsze kontakt z otoczeniem. Nie istnieją więc pory "suche" otoczone ze wszystkich stron przez pory "mokre".

W pierwszym przypadku procedura obliczeniowa ma przebieg następujący. Przyjmowano, że na początku procesu osuszania ośrodek jest nasycony. Dane wejściowe są następujące:

- a) powierzchnia porów,
- b) powierzchnia trójkątów zawierających pory,
- c) promień największego przewężenia każdego poru,
- d) liczba porów.



Rys. 2. Początkowy etap perkolacji sieci porów 2D nasyconych wodą (kolor czarny - pory osuszone, białe - nasycone wodą).  
Fig. 2. Beginning state of the 2D network percolation of water saturated pores.

Zakres zmienności promieni podzielono na określoną liczbę podzakresów np. 20, od największych do najmniejszych, przypisując im jednocześnie ciśnienie kapilarne (zgodnie ze wzorem 3). Następnie dla danego podzakresu sumowano powierzchnie porów, które nie ulegały “osuszeniu”, a na podstawie zależności 5 określano wilgotność odpowiadającą przyjętemu potencjałowi  $h$ .

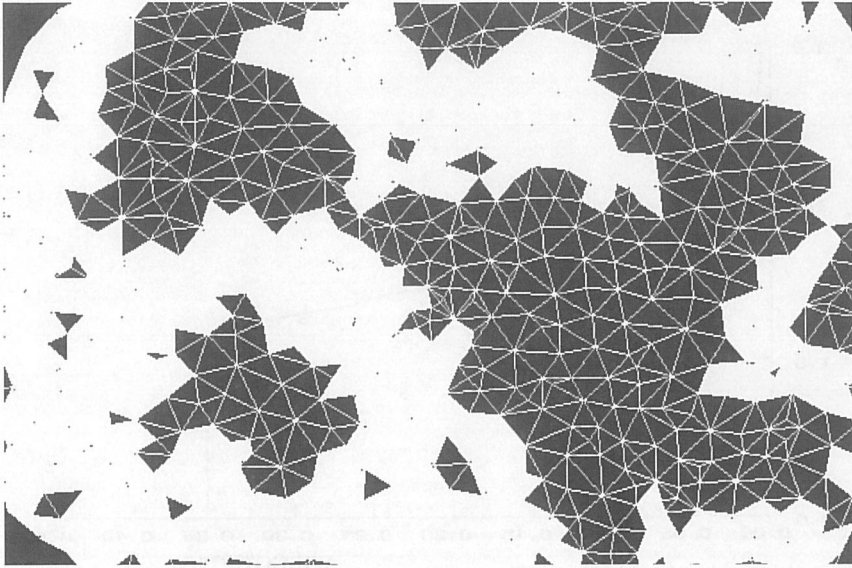
Obliczenia w drugim przypadku są bardziej skomplikowane. Procedura wstępna określa i zapamiętuje parametry poru wraz z numerami tworzących go cząstek. Następnie na tej podstawie dla każdego poru określone zostają pory sąsiednie. Dwa przewężenia, tzn. rozpatrywanego poru i poru sąsiedniego, które łączą pory ze sobą, są sobie równe na zasadzie tożsamości. Dla większości porów liczba sąsiadów wynosi 3. Dla tych spośród nich, które znajdują się na powierzchni liczba ta może wynosić 2 lub 1. Jeśli np. dany por ma tylko 2-ch sąsiadów oznacza to, że ma on kontakt z otoczeniem ośrodka (atmosferą) poprzez jedno przewężenie.

Por mający kontakt bezpośredni lub pośredni (tzn. poprzez inne pory) z otoczeniem nazwano porem aktywnym. Na każdym etapie osuszania ośrodka warunkiem koniecznym ewakuacji wody z rozpatrywanego poru jest jego kontakt z co najmniej jednym porem aktywnym. W tym przypadku może być on osuszany przy udziale wszystkich 3-ch przewężeń, a nie tylko największego z nich, jak to miało miejsce w 1-ym przypadku.

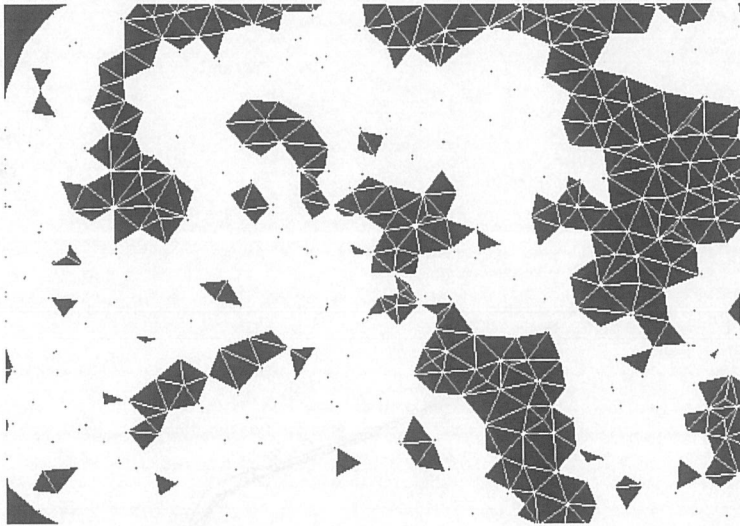
Dlatego osuszanie ośrodka nasyconego rozpoczyna się od porów powierzchniowych, które są zawsze aktywne. Rysunek 2 przedstawia początkowy etap osuszania sieci porów, na którym kolory czarny i biały odpowiadają porom “suchym” i “mokrym” (odpowiednio). Kolor czarny widoczny jest tylko w pobliżu powierzchni układu, ponieważ na tym etapie osuszania pory aktywne mogą znajdować się jedynie w tych miejscach. Proces ten jest przykładem perkolacji sieci dwuwymiarowej o liczbie koordynacyjnej węzłów 3, [5,6,13,14] ponieważ każdy por ma taką właśnie ilość połączeń z porami sąsiednimi. Przedmiotem badań jest sieć quasi-realnego układu porów w którym każdy element sieci (przewężenie) ma znaną wartość ciśnienia kapilarnego (wyznaczoną na podstawie stworzonej wcześniej geometrii ośrodka).

Prezentowane podejście do opisu procesu osuszania układu granularnego nie ma odnośników w literaturze z zakresu fizyki gleby i jest oryginalnym osiągnięciem niniejszego opracowania. Rysunki 3 i 4 przedstawiają kolejne fazy osuszania. Pierwszy z nich przedstawia stan sieci porów tuż przed osiągnięciem ciśnienia krytycznego, przy którym znaczna ilość porów już została osuszona, nie istnieje jednak jeszcze ciągła ścieżka łącząca przeciwległe krawędzie układu. Stan taki osiągnięty po wzroście ciśnienia o niewielką wartość przedstawiono na Rys. 4. Ciśnienie krytyczne ośrodka glebowego jest rutynowo mierzonym jego parametrem, nazywanym niekiedy ciśnieniem przebiccia (ang. bubbling pressure lub air-entry). Po jego osiągnięciu punkty dowolnie dużego ośrodka można połączyć linią łamaną przechodzącą tylko przez pory “suche”.

Przykładowe porównanie wyników pomiarów próbek rzeczywistych 2-ch ośrodków piaszczysto-pylastych z Tabeli 1 z wynikami obliczeń, wykonane przy założeniu

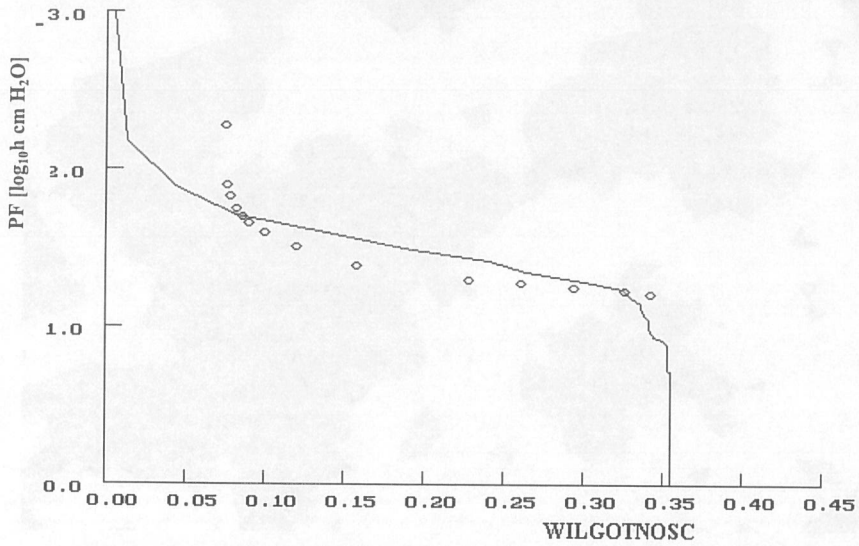


Rys. 3. Perkolacja sieci tuż przed osiągnięciem ciśnienia krytycznego.  
Fig. 3. Pore network percolation just before the critical pressure.



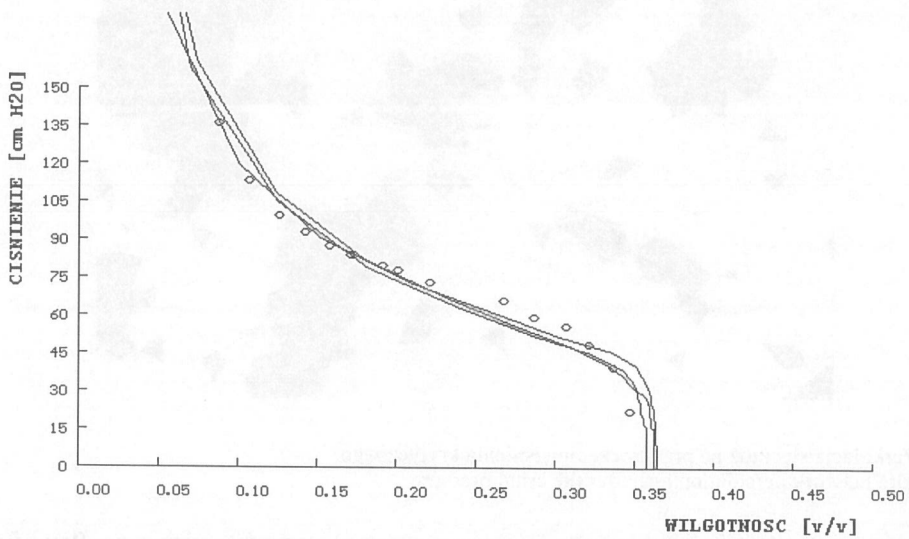
Rys. 4. Perkolacja sieci tuż po przekroczeniu ciśnienia krytycznego.  
Fig. 4. Pore network percolation just after the critical pressure.

niezależności osuszania porów (mechanizm pierwszy), przedstawiono na Rys. 5 i 6. Punkty odnoszą się do pomiarów, linie ciągłe - do wyników obliczeń. Obliczenia wykonano dla wszystkich ośrodków przedstawionych w Tabeli 1. Współczynnik korelacji dla nich wynosił od 86 do 95%.



Rys. 5. Potencjał wodny - wilgotność dla piasku rzeczego z Tabeli 1 obliczona na podstawie modelu 2D, przy założeniu niezależności osuszania porów.

Fig. 5. Moisture retention curve of river sand from Table 1 obtained from 2D model (independence of pore drying assumed).



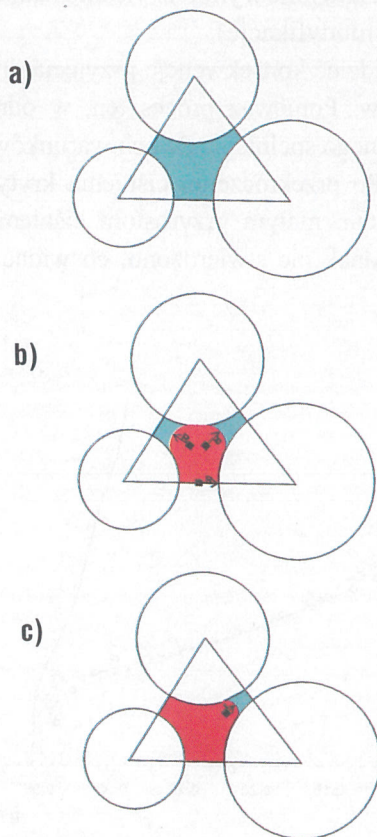
Rys. 6. Potencjał wodny - wilgotność dla kulek szklanych z Tabeli 1 dla trzech przekrojów - porównanie z punktami doświadczalnymi.

Fig. 6. Moisture retention curve for glass beds from Table 1 for 3 independent cross sections (rings - experimental data).



Wcześniej założono, że tworzone przy pomocy opisanych procedur ośrodki wirtualne wykazują nieuporządkowany charakter. Jeśli jest to prawdą, należy oczekiwać, że krzywe retencji określone na podstawie różnych przekrojów, winny być identyczne. Przykład takiej weryfikacji przedstawiono na Rys. 6. Trzy linie ciągłe odnoszą się do trzech wzajemnie prostopadłych przekrojów wirtualnego ośrodka składającego się z kuleczek szklanych (patrz Tabela 1). Wyniki doświadczalne zaznaczono punktami. Widać, że otrzymane przebiegi różnią się nieznacznie, co jest dobrym potwierdzeniem wcześniej postulowanego nieuporządkowanego charakteru ośrodka.

Należy podkreślić, że przedstawione na tym rysunku wyniki uzyskano wprowadzając pewną modyfikację do 1-ego mechanizmu opróżniania porów. Mechanizm 1-y dopuszcza tylko dwa stany poru: pełny ("mokry") lub pusty ("suchy"). Wiadomo jednak, że taki mechanizm jest uproszczeniem rzeczywistego procesu. Proces osuszania pojedynczego poru powinien przebiegać wg schematu przedstawionego na Rys. 7a, b, c. Pierwszy z nich przedstawia stan początkowy, w którym por jest wypełniony wodą (Rys. 7a).



**Rys. 7.** Trzy fazy osuszania pojedynczego poru 2D: a) por pełny, b)- ciśnienie zewnętrzne > ciśnienia kapilarnego największego przewężenia, c)- stan przy dalszym wzroście ciśnienia zewnętrznego (kolor niebieski -woda, czerwony - powietrze).

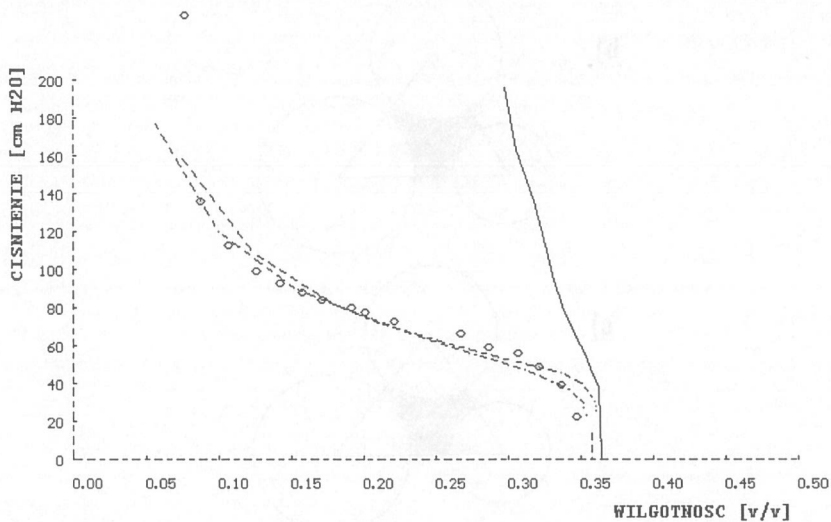
**Fig. 7.** Three stages of a single 2D pore drying a) pore full of water, b) external pressure > capillary pressure of the biggest neck, c) external pressure > capillary pressure of the two biggest neck ( blue color - water, red - air).

Spośród 3-ch przewężeń, "najślabszym" jest największe z nich. Opróżnianie poru rozpocznie się od niego. Gdy ciśnienie zewnętrzne osiągnie wartość ciśnienia kapilarnego właściwą dla tego przewężenia, nastąpi ewakuacja jedynie części, a nie całości, wody z poru (Rys. 7b). Trwa ona do chwili, gdy ciśnienia kapilarne menisków, powstających w pobliżu obu pozostałych przewężeń, nie zrównają się z ciśnieniem zewnętrznym. Na tym etapie z opróżnianych porów usuwana jest na ogół większość zawartej w nich wody. Reszta, tzw. woda stykowa (ang. lens water), ewakuowana jest stopniowo w miarę wzrostu ciśnienia (Rys. 7c). Ilość wody związana z manżetą wodną, utworzoną przez dwie cząstki, wyliczono z powierzchni trójkąta utworzonego przez środki 2-ch cząstek i okręgu krzywizny menisku, pomniejszając o sumę pól trzech wycinków kół zawartych w tym trójkącie: dwóch należących do cząstek i trzeciego - do menisku.

Wyniki uzyskane na podstawie tego modelu, przedstawione na Rys. 6, wykazują lepszą korelację z wynikami eksperymentu, szczególnie w odniesieniu do wysokich i średnich wilgotności.

Wszystkie powyżej przedstawione wyniki uzyskano zakładając pierwszy mechanizm opróżniania porów (lub jego modyfikację).

Częściowo można przewidzieć konsekwencje przyjęcia drugiego, tzn. perkolacyjnego mechanizmu osuszania porów. Ponieważ proces ten, w odniesieniu do każdego poru, uzależniony jest od jednoczesnego spełnienia dwóch warunków, więc w początkowej fazie osuszanie zachodzi powoli. Po przekroczeniu ciśnienia krytycznego osuszanie powinno następować bardzo szybko, tzn. małym przyrostom ciśnienia winny odpowiadać duże zmiany wilgotności. Tego jednak nie stwierdzono, co widać na Rys. 8. Krzywa ciągła,



**Rys. 8.** Krzywa wilgotność - potencjał wodny przy różnych mechanizmach opróżniania porów (punkty - wyniki doświadczeń).

**Fig. 8.** Moisture retention curves obtained from two different drying pore mechanisms (points - experimental values).

odpowiadająca perkolacyjnemu osuszaniu, przebiega powyżej zarówno 2-ch krzywych otrzymanych na podstawie mechanizmu omawianego wcześniej, jak i punktów doświadczalnych.

Podobną prawidłowość obserwuje się w odniesieniu do pozostałych ośrodków z Tabeli 1, co dowodzi, że ten mechanizm osuszania źle opisuje proces osuszania porów ośrodka dwuwymiarowego.

Wy tłumaczenie tego faktu związane jest ze spostrzeżeniem dotyczącym różnic między ośrodkiem trójwymiarowym i powstałym z niego w wyniku przekroju obiektem płaskim. Ośrodek dwuwymiarowy może mieć, i ma, pory o przewężeniach bliskich zera. W takim przypadku drenaż układu musi być utrudniony, co tłumaczy wynik przedstawiony na Rys. 8.

W rzeczywistości wielkość przewężeń jest pochodną upakowania wypukłych cząstek fazy stałej i w żadnym przypadku nie może być zerowa. W tym sensie wyniki analizy uzyskane na podstawie przekroju nie są adekwatne dla struktury ośrodka trójwymiarowego.

#### OKREŚLANIE ZALEŻNOŚCI POTENCJAŁ KAPILARNY - WILGOTNOŚĆ TRÓJWYMIAROWEGO, POLIDYSERSYJNEGO OŚRODKA GLEBOWEGO (3D)

Procedury obliczeń w przypadku wirtualnego ośrodka trójwymiarowego były analogiczne, lecz bardziej skomplikowane ze względu na blisko 30-krotnie większą liczbę strukturalnych elementów składowych, w porównaniu z ośrodkiem dwuwymiarowym. Ponieważ Borland PASCAL nie ma udogodnień językowych umożliwiających operowanie na zmiennych większych jak 64 kB, a zbiory jakie były niezbędne, musiały być przynajmniej 20 razy większe, należało stworzyć kilka podprogramów powiększających możliwości pamięciowe tego języka.

Wilgotność ośrodka w funkcji ciśnienia  $\theta(h)$  określano na podstawie zależności:

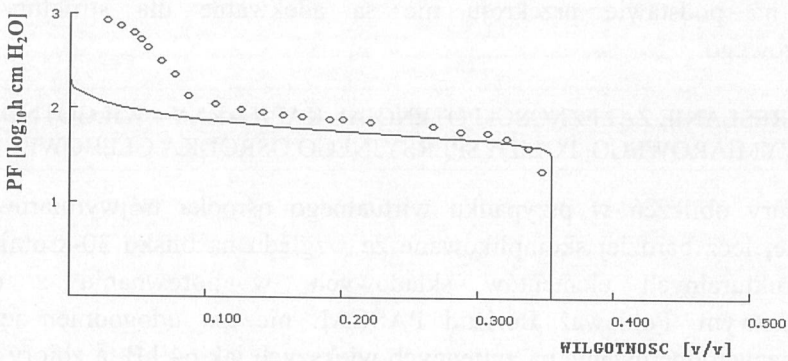
$$\theta(h) = \frac{\sum_{i=1}^n V_{p_i}(h_i > h)}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (10)$$

gdzie:  $V_{p_i}(h_i > h)$  - objętość poru  $i$ -tego, którego ciśnienie kapilarne  $h_i$ , związane z przewężeniem jest większe niż ciśnienie zewnętrzne  $h$ ,  $V_i$  - objętość komórki czworościennej zawierającej por  $i$ -ty.

Por może mieć tylko dwa stany: pusty lub pełny. Sumowanie przebiega po tych spośród nich, które przy danym ciśnieniu  $h$ , pozostają pełne, co oznacza, że ciśnienie kapilarne największego przewężenia jest większe od ciśnienia zewnętrznego.

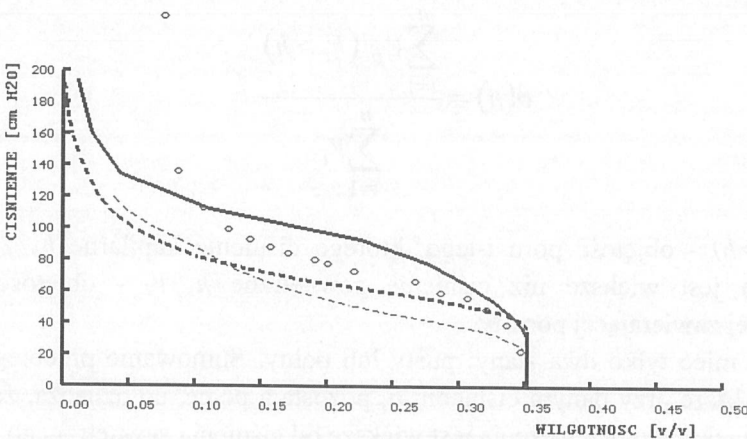
Podobnie jak poprzednio, możliwe są tu dwa podejścia w zależności od przyjętego mechanizmu opróżniania porów.

W pierwszym zakłada się, że pory opróżniane są niezależnie od siebie, a czynnikiem decydującym jest ciśnienie kapilarne "najsłabszego" przewężenia. Wielkość przewężenia określano na dwa sposoby przypisując im promień geometryczny [4]. Przyjmowano cylindryczny jego kształt, co pozwalało utożsamiać go z promieniem krzywizny menisku. Przykładowy wynik obliczeń dla kuleczek szklanych przedstawia Rys. 9. Porównując go z Rys. 6, przedstawiającą tę samą zależność uzyskaną na podstawie modelu dwuwymiarowego, widać, że wyniki uzyskane na podstawie modelu 3D wykazują gorszą korelację z punktami doświadczalnymi, dając zbyt niskie wartości wilgotności, szczególnie w niskim ich zakresie. Lepszą nieco zgodność z doświadczeniem uzyskano charakteryzując przewężenia przy pomocy wzoru 3. W tym przypadku, w znacznym



Rys. 9. Zależność potencjał - wilgotność dla kulek szklanych z Tabeli 1 na podstawie modelu 3D (przewężenie określone na podstawie promienia okręgu wpisanego).

Fig. 9. Moisture retention curve for glass beds (Table 1) from 3D model (neck radius determined by inscribed circle radius).



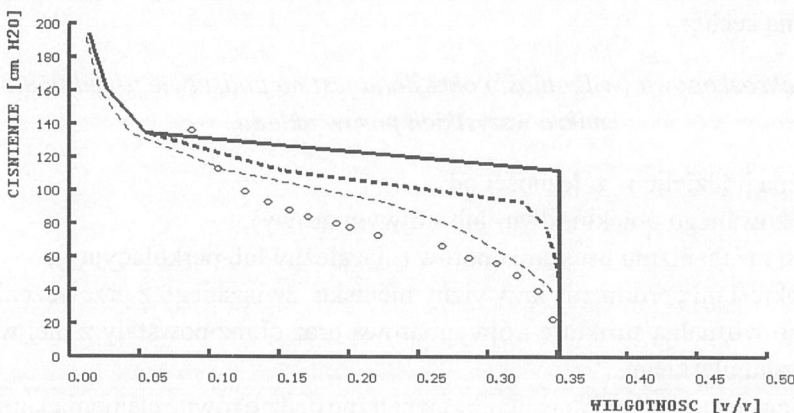
Rys. 10. Porównanie wyników trzech modeli 3D retencji wodnej kuleczek szklanych z punktami doświadczalnymi (objaśnienia w tekście).

Fig. 10. Comparison of three 3D models for glass beds with experimental data (explanation in text).

zakresie wilgotności oba przebiegi (teoretyczny i doświadczalny) są prawie równoległe, co pokazuje Rys. 10. Na rysunku tym wartości doświadczalne zaznaczono kółkami, linią przerywaną cienką - przebieg krzywej z modelu 1, a przerywaną grubą - z modelu 2.

Krzywa gruba, ciągła dotyczy wyników modelu perkolacyjnego osuszania ośrodka 3D. Tym razem wyniki uzyskane na podstawie tego modelu najlepiej zgadzają się z punktami doświadczalnymi, jakkolwiek w zakresie niskich wilgotności różnice są znaczne. Wynika to z rozkładu przewężeń, na którym granica lewostronna przewężeń jest większa od zera. W konsekwencji perkolacja ośrodka 3D nie napotyka na przeszkody, jakie miały miejsce podczas analogicznego procesu w przypadku 2D.

Z analizy mechanizmu procesu perkolacyjnego osuszania ośrodka porowatego wynika, że winien być on zależny nie tylko od jego struktury wewnętrznej, lecz również od warunków zewnętrznych na jego powierzchni. Bezpośrednim potwierdzeniem tych przypuszczeń są wyniki doświadczalne [16]. Występowanie tego efektu można dostrzec w eksperymentach, w których prowadzono pomiary profilu wilgotności próbek glebowych w trakcie procesu osuszania na płytach porowatych [14]. Termin "warunki zewnętrzne na powierzchni" odnosi się do wspomnianych już wcześniej porów aktywnych, tzn. do porów, które mają kontakt bezpośredni, lub pośredni, tzn. poprzez inne pory aktywne, z otoczeniem. Wydaje się oczywiste że, proces osuszania nasyconej próbki gleby, znajdującej się na płycie porowatej, musi rozpocząć się od porów powierzchniowych, ponieważ tylko one mają kontakt z otoczeniem, a więc są porami aktywnymi. W miarę osuszania liczba takich porów wzrasta, szczególnie po przekroczeniu ciśnienia krytycznego. Ponieważ w początkowym stadium desaturacji pory aktywne znajdują się tylko w górnej (powierzchniowej) warstwie, należy przypuszczać, że geometria próbki może mieć wpływ na wyniki pomiarów. Na przykład próbka wysoka winna mieć inną charakterystykę wilgotność - potencjał w porównaniu do próbki niskiej i płaskiej. W obu przypadkach, na początku eksperymentu relacje



Rys. 11. Zależność wilgotność - potencjał dla kulek przy różnej liczbie początkowo aktywnych porów (punkty - wartości pomiarowe, mechanizm perkolacyjny).

Fig. 11. Moisture retention curve of glass beds for different amount of beginning active pores (points - experimental values).

całkowitej liczby porów i porów aktywnych są różne, co oznacza, że w obu przypadkach osuszanie próbek będzie zachodziło inaczej. Hipotezę tą potwierdzają badania symulacyjne, których wyniki przedstawiono na Rys. 11. Dotyczą one zależności wilgotność - potencjał dla kulek szklanych (Tabela 2) obliczonych na podstawie geometrii trójwymiarowego ośrodka przy założeniu perkolacyjnego charakteru osuszania jego porów [11].

Analogicznie jak w przypadku 2D, osuszenie dowolnego poru może nastąpić przy jednoczesnym spełnieniu 2 warunków:

- 1) ciśnienie kapilarne przynajmniej jednego spośród czterech jego przewężeń jest mniejsze (równe) ciśnieniu zewnętrznemu,
- 2) sąsiedni por, w stosunku do osuszanego, kontaktujący się z nim poprzez przewężenie spełniające warunek 1, musi być porow aktywnym.

Parametrem krzywych jest początkowa ilość porów aktywnych, których wartości wynoszą: krzywa ciągła gruba - 3, gruba przerywana - 332, cienka przerywana - 3571, tzn. całkowita liczba porów na powierzchni. Liczba analizowanych porów tego układu była równa maksymalnej dostępnej dla Borland PASCAL'a w tej konfiguracji ilości, tzn. 30 000, co wiązało się z plikiem o objętości 2 MB. Otrzymane wyniki są teoretycznym uzasadnieniem rezultatów doświadczalnych i sugerują, że krzywa retencji wodnej gleby jest zależna nie tylko od rozkładu porów, lecz również od przyjętej metodyki pomiaru.

#### PODSUMOWANIE PRZEDSTAWIONYCH METOD OKREŚLANIA ZALEŻNOŚCI WILGOTNOŚĆ - POTENCJAŁ KAPILARNY OŚRODKA POROWATEGO

Przedstawiono kilka oryginalnych propozycji określenie retencji wodnej na podstawie składu granulometrycznego, których wspólną cechą i punktem wyjścia jest wirtualny ośrodek granularny. Powstaje on w wyniku symulacji upakowania cząstek, których skład granulometryczny jest taki sam jak badanego ośrodka.

Przedstawione modele obliczania krzywej retencji wodnej ośrodka porowatego mają jedną wspólną cechę:

*wielkość makroskopowa (wilgotność) określana jest na podstawie uśrednienia stanów mikro wszystkich porów układu.*

Modele można podzielić w zależności od:

- a) typu analizowanego obiektu (dwu- lub trójwymiarowy),
  - b) przyjętego mechanizmu osuszania porów (niezależny lub perkolacyjny),
  - c) sposobu określania promienia krzywizny menisku związanego z przewężeniem.
- Ad a) badano wirtualną strukturę trójwymiarową oraz obraz powstały z niej w wyniku przekroju płaskiego,
- Ad b) por ulega osuszeniu gdy ciśnienie zewnętrzne będzie równe ciśnieniu kapilarnemu związanemu z przynajmniej jednym przewężeniem. Warunek ten był wystarczający dla mechanizmu zakładającego wzajemną niezależność osuszania

porów. W mechanizmie perkolacyjnym był to warunek jedynie konieczny- drugi warunek każe uwzględnić stan (aktywny lub nie) przewężeń porów sąsiednich. Ponadto analizując mechanizm osuszania pojedynczego poru uwzględniono wariant, w którym może on znajdować się nie tylko w stanie "mokry - suchy" lecz, że osuszany jest on stopniowo w miarę wzrostu ciśnienia. Obliczenia tego typu udało się wykonać tylko dla niezależnego mechanizmu osuszania porów dwuwymiarowych, a ich rezultaty wykazywały najlepszą zgodność z doświadczeniem,

Ad c) zastosowano dwa różne sposoby określania promienia krzywizny tylko dla układów trójwymiarowych, dla przekrojów promień ten równał się zawsze połowie odległości między powierzchniami cząstek tworzących por.

Reasumując wyniki dotyczące wyliczania krzywych retencji na podstawie składu granulometrycznego można stwierdzić, że najlepszą zgodność z doświadczeniem otrzymano dla krzywej uzyskanej na podstawie przekroju, w których osuszanie porów było niezależne, przy czym odbywało się ono stopniowo w miarę wzrostu ciśnienia zewnętrznego.

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Case M.:** Physical Principles of Flow in Unsaturated Porous Media. Oxford Univ. Press., New York, 1994.
2. **Czachor H.:** Granulometric distribution and soil porosity. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 388, 11-19, 1990.
3. **Czachor H.:** Geometria fazy stałej i przestrzeni porów w rolniczych ośrodkach granularnych na przykładzie gleby mineralnej. Acta Agrophysica, 7, 1997.
4. **Czachor H.:** Symulacja struktur glebowych i ich parametryzacja. Acta Agrophysica, 24, 7-25, 1999.
5. **Fatt I.:** The network model of porous media. I. Capillary pressure characteristics. Petroleum Transc., AIME, v, 207, 144-159, 1956.
6. **Fogelholm R.:** The conductivity of large percolation network samples. J. Phys. C: Solid St. Physics., 13, 1980.
7. **Globus A.S.:** Ekspierimentalna Gidrofizika Pocz. Nauka, Leningrad, 1968.
8. **Hillel D.:** Introduction to Soil Physics. Academic press., 1982.
9. **Kowalik P., Zaradny H.:** Ruch wody glebowej. Archiwum Hydrotechniki, XVII, 4, 615-621, 1970.
10. **Kutilek M.:** Vliv Jilovyh mineralu na retencni krivky vlhosti. Vodohospodarski Cas., XVIII, 6, 616-633, 1970.
11. **Mason G., Mellor D.W.:** Desaturation of porous media. I Unconsolidated materials. J. Colloid and Interface Sci. And Catalysis., 62, 41-50, 1991.
12. **Scher H., Zallen R.:** Critical density in percolation processes. J. Chem. Phys., 53, 1970.
13. **Sobczuk H., A., Plagge R., Walczak R., Rothe C.H.:** Laboratory equipment and calculation procedure to rapidly determine hysteresis and soil hydrophysical properties under nonsteady flow conditions. Z. Pflanzenenahr. Boden., 155, 157-163, 1992.
14. **Stauffer D.:** Introduction to Percolation Theory. Taylor, Francis. Philadelphia 1985.
15. **Taylor S.A., Ashcroft G.L.:** Physical Edaphology. Freeman and Co. San Francisco, 1972.
16. **White N.F., Sunda D.K., Duke H.R., Corey A.T.:** Boundry effect in desaturation of porous media. Soil Sci., 113, 1, 7-12, 1972.

## DETERMINATION OF THE MOISTURE RETENTION CURVE ON THE BASIS OF VIRTUAL STRUCTURE OF SOIL MEDIUM

*H. Czachor*

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences  
Doświadczalna 4, P.O. Box 201, Lublin 27

### SUMMARY

The new method for the moisture retention curve determination is presented. It based on virtual 2D and 3D structure of investigated granular medium. Introduction of single pore concept combined with Delaunay's tessellation allowed to obtain the network of interconnected pores. Knowledge of pore parameters and of pore geometry gave the possibility to analyse 2 independent mechanisms of medium drainage. This approach has been applied for 5 sandy and sandy loam materials

**K e y w o r d s:** Moisture retention curve, virtual granular medium, tessellation, grain size distribution, percolation