

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr Bartłomieja GACKIEWICZA  
pt. „Modelowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego  
materiału glebowego w oparciu o zobrazowania tomograficzne”

Hasło „modelowanie” w tytule rozprawy naukowej wzbudza od razu u czytającego nie tylko zainteresowanie nowym podejściem w badaniach złożonych procesów transportu masy w ośrodkach porowatych, ale i wiele pytań, jak na przykład: jakie są podstawy teoretyczne i metodyczne zastosowanego modelu, jakie przyjęto uproszczenia i warunki brzegowe/progowe, metody analizy parametrów, walidacji, itd., tym bardziej, że literatura nt. pomiarów i modelowania współczynnika przewodnictwa wodnego w glebach jest bogata.

Dzisiejszy stan wiedzy na temat metod pomiarów, oszacowań i symulacji współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego w glebach wskazuje, że nadal nie ma uniwersalnego, możliwego do zastosowania do różnych gleb, rozwiązania problemu. Wydaje się, że podstawową przyczyną tego stanu jest złożoność cech, zjawisk i procesów tak niejednorodnego ośrodka porowatego, jakim jest gleba. Pojawienie się nowych technik pomiarowych, jak m.in. komputerowa tomografia rentgenowska niesie nadzieje na nowe podejście w modelowaniu współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego w glebach.

Dlatego też temat podjęty przez Autora, chociaż nie jest nowy z badawczego punktu widzenia, zasługuje na szczególną uwagę i uznanie, ze względu na nowe podejście metodyczne przy analizie obrazowania tomograficznego różnych cech ośrodka porowatego oraz modelowaniu przepływu w tym ośrodku na podstawie zobrazowań tomografii komputerowej. Praca została przygotowana pod kierunkiem naukowym dr hab. Krzysztofa Lamorskiego, prof. IA PAN, w ramach grantu NCBiR nr PL-TW/IV/5/2017.

### *Struktura pracy*

Praca doktorska **mgr Bartłomieja Gackiewicza** stanowi zwartą monografię, która oparta jest na kilku założeniach metodycznych, zarówno w badaniach empirycznych, jak też symulacjach komputerowych, z wykorzystaniem różnych modeli. Praca obejmuje łącznie 116 stron, na co składają się: 93 strony zasadniczego tekstu pracy, podzielonego na 5 rozdziałów z 10 tabelami i 46 rysunkami, oraz 12 stron wykazu piśmiennictwa (obejmujący 127 pozycji, w tym aż 105 pozycji z numerem „doi”, czyli publikacje z czasopism najwyższej punktowanych wg listy MNiSzW). Struktura podziału treści, komplementarność rozdziałów nie budzi zastrzeżeń i jest typowa dla rozpraw doktorskich. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że podstawowy zrąb rozprawy stanowią rozdziały poświęcone metodom, wynikom badań własnych oraz dyskusji.

### *Uwagi merytoryczne do założeń metodycznych, wyników i dyskusji oraz wniosków końcowych pracy*

Krótki wstęp oraz wyczerpujący przegląd literatury nt. (i) wyznaczania współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego; (ii) wykorzystania tomografii rentgenowskiej w badaniach gleby oraz (iii) modelowania przepływu na podstawie zobrazowań tomografii komputerowej, czyli rozdział 1, dobrze wprowadzają czytającego do złożonych zagadnień zarówno badań empirycznych i fizycznych, jak też symulacji nasyconego przepływu w ośrodkach porowatych.

Autor opisał tutaj wiele z tych zależności podkreślając jednak, że wszystkie podejścia (empiryczne, fizyczne czy też symulacje) nie dają podstaw do szerszego wykorzystania wyników, ze względu na chociażby dużą zmienność przestrzenną tego parametru. Szkoda, że w tym fragmencie pracy Autor nie wspomniał o wielu badaniach prowadzonych nad tymi

zagadnieniami także w Lubelskim Ośrodku Agrofizycznym, we współpracy ze specjalistami z Czech, Słowacji, Holandii, Rosji, czy też USA. Nowe możliwości w badaniach cech i zjawisk ośrodków porowatych stworzyło wykorzystanie komputerowej tomografii rentgenowskiej, jako nieinwazyjnej techniki pomiarów. Autor jednak słusznie podkreśla, że istotny wpływ na wyniki uzyskane tą metodą mają procesy filtrowania (czyli redukcja szumów w celu poprawy jakości obrazu) i segmentacji obrazu 3D, tj. wyodrębniania w obrazie cyfrowym obszarów porowatych. W literaturze znanych jest wiele metod segmentacji, które z powodzeniem pozwalają na rozpoznanie porów glebowych, a nawet struktury korzeni, czy obecność cieczy w porach. Ale ponieważ gleby są bardzo zróżnicowane, stąd metoda segmentacji, zastosowana do jednego materiału glebowego może być zawodna dla innej gleby. Dlatego też nie ma standardów dotyczących procedur segmentacji, tak jak istnieją standardy dla pomiarów laboratoryjnych np. właściwości fizycznych gleb.

Nowe możliwości stwarza wykorzystanie zobrazowań, otrzymanych przy pomocy technik tomografii komputerowej, w modelowaniu przepływu poprzez symulacje komputerowe. Dowodem na to są liczne już publikacje naukowe, które opisują różne metody symulacji i modelowania przepływu w ośrodku porowatym. Autor krótko opisuje w tym podrozdziale zalety i wady tych metod, słusznie podkreślając na koniec, że tak naprawdę o praktycznym znaczeniu wszelkich rodzajów symulacji komputerowych decyduje walidacja, czyli porównanie oszacowanej na podstawie modelu wartości współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego z wartością określoną na podstawie pomiaru doświadczalnego. O ile dość dobrze skorelowane są wartości dla jednorodnych materiałów np. skał o tyle są one bardzo rozbieżne dla niejednorodnych materiałów glebowych.

Stąd logiczne jest następstwo kolejnych rozdziałów, tj. jasno sformułowany cel i zakres pracy (rozd. 2) oraz obszerny rozdział 3-ci (23 strony), poświęcony materiałom i metodom badań, które zastosowano w doświadczeniach modelowych, w analizie przetwarzania obrazu i segmentacji, czy też w modelowaniu numerycznym współczynnika przewodnictwa wodnego.

Za główny cel pracy Doktorant przyjął przeanalizowanie wpływu wybranych aspektów metodycznych modelowania współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego w materiale glebowym na wyniki symulacji. Przy czym, do szczegółowej analizy wybrał tylko te aspekty metodyczne, które w świetle literatury przedmiotu mogą mieć istotny wpływ na wyniki symulacji a nie były dotychczas analizowane lub były analizowane w stopniu niewystarczającym. W celu realizacji powyższego celu Autor przedstawił w pracy wyniki badań czterech zagadnień: (i) wpływu błędu segmentacji (progowania) obrazu na szacowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego; (ii) porównanie modelowania bezpośredniego z modelowaniem na podstawie uproszczonej sieci porów; (iii) wpływu dokładności odwzorowania siatki obliczeniowej na oszacowanie przewodnictwa wodnego, oraz (iv) modelowanie nasyconego przewodnictwa wodnego w makroporowych próbkach glebowych, tzn. w próbkach, w których brak jest ciągłości (łączności) porów.

Ze względu na metodyczny charakter badań, materiał glebowy był przygotowywany odpowiednio do badanego problemu, co zostało szczegółowo opisane w kolejnych rozdziałach (rozd. 3 i 4). Rozdział 3 przedstawia opisy tych metod, które są wspólne dla próbek wykorzystywanych we wszystkich czterech problemach badawczych, natomiast metody szczegółowe niezbędne do przygotowania próbek w celu realizacji badań indywidualnych zostały opisane łącznie z opisem wyników tych badań w rozdz. 4.

Autor wykorzystał w badaniach dwa rodzaje próbek: mieszaninę frakcji przesianego i zmielonego piasku oraz standardowe próbki glebowe o nienaruszonej strukturze. Pierwszą grupę próbek stanowił materiał mineralny uzyskany z piasku

rzecznego (z łachy wiślanej k/Puław), który został przesiany przez sita o wymiarach oczek: 0,5; 0,32; 0,16 i 0,08 mm. Frakcja piasku przesianego przez sito o średnicy 0,5 mm została zmielona w młynku (Pulverisette 6 Classic Line, Fritsch), w czasie 5, 10 lub 20 minut, w celu otrzymania materiału o różnym uziarnieniu. Z powyższego materiału przygotowano 10 próbek o zróżnicowanym składzie granulometrycznym, które przedstawiono na rys. 1 oraz w tab. 1. Natomiast drugą grupę próbek glebowych stanowiły próby o nienaruszonej strukturze, które pobrano z poziomu uprawnego 5 różnych typów gleb Wyżyny Lubelskiej, do cylindrów o objętości 64 cm<sup>3</sup>. Szkoda, że Doktorant nie przedstawił tutaj szerszej charakterystyki gleb, poza typologią. Nie daje ona informacji ani o naturze skały macierzystej, z której gleby zostały wytworzone, ani o uziarnieniu materiału glebowego, ani też o właściwościach fizykochemicznych i chemicznych, które mają istotny wpływ na badane przez Autora parametry. Natomiast zaprezentowane dalej przez Doktoranta opisy szczegółowe przygotowania próbek glebowych oraz metody pomiarów doświadczalnych nasyconego przewodnictwa wodnego są poprawne, pełne i nie budzą żadnych zastrzeżeń. Jest to istotne, bowiem dają one możliwość odwzorowania i powtórzenia eksperymentów także przez innych badaczy. Podobnie, dalsze opisy szczegółowe zarówno podstaw teoretycznych, jak i procedur przeprowadzonych badań tomograficznych materiału glebowego, począwszy od skanowania próbek (z wykorzystaniem tomografu rentgenowskiego GE Nanotom 180S) i trójwymiarowej rekonstrukcji cyfrowej obrazu do przetwarzania i analizy obrazu, które dały podstawę do wyznaczenia geometrycznej porowatości ogólnej i geometrycznej powierzchni właściwej. Te parametry z kolei były podstawą przygotowania siatek numerycznych w modelowaniu numerycznym i oszacowaniu przewodnictwa nasyconego przy pomocy zastosowanych równań. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone za pomocą pakietu OpenFOAM, który bazuje na metodzie objętości skończonych do numerycznego rozwiązywania równań transportu. Obliczenia przewodnictwa wodnego Autor dokonał na podstawie wyników symulacji numerycznej oraz na podstawie równania Kozeny-Carmena. Opisano także metodę obliczania błędu oszacowania wartości współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego, a poprawność estymacji sprawdzono stosując regresję liniową (współczynnik determinacji  $R^2$  oraz średnia kwadratowa błędu RMSE). Natomiast do oceny statystycznej wyników pomiarów zastosowano odchylenie standardowe. Do tej części strony metodycznej nie wnoszę żadnych zastrzeżeń. Co więcej, przedstawione szczegółowe opisy dowodzą, że Doktorant dobrze zna i rozumie podstawy matematyczno-fizyczne badanych procesów i potrafi wykorzystać wyniki przeprowadzonych eksperymentów do dalszych symulacji i modelowania badanego zjawiska.

Wszystko to pozwoliło Doktorantowi na przedstawienie kolejnego, obszernego, 56-stronicowego rozdziału, zatytułowanego „Wyniki i dyskusja”, który można by określić, jako zasadniczą część rozprawy doktorskiej (rozdz. 4). Autor analizuje tutaj wyniki badań własnych w obrębie 4 wyróżnionych problemów badawczych oraz przedstawia wnioski szczegółowe wprowadzone na podstawie tych badań i analizy danych literaturowych. Pewną niejasność budzi jednak wykorzystanie wyników badań opisanych w podrozdziale 4.1. „Wpływ segmentacji na szacowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego”, które wcześniej zostały wykorzystane w artykule naukowym, pt. „*Saturated water conductivity estimation based on X-ray CT images – evaluation of the impact of thresholding errors*”, opublikowanym w *International Agrophysics* przez Doktoranta razem z dwoma współautorami (*International Agrophysics*, 2019, vol. 33, str. 49-60, doi:10.31545/intagr/104376). Wprawdzie rozprawa doktorska może zawierać także

wyniki badań wcześniej opublikowanych przez Autora, ale w sposób jasny powinien być opisany udział Doktoranta w przygotowaniu publikacji do druku (udział w tworzeniu koncepcji badań, ich realizacji, przygotowaniu publikacji, itd.) oraz określona rola pozostałych współautorów, potwierdzona w stosownych oświadczeniach. Wobec braku takich oświadczeń trudno jest odnieść się do samodzielności Doktoranta przy powstawaniu wspomnianej publikacji i prawa do wykorzystania wyników w rozprawie doktorskiej. Wprawdzie Doktorant jest wskazany w publikacji jako „*Corresponding author*”, co wskazywałoby na Jego istotny udział w realizacji badań i tworzeniu publikacji, ale wymaga to formalnego potwierdzenia, tym bardziej, że niektóre wykresy i tabele (rys. 13-15 i 20 oraz tab. 4 i 5) są tożsame z zawartymi w publikacji (w j. angielskim). Problem ten wymaga jasnego wyjaśnienia przez Doktoranta. Jeśli chodzi o merytoryczną stronę wyników tych badań, ponieważ uzyskały one już pozytywną recenzję do druku w renomowanym czasopiśmie naukowym z listy „A” MNiSzW, to z obowiązku recenzenta podkreślić należy ich istotne znaczenie poznawcze, m.in. to, że błąd wynikający z segmentacji/progowania ma duży wpływ na estymację przewodnictwa nasyconego (błąd względny osiągać może wartość nawet 50%) oraz że czułość tego współczynnika na progowanie jest znacznie większa niż czułość innych cech, jak porowatość ogólna lub powierzchnia właściwa.

Opis i dyskusja wyników uzyskanych w pozostałych badaniach (rozdz. 4.2, 4.3 i 4.4.) dowodzą, że cele tych badań zostały osiągnięte a wyprowadzone wnioski końcowe są prawdziwe i mają istotne znaczenie poznawcze dla prowadzenia dalszych badań metodycznych w tym zakresie. Za najważniejsze uznać należy następujące stwierdzenia: (i) jakość odwzorowania przestrzeni porów przez siatkę numeryczną (aspekt często pomijany w literaturze przedmiotu) ma istotny wpływ na wyniki estymacji współczynnika przewodnictwa wodnego w modelowaniu numerycznym. Co więcej, na podstawie uzyskanych wyników badań można sformułować także zalecenia praktyczne, aby siatki numeryczne stosowane do estymacji nasyconego przewodnictwa wodnego były generowane tak, by ich najmniejsze komórki miały wymiary porównywalne z wielkością woksela zastosowanego do wykonania skanów tomograficznych badanego ośrodka porowatego; (ii) porównanie wyników estymacji współczynnika przewodnictwa wodnego metodami fizycznymi z metodą uproszczoną, wykorzystującą przybliżony, istotnie uproszczony model przestrzeni porów dowodzi, że metoda uproszczona przeszacowuje wartości współczynnika niemal półtora krotnie. W świetle uzyskanych wyników, zatem metoda bezpośrednia winna być zalecana do szacowania wartości współczynnika przewodnictwa wodnego; (iii) badania dowiodły, że standardowo stosowane metody estymacji współczynnika przewodnictwa wodnego nie pozwalają na modelowanie transportu wody w próbkach, jeśli w ich obrazach tomograficznych nie obserwuje się sieci porów współpołączonych i występujących w całej objętości próbki. Doktorant zaproponował zatem nowy, alternatywny model (NS/Darcy), który pozwala na modelowanie transportu wody w mikroporowatych próbkach glebowych. Wprawdzie wyniki walidacji tego modelu nie są zadowalające, co wynika z błędu w stosowanej metodzie oszacowania przewodnictwa macierzy glebowej - nowego parametru w zaproponowanym modelu. Wymaga to dalszych badań w celu znalezienia metody poprawnej estymacji tego dodatkowego parametru modelu.

Rozprawę wieńczy krótkie podsumowanie oraz wnioski końcowe (rozdz. 5), które są zasadne i znajdują potwierdzenie zarówno w dotychczasowej literaturze przedmiotu, jak i w uzyskanych wynikach badań własnych. Najważniejsze z nich przedstawiłem powyżej. Dobór i wykorzystanie literatury zasługuje także na szczególne podkreślenie

Analiza rozprawy doktorskiej pozwala na stwierdzenie, że cele pracy zostały osiągnięte. Co więcej, w całej rozprawie można by wyróżnić kilka, moim zdaniem, istotnych osiągnięć, które wzbogacają nasz a wiedzę o warunkach prowadzenia badań w

złożonym ośrodku glebowym i które chciałbym podkreślić. Otóż przedstawione przez Doktoranta szczegółowe opisy metodyczne zarówno eksperymentalnego wyznaczenia, jak i symulacji i szacowania współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego próbek glebowych pozwalają na standaryzację i realizację takich badań, także z wykorzystaniem tomografii komputerowej przez innych badaczy, oraz na innych materiałach porowatych. Szczególnie cenna jest również zebrana wiedza nt. ograniczeń możliwości wykorzystania zobrażeń tomografii komputerowej do analizy cech niejednorodnych ośrodków glebowych. Doktorant potwierdził, że obecnie wykorzystanie tej metody jest możliwe jedynie do analizy cech ośrodków jednorodnych, takich jak np. piaski, piaskowce, itp. I najważniejsze osiągnięcie to moim zdaniem zaproponowanie i walidacja nowego modelu (opartego na równaniach NS/Darcy) do estymacji przewodnictwa wodnego gleb, który wymaga dalszych badań i walidacji.

Praca została przygotowana rzetelnie pod względem edytorskim i graficznym. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych niedociągnięć natury stylistycznej i językowej, np. w wierszach 8-13 od dołu na str. 21. W pracy pojawiają się nieliczne błędy literowe oraz nieścisłe lub kolokwialne sformułowania, które czasami wynikają z nieprecyzyjnych tłumaczeń terminów z języka angielskiego. W cytowaniach literatury Autor wprowadził angielski łącznik „and” zamiast polskiego „i”. W tekście rozprawy zauważa się liczne błędy interpunkcyjne, np. brak przecinków i innych znaków interpunkcyjnych w zdaniach złożonych podrzędnie, przy wtrąceniach, wyliczeniach, dopowiedzeniach, itd. W pracy naukowej należy także unikać powtórzeń prezentacji tych samych danych w różnej formie graficznej, a tak się stało w przypadku danych zawartych w tab. 1 na str. 17 oraz na rys. 21 na str. 53. Są to te same dane, ale przedstawione w różny sposób.

#### ***Wniosek końcowy***

Przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską **mgr Bartłomieja GACKIEWICZA** pt. **"Modelowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego materiału glebowego w oparciu o zobrażenia tomograficzne"** oceniam pozytywnie pod względem merytorycznym. Wnosi ona nowe elementy poznawcze i metodyczne do naszej wiedzy o badaniach, symulacji i modelowaniu tego istotnego parametru glebowego. Problem przedstawiony w pracy mieści się w zakresie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i agronomia. Zawarte powyżej uwagi dyskusyjne i redakcyjne nie obniżają wartości naukowej pracy. Rozprawa jest bardzo ciekawym studium, w którym Autor zastosował poprawne metody badań, które wskazują, że opanował On warsztat badawczy, potrafi formułować hipotezy naukowe, przygotować eksperymenty naukowe, realizować je, krytycznie ocenić uzyskane wyniki, a w końcu przygotować tekst rozprawy naukowej.

Ponieważ rozprawa spełnia wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim w świetle zapisu obowiązującej ustawy o tytule i stopniach naukowych, dlatego wnoszę o dopuszczenie **mgr Bartłomieja Gackiewicza** do dalszych etapów przewodu doktorskiego przed Wysoką Radą Naukową Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie.

Lublin, 17 marca 2020 r.



Prof. dr hab. Ryszard Dębicki