

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Bartłomieja Gackiewicza

### **pt. „Modelowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego materiału glebowego w oparciu o zobrazowania tomograficzne”**

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dyrektora Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie Pana prof. dr. hab. Cezarego Sławińskiego na podstawie pisma (RN-431-5/18) z dnia 16 stycznia 2020 r.

#### **1. Wybór tematu i jego uzasadnienie**

Współczynnik nasyconego przewodnictwa wodnego jest jedną z podstawowych właściwości hydraulicznych utworów glebowych. Decyduje on o prędkości przepływu wody w materiałach porowatych. Znajomość tego parametru jest konieczna i niezbędna do opisu przepływu wody w strefie saturacji. Nasycone przewodnictwo wodne materiału glebowego w głównej mierze zależy od: typu gleby, składu granulometrycznego, gęstości gleby, a w przypadku utworów organicznych również od stopnia rozkładu, zaawansowania procesów fizycznych i chemicznych a także zawartości węgla organicznego. Z racji ważności tego parametru badania na powyższy temat są ciągle aktualne o czym świadczy bardzo duża liczba publikacji naukowych na powyższe zagadnienie. Powstało wiele metod bezpośredniego pomiaru np. metoda studzienkowa, metody zalewania (warunki polowe), czy np. metoda wanny de Wit'a (warunki laboratoryjne). Prowadzone są także badania wiążące wartości powyższego parametru z podstawowymi łatwo mierzalnymi parametrami np. takimi jak gęstość gleby. Aktualnie do celów szacowania tego parametru wykorzystuje się również techniki tomografii komputerowej, co w niniejszej pracy podjął mgr inż. Bartłomiej Gackiewicz.

#### **2. Ocena układu i struktury pracy**

Dysertacja została przygotowana zgodnie z wymogami stawianymi tego typu opracowania. Liczy ona 116 stron w tym 98 stanowi zasadniczy tekst pracy (bez spisu literatury spisu tabel i rysunków). Spis literatury obejmuje 125 pozycje w języku angielskim i 1w języku francuskim. Rozprawa zawiera 46 rysunków oraz 10 tabel. Praca składa się z 8 rozdziałów głównych tj.: wstęp, cel i zakres pracy, metodyka badań, wyniki i dyskusja, podsumowanie i wnioski, spis tabel, spis rysunków i bibliografia. Treść poszczególnych rozdziałów w pełni odpowiada tematyce pracy,

struktura pracy jest generalnie poprawna (z propozycją ewentualnych uwag w końcowej części recenzji). Praca została napisana poprawnym stylem, jest czytelna i w sposób zrozumiały opisuje poruszane w niej zagadnienia.

### **3. Merytoryczna ocena poszczególnych rozdziałów pracy:**

#### Rozdział pierwszy: Wstęp

Autor na wstępie pracy wymienia techniki na podstawie których można wyznaczać wartości współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego. W podejściu empirycznym wartości tego parametru ocenia się na podstawie jego korelacji z innymi relatywnie łatwo mierzalnymi parametrami między innymi takimi jak: skład granulometryczny, porowatość ogólna czy gęstość gleby. W podejściu fizycznym zaś wartości współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego oblicza się na podstawie stosunkowo prostych wzorów np. formuły Kozeny-Carmana czy Katza-Thomsona w których wykorzystuje się poszczególne własności ośrodka takie jak: porowatość, powierzchnia właściwa czy krętość porów. Można również prowadzić symulacje przepływu w układzie odwzorującym ośrodek porowaty oparty przykładowo na równaniu Naviera -Stokesa. W kolejnej części tego rozdziału Doktorant dokonuje przeglądu literatury związanego z wykorzystaniem tomografii rentgenowskiej w tego typu badaniach gleby. Jest to nieinwazyjna technika umożliwiająca badanie różnorodnych ośrodków porowatych. Badania te mogą dostarczyć informacji na temat porowatości czy powierzchni właściwej, rozkładów przestrzennych porów, ich kształtu, wielkości połączeń między nimi oraz skrętności, które mogą być następnie wykorzystane do szacowania nasyconego przewodnictwa wodnego.

#### Rozdział drugi: Cel i zakres pracy:

Autor przedstawia problematykę swojej rozprawy doktorskiej dotyczącej modelowania współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego materiału glebowego na podstawie zobrazowano tomograficznych. Za główny cel pracy stawia sobie przeanalizowanie wybranych aspektów metodycznych modelowania na rezultaty symulacji. Autor podkreśla metodyczny charakter pracy przy założeniu doboru indywidualnego materiału materiał glebowego do poszczególnych typów badań. W swoim ograniczeniu celu pracy Autor wskazuje, że praca nie będzie obejmowała szerokiego spektrum gleb. W rozdziale tym autor wytyczył sobie 4 cele cząstkowe, które konsekwentnie realizuje i opisuje w 4 podrozdziałach wynikowych.

#### Rozdział trzeci: Metodyka badań:

Jako materiał badawczy użyto 2 rodzaje próbek: mieszaninę frakcji zmielonego piasku oraz standardowe próbki gleb pobrane w warunkach naturalnych, pierwsza grupa próbek obejmuje mieszaniny przesianego i zmielonego piasku. Materiałem wyjściowym był piasek rzeczny pobrany z Łachy Wiślanej w okolicy Puław, (małe próbki) oraz drugi rodzaj (próbki duże) to standardowe próbki glebowe, które pobrano z wierzchniej warstwy gleby 5 cm poniżej powierzchni w pięciu miejscach na Wyżynie Lubelskiej. Reprezentowały one następujące typy gleb: płowe właściwe, bielcowe i bielice, płowe bielcowane oraz torfowe i murszowe. Na próbkach małych wykonywano laboratoryjne pomiary nasyconego przewodnictwa wodnego wykorzystując do tego specjalnie przygotowany zestaw pomiarowy. Na dużych próbkach pomiary wykonywano aparatem firmy Eijkelkamp (wanna de Wit'a). W

dalszej części tego rozdziału przedstawiono technikę badania tomograficznego materiału glebowego, stosowanego typu urządzenia, procedury skanowania poszczególnego typu próbek, następnie przetwarzania i analizy obrazu. Powyższe badania na tym etapie umożliwiły wyznaczenie geometrycznej porowatości ogólnej oraz geometrycznej powierzchni właściwej tj. parametrów które w dalszej części pracy były wykorzystywane. Następnie opisano zasady dotyczące modelowania numerycznego nasyconego przewodnictwa wodnego (metoda objętości skończonych, zasady przygotowania siatki obliczeniowej). W końcowej części zaprezentowano równania wykorzystywane do modelowania nasyconego przepływu wody (równanie Naviera-Stokesa, Kozeny-Carmana), procedurę obliczania błędu oszacowania wartości nasyconego przewodnictwa wodnego oraz podstawowe obliczenia statystyczne.

#### Rozdział 4: Wyniki i dyskusja:

W skład tego rozdziału wchodzi 4 podrozdziały wynikowe, które zawierają cele cząstkowe, metodykę badań, opis wyników oraz wnioski szczegółowe.

Podrozdz. 4.1: Wpływ segmentacji na szacowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego (wyniki tego podrozdziału zostały opublikowane w artykule naukowym: Saturated water conductivity estimation based on X-ray CT images - evaluation of the impact of thresholding errors. Gackiewicz B., Lamorski K., Sławiński C., 2019: Int. Agrophysics 33, 49-60.). Celem tych badań było skwantyfikowanie potencjalnego wpływu błędów progowania na estymowaną wartość współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego. Badania wykonano na 4 dużych próbkach glebowych ( $64 \text{ cm}^3$ ) B1, B2 (gleby pochodzenia mineralnego – płowe właściwe) oraz B9, B10 (gleby pochodzenia organicznego – gleby torfowe). W trakcie badań próbki zeskanowano a ich obrazy tomograficzne sprogowano 2 metodami (algorytm Default, algorytm Isodata). Umożliwiło to sporządzenie ich histogramów, obliczono powierzchnię właściwą oraz porowatość ogólną. W dalszej części przygotowano siatki obliczeniowe na podstawie których w symulacji metodą objętości skończonych obliczono wartości nasyconego przewodnictwa wodnego (tab. 5). Na podstawie dokonanego porównania wartości pomierzonych w warunkach laboratoryjnych i oszacowanych na podstawie symulacji z wykorzystaniem obrazów sprogowanych najlepsze wyniki (zgodność) uzyskano dla algorytmu Isodata.

Podrozdz. 4.2: Porównanie modelowania bezpośredniego z modelowaniem na podstawie uproszczonej sieci porów. Celem badań niniejszego podrozdziału było metodyczne porównanie 2 metod modelowania nasyconego przewodnictwa wodnego: modelowania bezpośredniego i bazującego na uproszczonej sieci porów. Badania przeprowadzono na 10 specjalnie przygotowanych małych próbkach S1-S10 (4 mm średnica), które zeskanowano w ich górnej i dolnej części. Sprogowane obrazy zostały wykorzystane do oszacowania przewodnictwa przy użyciu równania Kozeny-Carmana oraz przygotowania siatek obliczeniowych do symulacji na podstawie metody objętości skończonych i utworzenia sieci porów (równania Naviera-Stokesa). W wyniku tych badań dokonano porównania wartości nasyconego przewodnictwa wodnego dla analizowanych próbek, z którego wynika, że oszacowane wg równania Kozeny -Carmana są prawie dwukrotnie większe w stosunku do wartości pomierzonych. Najlepszą zgodność wartości pomierzonych uzyskano z oszacowaniami bazującymi na równaniach Naviera-Stokesa (tab. 6, rys. 28).



Podrozdz. 4.3: Wpływ dokładności odwzorowania siatki obliczeniowej na oszacowanie nasyconego przewodnictwa wodnego. Celem badań było ustalenie i ilościowe zbadanie wpływu błędów odtwarzania rzeczywistej przestrzeni porów przez siatkę numeryczną na estymowanie wartości współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego. W tym podrozdziale na potrzeby badań wytypowano 6 próbek: 3 próbki s1, s2 i s3 to piasek przesiany przez sита w przedziałach odpowiednio: 0,08 do 0,16 mm, 0,16 do 0,32 mm, oraz 0,32 do 0,5 mm, próbka 4 (s5) to piasek mielony przez 10 minut, natomiast pozostałe to 4 zobrazowania tomograficzne piaskowca, materiału z Tajwanu, pobranego z głębokości ponad 2000 m. Dla każdego zobrazowanego generowano następnie siatki obliczeniowe z wykorzystaniem podziału przestrzeni na próbki 10X10X10 (oznaczane jako m10), i odpowiednio kolejne jako m20, m30 i m40. Liczba tak przygotowanych siatek generalnie dla analizowanych próbek wynosiła od ok. kilkuset tysięcy do ok. 210 mln (rys. 33) a czas ich przygotowywania zajmował od ok. kilkudziesięciu godzin do ponad 900 dla próbek m40 co świadczy o bardzo dużej pracochłonności powyższych badań. Zbyt mała ilość komórek początkowych wg Autora wpływa negatywnie na jakość siatek, co pociąga za sobą trudności we właściwym odwzorowaniu powierzchni właściwej. Biorąc pod uwagę: analizę porowatości całkowitych, powierzchni całkowitych, wartości nasyconego przewodnictwa wodnego, czasu przygotowywania siatek oraz błędu estymacji wg Autora najrozsądniejszym rozwiązaniem jest propozycja siatek m30.

Podrozdz. 4.4: Modelowanie nasyconego przewodnictwa wodnego w makroporowych próbkach glebowych. Celem badań w tym podrozdziale było zastosowanie nowej alternatywnej metody polegającej na uwzględnieniu zarówno przepływu wody w dobrze zdefiniowanej przestrzeni porów (nie zawsze łączących się ze sobą) - makropory jak również w mikroporach. W tym celu wykorzystano model NS/Darcy, który wykorzystuje się do przepływu wody w makroporach równania Naviera – Stoksa oraz równania Darcy dla pozostałych obszarów. Badania przeprowadzono dla 10 dużych próbek dla których określono wymagane właściwości fizyczne oraz wartości pełnego nasycenia wodnego obliczone różnymi metodami (tab. 9). Tylko dla 4 próbek (B1, B2, B9 i B10) zaistniała możliwość utworzenia siatek obliczeniowych modelem NS, natomiast modelem NS/Darcy dla wszystkich próbek. Z przeprowadzonych badań porównawczych wynika, że w przypadku modelu NS/Darcy wartości nasyconego przewodnictwa wodnego są ok. 4 razy większe od pomierzonych laboratoryjnie (rys. 43). Autor tłumaczy to faktem innych warunków brzegowych na granicy makroporów dla tego typu modelu, które nie uwzględniają oporu jaki stawiają wodzie ściany makroporów. Natomiast dla 4 próbek dla których, dla których nasycone przewodnictwo wodne było estymowane modelem NS, było prawie 1,5 krotnie wyższe od wyników laboratoryjnych. Na szczególną uwagę w tym podrozdziale zasługuje wizualizacja przestrzenna sieci porów, rozkładu prędkości (rys. 45 i rys. 46) dla próbek B1 i B4.

Rozdział 5: Posumowanie i wnioski: W niniejszym rozdziale przedstawiono 4 główne wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w rozprawie doktorskiej. Do głównych przesłanek tej pracy wg Autora należy zaliczyć: 1) błędy na etapie progowania obrazu trójwymiarowej przestrzeni porów mogą mieć bardzo istotny wpływ na szacowanie wartości nasyconego przewodnictwa wodnego, 2) zbyt mało dokładna siatka odwzorująca jedynie największe przestrzenie porów może prowadzić do niedoszacowania wartości nasyconego przewodnictwa wodnego, 3) szacowanie nasyconej przewodności wodnej w oparciu o uproszczony model przestrzeni porów w porównaniu z modelowaniem bezpośrednim przeszacowuje wartości tego parametru o około 1,5 raza, 4) w pracy zaproponowano nowy



alternatywny model (NS/Darcy) umożliwiający na modelowanie przepływu wody w makroporowatych próbkach glebowych, model ten jednak wymaga znajomości współczynnika nasyconego transportu wodnego macierzy glebowej. W moim odczuciu 23 wnioski szczegółowe i 4 wnioski główne w pełni spełniają cel ogólny i cele szczegółowe jakie Doktorant postawił sobie na poszczególnych etapach tej pracy.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

- Podjęcie aktualnej tematyki estymacji wartości współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego w oparciu o nowoczesne techniki pomiarowe tomografii komputerowej;
- W ramach poszczególnych podrozdziałów wynikowych sformułowano cele szczegółowe, syntetycznie opisano stosowane metody użyte na potrzeby każdego podrozdziału oraz wysnuło po kilka wniosków szczegółowych w obrębie każdego z nich;
- Stworzenie własnego stanowiska badawczego do pomiaru nasyconego przewodnictwa wodnego gleb małych próbek
- Znajomość i stosowanie wielu specjalistycznych programów komputerowych wykorzystywanych do modelowania wartości nasyconego przewodnictwa wodnego gleb, na uwagę zasługuje również czasochłonność wykonywanych badań;
- Wykazanie, że oszacowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego w oparciu o progowanie algorytmem Isodata jest bardzo zbliżone do pomiarów tego parametru w warunkach laboratoryjnych;
- Wykazanie, że wartości nasyconego przewodnictwa wodnego obliczone metodą objętości skończonej na podstawie równania Naviera-Stocksa są zbliżone do pomiarów laboratoryjnych;
- Zaproponowanie nowatorskiej metody estymacji błędu wyznaczania wartości nasyconego przewodnictwa wodnego na podstawie symulacji numerycznych;
- Analizując wpływ dokładności odwzorowania siatki obliczeniowej na oszacowanie nasyconego przewodnictwa wodnego wykazano, że siatka m30 jest najbardziej rozsądną alternatywą biorąc pod uwagę błąd estymacji i złożoność obliczeniową procesu tworzenia siatki i symulacji numerycznej;

Lektura pracy nasunęła kilka uwag dyskusyjnych:

- Podrozdziały 1.1, 1.2 i 1.3 znajdujące się we wstępie pracy opisujące aktualny stan wiedzy na analizowane zagadnienie proponuję zatytułować jako Przegląd literatury.
- Podrozdziały wynikowe 4.1, 4.2, 4.3 i 4.4 można rozważyć jako odrębne rozdziały wynikowe (ale jest to tylko sugestia); materiał ten jest w rozdziale Wyniki i dyskusja, ale poza opisem otrzymanych rezultatów i ich analizy nie ma tu dyskusji wyników rozumianej jako porównanie otrzymanych wyników w pracy z podobnymi wynikami badań opublikowanych w literaturze na powyższy temat.
- W spisie literatury brakuje następujących pozycji literaturowych cytowanych w tekście pracy: Sansalone et al. 2008 (str. 57), Duda et al., 2011 (str. 58). W spisie literatury pozycje: Jasak H, 1996 oraz Valvante H, 2004 posiadają jedynie tytuły prac bez nazwy wydawnictwa w których je opublikowano.
- Jaka była długość rurek plastikowych o średnicy 5 mm do których wsypany był materiał mieszanin glebowych oraz czy je zagęszczano (jaka była ich gęstość ?) (str.

17), natomiast na str. 52 (rozdz. 4.2.2) podano że średnica próbek 4 mm ?, czy były to te same próbki ?

- Proszę podać klasyfikację glebową w oparciu o którą sklasyfikowano i podano typy gleb wykorzystywanych w pracy.
- Czy w trakcie pomiarów laboratoryjnych nasyconego przewodnictwa wodnego uwzględniano temperaturę wody, która wpływa na jej lepkość a w konsekwencji na wartość mierzonego parametru ?
- Co oznacza stwierdzenie (str. 25, podrozdz. 3.4): „obszary znajdujące się blisko plastikowych ścianek próbki oraz górnej i dolnej krawędzi zostały pominięte, ponieważ były wyraźnie ciemniejsze od pozostałych części, co mogłoby przyczynić do błędów w ich segmentacji oraz zniekształcić wyniki symulacji” dlaczego były one ciemniejsze, czy mogło to być np. wynikiem ich znacznego zagęszczenia podczas ich poboru w warunkach naturalnych ?
- Podrozdz. 3.4. (str. 25): co oznacza stwierdzenie: (w próbkach dużych) – „w części zeskanowanych obszarów pominięto obecne w górnej i dolnej części puste obszary o powierzchni przekraczającej nawet połowę przekroju próbek” czy jest to dopuszczalne ?, czy są one reprezentatywne (tylko 2 powtórzenia) czy może po poborze w terenie większej ich ilości, w warunkach laboratoryjnych można by było wyeliminować te z dużą częścią obszarów pustych ?
- Skala pionowa i pozioma w obrębie poszczególnych rysunków (16, 18,19) jest zróżnicowana, wprawdzie są one na tym etapie czytelne ale zróżnicowana skala w obrębie każdego z nich utrudnia nieco porównywanie analizowanych parametrów;
- Czy algorytm Isodata może być stosowany do szerszego spektrum gleb mineralnych w celu szacowania nasyconego przewodnictwa wodnego ?
- Str. 52 (podrozdz. 4.2.2.1: materiał badawczy): „Scan tomograficzny musi być wykonany na suchej próbce.....”. Czy próbki były powietrznie suche, czy wysuszone w temp. 105<sup>0</sup>C ?. Autor słusznie zauważa, że z uwagi na proces pęcznienia nie używano gleb pęczniących w badaniach w trakcie skanu tomograficznego (przykładowo: gliny, ily) a jak generalnie trzeba używać tej metodyki w glebach o zmiennej geometrii do których należą także gleby torfowe wykorzystane w tej pracy ?. Rozkład ich porów będzie inny w trakcie pełnego nasycenia i wykonywania pomiarów laboratoryjnych, a inny w trakcie wykonywania pomiarów tomografią komputerową gdy będą one suche (wówczas zachodzi w nich proces kurczenia).
- W tab. 9 (str. 83) zamieszczono wybrane właściwości rozpatrywanych w pracy gleb, na jakiej podstawie w oparciu o prezentowane uziarnienie próbek B9 i B10 sklasyfikowano je jako typ gleb torfowych ?, jak można przy takim uziarnieniu wytłumaczyć zagęszczenie (moim zdaniem niezbyt trafne określenie, powinno być gęstość objętościowa gleby) na poziomie 0,50-0,51 g/cm<sup>3</sup> ?, w przypadku gleb torfowych powinno przedstawić się zawartość części mineralnych (popielność) i organicznych oraz stopień ich rozkładu. Na str. 18 stwierdzono, że są to gleby torfowe i murszowe, proszę o wyjaśnienie klasyfikacji glebowej którą posłużono się w celu określenia ich typu. Czy próbki B9 i B10 reprezentowały gleby torfowe czy bardziej zdegradowane i przekształcone gleby murszowe ?
- Na wstępie pracy powinna być zamieszczona tabelka z podstawowymi właściwościami fizycznymi analizowanych gleb pobranych do cylindrów o obj. 64 cm<sup>3</sup> takich jak: gęstość objętościowa gleby, gęstość fazy stałej, porowatość, a w



przypadku gleb torfowych dodatkowo: stopień rozkładu, zawartość części organicznych, popielność, a gdyby się udało nawet gatunek torfu (lub główny materiał roślinny z którego były zbudowane próbki tej gleby), to mogłoby być pomocne w wyjaśnieniu rozkładu porów w tych glebach.

- Przeprowadzone w pracy badania dotyczące szacowania, obliczania, modelowania i pomiarów nasyconej przewodności wodnej gleb prowadzono na relatywnie małych próbkach  $64 \text{ cm}^3$  (i mniejsze). Jak wiadomo z literatury przedmiotu im objętość analizowanych próbek glebowych jest większa, tym wartości mierzonego nasyconego przewodnictwa wodnego jest bardziej wiarygodna. Jak w opinii Doktoranta należy ukierunkować ewentualnie przyszłe badania tego typu byłyby przydatne w praktyce inżynierskiej do szacowania tego ważnego parametru hydraulicznego gleb ?

Powyższe uwagi w większości mają charakter dyskusyjny i nie podważają mojej pozytywnej oceny pracy. Mogą one ewentualnie być pomocne w przygotowaniu kolejnych publikacji naukowych, które mogą powstać na bazie materiału wynikowego (podrozdz. 4.2, 4.3 i 4.4).

### **Wniosek końcowy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr Bartłomieja Gackiewicza pt. „Modelowanie współczynnika nasyconego przewodnictwa wodnego materiału glebowego w oparciu o zobrażenia tomograficzne” została wykonana w oparciu o starannie zaplanowaną i przemyślaną metodykę badań i jest właściwie udokumentowana. Obszerny i skomplikowany zakres badań laboratoryjnych wraz z zastosowaniem najnowocześniejszych technik pomiarowych wskazuje na dobre przygotowanie Autora do prowadzenia badań naukowych. Na uwagę zasługuje fakt zastosowania wielu specjalistycznych metod badawczych i programów komputerowych w rozwiązywaniu postawionych sobie problemów naukowych. Świadczy to o dobrym przygotowaniu naukowym Doktoranta, Jego szerokiej i specjalistycznej wiedzy. Recenzowana praca wnosi nowe elementy poznawcze i metodyczne w analizowane zagadnienie modelowania nasyconego przewodnictwa wodnego gleb i w związku z tym zasługuje na pozytywną ocenę. Zakres tematyczny rozprawy umiejscawia ją w dziedzinie nauk rolniczych, w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa w pełni spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789). Na tej podstawie przedkładam Radzie Naukowej Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgr Bartłomieja Gackiewicza do publicznej obrony przedłożonej pracy.

*Oleszczuk Ryszard*

Dr hab. inż. Ryszard Oleszczuk, prof. SGGW