

Prof. dr hab. inż. Eulalia Szmidt  
Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Newelska 6  
01-447 Warszawa  
E-mail: szmidt@ibspan.waw.pl

Warszawa, 18.05.2023r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Miłosza Makowskiego  
pt. „*Multi-scale mathematical modeling of vegetation, soil and  
weather*” (Wielopoziomowe matematyczne modelowanie  
roślinności, gleby i pogody)**

Niniejsza recenzja została przygotowana na prośbę Rady Naukowej dyscyplin matematyka i informatyka UAM, wyrażoną w piśmie z dn. 6 marca 2023r. Recenzja została opracowana na podstawie nadesłanej papierowej wersji rozprawy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy niezwykle skomplikowanego, ważnego i interesującego zagadnienia badawczego, zarówno w kontekście teoretycznym, jak i praktycznym, mianowicie, modelowania roślin w zmiennych warunkach klimatycznych.

Praca została napisana w języku angielskim, liczy 79 stron, składa się z pięciu rozdziałów uzupełnionych o spis publikacji Doktoranta. Wykaz literatury zamieszczony jest po każdym z trzech głównych rozdziałów (obejmuje odpowiednio: 71+6+76 pozycji). Moim zdaniem lepiej byłoby przedstawić jeden, łączny spis literatury, tym bardziej, że pewne publikacje są powtarzane. Dałoby to także bardziej spójny obraz rozprawy doktorskiej. Pracę kończą ciekawe rozważania dotyczące możliwości dalszego rozwijania i udoskonalania przedstawionego systemu oraz jego przydatności w wymiarze teoretycznym i praktycznym.

We Wstępie (Rozdział 1) jest dobrze wyjaśniony rozważany problem i przedstawiony cel rozprawy, czyli symulacja roślinności, gleby i pogody uwzględniająca złożone interakcje między wymienionymi trzema składnikami. Nowe, wielopoziomowe podejście do modelowania roślinności i ich interakcji z otoczeniem pozwala na symulowanie ogromnych ekosystemów zależnych od temperatury i opadów, a jednocześnie na uwzględnianie szczegółów dotyczących rozwoju roślin. **Wielopoziomowość modelu w ujęciu przedstawianym przez Autora jest podejściem nowatorskim.** Autor wyjaśnia, że rozprawa została napisana na podstawie trzech współautorskich artykułów i szczegółowo wyjaśnia swój wkład. Zawartość pracy i jej układ przedstawione są w sposób przejrzysty.

Rozdział 2 pracy doktorskiej został opracowany na podstawie współautorskiej publikacji (140 p. na liście Ministra Edukacji i Nauki z dn. 21.12.2021), w którym Autor jest głównym (pierwszym) autorem. Przedstawiona jest tutaj autorska, wielopoziomowa metoda projektowania wielkich ekosystemów z realistycznymi pojedynczymi roślinami, o wiernie odwzorowanych cechach biologicznych, takich jak wzrost, interakcje między roślinami, rywalizacja o zasoby. Rozważane są interaktywne ekosystemy do 500 000 roślin, przy jednoczesnym uwzględnianiu biologicznych zjawisk oraz priorytetów znanych w leśnictwie i badaniach botanicznych.

Dzięki wprowadzeniu parametrów do modelu, możliwa jest symulacja dziewięciu różnych ekosystemów, np. lasu liściastego, iglastego, sawanny, tundry, pustyni itp., W wymienionych ekosystemach **każda roślina jest modelowana indywidualnie**, czyli uwzględniane są jej cechy gatunkowe w indywidualnym rozwoju (np. długość gałęzi i kąt jaki tworzą), a jednocześnie modelowana jest jej dynamiczna adaptacja do otoczenia scharakteryzowanego przez ukształtowanie terenu oraz warunki klimatyczne.

Autor przedstawia własne modele matematyczne, a jednocześnie zrećnie korzysta z rozwiązań przedstawianych w literaturze.

Rozdział zamykają wyniki symulacji (świadczące, tak jak cała rozprawa, o umiejętnościach informatycznych Doktoranta).

Rozdział zawiera bardzo ładne, dobrze opisane i świetnie ilustrujące tekst, rysunki. **Grafika jest bardzo ważnym elementem dysertacji i zapewnia znakomitą komunikację z użytkownikiem.** Sprzężenie zwrotne, będące rezultatem zmiany parametrów modelu, przedstawione w formie graficznej, jest w efekcie **łatwo interpretowalne.**

W Rozdziale 3. Zasyulowano cykl hydrologiczny, przedstawiając model dynamiki chmur, na który składa się parowanie roślin i gleby, powstawanie chmur i opady atmosferyczne. Przedstawiony jest syntetyczny opis powstawania różnych rodzajów chmur w zależności od czynników atmosferycznych. Wykorzystane i rozszerzone są w tym celu modele fizyczne znane z literatury. Istotnym elementem jest modelowanie chmur w czasie rzeczywistym. Również w przypadku tego rozdziału mocną stroną jest interesująca grafika. Zaprezentowane modele są elementem umożliwiającym odzwierciedlać skomplikowane interakcje między pogodą i wegetacją roślin.

W Rozdziale 4. Wykorzystano model dynamiki chmur w symulacji ekosystemów. Badano sprzężenie zwrotne między roślinnością i powstawaniem chmur. Rozszerzono istniejące modele wegetacji roślin i modele atmosferyczne uzupełniając je o nowy model uwzględniający wpływ gleby. W efekcie modelowano jednocześnie wpływ zmian gradientu hydrologicznego, gradientu przepływu ciepła i dostępu roślin do światła. Badano wzrost drzew w odpowiedzi na wymienione zmiany. W ten sposób **zamodelowano zjawiska w ekosystemie, które nie były modelowane wcześniej w literaturze.** W przeciwieństwie do znanych modeli badających globalne zmiany klimatu, przedstawiony model uwzględnia lokalne zmiany.

Przykładem są zmiany zachodzące na krawędzi lasu, zjawiska wywołane rzeźbą terenu, powstawanie wiatru fen (w Polsce jest to wiatr halny). Zostały wykonane interesujące, liczne symulacje potwierdzające poprawność modelu. Założenia i uzyskiwane wyniki były porównywane z wiedzą znaną z ekologii i klimatologii.

Warto podkreślić, że istotną cechą przedstawionego modelu jest nie tylko wnikliwa i poprawna analiza znanych zjawisk, ale także możliwość symulacji ekosystemów w długim i bardzo długim horyzoncie czasowym. Można badać tak istotne zjawiska jak niszczenie wielkich obszarów leśnych i ich wpływ na klimat w wymiarze globalnym. Ma to niewątpliwie niezwykle **ważny wymiar praktyczny**.

Rozdział 5 wskazuje interesujące możliwości udoskonalenia opracowanego systemu.

Rozprawę kończy wykaz współautorskich publikacji Autora (każda z wymienionych trzech publikacji ma przypisanych 140 punktów na liście ministerialnej).

Rozprawa bez wątplenia plasuje się w dyscyplinie informatyka.

Zalety dysertacji zostały podkreślane przy opisie poszczególnych rozdziałów. Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne.

Zaskoczył mnie fakt, że praca składa się z jakby trzech odrębnych części. Po każdym z trzech zasadniczych rozdziałów mamy trzy odrębne spisy literatury (niektóre pozycje powtarzają się w kolejnych wykazach). Autor przyjął ponadto konwencję powtarzania informacji zawartych w poprzednich rozdziałach i uzupełniania jej o nowe elementy. Osobiście wołałabym wyczerpujące omówienie poszczególnych modeli w jednym miejscu. Przykład – bardzo ciekawy sposób zaproponowany przez Doktoranta w Rozdziale 2., dotyczący

konstrukcji różnych roślin z 9 modułów, jest opisany w Rozdziale 1. (przedstawiony na Rysunku 4.), a następnie opis tego samego sposobu pojawia się w Rozdziale 4. (na Rysunku 33.). Wprawdzie opisy (rysunki) nie są identyczne, ale niosą dokładnie tę samą informację. Konwencja przyjęta przez Doktoranta nie jest błędem, ale pracę czytałoby się „płynniej” dostając tekst bardziej ujednolicony.

Praca napisana jest poprawnie, chociaż Autor nie ustrzegł się błędów.

W Rozdziale 1., na str. 25 mamy: “...we render the majority of the results shown throughout the chapter with Houdini.” Jednak rozdział z Houdinim nie jest nigdzie wskazany. Prawdopodobnie powinien być w spisie literatury. Ale nie jest.

Dalej, na str. 25. mamy: „Details of our framework and a screenshot of the developed user interface can be found in the Appendix 2.6.5.”. I znowu, Autor powołuje się na *Appendix*, który nie istnieje.

Na str. 29. Autor powołuje się na “...the 3/2 power law [71]” bez żadnych dodatkowych wyjaśnień. Znalazłam wyjaśnienie w artykule Donalda Wellera “Self thinning exponent correlated with allometric measures of plant geometry”, namely : “The -3/2 power rule of self-thinning, which describes the course of growth and mortality in crowded, even-aged plant stands, predicts that average mass is related to plant density by a power equation with exponent – 3/2.” We wskazanym artykule jest analiza omawianej zasady oraz potwierdzenie poprawności wyników uzyskanych przez Autora, które trochę od tej zasady odbiegają.

Opisy równań są niekiedy zbyt lakoniczne. Na przykład, na str. 55. w równaniu (41) mamy symbol  $\pi$  bez żadnych wyjaśnień. W równaniu (43) pojawia się parametr (?)  $\alpha$ . Autor daje jedynie wyjaśnienie ogólne: „Plausible parameters were obtained from the literature [67], [68].” Nie ma podanych przedziałów

zmienności parametrów ani przyjętych ich wartości w badaniach symulacyjnych, ani wyjaśnień co ulega zmianie w modelu dzięki zmianom parametrów.

W spisie literatury (po rozdziale 4.) brakuje jednego z artykułów Doktoranta, mianowicie, wymienionej na str.79 pozycji (w wykazie artykułów współautorstwa Doktoranta):

[3] *W. Pałubicki, M. Makowski, W. Gajda, T. Hädrich, D. L. Michels, and S. Pirk, "Ecoclimates: Climate-response modeling of vegetation," ACM Trans. Graph., 2022.*

Wskazane niedociągnięcia nie przesłaniają faktu, że Doktorant proponuje **nowatorskie rozwiązania** problemu, który stanowi poważne **wyzwanie teoretyczne**, a jednocześnie jest niezwykle **istotny z punktu widzenia praktycznych zastosowań**. Co więcej, mocnym atutem pracy jest oprócz efektownej grafiki również fakt, że użytkownik otrzymuje narzędzie generujące nie tylko atrakcyjnie przedstawione, ale przede wszystkim **zrozumiałe i interpretowalne wyniki**. Rozprawa wykazuje erudycję Autora, a Jego dorobek został udokumentowany wartościowymi publikacjami.

W świetle powyższego, z przekonaniem stwierdzam, że w mojej opinii praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odpowiednie przepisy. W związku z tym, bez zastrzeżeń wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie Pana mgr. Miłosza Makowskiego do publicznej obrony.

