

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, 28.09.2024r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Andrzeja Kokoszy
pt. „Multiscale Modelling of Biological Systems:
A Computational Approach to Studying Natural Phenomena from Cellular to
Ecological Levels” (Wieloskalowe modelowanie systemów biologicznych:
obliczeniowe podejście do badania zjawisk naturalnych
od poziomu komórki po ekosystemy**

Niniejsza recenzja została przygotowana na prośbę Rady Naukowej dyscyplin matematyka i informatyka UAM, wyrażoną w piśmie z dn. 5 lipca 2024r. Recenzja została opracowana na podstawie nadesłanej papierowej wersji rozprawy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy **ważnego i interesującego**, a jednocześnie **niezwykle skomplikowanego** zagadnienia badawczego, zarówno **w aspekcie teoretycznym jak i praktycznym**, mianowicie tworzenia wybranych modeli obliczeniowych symulujących rozwój złożonych procesów biologicznych w różnych skalach. Praca bez wątplenia mieści się w obszarze dyscypliny informatyki.

Praca została napisana w języku angielskim, liczy 91 stron, składa się ze wstępu, trzech rozdziałów, wniosków, wykazu rysunków, tabel oraz spisu literatury obejmującego 66 pozycji (w tym kilku publikacji Doktoranta). Pracę kończą rozważania dotyczące rodzajów zastosowanych modeli oraz ich przydatności w wymiarze teoretycznym i praktycznym.

We Wstępie (Rozdział 1) jest dobrze uzasadnione podjęcie tematu rozprawy z jednoczesnym podkreśleniem jego złożoności, konieczności rozwoju nowych podejść matematycznych inspirowanych systemami biologicznymi, a jednocześnie umożliwiających lepsze zrozumienie wspomnianych systemów i nowe spojrzenie na pojawiające się w trakcie badań pytania. Przedstawione są trzy hipotezy, które Autor weryfikuje w pracy. Omówiona jest także zawartość kolejnych rozdziałów. W każdym rozdziale opisany jest inny model.

Każdy z modeli oparty jest na danych empirycznych i konsultowany z ekspertami. Omawiane modele zjawisk są rozważane w różnych skalach przestrzeni i czasu – od wymiaru komórki do dynamicznego rozwoju całego ekosystemu, od pojedynczych minut do kilku miesięcy. Cel, zawartość pracy oraz jej układ przedstawione są w sposób przejrzysty.

W **Rozdziale 2.** opisany jest dyskretny model wyjaśniający, jak powstaje system naczyń roślinnych. Chodzi o zrozumienie, jak tworzą się naczynia w części wzrostowej, tzw. merystemie wierzchołków, rośliny *Arabidopsis Thaliana*. Rozwój systemu naczyniowego to kluczowy element biologii roślin. Proces ten łączy tworzenie nowych organów z budowaniem złożonej sieci naczyń, które pełnią ważną rolę w funkcjonowaniu i rozwoju organów, dostarczając im niezbędnych składników odżywczych i hormonów. Ponieważ rośliny przez całe życie tworzą nowe organy, system naczyniowy musi się nieustannie rozrastać i reorganizować w odpowiedzi na sygnały rozwojowe oraz warunki środowiskowe.

Powstawanie systemu naczyń można śledzić, obserwując pierwsze żyły, które powstają dzięki działaniu hormonu wzrostu, czyli auksyny. Autor symuluje powstawanie naczyń za pomocą modelu opartego na agentach – wirtualnych jednostkach poruszających się **w trójwymiarowej przestrzeni**, które testują różne hipotezy dotyczące formowania się żył.

Przedstawione badania bazują na danych eksperymentalnych pochodzących z ponad 100 trójwymiarowych rekonstrukcji wierzchołków pędów roślin na różnych etapach ich rozwoju. Autor podkreśla, że **w literaturze na ogół pomijana jest głębia obrazów**, a modele skupiają się jedynie na powierzchni organów. Tymczasem uwzględniony przez Autora aspekt głębi jest **podejściem nowatorskim**, a zarazem **kluczowym** do zrozumienia rozwoju systemu naczyniowego. Z tego powodu przedstawione podejście wymagało **opracowania nowych metod zarówno do analizy obrazów, jak i modelowania**. Zaproponowany model **prawidłowo odtwarza powstawanie systemu naczyń** i pokazuje, że zmiana tempa wzrostu merystemu może być powodem zmiany w układzie liści.

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

Rozdział 3. omawia modelowanie różnic strukturalnych między formą drzewa a krzewu na przykładzie brzozy brodawkowatej (*Betula pendula*). Rzeczywiste, dwumiesięczne drzewa są modelowane za pomocą **skierowanych grafów zmieniających się w czasie**. Model wiernie odzwierciedla proces formowania się drzew oraz mutantów (krzewów).

Następnie Autor proponuje model przesyłania sygnałów na duże odległości w brzozach. **Dyskretna reprezentacja drzewa w postaci grafu została uzupełniona o opis przesyłania sygnału za pomocą równań różniczkowych**. Model pozwala zaobserwować, jak strukturalne różnice wpływają na globalny gradient hormonu wzrostu (auksyny).

Autor nakreśla kierunki dalszych badań i nie stroni od pokazywania pewnych wad modeli, co należy zaliczyć na plus. Rozdział jest napisany klarownie, a jego treść została zilustrowana przejrzystymi, starannie dobranymi rysunkami.

Przedstawiony w Rozdziale 4. nowatorski model symulacji pożarów lasów jest znaczącym krokiem naprzód w dziedzinie modelowania i zwalczania pożarów. Uniwersalność modelu, wynikająca z możliwości symulacji pożarów w różnych ekosystemach sprawia, że jest to narzędzie wszechstronne i przydatne w szerokim zakresie zastosowań.

Realistyczność zaproponowanego modelu została potwierdzona poprzez eksperymenty z kontrolowanymi wypaleniami, co daje pewność, że wyniki symulacji są zgodne z rzeczywistością. Fakt ten jest ważny zarówno z punktu widzenia teorii jak i praktyki. **Innowacyjność modelu** przejawia się w szczegółowym uwzględnieniu rodzaju roślinności i wilgotności paliwa, co zwiększa precyzję symulacji oraz pozwala na dynamiczne dostosowanie parametrów modelu do różnych scenariuszy pożarów, od powolnie tłącego się ognia na powierzchni gruntu po intensywne pożary koron drzew. Model opisuje także wpływ drobnych paliw, trawy i ściółki na rozprzestrzenianie się pożaru. **Wprowadza to nową jakość w przewidywaniu rozprzestrzeniania się ognia.**

Na podkreślenie zasługuje także zastosowanie nowatorskiego podejścia hybrydowego, które efektywnie łączy różne paradygmaty modelowania, takie jak 3D, dotyczące atmosfery, czy 2D, dotyczące warstwy gruntu. Dzięki temu każda domena pożaru jest modelowana osobno, co prowadzi do **większej dokładności symulacji i możliwości jej szybkiej optymalizacji**. W efekcie model jest nie tylko narzędziem badawczym, ale może także stanowić realne **wsparcie dla służb pożarniczych**, szczególnie w kontekście działań w czasie rzeczywistym.

Podsumowując, prezentowany model oferuje **kompleksowe podejście do symulacji pożarów lasów**, łącząc naukową precyzję z praktycznymi korzyściami. Jego **wszechstronność, innowacyjność oraz możliwości adaptacyjne** czynią go niezwykle cennym narzędziem w badaniu i zwalczaniu pożarów, jednocześnie otwierając perspektywy na dalszy rozwój i udoskonalenie przedstawionego modelu.

Rozdział uzupełniony jest o Dodatki z opisem modelu wegetacji roślin (zależnym od ilości światła, wody i gatunku roślin), wykazem parametrów oraz wartościami przyjętymi w symulacjach. Zgromadzenie w jednym miejscu wymienionych informacji ułatwia czytanie Rozdziału.

Pracę kończą ciekawe rozważania dotyczące rodzajów zastosowanych modeli, spełnienia przez nie postawionych na początku hipotez, możliwości ich dalszego rozwijania i udoskonalania prowadzonych prac, a także ich **niekwestionowanej przydatności w wymiarze teoretycznym i praktycznym**.

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

- Str 9 – ostatni akapit (3 linie) w części „Direction calculation” (str. 9) powtórzony jest dwa razy.
- Na stronie 9 podane jest równanie zawierające stałą 0.3. Prawdopodobnie dobrano ją w wyniku symulacji, ale przydałby się tutaj drobny komentarz. Tego typu sytuacje powtarzają się wielokrotnie w rozdziale.
- W rozdziałach 2. – 2.5 nie znalazłam odniesień do literatury. Autor wspomina wprawdzie, że przedstawiane modele powstały na podstawie danych empirycznych i opracowane we współpracy ze specjalistami z odpowiednich dziedzin, ale być może część wzorów pojawiała się w literaturze, a część powstała w wyniku symulacji przeprowadzonych przez Autora. Brak jest jednak komentarza na ten temat.
- Rysunek 2.12 ma w opisie części a – f, podczas gdy na rysunku są oznaczone tylko części a oraz b.
- Ostatnie zdanie w sekcji 3.5. (str. 42) jest niedokończone i brzmi: „It can be caused by environmental effects, that weren't”.
- Rysunek 4.6 (str. 61) jest poprawnie opisany pod rysunkiem, jednak na str. 62, gdzie znajduje się jego opis w tekście, oznaczono części od a – c oraz d – f, które nie są oznaczone na rysunku.

Powyższe uwagi mają charakter marginalny i nie wpływają na moją wyjątkowo pozytywną ocenę rozprawy.

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że:

- Praca zawiera **oryginalny dorobek** Doktoranta.
- Doktorant proponuje **nowatorskie rozwiązania** problemu, który stanowi poważne **wyzwanie teoretyczne**, a jednocześnie jest niezwykle **istotny z punktu widzenia praktycznych zastosowań**.
- Autor z powodzeniem zweryfikował hipotezy postawione na początku pracy.
- Zaproponowane nowe algorytmy zostały oprogramowane, przetestowane z sukcesem na rzeczywistych danych i skonsultowane z ekspertami.
- Doktorant umiejętnie zastosował podejścia znane z literatury, przeanalizował, zmodyfikował i zaimplementował.
- Praca świadczy o dużej erudycji Autora, umiejętności rozwiązywania realnych problemów, programowania, a także umiejętności jasnego i precyzyjnego przedstawiania wyników.
- Mocnym atutem pracy jest efektowna grafika, a także przejrzyste wizualizacje danych.
- Dorobek Autora został udokumentowany trzema wartościowymi publikacjami znajdującymi się na liście ministerialnej, z których każda otrzymała po 140 punktów.

W związku z powyższym, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że w mojej opinii praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odpowiednie przepisy. Dlatego bez zastrzeżeń wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie Pana mgr. Andrzeja Kokoszy do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę nowatorski charakter, zakres oraz znaczenie uzyskanych wyników, wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

