

Prof. dr hab. Jerzy Weres  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
Wydział Rolnictwa i Bioinżynierii  
Instytut Inżynierii Biosystemów  
Zakład Informatyki Stosowanej  
Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań

Poznań, 23 grudnia 2013 r.

**Ocena rozprawy doktorskiej mgra Piotra Pieczywka  
zatytułowanej  
„Modelowanie właściwości mechanicznych tkanek roślinnych metodą elementów skoń-  
czonych”**

**1. Informacja o rozprawie**

Rozprawa doktorska mgra Piotra Pieczywka została wykonana w Zakładzie Mikrostruktury i Mechaniki Biomateriałów Instytutu Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie pod kierunkiem dr hab. Artura Zdunka. Rozprawa zawiera 87 stron formatu A4, łącznie z wykazem ważniejszych oznaczeń (str. 3), spisem treści (str. 4 - 5), 4) i wykazem cytowanej literatury (122 pozycje, str. 79 – 87). W pracy znajdują się 23 rysunki ściśle związane z treścią pracy.

**2. Merytoryczna ocena rozprawy**

Oceniana rozprawa dotyczy matematycznego modelowania systemów empirycznych utworzonych z tkanek roślinnych, z uwzględnieniem ich budowy na poziomie komórkowym. Ze względu na znaczną złożoność takiej materialnej struktury, a zatem złożoność właściwości i zachowań obiektów wchodzących w jej skład, odwzorowywanie omawianych systemów do postaci modeli matematycznych - strukturalnych i operacyjnych, takich, które pozwoliłyby lepiej wyjaśniać i prognozować badane systemy, jest dla nauki trudnym wyzwaniem i stanowi, w skali światowej, o poznawczej wartości podjętej przez Doktoranta problematyki.

Złożoność badanych systemów powoduje, że autorzy opracowań dostępnych w literaturze przedmiotu przyjmują znaczne uproszczenia, na poziomach konstruowania struktury matematycznego modelu, aproksymowania modelu do postaci numerycznej i reprezentowania w tym modelu materiałowych właściwości tkanek roślinnych, w wyniku czego dotychczasowe próby modelowania omawianych systemów są niezadowolające. Duże nadzieje można pokładać w recenzowanej rozprawie, bowiem te najważniejsze, wspomniane wcześniej zagadnienia zostały w niej poddane obszernej i kompleksowej analizie, z zachowaniem poznawczej wnikliwości, bardzo

dobrej znajomości współczesnej literatury naukowej, a także metodycznej kompetencji. Dużym osiągnięciem ze strony Doktoranta jest skuteczne sięgnięcie po nowoczesne metody aproksymacyjne, pozwalające przekształcić złożony model matematyczny strukturalny do postaci operacyjnej, pozwalającej rozwiązywać skomplikowane zagadnienia i wyznaczać pola przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w biomateriałach.

Doktorant oparł omawiane problemy numerycznego modelowania tkanki roślinnej na dotychczasowym dorobku wiedzy naukowej, trafnie i obszernie dobranym i omówionym w rozdziale 2. *Przegląd literatury*, w podrozdziałach: 2.1. *Budowa i właściwości mechaniczne tkanek roślinnych*, 2.2. *Właściwości mechaniczne ściany komórkowej oraz blaszki środkowej*, 2.3. *Turgor*, 2.4. *Mikrostruktura tkanki*, 2.5. *Modelowanie pojedynczych komórek oraz tkanek roślinnych* oraz 2.6. *Metoda elementów skończonych*. Doktorant wykazał tu dobrą znajomość bieżącego stanu wiedzy, zarówno w aspektach teoretycznych, jak i aplikacyjnych, umiejętność krytycznej analizy literatury oraz zdolność wnikliwego wnioskowania. Zdarzają się czasem wnioski trywialne, jak choćby te o przyczynach obserwowanej nieliniowości – związane z różnorodnością geometrii czy wydostawaniem się płynów, zaczerpnięte z prac Pitta i Davisa, 1984 oraz Pitta i Chena, 1983. Przeważają jednak sformułowania głęboko osadzone w zaawansowanej analizie problemów budowy tkanek roślinnych, ich mikrostruktury i właściwości mechanicznych ściany komórkowej oraz związanych z nimi problemów całościowego poznawania ich mechanicznych właściwości. Autor dotyka szerokiego spektrum zagadnień związanych m.in. z nieliniowością i anizotropią ośrodka, współistnieniem kilku mechanizmów odpowiedzialnych za postać związków między stanami naprężenia i odkształcenia, odnosi się też do wiązań sieciujących matrycę ściany komórkowej. Szczegółowo też opisuje rolę turgoru w kształtowaniu mechanicznych właściwości tkanek.

W zakresie analizy modeli pojedynczych komórek i tkanek roślinnych Doktorant skrupulatnie omówił ich rozwój, zwracając uwagę na uproszczenia kolejnych wersji modeli oraz poddał analizie sposoby pozbywania się tych uproszczeń w wersjach następnych. Ten fragment rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do formułowania i rozwiązywania problemów z omawianego zakresu.

Opis bieżącego stanu wiedzy w zakresie podstaw i zastosowań MES w modelowaniu zjawisk zachodzących w warzywach i owocach, choć przejrzysty, jest skromny i wrywkowy. Podobne odczucia można mieć odnośnie opisu zastosowań MES w modelowaniu zagadnień odwrotnych i modelowaniu wieloskalowym – z jednej strony należy wyróżnić wzmiankę o zastosowaniu modelowania MES w tych obszarach, z drugiej jednak zagadnienia te zostały potraktowane skromniej,

niż wskazywałyoby na to ich znaczenie. Pominięta została przykładowo kwestia, że w modelowaniu odwrotnym algorytmy MES nie wnoszą niczego nowego, istotą są tu odpowiednio dobrane algorytmy optymalizacji.

W rozdziale dotyczącym przeglądu literatury Doktorant przekonująco uzasadnił celowość podjęcia swoich badań. Na podstawie treści rozdziału 3. *Cel i zakres pracy* można nabrać przekonania, że rozprawa ma charakter naukowy: Doktorant potrafi dostrzec istotny problem naukowy dotyczący braku możliwości wyjaśniania i prognozowania stanu mechanicznego tkanek roślinnych, na akceptowalnym poziomie dokładności – w oparciu o znajomość ich właściwości materiałowych. Potrafi przy tym określić dopuszczalne na przyjętym, akceptowalnym poziomie założenia upraszczające proponowanej analizy.

Doktorant zaproponował właściwe metody osiągnięcia celu, oparte zarówno na metodach doświadczalnych, analitycznych i numerycznych (rozdział 4. *Materiały i metody*). Poprawnie zaplanował doświadczenia laboratoryjne - przygotował odpowiednie próbki do badań, dla każdej z nich zarejestrował obraz jej mikrostruktury, przeprowadził testy mechaniczne pozwalające wyznaczyć właściwości mechaniczne tkanki oraz dokonał analizy zgromadzonych danych. Metody naukowe Doktorant dobrał i zastosował w rozprawie prawidłowo. Przedstawiony w tej części rozprawy opis przygotowania materiału badawczego i przeprowadzenia doświadczeń jest metodycznie poprawny, wprawdzie skrótowy, lecz wskazujący na dobre metodyczne przygotowanie Doktoranta do pracy badawczej.

Opis wyników badań (rozdział 5. *Wyniki i dyskusja*), a także ich analiza zostały przedstawione obszernie, przejrzysto i adekwatnie do sformułowanych celów. Doktorant szczegółowo opisał etap przetwarzania i analizy obrazów tkanek roślinnych. Ta część pracy jest niewątpliwie dużym osiągnięciem Autora – choć opisane w niej metody w ogólności są znane, w tym jednak wypadku zostały oryginalnie zmodyfikowane i zastosowane odpowiednio do celu rozprawy i struktury badanego ośrodka, są zatem unikalnym wkładem Doktoranta do rozwoju metod pozyskiwania danych o geometrycznych właściwościach biomateriałów – danych, bez których nie sposób podejść do modelowania mechanicznego stanu badanych ośrodków. I w tym właśnie celu Doktorant zmierzył się z kolejnym problemem – w jakiej postaci wykorzystać uzyskane dane o geometrii. Posłużył się znanymi wprawdzie metodami, lecz znowu dopracowanymi zgodnie ze specyfiką własnych badań do postaci oryginalnych i użytecznych algorytmów, znowu w sposób zasługujący

jący na uznanie. Doktorant zaproponował i poddał analizie kilka opracowanych przez siebie algorytmów parametryzacji struktury tkanek roślinnych – algorytm wektoryzacji, teselacji Woronoja oraz teselacji eliptycznej, a następnie, co często bywa w podobnych pracach pomijane, ocenił jakość tych algorytmów za pomocą zaproponowanej miary. Kwestią dyskusyjną pozostaje uznaniowa decyzja Autora odnośnie liczby usuwanych danych, a więc o gęstości tworzonej siatki MES.

Dotychczasowe działania doprowadziły Doktoranta do konieczności przyjęcia kolejnego kompromisu – między czasem obliczeń, a więc dostępną mocą obliczeniową komputerów a dokładnością odwzorowania geometrii badanych obiektów – geometrii dwu- lub trójwymiarowej. Ponieważ duża moc obliczeniowa jest w ośrodkach akademickich dostępna, można by uznać, że wybór modelu płaskiego byłby uzasadniony jedynie łatwością budowy takiego modelu. Na szczęście Doktorant poświęca sporo uwagi temu zagadnieniu i mimo wyboru analizy dwuwymiarowej, podejmuje się budowy modelu, w którym uwzględnia pewne cechy wynikające z trójwymiarowej geometrycznej struktury – komórki modelu tkanki roślinnej buduje z pionowych i poziomych ścianek, w płaszczyznach prostopadłych względem siebie, a w końcowej dyskusji w rozprawie ustosunkowuje się do dalszego rozwoju modelu w kierunku trzeciego wymiaru.

W ramach omawianego rozdziału 5. *Wyniki i dyskusja* Doktorant umieścił podrozdział 5.2. *Budowa modelu MES*. Zawarł w nim szczegółowy opis procedur, rysunków i licznych wzorów, zgodnie z dokumentacją pakietu ANSYS 11. Większość z nich jest na podstawowym poziomie programu nauczania metody elementów skończonych na wyższych uczelniach technicznych i przyrodniczych, więc można było część tych opisów pominąć. A jeśli już je umieszczać, jako że stanowią przecież opis zastosowanych procedur obliczeniowych, można je było lepiej zorganizować – zacząć od omówienia numerycznej, macierzowej postaci matematycznego modelu, która to postać niepotrzebnie przewija się kilkakrotnie w całym podrozdziale 5.2; w ramach modelu omówić warunki brzegowe, a dopiero później pisać o metodach rozwiązywania układów równań algebraicznych liniowych. Oprócz opisanej szczegółowo procedury rozwiązywania takich układów równań, opartej na algorytmie Cholesky’ego, istnieje wiele innych metod zapewniających podobną, jeśli nie większą wydajność, więc akurat dokładny opis tej procedury wydaje się nadmiarowy. Powyższe uwagi mają charakter porządkujący, praca mogłaby zyskać na czytelności, gdyby w podrozdziale tym Autor poświęcił więcej czasu na organizację materiału, nie kwestionując jednak merytorycznej poprawności i zasadności wykonanych działań. W szczególności wyróżnić chciałbym tę część podrozdziału 5.2, w której Doktorant omawia reprezentację materiałowych właściwości badanych tkanek w numerycznym modelu oraz sposób ich uwzględniania w budo-

waniu rozwiązań, z uwzględnieniem nieliniowości i plastyczności oraz podrozdziały 5.2.3. i 5.2.4. poświęcone budowie modelu ściany komórkowej i wnętrza komórki oraz reprezentacji warunków brzegowych dla rozwiązywanego zagadnienia. Doktorant wykazuje tu bardzo dobrą znajomość badanej problematyki i wpływa w ten sposób na ostateczną wysoką wartość naukową swojej rozprawy.

Analiza wrażliwości modelu (podrozdział 5.3.) została wykonana poprawnie, we wszystkich najważniejszych aspektach, podobnie jak walidacja (podrozdział 5.4.), umożliwiającą ocenienie jakości zaproponowanego modelu. W podrozdziale tym można stwierdzić, w oparciu o porównanie wyników symulacji opartej na systemie abstrakcyjnym oraz wyników laboratoryjnych doświadczeń wykonanych na systemie empirycznym, że opisany w poprzednich rozdziałach oryginalny model uwzględniający geometryczną strukturę i materiałowe właściwości tkanki roślinnej odwzorowuje zadowalająco strukturę obiektu materialnego – tkanki wybranego produktu rolniczego.

Całość osiągnięć Doktorant podsumował w rozdziałach 6. *Uogólnienie wyników symulacji* i 7. *Wnioski*. Przedstawił tu w skondensowanej postaci uzyskane wyniki oraz uogólnił swoje rozważania – podkreślił m.in., że zaproponowaną, szczegółową postać modelu dostosowaną do modelowanego systemu empirycznego – tkanki epidermy cebuli można, dzięki zaproponowanej metodzie, dostosować do innych struktur tkanek roślinnych. Pozytywnie oceniam pierwszy, wstępny akapit rozdziału 7. *Wnioski*, w którym Doktorant uwypuklił istotę swojego osiągnięcia naukowego. Wszystkie szczegółowe wnioski, ponumerowane od 1 do 6, wynikają z przeprowadzonych i opisanych badań – odpowiadają uzyskanym wynikom doświadczeń laboratoryjnych, wynikom numerycznego modelowania za pomocą metody elementów skończonych oraz wynikom symulacji komputerowej opartej na oryginalnym modelu. Wnioski te są bardzo dobrym podsumowaniem całości pracy, nie zawierają trywializmów, a wniosek 6. zawierający zalecenia odnośnie dalszych badań ma swoje pełne uzasadnienie w treści rozprawy.

Jestem przekonany, że sformułowanie celu ocenianej rozprawy, wnikliwy, poprawny dobór metod badawczych, zaprojektowanie i przeprowadzenie oryginalnych badań łączących doświadczenia fizyczne z modelowaniem matematycznym, a także umiejętne wnioskowanie stanowią o znacznym rozwoju naukowym Doktoranta. Osiągnięte w rozprawie wyniki dostarczają oryginalnych, skutecznych metod badania stanu mechanicznego tkanki roślinnej oraz pozwalają na uzasadnione naukowo wyjaśnianie procesów zachodzących w badanych biomateriałach z uwzględnieniem ich szczegółowej geometrycznej struktury i materiałowych właściwości. Wyniki rozpra-

wy poszerzają wiedzę naukową o badanym systemie empirycznym i stanowią podstawę do praktycznych zastosowań.

### 3. Ocena formy rozprawy

Forma rozprawy jest poprawna. Materiał został dobrze zorganizowany, przejrzysto opracowany, obszernie zilustrowany, starannie zredagowany i zapisany poprawnym językiem. Drobne niedociągnięcia formalne, które pojawiły się w rozprawie zostały omówione w następnym punkcie.

### 4. Szczegółowe uwagi krytyczne i komentarze

Uważna lektura rozprawy pozwala odnaleźć w niej drobne usterki redakcyjne i szczegóły składające do dyskusji. Przykładowo:

- Str. 3<sup>3</sup> – „PSO płaski stan obciążenia” – choć można definiować i używać wiele akronimów, ten akurat (PSO) kojarzy się w mechanice z płaskim stanem odkształcenia, a PSN – z płaskim stanem naprężenia.
- Str. 3<sup>4,5</sup> – zapis symboli tensorów naprężenia i odkształcenia (ew. ich składowych lub współrzędnych), podobnie jak wektora siły (ew. jej składowych lub współrzędnych) wymaga użycia odpowiedniej notacji (pogrubienie lub faliście podkreślenie, odpowiednio podwójne lub pojedyncze, lub – notacji wskaźnikowej).
- Str. 3<sup>5</sup> – w nazwie „odkształcenie względne”, zgodnie z definicją tej wielkości, drugi człon można pominąć jako nadmiarowy.
- Str. 10<sup>12,13</sup> – „stanowi około 20-35% suchej masy” – potoczne pojęcie „suchej masy”, w którym masa jest rozumiana jako materia, substancja lub złoże zostało usunięte z większości języków obcych, w języku polskim staramy się od dawna, by też zniknęło i by masie przywrócić jej podstawowe znaczenie, w którym nie może być ona ani mokra, ani sucha.
- Str. 13<sup>10</sup> – „Cześć” – powinno być Część.
- Str. 17<sub>18</sub> – „współczynnik Poisson’a” – 2 błędy: literówka i niepoprawnie użyty apostrof.
- Str. 20<sub>15</sub> – „Wu oraz Pitts (1999)” – w zestawieniu literatury jest 1998.
- Str. 21<sup>17,18</sup> – „przy pomocy miniaturowych maszyn” – w języku polskim obowiązuje zasada: przy pomocy kogoś, za pomocą czegoś.
- Str. 23<sub>13</sub> – „przy pomocy MES” – jak wyżej.

- Str. 23<sub>7</sub> – „ilości przestrzeni” – dla policzalnych musi być: liczbie przestrzeni. Podobnie str. 25<sub>17</sub> – „ilości kroków” – liczby kroków, str. 43<sub>8,7</sub> – „ilość koniecznych do zapamiętania elementów” – liczbę.
- Str. 24<sub>2</sub> – „uzyskuje się tzw. globalną macierzą sztywności” – ... globalną macierz ...
- Str. 27<sup>10</sup> – „modelowania wielkoskalowego” – powinno być: modelowania wieloskalowego.
- Str. 27<sub>4-2</sub> – „wynikają z niedostosowania komercyjnego oprogramowania oraz odwzorowaniem ogromnej złożoności budowy materiałów biologicznych” – pomyłka w wyrazie odwzorowanie. Powyższe zdanie Doktoranta, niewątpliwie słuszne, wskazuje na przewagę samodzielnego, autorskiego opracowywania algorytmów MES oraz kodu, odpowiednio do wyzwań stawianych przez naukę. Jako przykład mogę podać moje oryginalne, systematycznie rozwijane oprogramowanie w celu bezpośredniej i/lub odwrotnej analizy MES złożonych procesów transportu ciepła i substancji w biomateriałach, dokładniejsze i elastyczniejsze, a także efektywniejsze od kodów komercyjnych.
- Str. 33<sub>10</sub> – „Rys. 4. Przykładowa charakterystyka naprężenia w funkcji odkształcenia względnego” – sformułowanie „w funkcji” jest błędne, powinno być: „... naprężenia jako funkcji odkształcenia ...” (w języku angielskim: „as a function”). Y nie jest „w funkcji” X, zgodnie z definicją w matematyce mówimy, że Y „jest funkcją” X. Błąd ten pojawia się jeszcze na stronach: 10, 20, 43, 54, 55, 56, 57, 58, 62 (dwukrotnie), 63, 71 i 77.
- Str. 36 – Opis procesu segmentacji, podobnie jak niektórych innych metod czy algorytmów na innych stronach rozprawy został przedstawiony przez Doktoranta na tak ogólnym poziomie, że powinien zostać umieszczony w odpowiednim podrozdziale przeglądu literatury. Jeśli już czytelnik ma się z nim zapoznawać w tym miejscu, w rozdziale opisującym wyniki, taki opis powinien już tylko dotyczyć szczegółowo wykonanych daną metodą operacji i takie podejście byłoby najsluszniejsze.
- Str. 38<sub>12</sub> – Zwrot „teselacji Voronoi’a” powinien, zgodnie z zasadą pisowni obcych nazwisk w dopełniaczu, być zapisany „teselacji Voronoia” lub nawet, skoro nazwisko w oryginale brzmi: Георгий Феодосьевич Вороной, „teselacji Woronoja”.
- Str. 42<sub>12,11</sub> – „Do rozwiązywania układów równań różniczkowych cząstkowych użyty został moduł obliczeniowy - Sparse Direct Solver” – taki zwrot, często spotykany w podobnych opracowaniach, jest żargonowym uproszczeniem. Czy moduł ten rozwiązuje układy równań różniczkowych cząstkowych czy też ich postać aproksymowaną metodą elementów skończonych – układy równań algebraicznych liniowych? A jeśli już: „rozwiązywania

układów równań różniczkowych cząstkowych”, to z oczywistych powodów proszę zawsze dodawać: z odpowiednimi warunkami brzegowymi.

- Str. 43<sup>12</sup> – W zwrocie „macierzy z” symbol macierzy, mimo że pogrubiony, nie wyróżnia się jako pogrubiony ze względu na dobór innej czcionki niż użytej we wzorze (4) - Cambria Math.
- Str. 43, 44 – Wyrażenia wektor naprężenia, wektor odkształcenia są ze względu na formalizm macierzowego zapisu poprawne – są to bowiem jednokolumnowe macierze. W rozprawie doktorskiej warto jednak udokumentować, że jej Autor wie, bez względu na rodzaj użytej notacji – macierzowej, wskaźnikowej czy rozwiniętej, że mamy do czynienia z tensorami stanów naprężenia i odkształcenia, a nie wektorami. A także, na marginesie powyższej uwagi, że w zapisie jest różnica między składową tensora lub wektora a ich współrzędną.
- Str. 47<sub>7</sub> – „krok integracyjny zostaje przerywany” – pomyłka słowna.
- Str. 48<sup>5</sup> – „5.2.2. Dobór element dyskretnego” – błąd literowy.
- Str. 48<sup>7</sup> – „trój-węzłowy”, „sześć-węzłowy” – wymagana pisownia łączna.

Wszystkie te uwagi mają marginalny charakter wobec niewątpliwych istotnych osiągnięć Doktoranta i nie obniżają mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy. Doktorant zastosował w niej prawidłowe, nowoczesne metody badawcze i wykazał się oryginalnością oraz bardzo dobrą znajomością zagadnień związanych z modelowaniem stanu mechanicznego tkanek roślinnych z użyciem zaawansowanych technik numerycznego modelowania metodą elementów skończonych. Wykazał też znaczną dociekliwość i umiejętność logicznego wnioskowania.



## 5. Ocena końcowa

Jako wniosek końcowy uważam, że rozprawa doktorska mgra Piotra Pieczywka zatytułowana „Modelowanie właściwości mechanicznych tkanek roślinnych metodą elementów skończonych” zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego mieszczącego się w zakresie badania stanu mechanicznego tkanki roślinnej oraz potwierdza, że Doktorant dysponuje znaczną wiedzą i umiejętnościami niezbędnymi do prowadzenia badań naukowych we wspomnianym zakresie. Oceniana przeze mnie praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2003 r. i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Ze względu na znaczny wkład tej rozprawy do rozwoju oryginalnych metod opartych na pozyskiwaniu danych o geometrii złożonych obiektów roślinnych z wykorzystaniem przetwarzania i analizy obrazów oraz na modelowaniu takich obiektów z uwzględnieniem ich geometrii i właściwości materiałowych z wykorzystaniem nowoczesnych metod numerycznych wnioskuję o wyróżnienie rozprawy nagrodą.

