

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Słupskiej pt.,, **Modelowanie mechanicznych uszkodzeń jabłek metodą elementów skończonych w oparciu o mikromechaniczne właściwości tkanek** ”

Recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo, Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu Pana Prof. dr hab. Cezarego Kabała na podstawie pisma (PD000000 4100.4.2. 2023) z dnia 28.06.2023 roku.

Praca doktorska była wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Romana Stopy, prof. uczelni i dra hab. Jarosława Proćków, prof. uczelni.

### Ocena problematyki badawczej i celu pracy

Badania właściwości mechanicznych owoców są ważnym obszarem badań naukowych w zakresie inżynierii produkcji rolno-spożywczej. Wykorzystujące często nowoczesne metody badań zarówno niszczących, jak i nieniszczących w ocenie jakości i trwałości owoców w procesach zbioru, transportu i przechowywania. Wiele czynników wpływa na wytrzymałość mechaniczną jabłek, w tym ich budowa komórkowa, właściwości biochemiczne oraz turgor. Zawartość wody, pektyn, związków celulozowych i kwasów ma kluczowe znaczenie dla wytrzymałości mechanicznej jabłek, podobnie jak reakcje enzymatyczne zachodzące w trakcie ich dojrzewania. W literaturze naukowej można znaleźć wiele metod badań niszczących właściwości wytrzymałościowych owoców, które są stale doskonalone a najważniejsze z nich obejmują: testy zginania, rozciągania, ściskania, udarności, przecinania oraz przebicia. Oprócz samej metody testu, ważne jest również ustalenie parametrów pomiarowych, takich jak siła, deformacja, odkształcenie, moduł sprężystości, stała Poissona, energia absorbowana, odpowiedź akustyczna, naciski powierzchniowe, czy naprężenia niszczące. Wiele badań skupia się na analizie wpływu tych parametrów na właściwości mechaniczne tkanek owoców, co pozwala na bardziej precyzyjne określenie ich jakości i odporności na uszkodzenia.

Metody badań nieniszczących polegają na badaniu próbek bez naruszenia ich struktury. W przypadku badań mechanicznych wykonywanych pod obciążeniem – próbka jest poddawana lekkim naciskom lub drganiom, a następnie mierzy się jej reakcję na zadane bodźce.

Wśród metod nieniszczących w badaniach owoców można wyróżnić m.in.: badanie odkształceń przy pomocy wideoekstensometru, metody analizy obrazu, tomografię komputerową, MRI (obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego), metodę modelowania numerycznego, badania akustyczne oraz ultradźwiękowe. W dziedzinach nauk rolniczych i biologicznych modelowanie numeryczne okazało się cennym narzędziem w znajdowaniu

rozwiązań problemów praktycznych i naukowych. Modele numeryczne są coraz bardziej popularnym narzędziem wykorzystywanym w dziedzinie badań nad owocami. W przypadku owoców, MES może być używana do analizy ich właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość, sztywność, odporność na uszkodzenia i odpowiedź akustyczną. Modelowanie MES może pomóc w identyfikacji najważniejszych czynników wpływających na właściwości mechaniczne owoców, takich jak ich kształt, wielkość, gęstość czy sztywność. Analiza z zastosowaniem MES jest również przydatna w projektowaniu urządzeń i maszyn do przetwarzania owoców. Podjęta tematyka badań ściśle związana jest z wszystkimi ww. aspektami. Dlatego też podjęte przez mgr inż. Monikę Słupską badania dotyczące wykonania adekwatnych modeli dyskretnych statycznych, dla trzech analizowanych dojrzałości owoców jabłek, z uwzględnieniem procesów zachodzących w połączeniach między komórkami tkanki parenchymy owoców są bardzo aktualne i uzasadnione z punktu naukowego i utylitarnego.

### **Ogólna charakterystyka pracy doktorskiej**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska, licząca wraz ze spisem tabel i rysunków 103 stron składa się z 16 rozdziałów:

**1. Wstęp; 2. Przegląd literatury; 3. Problem badawczy i hipotezy badawcze; 4. Cel pracy; 5. Materiały i metody badań doświadczalnych; 6. Wyniki badań; 7. Modele dyskretnie jabłek; 8. Walidacja modeli dyskretnych; 9. Wyznaczenie naprężeń niszczących tkankę parenchymy; 10. Dyskusja; 11. Podsumowanie wyników badań; 12. Wnioski; 13. Bibliografia; 14. Spis stron www; 15. Spis rysunków; 16. Spis tabel.**

W pracy zamieszczony jest bogaty materiał dokumentacyjny, który obejmuje 54 rysunków i 23 tabele. Wyodrębnienie rozdziałów i podrozdziałów tematycznych, zwiększa przejrzystość prezentowanej tematyki i ułatwia jej studiowanie. Najbardziej obszernymi są rozdziały zawierające wyniki badań, budowania i walidacji modeli dyskretnych i ich omówienie (34 stron) oraz rozdział przegląd literatury (18 stron). Wykaz bibliograficzny rozprawy w spisie obejmuje 144 pozycje i 4 strony internetowe z tego 136 pozycji obcojęzycznych, co stanowi 94% wszystkich publikacji. Ponad 52% cytowanych przez Autorkę pozycji została wydana w ostatnich 10 latach.

Zestawienia tabelaryczne i rysunki ilustrujące wyniki korespondują z treścią rozprawy stanowiąc merytoryczną i wnikliwą dokumentację uzyskanych wyników badań.

### **Merytoryczna ocena pracy**

Podjęty temat badawczy związany z zagadnieniami modelowania mechanicznych właściwości owoców na poziomie tkankowym metodą elementów skończonych Doktorantka nakreśliła już w streszczeniu i we wstępie pracy doktorskiej akcentując w bardzo syntetyczny i logiczny sposób ich możliwość zastosowania do walidacji modeli komórkowych. W drugim rozdziale pracy (**Przegląd literatury**) w sposób bardzo wnikliwy przedstawia wpływ budowy komórkowej i parametrów biochemicznych jabłek na właściwości wytrzymałościowe owoców, podkreślając, że zawartość wody, pektyn, związków celulozowych i kwasów ma

kluczowe znaczenie dla wytrzymałości mechanicznej jabłek, podobnie jak reakcje enzymatyczne zachodzące w trakcie ich dojrzewania. W szczególności analizuje metody pomiaru właściwości mechanicznych tkanek owoców w tym najistotniejszą z punktu widzenia konsumenckiego tkankę parenchymy, która jednocześnie stanowi największą część owocu. Metody mechaniczne stanowią powszechny sposób wyznaczania naprężeń niszczących tkanki owoców. Doktorantka wiele uwagi skupiła na scharakteryzowaniu metody numerycznej. Metoda MES pozwala na dokładne określenie zachowania materiału pod wpływem różnego rodzaju obciążeń. Przykładami zastosowania MES są badania twardości owoców, predykcja obić owoców, analiza wpływu geometrii owoców na ich zachowanie dynamiczne i badania deformacji owoców podczas testów udarności. Również na identyfikację czynników wpływających na właściwości mechaniczne owoców, takich jak ich kształt, wielkość, gęstość czy sztywność.

W nawiązaniu do przytoczonego przeglądu literatury w rozdziale trzecim (**Problem badawczy i hipotezy badawcze**) Doktorantka zdefiniowała problem badawczy, że jest potrzeba wyznaczenia metodami doświadczalnymi zestawu właściwości tkanki parenchymy, stanowiących dane pozwalające na budowę adekwatnych modeli dyskretnych jabłek, w odniesieniu do poszczególnych ich dojrzałości.

Na podstawie tak określonego problemu badawczego sformułowała hipotezy badawcze:

- H1** - Model dyskretny jabłka zbudowany w oparciu o właściwości sprężystoplastyczne jest bardziej adekwatny niż model zbudowany w oparciu o właściwości sprężyste,
- H2** - Porównanie obrazów mikrotomograficznych uszkodzonych jabłek oraz warstw naprężeń Hubera-Misesa wygenerowanych w modelu dyskretnym pozwala na wyznaczenie wartości naprężeń niszczących tkankę parenchymy.

Nawiązując do zredagowanych hipotez badawczych formułuje właściwie korespondujący cel główny pracy cyt., budowa i walidacja adekwatnych modeli dyskretnych jabłek, pozwalających na wyznaczenie naprężeń powodujących uszkodzenia owoców, na poszczególnych etapach ich dojrzałości” oraz cele szczegółowe:

- wyznaczenie właściwości fizykochemicznych owoców,
- wyznaczenie właściwości wytrzymałościowych tkanki parenchymy i epidermy,
- zdefiniowanie właściwości sprężystych i sprężystoplastycznych tkanki parenchymy, stanowiących dane wejściowe do budowy modeli dyskretnych,
- wyznaczenie zależności obciążenia od przemieszczenia i powierzchni styku od obciążenia, niezbędnych do walidacji modeli dyskretnych,
- wyznaczenie stref uszkodzeń jabłek dla różnych wartości obciążeń przy pomocy obrazów mikrotomograficznych,
- wyznaczenie wartości naprężeń niszczących tkankę parenchymy na podstawie modeli dyskretnych i obrazów mikrotomograficznych.

### **Materiały i metody badań doświadczalnych**

Materiałem badawczym były jabłka odmiany Chopin, zebrane w Sadzie Doświadczalnym Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, w Wilanowie w trzech terminach zbioru, dojrzałość zbiorcza, konsumpcyjna i fizjologiczna. W celu wyznaczenia analizowanych dojrzałości zbioru wykonano pomiary jędrności, zawartości ekstraktu i indeksu skrobiowego, które posłużyły do wyznaczenia indeksu Streifa. Doktorantka bardzo

umiejętnie przedstawiła ogólny plan doświadczeń i kolejność etapów realizacji celu pracy w tym:

- wyznaczenie podstawowych właściwości fizykochemicznych owoców,
- wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych parenchymy i epidermy na poszczególnych etapach dojrzałości owoców,
- wyznaczenie zakresu uszkodzeń owoców na podstawie zdjęć mikrotomograficznych,
- budowę i walidację modeli MES,
- wyznaczenia naprężeń niszczących na podstawie wyznaczonych głębokości uszkodzeń.

W tym miejscu pragnę podkreślić, że szeroki zakres badań i ilość pomiarów różnych parametrów w okresie prowadzonych badań wymagały od Doktorantki dużej znajomości metod badawczych oraz wykorzystania specjalistycznych urządzeń pomiarowych (przedstawione zostały w podrozdziałach 5.2, 5.3, 5.4). Badania fizykochemiczne i mechaniczne owoców jabłek zostały wykonane w laboratoriach laboratorium Zakładu Podstaw Techniki mieszczącego się w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Przyjęta metodyka pomiarów i obliczeń wybranych parametrów mechanicznych przedstawiona została poprawnie, co dało podstawę do prawidłowego wnioskowania uzyskanych wyników badań.

W odniesieniu do tej części pracy mam kilka pytań oraz uwag. Brak informacji czym się kierowała Doktorantka przy wyborze odmiany jabłek Chopin ?. Chciałabym się dowiedzieć w jaki sposób pobrano próbki jabłek z drzew do badań w kolejnych terminach dojrzałości, czy wielkość jabłek była wyrównana i o cechach charakterystycznych dla tej odmiany ?. Warto przypomnieć, że dokładność pomiarów, które określają w danej chwili stan fizjologiczny owoców zależy również od właściwego pobierania próbek do analizy. Na jakiej podstawie ustalono liczebność próby w celu określenia wytrzymałości parenchymy i epidermy oraz testów ściskania całych jabłek (5 szt. jabłek) ?. Szkoda, że nie wykonano pomiarów intensywności oddychania jabłek po zbiorze dla analizowanych dojrzałości (próba etylenowa).

Realizując pierwszy z celów szczegółowych (**Wyniki badań**) w pierwszym podrozdziale Doktorantka przedstawiła wyniki badań właściwości fizykochemicznych owoców dla poszczególnych etapów ich rozwoju fizjologicznego w tym indeks Streifa, gęstość i wymiary całych owoców, zawartość wody, kwasowość oraz zawartość pektyn. Porównując dane literaturowe w tym miejscu mam pytanie dotyczące przedstawionych wartości w tabeli 3 kwasowości ogólnej w przeliczeniu na kwas jabłkowy oraz zawartości pektyn.

W kolejnych dwóch podrozdziałach odniosła się do drugiego celu szczegółowego w których przedstawione zostały wyniki badań wybranych właściwości wytrzymałościowych tkanek parenchymy i epidermy ( odkształcenia, naprężenia, współczynnika Poissona oraz umownego modułu sprężystości) dla analizowanych terminów dojrzałości owoców.

Na rysunkach 28 i 29 przedstawione zostały wartości sił niszczących w funkcji przemieszczenia w statycznej próbie ściskania całych owoców dla analizowanych dojrzałości owoców. W kolejnym podrozdziale Doktorantka przedstawiła uśrednione wyniki pomiaru powierzchni styku jabłek w teście ściskania całych owoców w zależności od zastosowanej siły nacisku. Interesująco przedstawione są obrazy mikrotomograficzne z wyznaczeniem uszkodzeń owoców dla analizowanych ich dojrzałości i ustalonych wartości siły niszczącej.

Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić zmiany analizowanych parametrów wytrzymałościowych owoców jabłek w zależności od ich dojrzałości oraz ich zastosowanie do budowy modeli dyskretnych. W części tego rozdziału zastosowane metody statystyczne są bardzo skromne i nie pozwalają na przedstawienie zależności pomiędzy zmiennymi będącymi przedmiotem analiz. W tabelach 1-9 brak oceny statystycznej dotyczącej zmienności otrzymanych wyników.

Na szczególną uwagę zasługują badania zaprezentowane w podrozdziałach 7-9 (str. 54-76) w których Doktorantka w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów empirycznych oraz metodę elementów skończonych buduje modele dyskretne opisujące wybrane właściwości mechaniczne jabłek. Przedstawia kolejne kroki modelowania dotyczące kontaktu w procesie ściskania całych owoców, warunków brzegowych. W dalszej części pracy na rysunkach wykresy siły w funkcji przemieszczenia dla wybranych modeli sprężystoplastycznych i sprężystych analizowanych dojrzałości owoców jabłek oraz ich dopasowanie z wynikami testów. Stwierdzając, że średnie dopasowanie modeli sprężystoplastycznych do wyników badań wyniosło 95% w porównaniu do średniego dopasowania modeli sprężystych 82%.

Rozdział 10. **Dyskusja** przedstawiono rezultaty własnych badań w nawiązaniu głównie do najnowszej zagranicznej literatury, ściśle związanych z tematem pracy. Autorka we właściwy sposób analizuje właściwości fizykochemiczne owoców jabłek odmiany Chopin dla analizowanych dojrzałości porównując ze znanymi odmianami jesiennymi Elstar, Jonagold i Gloster. Mam jednak drobną uwagę, odmiany Jonagold i Gloster ze względu na termin zbioru zaliczane są do odmian zimowych. Na podstawie badań wytrzymałościowych całych owoców odmiany Chopin Doktorantka stwierdziła, że pomimo spadku zawartości pektyn dla dojrzałości konsumpcyjnej owoce okazały bardziej odporne na uszkodzenia mechaniczne w porównaniu do owoców w dojrzałości zbiorczej. Czy to zaobserwowane zjawisko według Autorki nie należy wykorzystać do opóźnionego terminu zbioru owoców odmiany Chopin w dojrzałości konsumpcyjnej. Przeprowadzenie walidacji zaprezentowanych modeli owoców w oparciu o dwa zmienne parametry oraz ich dojrzałość zbiorczą świadczy o dobrym opanowaniu zaawansowanego warsztatu analitycznego do modelowania rozkładu nacisków powierzchniowych metodą elementów skończonych w oparciu o ich mechaniczne właściwości.

W rozdziałach 11 i 12 **Wyniki badań i Wnioski** zgodnie z założoną koncepcją, przyjętymi hipotezami oraz zadaniami badawczymi pracy przedstawione zostały skompensowane rezultaty badań, które są odzwierciedleniem uzyskanych najważniejszych wyników badań zawartych w przedłożonej do oceny pracy doktorskiej. Doktorantka w sposób wyważony w 6 punktach przedstawiła wyniki badań oraz sformułowała 6 wniosków, które poprawnie uogólniają osiągnięcia przedstawione w rozprawie doktorskiej dając odpowiedź na postawione w pracy hipotezy i cele badawcze. Mają one charakter zarówno poznawczy jak i praktyczny. Wniosek nr 1 i 2 wymaga preredagowania.

Rozdział 13. **Bibliografia** - wykaz bibliograficzny rozprawy obejmuje 144 pozycje naukowych, szkoda, że nie w ujęciu alfabetycznym. Wykonany został zgodnie z wymogami edytorskimi jednak brak w spisie literatury informacji dla pozycji literatury 60, 78, 141, 144 jakie czasopismo i rok wydania, natomiast dla pozycji literatury 61- autorów, jakie czasopismo i rok wydania.

## Ocena formalna pracy

Praca przygotowana jest starannie mimo to Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów pod względem językowym, zawiera błędy gramatyczne, stylistyczne, interpunkcyjne jednak nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy. Przykłady błędów wymieniono poniżej. Mogą one pomóc Doktorantce ustrzec się ich podczas przygotowywania publikacji z pracy doktorskiej.

- od str. 28 w pracy – sformułowania odnoszące się do dojrzałości owoców jabłek - („na poszczególnych etapach, stadiach, poziomie ich dojrzałości”), powinny być przeredagowane – „dla analizowanych dojrzałości”, „w fazie dojrzałości”,
- str.32 , wers 11 – ...wykres naprężeń w funkcji odkształcenia uzyskany poprzez kalkulację wyników testu przy użyciu wzoru 2 i 3. –...uzyskany na podstawie wyników testu i zastosowanych wzorów 2 i 3,
- str. 32, wers 15 – brak jednostki – A powierzchnia przekroju poprzecznego próbki....,
- str. 33, wers 1 – jest „dla każdego etapu dojrzałości wykonano”..- powinno być... „dla analizowanych terminów dojrzałości wykonano”.....,
- str. 33, 35 wers 2 – dla materiałów biologicznych nie wyznaczamy Modułu Younga - wyznaczamy umowny moduł sprężystości E,
- w podrozdziale 5.4, str.37, wers 7 – szkoda, że nie podano średniej wartości obciążenia niszczącego owoców dla dojrzałości zbiorczej,
- str. 37, wers 16 – ...„ wyciąganie średniej z 2 klatek”, ... „wartość średnią określono z 2 klatek,
- str. 43, wers 1 –...„właściwości chemicznych owoców zbieranych w poszczególnych terminach, ...„właściwości chemicznych owoców w analizowanych ich dojrzałościach,
- str. 44, wers 12 –...„ dla pozostałych stadiów rozwoju owoców”,... dla pozostałych analizowanych dojrzałości owoców”,
- str. 45, wers 4 –...„dla etapu dojrzałości zbiorczej naprężenia niszczące wyniosły 0,43 MPa”, ...„w fazie dojrzałości zbiorczej średnia wartość naprężenia niszczącego wyniosła 0,43 MPa”,
- str. 50, wers 6 – ...jest „moduły”, powinno być „modułu”,
- str. 53, wers 1 –...„z brakiem istotnego wpływu etapu dojrzałości”, ...” w tabelach z wynikami brak analizy statystycznej”..,
- str. 56, tabela 12 – niepoprawne formatowanie tabeli,
- str. 66, rys. 45 – niepoprawna wartość na ostatnim z podpisów warstwic, jest  $F = 50 \text{ N}$ , powinno być  $F = 650 \text{ N}$ ,
- str. 66, rys. 46 – w podpisie rysunku brakuje ...„ i sprężystoplastycznych”,
- str. 67, wers 5 – jest „w wynikami testów”, powinno być „z wynikami testów”,
- str. 77, wers 27 – jest ...”wraz z rozwojem owoców..”, powinno być „...z dojrzewaniem owoców...”.

W mojej ocenie praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia badań przez mgr inż. Monikę Słupską. Jednocześnie chciałabym podkreślić, że uwagi przedstawione w recenzji mają w większości charakter redakcyjny lub dyskusyjny i nie mają one wpływu na pozytywną ocenę merytoryczną pracy.

## Wniosek końcowy

Praca doktorska mgr inż. Moniki Słupskiej rozwiązuje problem naukowy przedstawiony za pomocą celów szczegółowych i hipotez badawczych oraz przedstawia oryginalne rozwiązanie w zakresie analiz wyników własnych badań naukowych w sferze produkcji ogrodniczej z wykorzystaniem modelowania właściwości mechanicznych jabłek metodą elementów skończonych..

W oparciu o dobrze przeanalizowaną literaturę, odpowiedni dobór metod badawczych jak i organizację badań, ich przeprowadzenie a także interpretację wyników stanowi oryginalne rozwiązanie jasno sprecyzowanego problemu naukowego. Charakteryzuje się aktualnością tematu, oparta jest na najnowszej wiedzy a jej wyniki mogą mieć duże znaczenie w tematyce możliwości zastosowania modelowania do oceny wybranych właściwości mechanicznych owoców i warzyw przy użyciu metody elementów skończonych. Podjęte badania uważam za bardzo wartościowe i uzupełniają wiedzę naukową w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo.

Reasumując stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Moniki Słupskiej pt. „**Modelowanie mechanicznych uszkodzeń jabłek metodą elementów skończonych w oparciu o mikromechaniczne właściwości tkanek**” spełnia wymagania wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2022 poz.574) i przedkładam wniosek do Rady Dyscypliny Rolnictwo i Ogrodnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu o dopuszczenie mgr inż. Monikę Słupską do dalszego toku przewodu doktorskiego.



