



**UNIwersytet  
PRZYRODNICZY  
WE WROCLAWIU**

**mgr inż. Monika Słupska**

**Modelowanie mechanicznych uszkodzeń jabłek  
metodą elementów skończonych  
w oparciu o mikromechaniczne właściwości tkanek**

Modeling of mechanical damage to apples using the finite element method  
based on the micromechanical properties of tissues

Praca doktorska

wykonana

w Instytucie Inżynierii Rolniczej

Wydział Przyrodniczo-Technologiczny

pod kierunkiem

promotora dr. hab. inż. Romana Stopy, profesora uczelni

i

drugiego promotora dr. hab. Jarosława Proćków, profesora uczelni

Wrocław, 2023

**Niniejszą pracę dedykuję swojej Mamie**

Chciałabym aby ta dysertacja była  
zwieńczeniem Jej ciężkiej pracy, trudu i poświęceń,  
z którymi musiała się zmagać przez całe życie.

Składam serdeczne podziękowania swojemu  
Promotorowi **dr. hab. inż. Romanowi Stopie,**  
**profesorowi Uczelni** za parasol ochronny, szalone  
pomysły oraz wyciągnięcie pomocnej dłoni na tej  
ostatniej prostej 😊.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono nową procedurę wykonania modeli dyskretnych 3D jabłek na poziomie tkankowym, z uwzględnieniem poszczególnych etapów dojrzewania owoców, przy pomocy metody elementów skończonych (MES). Przedmiotem badań była nowa, polska odmiana jabłek Chopin. W pierwszym etapie badań wykonano szczegółowe pomiary właściwości wytrzymałościowych tkanki parenchymy i epidermy owoców oraz przeprowadzono ich badania fizykochemiczne.

Analiza wyników pozwoliła na stwierdzenie, że – w zależności od pożądaných rezultatów – tkankę parenchymy można rozpatrywać jako materiał o właściwościach sprężystych lub sprężystoplastycznych. Na tej podstawie opracowano zestaw parametrów stanowiący dane wejściowe do modeli numerycznych na poziomie tkankowym, dla etapów dojrzałości zbiorczej, konsumpcyjnej oraz fizjologicznej. Walidacja modeli została przeprowadzona przy pomocy zależności przemieszczenia w funkcji obciążenia oraz zmiany powierzchni nacisku w funkcji siły obciążającej. Modele sprężyste walidowane w oparciu o dane empiryczne uzyskały zgodność na poziomie nie mniejszym niż 82% dla średnich wartości odchyień. Modele sprężystoplastyczne wykazywały lepsze dopasowanie, nie mniejsze niż 91% średnich wartości odchyień.

W końcowej części pracy przedstawiono metodę wyznaczania naprężeń niszczących tkankę parenchymy z zastosowaniem zdjęć mikrotomograficznych uszkodzonych owoców i obrazów naprężeń Hubera-Misesa pozyskanych z modeli dyskretnych. Badania przeprowadzono dla owoców w próbie ściskania przy obciążeniu wynoszącym 20%, 50% i 80% siły niszczącej.

## Summary

The paper presents a new procedure for creating 3D discrete models of apple tissue at various stages of fruit ripening using the finite element method (MES). The study focused on a new Polish apple variety, Chopin. In the first stage of research, detailed measurements of the mechanical properties of the parenchyma and epidermis tissue were conducted, along with physicochemical tests of the fruit.

The analysis of the results allowed for the determination that, depending on the desired outcomes, the parenchymal tissue can be considered as a material with either elastic or elastoplastic properties. Based on this, a set of parameters were developed as input data for numerical models at the tissue level for the stages of collective maturity, consumption, and physiological maturity. Model validation was performed using displacement-load relationships and changes in contact area as a function of loading force. Elastic models validated using empirical data achieved a no less than 82% degree of compliance for mean values of standard deviations. Elastoplastic models exhibited better fit, with no less than 91% degree of compliance for mean values of standard deviations.

In the final part of the study, a method of determining the stresses destroying the parenchyma tissue with the use of microtomographic images of damaged fruits and Huber-Mises stress images obtained from discrete models was presented. The research was conducted for fruits under compression testing with loads of 20%, 50%, and 80% of the destructive force.

## Spis treści

<b>Streszczenie</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Wstęp</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Przegląd literatury</b> .....	<b>9</b>
2.1. Wpływ budowy komórkowej i parametrów biochemicznych jabłek na właściwości wytrzymałościowe owoców .....	9
2.2. Badania właściwości wytrzymałościowych tkanek owoców .....	13
2.2.1. <i>Metody badań niszczących</i> .....	14
2.2.2. <i>Metody badań nieniszczących</i> .....	18
2.2.1. <i>Metody wyznaczania naprężeń niszczących</i> .....	23
2.3. Modelowanie owoców przy pomocy programów numerycznych .....	24
<b>3. Problem badawczy i hipotezy badawcze</b> .....	<b>28</b>
3.1. Problem badawczy .....	28
3.2. Hipotezy badawcze .....	28
<b>4. Cel pracy</b> .....	<b>29</b>
<b>5. Materiały i metody badań doświadczalnych</b> .....	<b>30</b>
5.1. Przedmiot badań .....	30
5.2. Wyznaczenie podstawowych właściwości fizykochemicznych .....	30
5.3. Wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych na poszczególnych etapach dojrzałości owoców .....	31
5.3.1. <i>Właściwości wytrzymałościowe parenchymy</i> .....	32
5.3.2. <i>Właściwości wytrzymałościowe epidermy</i> .....	34
5.3.3. <i>Test ściskania całych jabłek</i> .....	35
5.4. Wyznaczenie zakresu uszkodzeń owoców na podstawie zdjęć mikrotomograficznych .....	37
5.5. Budowa modeli MES .....	38
5.6. Walidacja modeli MES .....	39
5.7. Metodyka wyznaczenia naprężeń niszczących .....	40
<b>6. Wyniki badań</b> .....	<b>42</b>
6.1. Indeks Streifa oraz właściwości fizykochemiczne owoców .....	42
6.2. Właściwości wytrzymałościowe tkanek .....	44
6.2.1. <i>Właściwości parenchymy</i> .....	44
6.2.2. <i>Właściwości tkanki epidermy</i> .....	46
6.3. Test ściskania całych owoców .....	46
6.3.1. <i>Wykres siły w funkcji przemieszczenia</i> .....	46
6.3.2. <i>Zależność powierzchni styku jako funkcja obciążenia</i> .....	49
6.3.3. <i>Zakres uszkodzeń owoców</i> .....	50

<b>7. Modele dyskretne jablek .....</b>	<b>54</b>
7.1. Założenia modeli dyskretnych jablek.....	54
7.1.1. Model geometryczny.....	54
7.1.2. Właściwości materiałowe tkanek.....	55
7.1.3. Modelowanie kroku analizy.....	57
7.1.4. Modelowanie kontaktu.....	57
7.1.5. Modelowanie warunków brzegowych.....	58
7.1.6. Dyskretyzacja modelu.....	59
<b>8. Walidacja modeli dyskretnych .....</b>	<b>60</b>
8.1. Walidacja w oparciu o wykresy siły w funkcji przemieszczenia.....	60
8.1.1. Walidacja modeli sprężystych.....	61
8.1.2. Walidacja modeli sprężystoplastycznych.....	64
8.2. Walidacja w oparciu o zmianę powierzchni styku w funkcji obciążenia.....	66
8.2.1. Walidacja modeli sprężystych.....	67
8.2.2. Walidacja modeli sprężystoplastycznych.....	69
<b>9. Wyznaczenie naprężeń niszczących tkankę parenchymy .....</b>	<b>72</b>
9.1. Wyznaczenie naprężeń niszczących dla modelu sprężystego .....	72
9.2. Wyznaczenie naprężeń niszczących dla modelu sprężystoplastycznego .....	74
9.3. Porównanie wyznaczonych naprężeń niszczących z wynikami empirycznymi.....	75
<b>10. Dyskusja .....</b>	<b>77</b>
10.1. Właściwości fizykochemiczne .....	77
10.2. Właściwości wytrzymałościowe parenchymy.....	78
10.3. Modele dyskretne .....	79
<b>11. Podsumowanie wyników badań .....</b>	<b>81</b>
<b>12. Wnioski .....</b>	<b>82</b>
<b>13. Bibliografia .....</b>	<b>83</b>
<b>14. Spis stron www .....</b>	<b>98</b>
<b>15. Spis rysunków.....</b>	<b>99</b>
<b>16. Spis tabel .....</b>	<b>102</b>

## 1. Wstęp

Tworzenie nowych odmian owoców opiera się na doskonaleniu cech biologicznych roślin dostosowanych do warunków środowiska, technologii przetwórstwa oraz wymagań użytkowników. Opracowanie nowych odmian odpornych na uszkodzenia podczas procesów zbioru, transportu i przechowywania przyczynia się do zmniejszenia strat i nadprodukcji żywności, prowadząc do obniżenia ponoszonych kosztów i strat środowiskowych [1].

Odmiana jabłek Chopin pochodzi od jednej z najbardziej rozpoznawalnych odmian na świecie – Granny Smith. Z uwagi na dużą wytrzymałość przechowalniczą, wynikającą z wysokiej kwasowości, odmiana ta ma szansę na osiągnięcie dużej popularności wśród sadowników. Dodatkową zaletą odmiany Chopin jest to, że owocuje bardzo bogato [www1]. Zwiększenie zainteresowania tą odmianą wymaga dalszych prac zmierzających do lepszego poznania jej właściwości, w tym właściwości mechanicznych, aby umożliwić porównanie jej z innymi odmianami.

Owoce są materiałem złożonym i składają się z różnych elementów strukturalnych o różnych właściwościach mechanicznych, jednak większą ich część stanowi jadalna tkanka parenchymatyczna [2]. Właściwości wytrzymałościowe parenchymy zależą od kondycji ścian komórkowych oraz ciśnienia turgorowego komórek. Z mechanicznego punktu widzenia, ściana komórkowa owocu to silna sieć o włóknistej strukturze, która nadaje każdej komórce jej stabilny kształt: sieć odporna na rozciąganie (celulozowa), sieć odporna na ścinanie (hemicelulozowa) i sieć odporna na ściskanie (pektynowa) [3]. Pektyna odpowiada również za siłę adhezji komórek. Jest to rodzaj polisacharydu, który w przypadku jabłek stanowi ponad połowę suchej masy ściany komórkowej, dlatego to on w głównej mierze odpowiada za właściwości wytrzymałościowe owoców. Ich rozkład jest spowodowany reakcjami enzymatycznymi naturalnie zachodzącymi w roślinach, ale może być również powodowany przez chorobotwórcze grzyby i bakterie [4].

W dziedzinach nauk rolniczych i biologicznych modelowanie numeryczne okazało się cennym narzędziem w znajdowaniu rozwiązań problemów praktycznych i naukowych. Dostępne modele reologiczne nie opisują rzeczywistej struktury materiału biologicznego, a jedynie pokazują reakcję określonego materiału na zadany impuls. Uproszczenie to wynika z faktu, że szereg zjawisk zachodzących w strukturze materiału, na różnych etapach obciążenia, wydaje się niemożliwych do modelowania. W celu stworzenia poprawnego modelu MES należy uwzględnić proces wypierania gazów, zerwania połączeń międzykomórkowych oraz migracji cieczy w obrębie całego układu. Stworzenie spójnej

i jednolitej teorii mechaniki materiałów biologicznych prowadziłyby do układu równań równowagi o złożonej strukturze z wieloma zmiennymi. Taki system musiałby zawierać również rozwiązania z zakresu biochemii, biomechaniki i biofizyki [5].

Z opublikowanych danych wynika, że badania dotyczące modelowania MES, wyznaczania właściwości wytrzymałościowych oraz podstawowych właściwości fizykochemicznych owoców rozpatrywane były oddzielnie lub w sposób pobieżny. W dostępnej literaturze nie znaleziono publikacji, która obejmowałaby wszystkie te zagadnienia kompleksowo. Ponadto dostępne modele MES w większości obejmowały badania dynamiczne i bardzo rzadko były walidowane o więcej niż jedną zmienną. W związku z powyższym podjęto próbę wykonania adekwatnych modeli dyskretnych statycznych, dla trzech etapów dojrzałości owoców. Osiągnięcie celu umożliwiło pozyskanie modeli oraz wyników, które następnie będzie można zastosować do walidacji modeli komórkowych, z uwzględnieniem procesów zachodzących w połączeniach między komórkami tkanki parenchymy owoców. Dodatkowo, proponowany model może również przyczynić się do rozpowszechnienia nowej polskiej odmiany jabłek Chopin, wyhodowanej przez dr. hab. Emilianę Piterę, prof. SGGW w Warszawie.

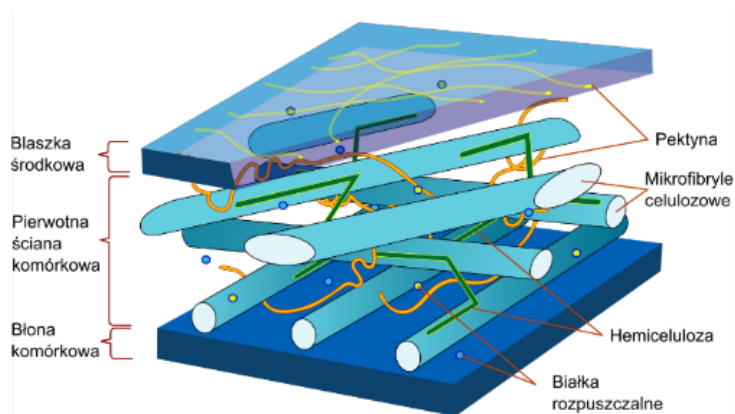


## 2. Przegląd literatury

### 2.1. Wpływ budowy komórkowej i parametrów biochemicznych jabłek na właściwości wytrzymałościowe owoców

Właściwości mechaniczne tkanek biologicznych zależą od różnych poziomów ich struktury: molekularnej, komórkowej i organów roślinnych. Molekuły formują komórki, a te, wraz z przestrzeniami międzykomórkowymi, są zorganizowane w tkanki, które ostatecznie tworzą organ końcowy [6].

Owoce składają się z różnych elementów strukturalnych o różnych właściwościach mechanicznych, jednak większą ich część stanowi jadalna tkanka parenchymatyczna. To właśnie jej jakość w głównej mierze determinuje przydatność owoców do spożycia. Komórki parenchymy jabłek są okrągłe lub wieloboczne; ich średnica zazwyczaj waha się pomiędzy 75-150  $\mu\text{m}$  [2], [7], [8]. W skład budowy ściany komórkowej wchodzi blaszka środkowa, ściana pierwotna i błona komórkowa (Rys. 1).



Rysunek 1. Budowa ściany komórkowej [www2]

Błaszka środkowa łączy ze sobą komórki i jest warstwą położoną między dwiema ścianami pierwotnymi sąsiednich komórek. Błaszka środkowa parenchymy jabłek jest zbudowana z pektyn. Pektyny składają się w głównej mierze z homogalakturonanów, rhamnogalakturonanów i arabinogalakturonanów [9]–[11]. Pełnią one ważne funkcje w jabłkach, takie jak wzrost, utrzymywanie struktury i kształtu komórek [12], odporność na stres biotyczny [13] oraz wpływają na właściwości sensoryczne owoców [14]. Warto zaznaczyć, że skład i ilość pektyn w blaszce środkowej parenchymy jabłek może różnić się w zależności od odmiany, dojrzałości owoców, a także metod ich przechowywania. Główną rolą blaszki środkowej jest utrzymanie adhezji między komórkami, co umożliwia utworzenie tkanki roślinnej oraz wpływa na procesy wzrostu i rozwoju roślin [15]–[17].

Pierwotna ściana komórkowa składa się głównie z mikrofibryli celulozowych, hemiceluloz, pektyn, rozpuszczalnych białek i wody. Pektyny i hemicelulozy są składnikami materiału wypełniającego „macierzy”, w której osadzone są celulozowe mikrofibryle stanowiące włóknisty szkielet [2], [18]. Celuloza, główny składnik pierwotnej ściany komórkowej, to polisacharyd zbudowany z łańcuchów glukozy. Hemicelulozy to z kolei rodzaj polisacharydów, które są mniejsze i bardziej rozgałęzione niż celuloza. Pełnią one ważną rolę w utrzymaniu struktury pierwotnej ściany komórkowej i jej elastyczności [2], [19]. Pierwotna ściana komórkowa jabłek jest elastyczna i umożliwia komórkom roślinnym wzrost i rozciąganie się podczas ich rozwoju. Jej funkcje to między innymi: utrzymywanie kształtu i sztywności komórek; chronienie komórek przed uszkodzeniami mechanicznymi i infekcjami; wpływanie na właściwości fizyczne i chemiczne owoców, takie jak konsystencja i smak. Warto zaznaczyć, że pierwotna ściana komórkowa jabłek może ulegać modyfikacjom podczas dojrzewania owoców, co wpływa na ich właściwości mechaniczne [20].

Błona komórkowa to cienka, półprzepuszczalna warstwa oddzielająca środowisko wewnątrzkomórkowe od środowiska zewnętrznego. Składa się ona przede wszystkim z fosfolipidów i białek. Błona komórkowa w połączeniu z siateczką śródplazmatyczną (ER) jabłek pełni wiele ważnych funkcji, m.in.: kontroluje przepływ wody, substancji odżywczych i innych związków między komórkami a środowiskiem zewnętrznym; umożliwia komunikację między komórkami; reguluje procesy metaboliczne i fizjologiczne zachodzące w komórce [2].

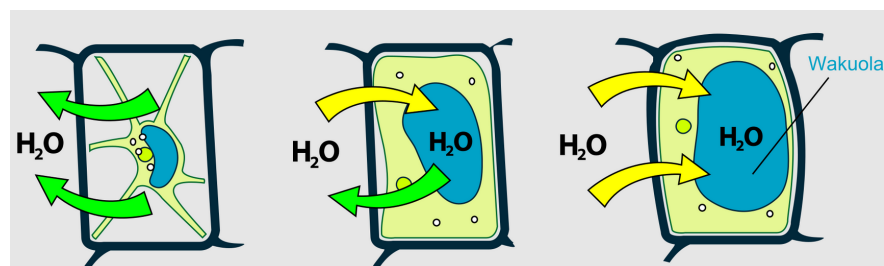
Z mechanicznego punktu widzenia ściana komórkowa rośliny to silna sieć o włóknistej strukturze, która nadaje każdej komórce jej stabilny kształt: odporna na rozciąganie sieć celulozowa, odporna na ścinanie sieć hemicelulozowa i odporna na ściskanie sieć pektynowa. Sieć celulozowa składa się z długich łańcuchów glukozy, które są ułożone równolegle i tworzą mikrofibryle. Te z kolei są splecione w większe struktury, które nadają ścianie komórkowej jej wytrzymałość na rozciąganie. Hemicelulozy są drugą ważną składową ściany komórkowej roślin. Składają się one z różnych cukrów i pełnią funkcję sklejącą, łącząc mikrofibryle celulozowe i pektyny. Hemicelulozy tworzą sieć odporną na ścinanie i wraz z siecią celulozową nadają ścianie komórkowej jej wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie. Pektyny to trzecia składowa ściany komórkowej roślin. Są to polisacharydy, które pełnią funkcję sklejącą, łącząc mikrofibryle celulozowe i hemicelulozy w sieć odporną na ściskanie [6], [14], [19], [21]–[28].

Badania wykazały, że jabłka o wyższej zawartości pektyn są bardziej odporne na uszkodzenia mechaniczne [29]. Pektyny wpływają na wytrzymałość jabłek poprzez zwiększenie ich elastyczności i odporności na naprężenia. Wysoka zawartość pektyn w jabłkach może również wpływać na ich zdolność do magazynowania wody i utrzymywania kształtu, co przyczynia się do zwiększenia ich trwałości [21], [30], [31]. Inne badania wykazały, że jabłka o wyższej zawartości celulozy są bardziej odporne na uszkodzenia mechaniczne. Celuloza wpływa na wytrzymałość jabłek poprzez zwiększenie ich sztywności i odporności na odkształcenia [32].

Kwasy, takie jak kwas jabłkowy i cytrynowy, również wpływają na właściwości wytrzymałościowe jabłek. Badania przeprowadzone przez Luo et al. (2021) wykazały, że jabłka o wyższej zawartości kwasu jabłkowego są bardziej odporne na zmiany warunków środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność. Kwas jabłkowy działa jako naturalny antyoksydant, chroniąc jabłka przed utlenianiem i utratą jakości [33].

Proces dojrzewania jabłek jest złożony i regulowany przez wiele enzymów, które wpływają na ich strukturę i właściwości. Jednym z kluczowych enzymów jest pektynaza, która katalizuje rozkład pektyn w ścianach komórkowych jabłek. W trakcie dojrzewania jabłek aktywność pektynazy wzrasta, co prowadzi do rozkładu pektyn i zmniejszenia wytrzymałości jabłek [34]. Innym ważnym enzymem podczas dojrzewania jabłek jest celulaza, która katalizuje rozkład celulozy w ścianach komórkowych jabłek. W trakcie dojrzewania jabłek aktywność celulazy również wzrasta, co prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości jabłek [35].

Turgor komórkowy to ciśnienie wewnątrzkomórkowe, czyli siła naciskająca na ściany komórkowe wynikająca z różnicy stężenia substancji. Woda, która wchodzi do komórki w procesie osmozy, wypełnia wakuolę i naciska na ścianę komórkową, co powoduje wytworzenie ciśnienia wewnątrzkomórkowego (Rys. 2).



Rysunek 2. Wpływ turgoru na ścianę komórkową [www3]

Turgor komórkowy wpływa na kształt i objętość komórki oraz ma kluczowe znaczenie dla wielu procesów fizjologicznych, takich jak rozwój roślin, pobieranie wody i składników pokarmowych, a także utrzymywanie struktury i wytrzymałości mechanicznej komórek. Badania wskazują, że niski poziom turgoru może prowadzić do zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej jabłek i zwiększonej podatności na uszkodzenia mechaniczne podczas przechowywania i transportu. Potwierdzono, że utrzymanie odpowiedniego poziomu turgoru jest kluczowe dla zachowania wysokiej jakości jabłek podczas przechowywania. Niski poziom turgoru może prowadzić do zwiększonej podatności na uszkodzenia mechaniczne i choroby, a także do zmniejszenia jakości sensorycznej jabłek. Wnioski te wskazują na istotność odpowiedniego poziomu turgoru w utrzymaniu właściwości wytrzymałościowych jabłek. Aby zapewnić jak najwyższą jakość jabłek, ważne jest utrzymywanie ich w odpowiednich warunkach przechowywania, takich jak odpowiednia temperatura i wilgotność, aby zminimalizować utratę wody przez owoce [23], [36]–[39].

Przeprowadzone badania wykazały, że ekspresja genów kodujących pektynazę i celulazę wzrasta wraz z dojrzewaniem jabłek, co prowadzi do zmniejszenia ich wytrzymałości [40]. Willats i in. (2001) dokonali przeglądu w zakresie analizy funkcjonalnej polisacharydów pektynowych we wzroście i rozwoju roślin w oparciu o aktualny stan wiedzy na temat enzymów biosyntetycznych, pektynaz roślinnych i mikrobiologicznych oraz interakcji pektyn z innymi składnikami ściany komórkowej [21]. Weia i in. (2010) opisali zmiany związane z regulacją aktywności i ekspresji genowej enzymów związanych z degradacją ścian komórkowych dojrzewających owoców jabłoni [16]. Jiang i in. (2019) wykazali, że częstość występowania pęknięć komórek pomidorów jest istotnie skorelowana z grubością ścian komórkowych oraz zawartością protopektyny i celulozy [41].

Videcoq i in. (2017) zbadali wpływ udziału polisacharydów na właściwości mechaniczne ścian komórkowych parenchymy. Na podstawie badań stwierdzono, że elastyczność i lepkość tkanek były powiązane i kontrolowane w różnym stopniu przez wszystkie docelowe polisacharydy (wśród nich, pektyczne domeny homogalakuronowe). Wykazano, że krystaliczna celuloza i fukozylowany ksyloglukan mają podstawowe znaczenie w określaniu lepkosprężystych właściwości mechanicznych tkanki parenchymy jabłek [22]. Zdunek i in. (2015) zbadali sztywność ścian komórkowych podczas dojrzewania owoców gruszy. Na podstawie badań stwierdzili, że moduł sprężystości pierwotnych ścian komórkowych gruszek zmniejsza się liniowo podczas dojrzewania przed zbiorami

na drzewie i wzrasta podczas przechowywania po zbiorach, natomiast nie koreluje z jędrnością owoców [42].

Podsumowując, 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 związku z tym, badania nad wpływem różnych czynników na te właściwości są niezwykle ważne dla poprawy jakości jabłek i zapewnienia dłuższego okresu ich przechowywania.

## **2.2. Badania właściwości wytrzymałościowych tkanek owoców**

Badania właściwości wytrzymałościowych tkanek owoców są ważnym zagadnieniem w dziedzinie nauki o żywności, a ich dokładne badanie jest kluczowe dla zachowania jakości owoców podczas ich przechowywania i transportu. Wyniki te są również wykorzystywane podczas opracowywania zarówno technologii obróbki wstępnej: obierania czy porcjowania, jak i technologii procesów obróbki finalnej: miazdżenia czy wyciskania. W literaturze naukowej można znaleźć wiele metod badania właściwości wytrzymałościowych owoców, a najważniejsze z nich obejmują: testy ściskania, rozciągania, relaksacji, pełzania, przebicia, cięcia, indentacji, testów zmęczeniowych oraz udarności. Wybór odpowiedniego testu zależy od rodzaju owoców oraz celu badania. Często stosuje się kombinację różnych testów, aby uzyskać kompleksowe informacje o wytrzymałości owoców.

Wśród metod pomiaru właściwości mechanicznych owoców wyróżnić można między innymi testy jednoosiowe, testy wieloosiowe, testy na próbkach nierównomiernych, testy *in situ*, testy dynamiczne oraz testy mikro- i nanomechaniczne. Każda z tych metod ma swoje zalety i wady, a jej wybór zależy od celu badania i dostępnych zasobów. 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 trwałości [3], [43]–[65].

W celu dokładnego wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych owoców należy przeprowadzić testy wytrzymałościowe dla poszczególnych budujących go tkanek. Najczęściej badaniom poddaje się najistotniejszą z punktu widzenia konsumenckiego tkankę parenchymy, która jednocześnie stanowi największą część owocu. Parenchyma jest najbardziej narażona na uszkodzenia, natomiast epiderma oddziela parenchymę od środowiska, chroniąc ją przed utratą wody, patogenami oraz lekkimi obciążeniami mechanicznymi. W związku z tym można znaleźć wiele badań dotyczących także właściwości wytrzymałościowych epidermy, która stanowi dla parenchymy naturalną ochronę przed środowiskiem zewnętrznym [4], [66], [67]. Tkanek parenchymy najczęściej bada się wykorzystując testy ściskania [68], relaksacji naprężeń oraz pełzania [69]–[71]. W tym celu najczęściej wykorzystuje się maszyny wytrzymałościowe. W celu wyznaczenia właściwości mechanicznych parenchymy pod wpływem obciążeń udarowych można także poddać ją badaniu przy pomocy dynamicznej analizy mechanicznej (DMA) [72], [73]. W przypadku tkanki epidermy, najczęstszymi stosowanymi badaniami jest test rozciągania oraz próba przebicia [74], [75], natomiast są także dostępne publikacje na temat testów DMA i reologii przeprowadzonych na skórcie pomidora [76]–[78].

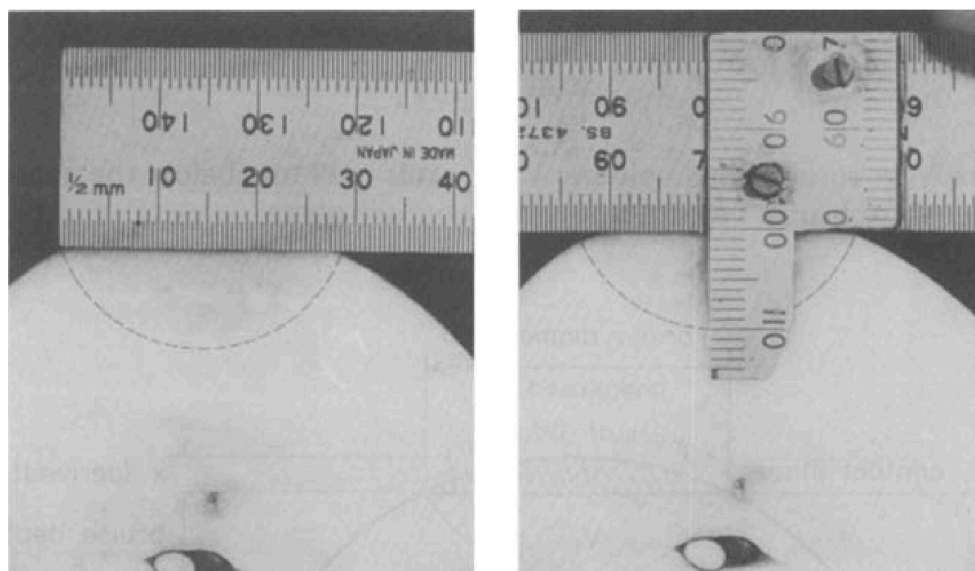
Podsumowując, badania właściwości mechanicznych tkanek owoców to obszar intensywnych badań naukowych, mający kluczowe znaczenie w ocenie jakości i trwałości owoców w procesach zbioru, transportu i przechowywania. Należy również dodać, że metody te są stale doskonalone. W ostatnich latach wiele badań skupiło się na wykorzystaniu nowoczesnych technologii umożliwiających przeprowadzanie analiz zarówno niszczących, jak i nieniszczących. Badania te można podzielić także na skale makro, mikro, nano oraz te, które są prowadzone na poziomie atomowym.

### ***2.2.1. Metody badań niszczących***

Z mechanicznego punktu widzenia, testy niszczące to metody badawcze, które prowadzą do zniszczenia testowanego materiału w celu określenia jego właściwości wytrzymałościowych lub innych charakterystyk. Przykłady testów niszczących obejmują: testy zginania, rozciągania, ściskania, udarności, przecinania oraz przebicia. W badaniach materiałów biologicznych można je podzielić na testy, które z założenia prowadzą do zniszczenia próbki pod wpływem zadanego obciążenia, oraz testy wymagające zniszczenia materiału w celu wypreparowania próbki do dalszych badań [79].

Najpopularniejszą metodą niszczącą są testy wytrzymałościowe. W celu wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych badanego przedmiotu, w pełnym zakresie obciążenia, próbka poddawana jest obciążeniu do momentu uzyskania wartości siły niszczącej. Na tej podstawie można wyznaczyć podstawowe cechy i właściwości materiału na poszczególnych etapach obciążania, takie jak: stała Poissona, która opisuje związek między odkształceniem podłużnym a odkształceniem poprzecznym, czy moduł sprężystości, który opisuje związek pomiędzy naprężeniem a odkształceniem próbki. Na podstawie uzyskanych wartości siły niszczącej oraz przekroju osiowego próbki można wyznaczyć naprężenia niszczące tkankę. Innymi przykładami badań niszczących, najczęściej wykonywanych na owocach są testy udarowości czy badanie jędrności z zastosowaniem penetrometru. Metody te są stosunkowo łatwe do wykonania i dają wyniki w krótkim czasie, ale wymagają zniszczenia próbki [3], [5], [80].

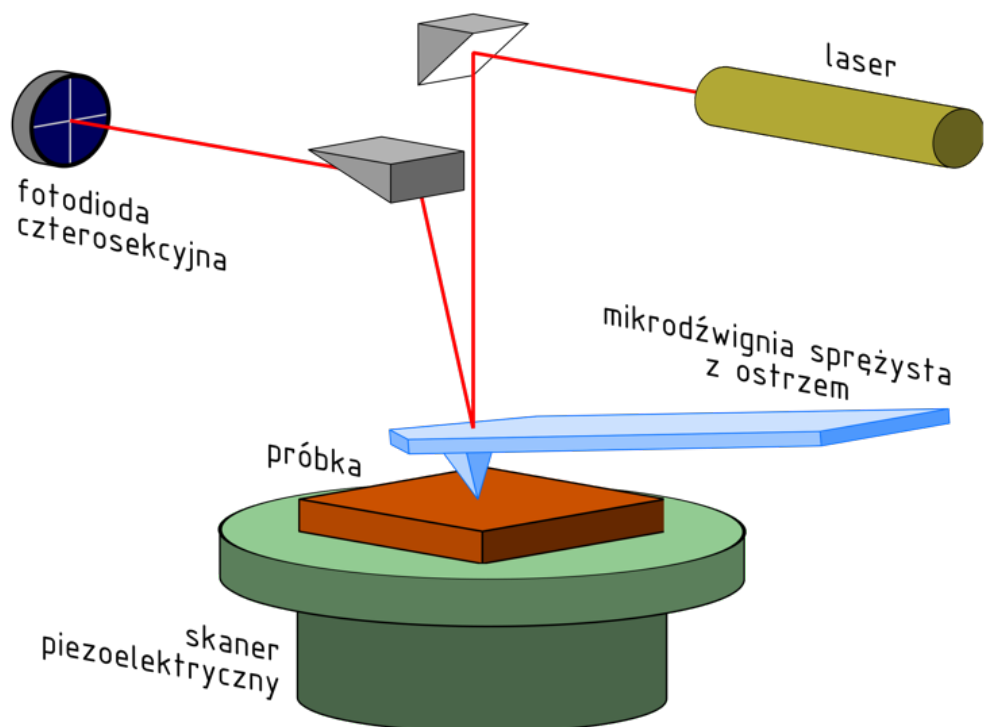
Kolejną metodą jest badanie objętości obić tkanki parenchymy owoców poprzez ręczny pomiar obszaru zasinienia (Rys. 3). W tym celu Schoorl i Holt (1980) pozyskiwali wymiary średnic i głębokości obić z przekroju owoców. Metoda ta wymagała odczekania od 4 do 24 godzin, aby strefa zasinienia była lepiej widoczna [81]. Na podstawie tej metody autorzy następnie wyznaczali energię powodującą uszkodzenia owoców w testach udarowych [82].



Rysunek 3. Metoda pomiaru objętości obić z zastosowaniem techniki niszczącej [81]

Innymi niszczącymi, jednak bardziej zaawansowanymi metodami pomiaru właściwości wytrzymałościowych są badania prowadzone w skali nano, przy użyciu mikroskopii sił atomowych (AFM) oraz nanoindentacji. AFM to metoda mikroskopii pozwalająca na badanie powierzchni materiałów na poziomie atomowym i nanometrycznym. Metoda ta wykorzystuje sondę zakończoną ostrzem o wymiarach rzędu nanometrów, która porusza się po powierzchni materiału, a następnie rejestruje siły oddziaływania między sondą a powierzchnią (Rys. 4). Technika ta może być wykorzystana do pomiaru modułu sprężystości w bardzo małych skalach, takich jak pojedyncze nanocząsteczki czy warstwy atomowe. Zastosowanie mikroskopii sił atomowych (AFM) pozwala na pomiar sił adhezyjnych, sprężystości powierzchni pojedynczych komórek i spójności tkanek owoców, co pozwala na dokładne zrozumienie ich właściwości mechanicznych na poziomie nano i subnano [83], [84]. Metoda nanoindentacji pozwala na wyznaczenie twardości oraz sprężystości badanych próbek. Wykorzystuje sondy o rozmiarze rzędu nanometrów, wywiera siłę w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset mN. Metoda ta jest stosowana do badania właściwości mechanicznych materiałów miękkich, takich jak tkaniny, mięśnie czy tkanki roślinne. Ponadto metoda ta umożliwia badanie właściwości mechanicznych na poziomie pojedynczych komórek. Moduł sprężystości tkanek owoców można obliczyć z wykorzystaniem wzoru  $E=S/(2a\delta)$ , gdzie S to sztywność narzędzia, a  $\delta$  to głębokość penetracji sondy. Znana jest także metoda mikroindentacji, która wykorzystuje sondy o rozmiarze rzędu mikrometrów. Wywiera ona siłę w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset mN. Metoda ta jest stosowana do badania właściwości mechanicznych materiałów twardszych, takich jak metale, ceramika czy kompozyty. Wyniki badań nanoindentacji są bardziej precyzyjne niż mikroindentacji, ponieważ umożliwiają dokładniejsze pomiary w mniejszej skali. Z drugiej strony, mikroindentacja jest stosunkowo łatwiejsza w realizacji i jest stosowana w przypadkach, gdy badane materiały są zbyt twarde, aby były badane za pomocą nanoindentacji [85], [86].

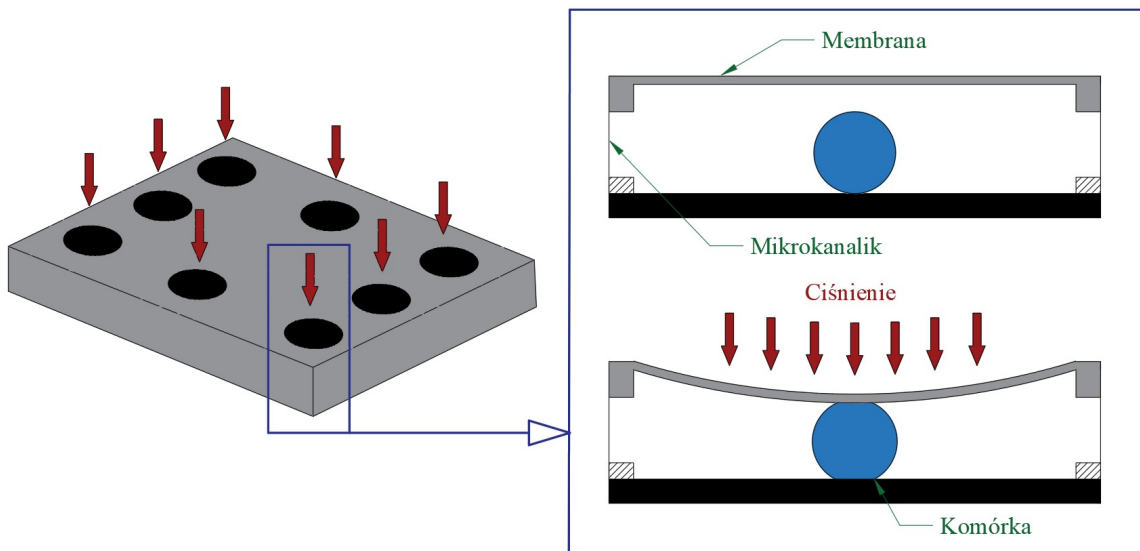




Rysunek 4. Metoda pomiaru właściwości materiału z zastosowaniem mikroskopii sił atomowych (AFM) [www4]

Zdunek i in. (2013) wyznaczyli, przy pomocy AFM, moduł Younga i sztywność komórek mezokarpu pomidora, wykorzystując modele Hertza i Snedдона. Zastosowanie dwóch sond o różnych promieniach krzywizny (20 nm i 10.000 nm) wykazało, że na zmierzone właściwości sprężyste istotny wpływ miała geometria końcówki. Moduł Younga wynosił około 100 kPa  $\pm$ 35 kPa i 20 kPa  $\pm$ 14 kPa odpowiednio dla ostrzejszej końcówki i końcówki o kulistym kształcie [84]. W oparciu o tę pracę, Khodabakhshian i in. (2021) oszacowali przy pomocy AFM moduł sprężystości i sztywność ścian komórkowych mezokarpu banana. Użyli dwóch końcówek o różnych promieniach krzywizny (10 nm i 10.000 nm). Moduł sprężystości wyniósł około 95 kPa dla ostrzejszej końcówki i 18,5 kPa dla końcówki o kształcie kulistym [87].

Yokokura i in. (2017) opracowali innowacyjną metodę pomiaru modułu sprężystości komórek za pomocą ich kompresji w mikrokanalikach. Mikrouządzenie zostało wykonane z przezroczystych materiałów, aby umożliwić monitorowanie odkształceń *in situ* przy pomocy mikroskopu optycznego. Urządzenie umożliwiało kontrolę nacisku podczas przeprowadzanych badań przy użyciu ciśnienia (Rys. 5). Opublikowano kilka prac na temat uzyskanych właściwości mechanicznych komórek przy pomocy mikrowykalazku [88], [89].



Rysunek 5. Metoda pomiaru właściwości wytrzymałościowych komórek przy użyciu mikrouządzenia  
(opracowanie własne na podstawie [89])

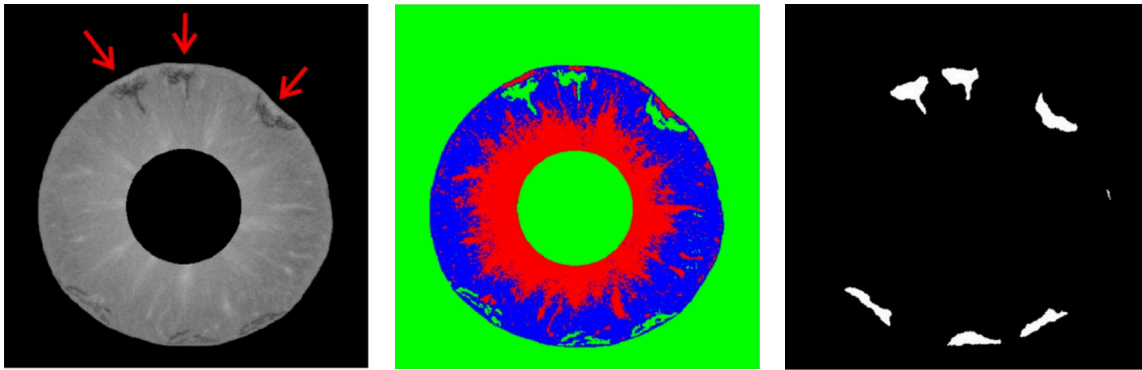
### 2.2.2. Metody badań nieniszczących

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. Metoda ta jest bardziej skomplikowana niż metoda niszcząca, ale pozwala na badanie tkanek owoców bez niszczenia próbek, które następnie można wykorzystać w kolejnych badaniach [90], [91]. 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 [92]–[101].

Metoda optyczna z zastosowaniem wideoekstensometru polega na pomiarze odkształceń próbki w trakcie jej obciążania. Najczęściej stosowana jest w warunkach statycznych obciążeń. O ile klasyczny ekstensometr, przytwierdzony do próbki, również można skategoryzować jako narzędzie służące do badań nieniszczących, to w przypadku delikatnych próbek, jakimi są tkanki biologiczne nie można go jednak skategoryzować jako bezinwazyjnego przyrządu pomiarowego [102]. Należy także dodać, że nieniszczący charakter tego pomiaru leży w jego bezkontaktowej metodzie pomiaru, używany jest natomiast jednocześnie zarówno w badaniach niszczących jak i nieniszczących.

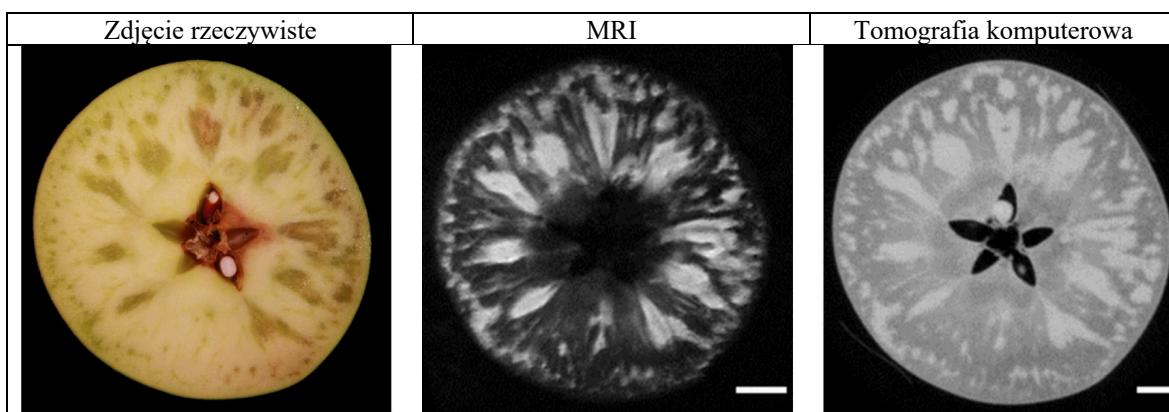
Metoda analizy obrazu może być stosowana w celu określenia zakresu powierzchniowych uszkodzeń owoców. Komarnicki i in. (2017) wyznaczył powierzchnie obić jabłek, powstałe w wyniku testów udarowych, wykorzystując do tego celu program AutoCad. Zdjęcia powierzchni obić zostały zaimportowane do programu, wyskalowane i następnie obrysowane linią splajnu, która umożliwiła obliczenie ich powierzchni. Zaletą tej metody jest niski koszt wykonania i brak potrzeby posiadania fachowego sprzętu, natomiast dokładność pomiaru oraz czas potrzebny do uzyskania wyników przemawia na niekorzyść tej metody [103], [104].

Tomografia komputerowa jest techniką obrazowania, która umożliwia tworzenie trójwymiarowego obrazu wewnętrznej struktury owocu. Metoda ta polega na wykorzystaniu promieniowania rentgenowskiego, które przechodzi przez owoc i jest rejestrowane przez detektor. Dane te następnie są przetwarzane przez program do rekonstrukcji zdjęć, który tworzy trójwymiarowy obraz owocu. Technika tomografii komputerowej umożliwia wyznaczanie zakresu uszkodzeń owoców poprzez analizę zmian wewnętrznej struktury owocu. Procedura ta w pierwszym kroku wymaga dobrania odpowiednich parametrów skanowania a następnie dobrania odpowiedniego kontrastu poprzez równoważenie poziomów szarości lub transformację krzywej tonalnej. Dzięki temu możliwe jest uwidocznienie szczegółów, które podczas analizy obrazu źle wykonanego lub niedostrojonego mogłyby być niewidoczne. Technika ta jest bardzo precyzyjna, jednak wymaga dużego doświadczenia osoby obsługującej. Tomografia komputerowa umożliwia wykonywanie zdjęć w skali nano, mikro oraz makro. Warto nadmienić, że o ile metoda ta jest bardzo dokładna, to badania są kosztowne, wymaga specjalistycznego sprzętu oraz wykwalifikowanej obsługi [104]–[107]. Dodatkowym atutem tomografii komputerowej jest możliwość eksportu geometrii do programów numerycznych, które również stanowią metodę badań nieniszczących [108]. Diels i in. (2017) porównali metodę tomografii komputerowej z niszczącymi badaniami służącymi do wyznaczenia objętości obić owoców. Wizualizacja siniaków wykazała, że stłuczenia mogą mieć bardzo nieregularny kształt, co oznacza, że szacunki objętości siniaków oparte na prostych założeniach geometrycznych nie mogą dostarczyć dokładnych wyników [104]. Uzyskane przez Dielsa i in. (2017) obrazy tomograficzne wraz z metodą ich analizy przedstawiono na [rysunku 6](#).



Rysunek 6. Metoda wyznaczania obić owoców z zastosowaniem tomografii komputerowej [104]

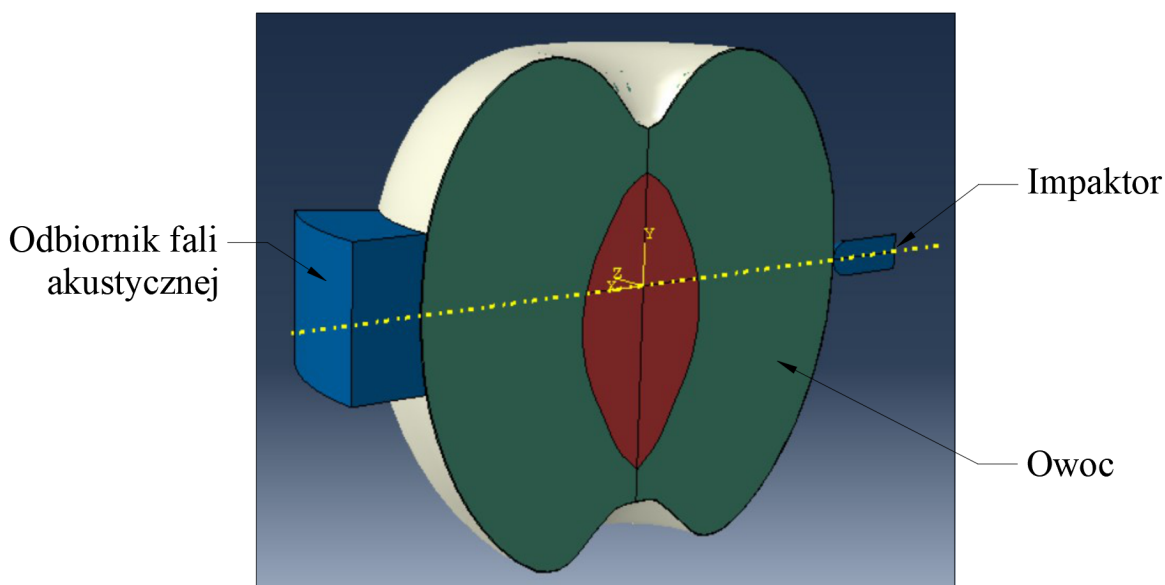
Metoda rezonansu magnetycznego (MRI) to nieinwazyjna metoda pomiarowa wykorzystująca pole magnetyczne i fale radiowe w obrazowaniu wewnętrznej struktury obiektów. Metoda ta opiera się na zjawisku rezonansu magnetycznego, czyli zdolności jąder atomów do wchodzenia w rezonans z polem magnetycznym. Badania MRI przynoszą podobny efekt jak w przypadku zdjęć tomograficznych, ale badania przeprowadzone przez Herremans i in. (2014) pokazały, że tomografia komputerowa jest narzędziem dokładniejszym. Z drugiej strony, przy pomocy badań MRI można uzyskać znacznie lepszy kontrast obrazów. Wybór metody zależy od spodziewanego efektu końcowego i pożądanej dokładności pomiaru. Wyniki porównania tych dwóch metod przedstawiono na [rysunku 7](#) [109].



Rysunek 7. Porównanie metody MRI z tomografią komputerową [109]

Metoda modelowania numerycznego polega na wykorzystaniu modeli matematycznych do symulacji zachowania materiału pod obciążeniem. Metoda ta pozwala na badanie materiałów w różnych warunkach obciążenia, ale wymaga dużej wiedzy i umiejętności w zakresie obsługi programów wykorzystujących metodę elementów

skończonych. Chen i Baerdemaeker (1993) wykonali modele dynamiczne jabłek i ananasów, które pozwoliły na powiązanie drgań modeli z jądernością oraz modułem sprężystości owoców [110]. [Rysunek 8](#) przedstawia schemat budowy modelu akustycznego.

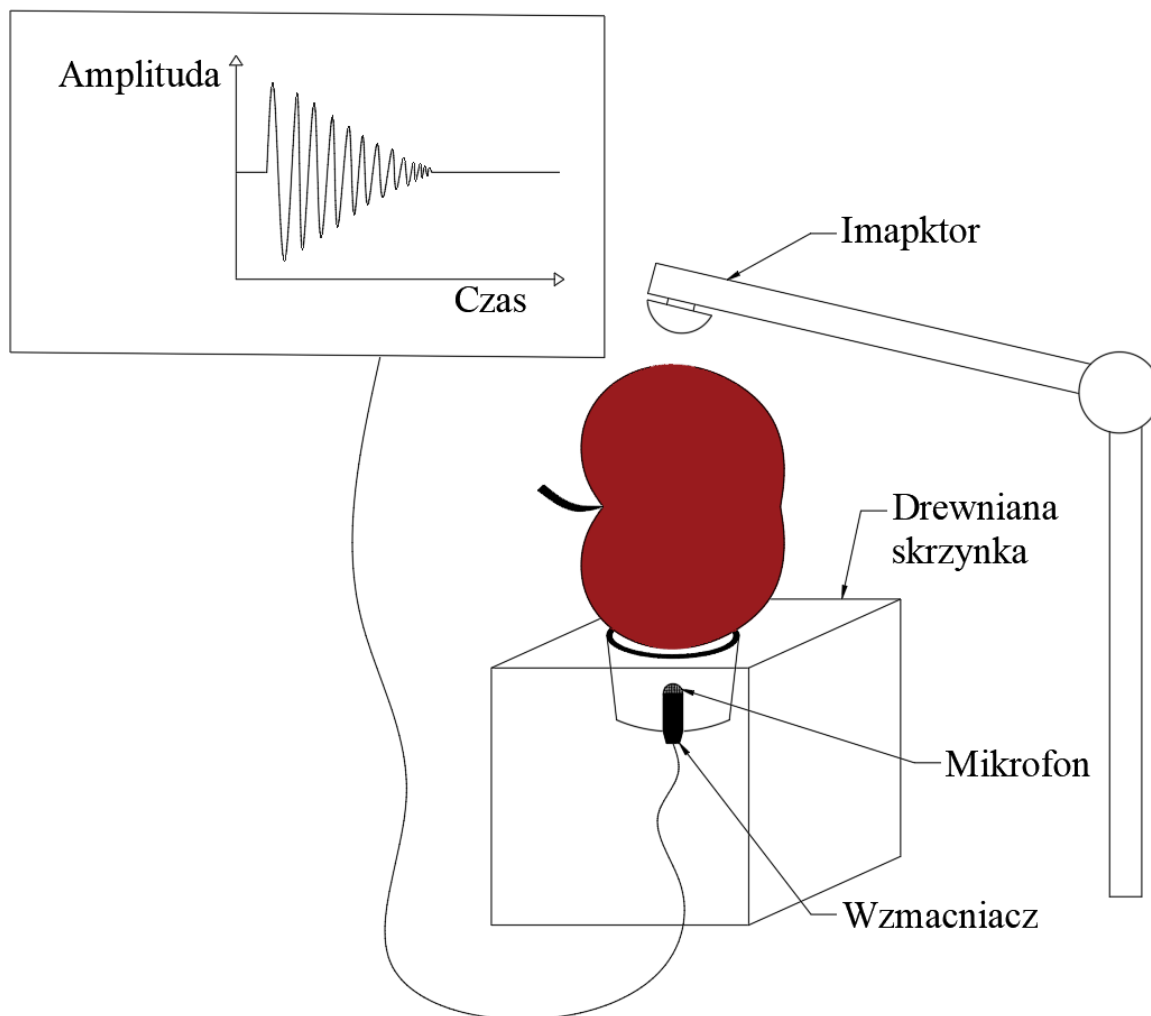


Rysunek 8. Modelowanie odpowiedzi akustycznej jabłka w programie Abaqus CAE (*opracowanie własne*)

W badaniach akustycznych wykorzystuje się dźwięki o niskiej częstotliwości. Dźwięk, częściowo pochłonięty i zmieniony przez owoc jest analizowany pod kątem spektrum (barwy) i częstotliwości drgań. Na podstawie odpowiedzi akustycznej możliwa jest ewaluacja jego stopnia dojrzałości, który w przypadku tych badań, determinowany jest jądernością owoców. Metoda ta jest niedroga, dlatego stosunkowo często jest wykorzystywana w przemyśle spożywczym. Badania wskazują, że metody akustyczne umożliwiają nie tylko określenie jąderności, ale także mogą pomóc w określeniu zawartości wody w owocach [111], [112]. Schemat badawczego stanowiska pomiarowego dla testów akustycznych przedstawiono na [rysunku 9](#). W przemyśle metoda opiera się na tym samym założeniu, jednak testowany materiał przeważnie jest badany podczas transportu taśmowego.

Kolejnymi badaniami wykorzystującymi dźwięk do ewaluacji jakościowej produktów są testy ultradźwiękowe. W metodzie tej wykorzystuje się fale dźwiękowe o wysokiej częstotliwości, aby ocenić jakość i strukturę owoców. Różnica polega na tym, że badania akustyczne pozwalają na analizę ogólnej konsystencji owoców, podczas gdy

badania ultradźwiękowe pozwalają na dokładniejszą analizę struktury wewnętrznej owoców [113].



Rysunek 9. Schemat stanowiska pomiarowego do testów akustycznych (*opracowanie własne*)

Analiza w bliskiej podczerwieni (NIR) to technika spektroskopowa, która wykorzystuje promieniowanie bliskiej podczerwieni do analizy składu chemicznego próbek. Metoda ta opiera się na absorpcji promieniowania bliskiej podczerwieni przez wiązania chemiczne występujące w badanej próbce. Każda cząsteczka ma unikalne widmo absorpcyjne, które może być wykorzystane do identyfikacji i ilościowego oznaczania składników próbki. W badaniach tych stosuje się zazwyczaj spektrometry NIR, które pozwalają na pomiar absorpcji promieniowania w zakresie 700-2500 nm. Metoda ta umożliwia szybkie i nieinwazyjne określenie wielu parametrów jakościowych i ilościowych owoców, takich jak zawartość cukru, kwasowość, składniki mineralne, aminokwasy i wiele innych. Wyniki te mogą być wykorzystane do oceny jakości owoców oraz do kontroli

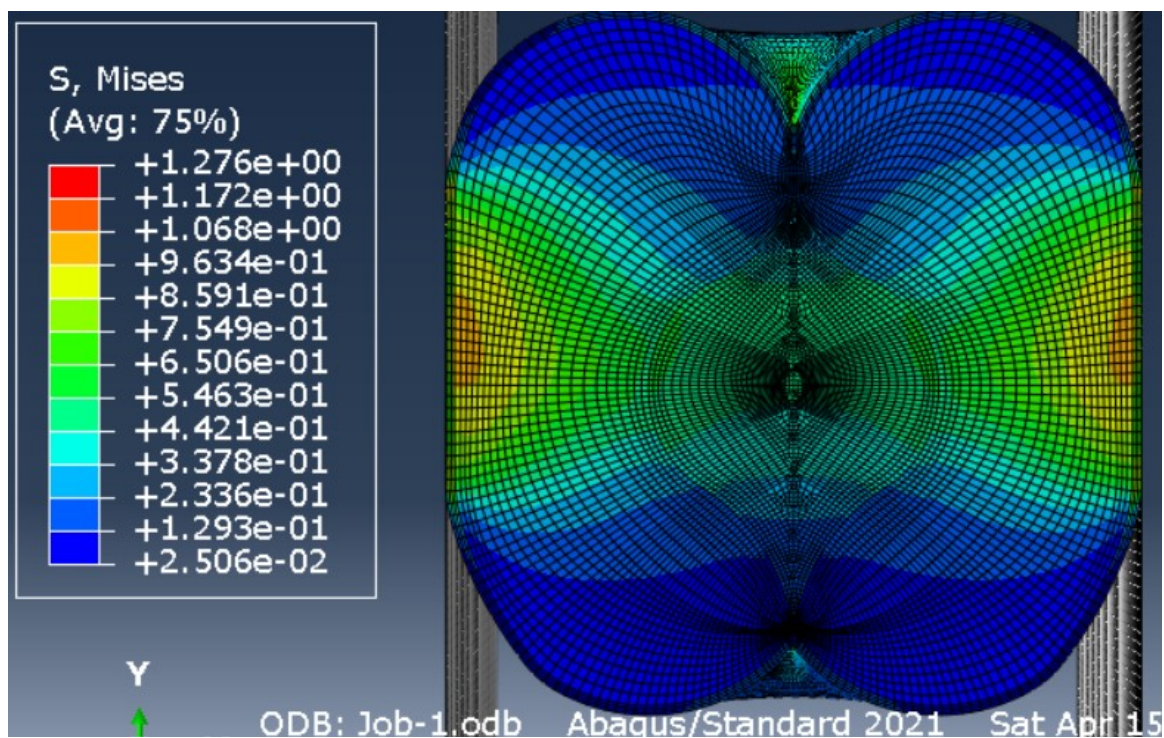
procesów przetwarzania i przechowywania. Badania wykazały, że metoda ta jest również skuteczna w wykrywaniu wewnętrznych uszkodzeń borówki już po 30 minutach od uderzenia mechanicznego [114]. Ważną zaletą NIR jest jej szybkość i łatwość użycia. Technika ta może być stosowana bezpośrednio w polu lub w magazynach, co pozwala na szybkie i skuteczne podejmowanie decyzji dotyczących zbiorów i przetwarzania [115].

### ***2.2.1. Metody wyznaczania naprężeń niszczących***

Badania dotyczące wyznaczania naprężeń niszczących tkanki owoców są istotne z punktu widzenia jakości i bezpieczeństwa produktów spożywczych. W ciągu ostatnich kilku lat, przeprowadzono wiele badań dotyczących wyznaczenia właściwości mechanicznych owoców dla poszczególnych gatunków i odmian pozyskiwanych w różnych terminach zbioru oraz poddawanych zmiennym warunkom przechowywania. Wraz z rozpowszechnieniem się metody numerycznej, właściwości te zaczęto implementować w celu modelowania obciążeń owoców z wykorzystaniem MES [45]. Zabieg ten umożliwił zastosowania inżynierii odwrotnej, czyli wyznaczenia poszukiwanych własności materiału (np. naprężeń niszczących) w wybranych obszarach modeli. W związku z tym, że metody mechaniczne stanowią powszechny sposób wyznaczania naprężeń niszczących tkanki owoców i zostały one omówione w rozdziale 2.2.1, warto skupić się na scharakteryzowaniu metody numerycznej.

Metody numeryczne są szeroko stosowane w badaniach mających na celu wyznaczenie naprężeń występujących w tkankach owoców. Proces ten wymaga zaprojektowania modelu dyskretnego (3D) badanego obiektu lub importu jego geometrii ze skanu tomograficznego bądź skanera 3D. Następnie model poddaje się analizie mechanicznej, która między innymi umożliwia wyznaczenie poszczególnych wartości sił, odkształceń oraz naprężeń występujących w różnych rejonach modelu. Model, po procesie walidacji, można wykorzystać do symulacji obciążeń. Metoda elementów skończonych (MES) polega na podziale modelu owocu na wiele małych elementów (skończonych), które są połączone ze sobą za pomocą węzłów. W każdym elemencie skończonym wyznaczane są równania ruchu, a następnie rozwiązanie tych równań umożliwia wyznaczenie naprężeń występujących w modelu [116]–[118]. Zastosowanie metody elementów skończonych w modelowaniu owoców zostało szerzej omówione w kolejnym rozdziale. Na [rysunku 10](#)

przedstawiono wizualizację naprężeń Hubera-Misesa, występujących w modelu podczas procesu ściskania, na przykładzie warstwy jabłka.



Rysunek 10. Wizualizacja naprężeń Hubera-Misesa występujących w warstwie przekroju jabłka  
(opracowanie własne)

### 2.3. Modelowanie owoców przy pomocy programów numerycznych

Modele numeryczne są coraz bardziej popularnym narzędziem wykorzystywanym w dziedzinie badań nad owocami. MES jest metodą numeryczną, która pozwala na analizę zachowania się ciała pod wpływem zmiennych obciążeń. Modele numeryczne są oparte na modelach fizycznych, które uwzględniają wiele czynników, takich jak geometria owoców i właściwości mechaniczne materiałów, z których są wykonane. W przypadku owoców, MES może być używana do analizy ich właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość, sztywność, odporność na uszkodzenia i odpowiedź akustyczna. 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, takich jak urządzenia do cięcia, kruszenia, sokowirówek, itp. Dzięki MES możliwe jest dokładne określenie sił i obciążeń, które działają na owoce podczas procesów przetwarzania, co pozwala na zaprojektowanie urządzeń i maszyn do przetwarzania owoców, które są bardziej wydajne i skuteczne; umożliwia symulację procesów ich przetwarzania.



Badania przeprowadzone przez Lu i in. (2006) wykazały, że metoda elementów skończonych może być stosowana do analizy wpływu jędrności owoców na ich właściwości mechaniczne [119]. Z kolei na podstawie badań przeprowadzonych przez Chena i Baerdemaekera (1993) można stwierdzić, że analiza modalna, oparta na metodzie elementów skończonych, umożliwiła badania twardości owoców poprzez pomiar częstotliwości rezonansowej owoców. Uzyskane przez autorów wyniki modelowania wykazały związek z modułem sprężystości owoców, co umożliwiło naukowcom wyznaczenie współczynnika sztywności  $f^2m^{2/3}$ . Metoda elementów skończonych okazała się również pomocna w analizie wpływu geometrii owoców na zachowanie dynamiczne. Na podstawie modelu Chen i in. (1993) określili optymalne rozmieszczenie elementów wywołujących impuls i czujników służących do pomiaru reakcji owocu. Walidacja w oparciu o dane empiryczne potwierdziła skuteczność tej metody [110]. Podobne badania na owocu arbuza przeprowadził również Abbaszadeh i in. (2014) [120].

Innym przykładem zastosowania MES jest predykcja obić owoców w oparciu o model dyskretny. Pascoal-Faria i in. (2017) w pierwszej kolejności wyznaczyli przy pomocy testu ściskania: średni moduł sprężystości ( $E=2$  MPa), granicę plastyczności ( $\sigma=0,4$  MPa,  $\nu=0,12$ ) i naprężenia niszczące ( $\sigma=0,4$  MPa,  $\nu=0,15$ ). Autorzy nie przeprowadzili walidacji modelu, ale stwierdzili, że uzyskane wyniki będą przydatne dla dystrybutorów i sprzedawców jabłek oraz pozwolą na zmniejszenie strat w żywności [116]. Z kolei Du i in. (2019) przeprowadzili analizę predykcji obić owocu kiwi z zastosowaniem metody numerycznej. Swoje wyniki zweryfikowali w oparciu o prędkość początkową, długość maksymalnej deformacji, powierzchnię kontaktu oraz zasymulowane objętości obić [121].

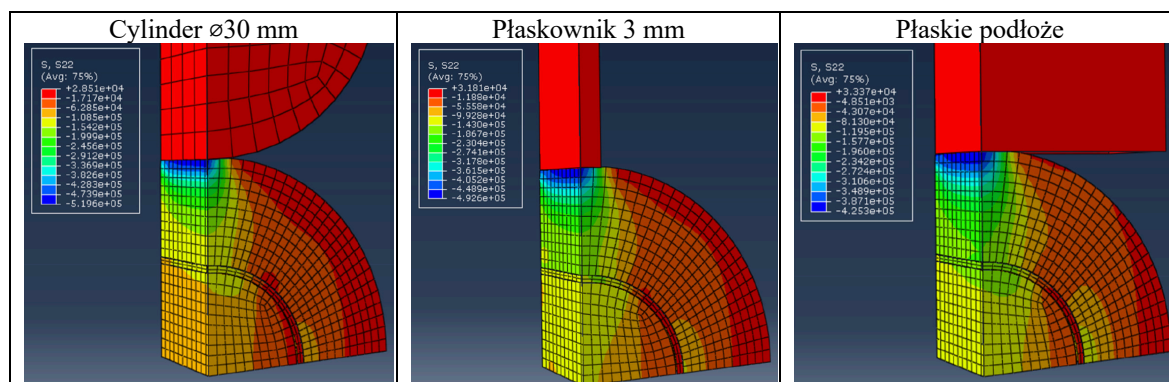
Celik i in. (2011) zbadali deformację jabłka poddanego testowi udarności. Z wyników symulacji uzyskano maksymalne naprężenie wynoszące 0,416 MPa i maksymalną siłę kontaktową 250,98 N. Walidacja wyników badań zdaniem naukowców przebiegła pomyślnie, natomiast zaprezentowane przez nich dane dotyczyły jedynie badań modelowych bez odniesienia do wyników rzeczywistych [122]. Autorzy nie podali pełnych informacji na temat właściwości wytrzymałościowych zaimplementowanych do modelu.

W kolejnej pracy Celik i in. (2018) przedstawili metodę wyznaczania obić na przykładzie modelu gruszki, z zastosowaniem analizy dynamicznej MES. Dane materiałowe modelu oparto o moduł sprężystości, stałą Poissona, punkt granicy plastyczności oraz naprężenia niszczące. Wyniki modelowe uzyskane przez autorów nie zostały poddane procesowi walidacji [123].

Ahmadi i in (2016) użyli MES do badań dynamicznych jabłka. W modelowaniu uwzględniono niejednorodną strukturę materiału aby przeanalizować zachowanie epidermy, parenchymy oraz gniazda nasiennego w próbie zderzenia owocu ze sztywnym podłożem oraz zderzenia jabłka z innym jabłkiem. Autorzy do modelowania użyli lepkosprężystych właściwości materiału, które pozyskali z publikacji Dintwy i in. (2008). Modele nie zostały poddane procesowi walidacji [124]. Natomiast Dintwa wyznaczył właściwości lepkosprężyste na podstawie danych literaturowych różnych autorów, podczas gdy modele walidował w oparciu o wyliczenia teoretyczne, które opierały się na wzorach zaimplementowanych do modułu obliczeniowego [125].

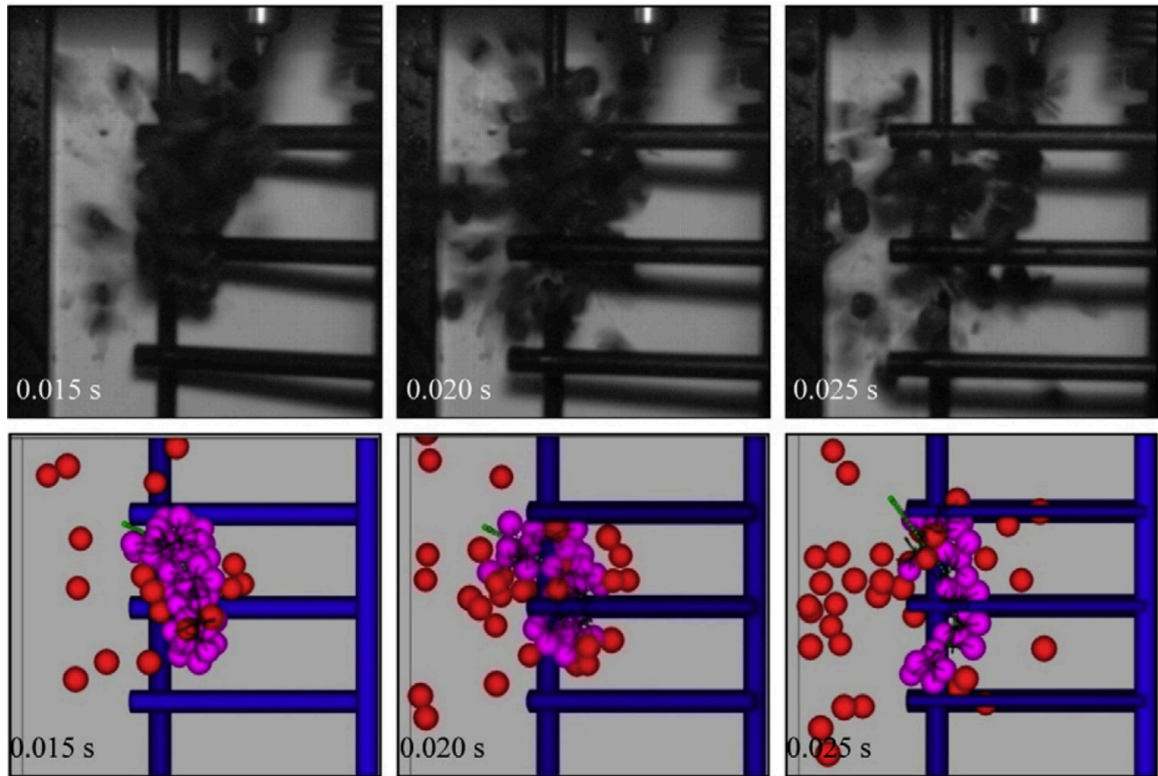
Szyjewicz i in. (2021) zaprojektowali dynamiczny model jabłka o właściwościach materiałowych kruchej pianki (przeznaczonej do modelowania pianek polimerowych, małej gęstości). Dodatkowo zdecydowali się na dokonanie zabiegu wzmocnienia materiału typu objętościowego. W procesie usztywnienia materiału przyjęli granicę plastyczności wynoszącą 3 MPa, przy wartości odkształcenia 1. Wartości modułu sprężystości i stałej Poissona autorzy zaadoptowali z badań opublikowanych przez Komarnickiego i in. (2017) [103]. Autorzy poddali modele testowi upadku na różnego typu podłoża. Wyniki modeli poddali walidacji w oparciu o badania empiryczne: wartości ciśnienia, powierzchni oraz siły nacisku [126].

Stopa i in. (2019) przedstawili metodę wyznaczania nacisków powierzchniowych korzenia marchwi obciążonego różnymi kształtami elementów roboczych (cylindrem o średnicy 30 mm, płaskownikami o szerokości 3 mm i 5 mm oraz płaskim podłożem). Autorzy przyjęli wartości modułu sprężystości od 4,04 MPa do 4,85 MPa dla ksylemu, łyka i perydermy; wartość współczynnika Poissona wyniosła  $0,47 \pm 0,01$ . Wyniki walidowali w oparciu o wykresy siły w funkcji przemieszczania. [Rysunek 11](#) przedstawia metody obciążania modeli wykonanych przez autorów publikacji [127].



Rysunek 11. Modele marchwi obciążone elementami o różnych kształtach [127]

Coetzee i in. (2013) zaprojektowała model odszypułkowania owoców winogron oparty o metodę elementów dyskretnych. W modelu uproszczonego odszypułkowania pojedyncza kiść winogron została uderzona zestawem obracających się łopatek. Walidację przeprowadzono w oparciu o nagranie kierunku i stopnia przemieszczeń elementów kiści winogron (Rys. 12) [128].



Rysunek 12. Walidacja modelu DEM procesu odszypułkowania winogron [128]

Metoda MES pozwala na dokładne określenie zachowania materiału pod wpływem różnego rodzaju obciążeń. Przykładami zastosowania MES są badania twardości owoców, predykcja obciążenia owoców, analiza wpływu geometrii owoców na ich zachowanie dynamiczne i badania deformacji owoców podczas testów udarności. MES pozwala na identyfikację czynników wpływających na właściwości mechaniczne owoców, takich jak ich kształt, wielkość, gęstość czy sztywność, co jest bardzo przydatne w procesie projektowania nowych urządzeń do przetwarzania owoców. Należy jednak pamiętać, że wyniki symulacji można uznać za wiarygodne dopiero po przeprowadzeniu ich walidacji.

### **3. Problem badawczy i hipotezy badawcze**

#### **3.1. Problem badawczy**

Problemem badawczym jest potrzeba wyznaczenia metodami doświadczalnymi zestawu właściwości tkanki parenchymy, stanowiących dane pozwalające na budowę adekwatnych modeli dyskretnych jabłek, w odniesieniu do poszczególnych etapów ich dojrzałości.

#### **3.2. 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.

#### 4. Cel pracy

Celem pracy była budowa i walidacja adekwatnych modeli dyskretnych jabłek, pozwalających na wyznaczenie naprężeń powodujących uszkodzenia owoców, na poszczególnych etapach ich dojrzałości.

Osiągnięcie celu głównego wymagało spełnienia celów szczegółowych, do których należało:

- 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.

## 5. Materiały i metody badań doświadczalnych

### 5.1. Przedmiot badań

Jabłka odmiany Chopin, stanowiące materiał badawczy, zostały wyhodowane i zebrane przez Sady Doświadczalne Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, w Wilanowie. Terminy zbioru ustalone przez producenta na podstawie predykcji dla etapów dojrzewania zbiorczego, konsumpcyjnego i fizjologicznego przypadły odpowiednio na 13 października, 26 października i 14 listopada 2022 r. Wszystkie terminy zbioru zostały wyznaczone na podstawie indeksu Streifa.

### 5.2. Wyznaczenie podstawowych właściwości fizykochemicznych

W celu wyznaczenia etapów dojrzałości wykonano pomiary jędrności, zawartości ekstraktu i indeksu skrobiowego, aby na podstawie tych trzech parametrów wyznaczyć indeks Streifa. Szczegółowy opis poszczególnych wykorzystanych metod przedstawiono w poniższych punktach.

- **Jędrność (F)** zmierzono za pomocą ręcznego testera (Facchini FT 327, Alfonsine, Włochy) wyposażonego w cylindryczną przystawkę penetrującą o średnicy 11,1 mm. Przed wykonaniem testu jędrności skórka jabłka została usunięta. Szczegółowy opis metodyki został opisany w publikacji Stopy i in. (2018) [129].
- **Zawartość ekstraktu (SSC)** określono przy użyciu ręcznego refraktometru (RMR 200, Hanna Instruments, Woonsocket, Rhode Island, USA). Szczegółowy opis metodyki został opisany w publikacji Stopy i in. (2018) [129].
- **Indeks skrobiowy (SI)** wyznaczono poprzez zanurzenie plastrów jabłek na minutę w roztworze jodu, które następnie wysuszono i porównano z wzornikami. Szczegółowy opis metodyki opisano w publikacji Guza (2003) [130].
- **Indeks Streifa (IS)** został wyznaczony poprzez zastosowanie [wzoru 1](#):

$$IS = \frac{F}{SSC \cdot SI} \quad (1)$$

Gdzie F – jędrność [kG], SSC – zawartość ekstraktu [°Brix], SI – indeks skrobiowy [-].

- **Zawartość wody** wyznaczono przy użyciu metody wagowej. Do procesu suszenia zastosowano liofilizator Labconco 4,5L (Kansas City, MO, USA). Zastosowane parametry: ciśnienie 50 Pa, temperatura kolektora -48°C, czas suszenia 24 godziny.

- **Oznaczenie pektyn** przeprowadzono na podstawie metodyki Pijanowskiego i in. (1971). Pektyny wytrącono z roztworu badanej próbki za pomocą 100% acetonu. Wyniki otrzymano metodą grawimetryczną: filtrując, susząc, a następnie ważąc powstały osad [131].
- **Zawartość kwasu jabłkowego** wyznaczono na podstawie analizy kwasowości miareczkowej – 5 ml soku oraz 100 ml wody destylowanej miareczkowano 0,1 N NaOH do pH 8,1 (do zobojętnienia roztworu) [131].
- **Geometria owoców** – wymiary owoców zmierzono w trzech płaszczyznach przy pomocy suwmiarki DC-1 (Ovibell GmbH & Co. KG, Mulheim, Niemcy) z dokładnością pomiaru 0,01 mm.

### **5.3. Wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych na poszczególnych etapach dojrzałości owoców**

Bezpośrednio po zbiorze owoce zostały przewiezione do laboratorium Zakładu Podstaw Techniki mieszczącego się w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, w którym wykonano testy właściwości mechanicznych owoców. Badania przeprowadzono zarówno dla całych owoców, jak i dla tkanki parenchymy oraz epidermy. Na ich podstawie wyznaczono zależności zmian siły obciążającej jako funkcji przemieszczenia, która w przypadku całych jabłek posłużyła następnie do walidacji modeli dyskretnych ([rozdział 8.1](#)). Dla całych owoców wyznaczono dodatkowo zależność wielkości powierzchni styku jako funkcji siły obciążającej, mającej stanowić podstawę do walidacji modeli numerycznych w oparciu o powierzchnie nacisku w procesie ściskania ([rozdział 8.2](#)). Z kolei uzyskane dla tkanek parametry siły w funkcji przemieszczenia umożliwiły wyznaczenie właściwości materiałowych, niezbędnych do budowy modeli dyskretnych ([rozdział 7.1.2](#)). Następnie wyznaczono zakresy uszkodzeń owoców, poddanych różnym stopniom obciążenia, w oparciu o obrazy mikrotomograficzne. Wyżej opisany proces umożliwił wyznaczenie naprężeń niszczących tkankę parenchymy, w oparciu o zwalidowany model dyskretny i zakresy uszkodzeń owoców ([rozdział 9](#)).

### 5.3.1. Właściwości wytrzymałościowe parenchymy

Właściwości wytrzymałościowe parenchymy zostały wyznaczone w próbie ściskania. Próbki zostały przygotowane w postaci sześcianów o podstawie kwadratu. Ich wysokość była nie więcej niż 1,5 raza większa od krawędzi podstawy, aby uniknąć braku jednoosiowego stanu naprężenia, tym samym spełniając założenia zasady Saint-Venanta.

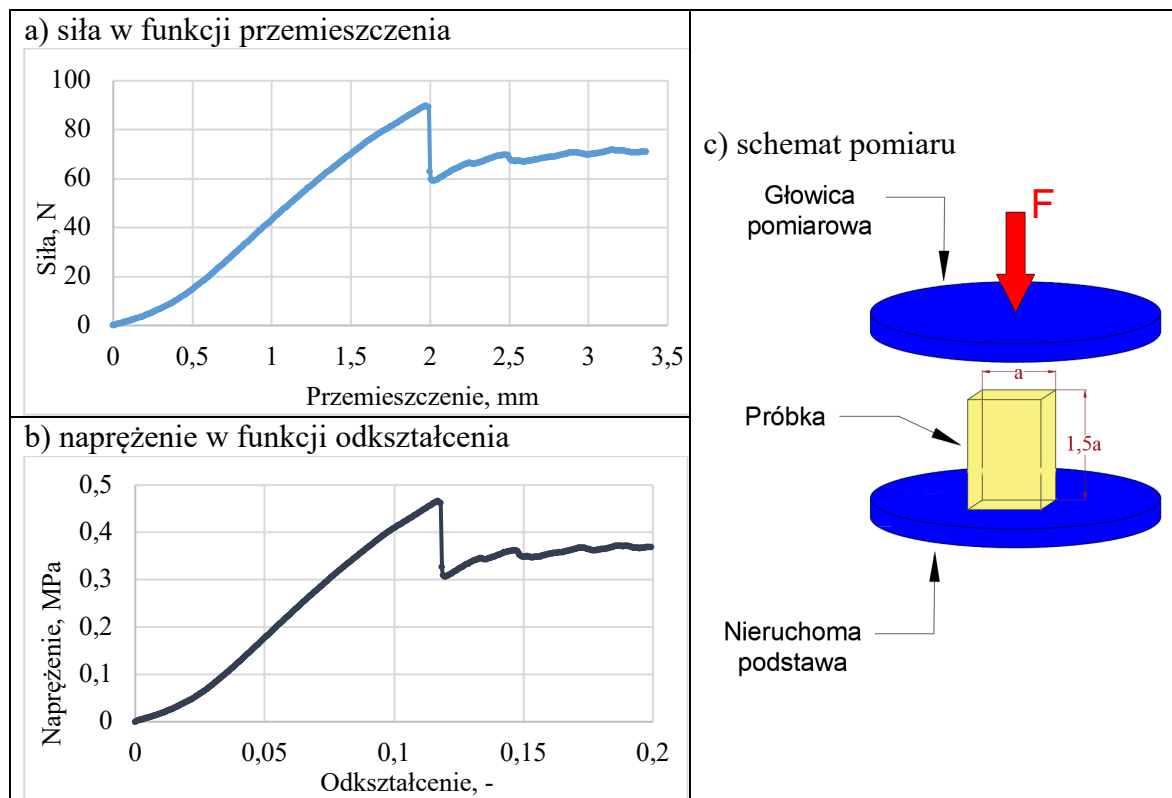
Próbki zostały obciążone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 (Instron, Norwood, Massachusetts, USA) w warunkach quasi-statycznych, przy prędkości obciążania wynoszącej  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Klasa dokładności głowicy pomiarowej siły wynosiła 0,5 według ISO 7500-1. Na [rysunku 13a](#) przedstawiono wykres siły w funkcji przemieszczenia, uzyskany w teście ściskania ([Rys. 13c](#)). Następnie na [rysunku 13b](#) przedstawiono wykres naprężeń w funkcji odkształcenia uzyskany poprzez kalkulację wyników testu przy użyciu [wzoru 2 i 3](#).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Gdzie:  $\sigma$  – naprężenie [MPa],  $F$  – siła obciążająca [N],  $A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

Gdzie:  $\varepsilon$  – odkształcenie [-],  $\Delta L$  – skrócenie próbki lub wydłużenie próbki [mm],  $L_0$  – długość początkowa próbki [mm]



Rysunek 13. Metoda wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych parenchymy (opracowanie własne)

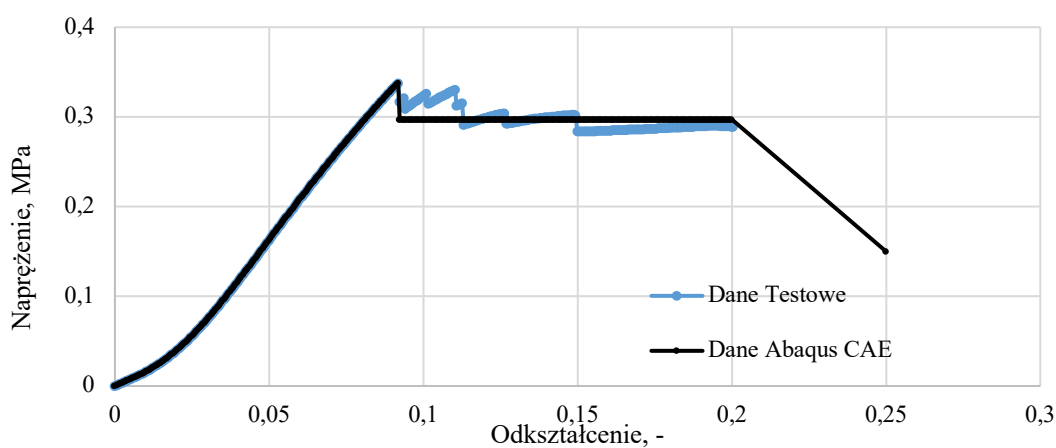


Dla każdego etapu dojrzałości wykonano po 10 powtórzeń. Następnie na podstawie wyników wyznaczono średnie wartości Modułu Younga przy użyciu wzoru 4.

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (4)$$

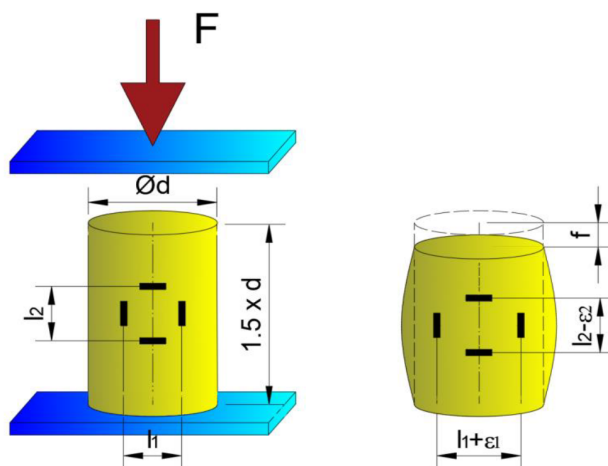
Gdzie: E – moduł Younga [MPa],  $\sigma_{max}$  – naprężenie niszczące [MPa],  $\varepsilon_{max}$  – odkształcenie przy naprężeniu niszczącym [-]

Wykresy dla każdej z badanych grup uśredniono i następnie dostosowano do wymagań programu Abaqus CAE w celu kalibracji materiału sprężystoplastycznego (Rys. 14). Szczegółowy opis kalibracji materiału znajduje się w rozdziale 7.1.2.



Rysunek 14. Metoda modyfikacji danych do kalibracji materiału sprężystoplastycznego (opracowanie własne)

W trakcie testów wyznaczono również stałą Poissona poprzez pomiar odkształcenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach próbki w teście ściskania. W tym celu użyto ekstensometru optycznego ME45 (Messphysik, ZwickRoell Testing Systems, Fürstfeld, Austria). Metodyka pomiaru została zaprezentowana na rysunku 15, natomiast wzór 5 opisuje metodę obliczenia współczynnika Poissona.



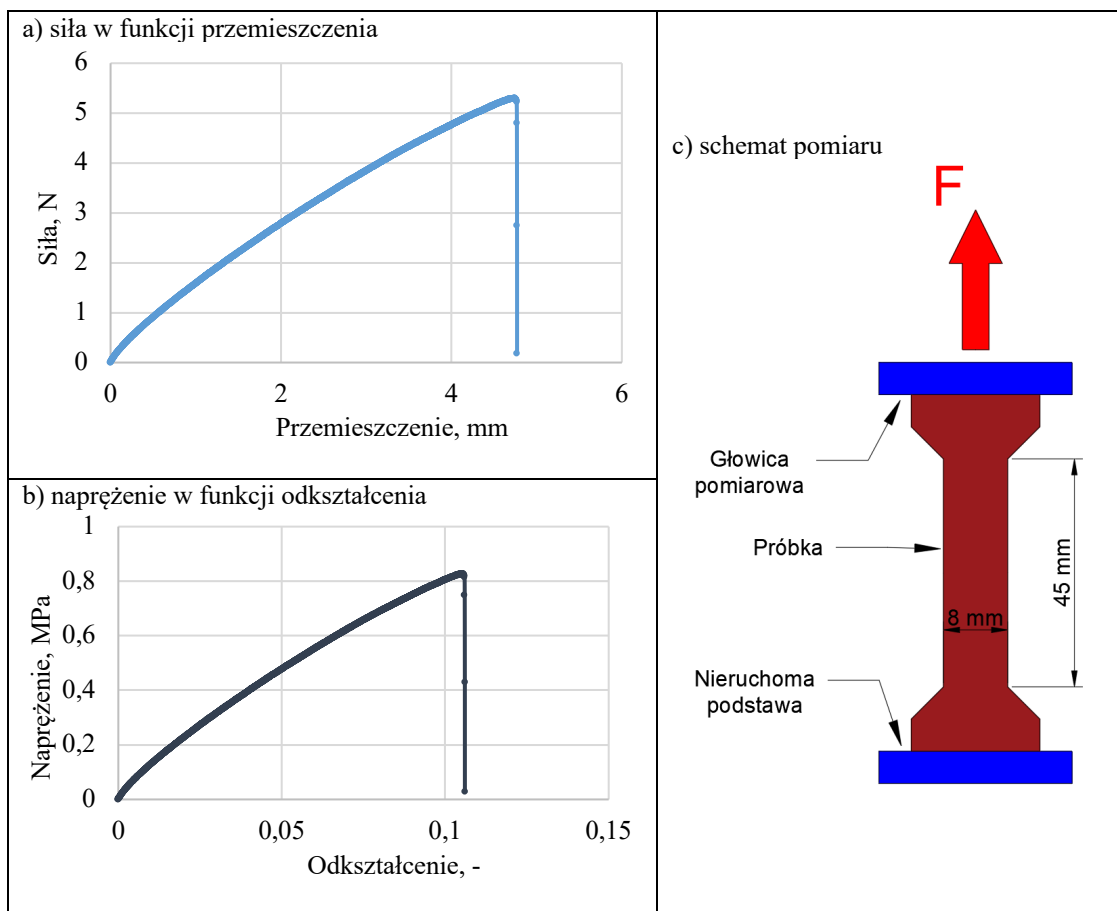
Rysunek 15. Metoda wyznaczenia współczynnika Poissona tkanki parenchymy (opracowanie własne)

$$\nu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (5)$$

Gdzie:  $\nu$  – stała Poissona [-],  $\varepsilon_1$ – odkształcenie poprzeczne [-],  $\varepsilon_2$  – odkształcenie osiowe [-]

### 5.3.2. Właściwości wytrzymałościowe epidermy

Właściwości wytrzymałościowe epidermy zostały wyznaczone w próbie rozciągania. Metodę przygotowania próbek przedstawiono na [rysunku 16c](#). Podobnie jak w próbie ściskania, próbki zostały obciążone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 w warunkach quasi-statycznych, przy prędkości obciążania wynoszącej  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Na [rysunku 16a](#) przedstawiono wykres siły w funkcji przemieszczenia, uzyskany w teście rozciągania. Na [rysunku 16b](#) przedstawiono wykres naprężeń w funkcji odkształcenia uzyskany poprzez kalkulację wyników testu przy użyciu [wzoru 2 i 3](#).



Rysunek 16. Metoda wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych epidermy (*opracowanie własne*)

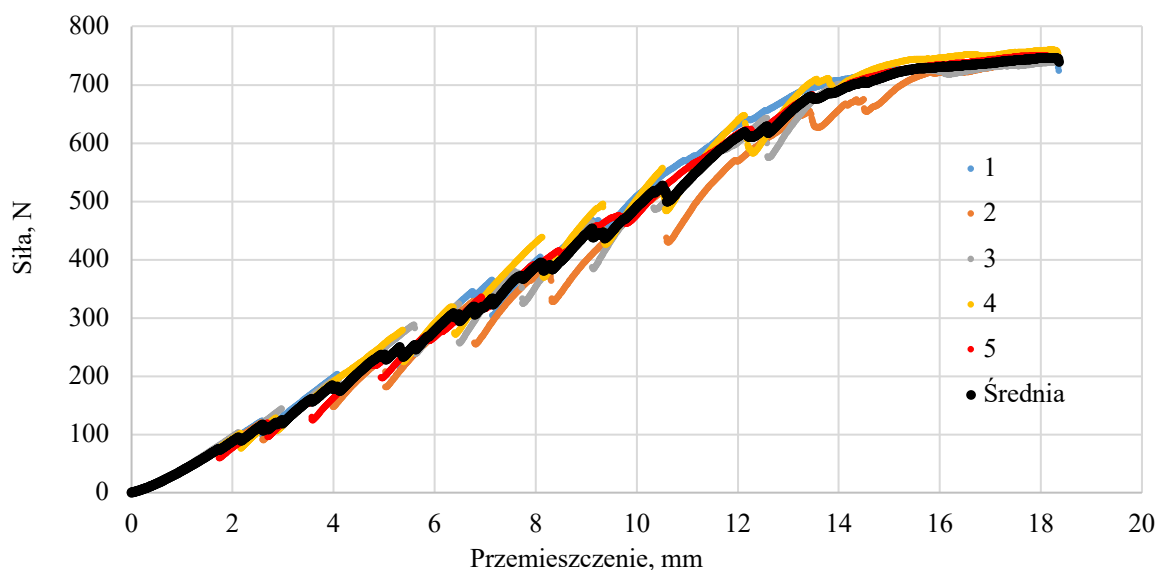
Dla każdego etapu dojrzałości wykonano po 20 powtórzeń. Następnie na podstawie wyników wyznaczono średnie wartości modułu Younga przy użyciu wzoru 6.

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (6)$$

gdzie: E – moduł Younga [MPa],  $\sigma_{max}$  – naprężenie niszczące [MPa],  $\varepsilon_{max}$  – odkształcenie przy naprężeniu niszczącym [-]

### 5.3.3. Test ściskania całych jabłek

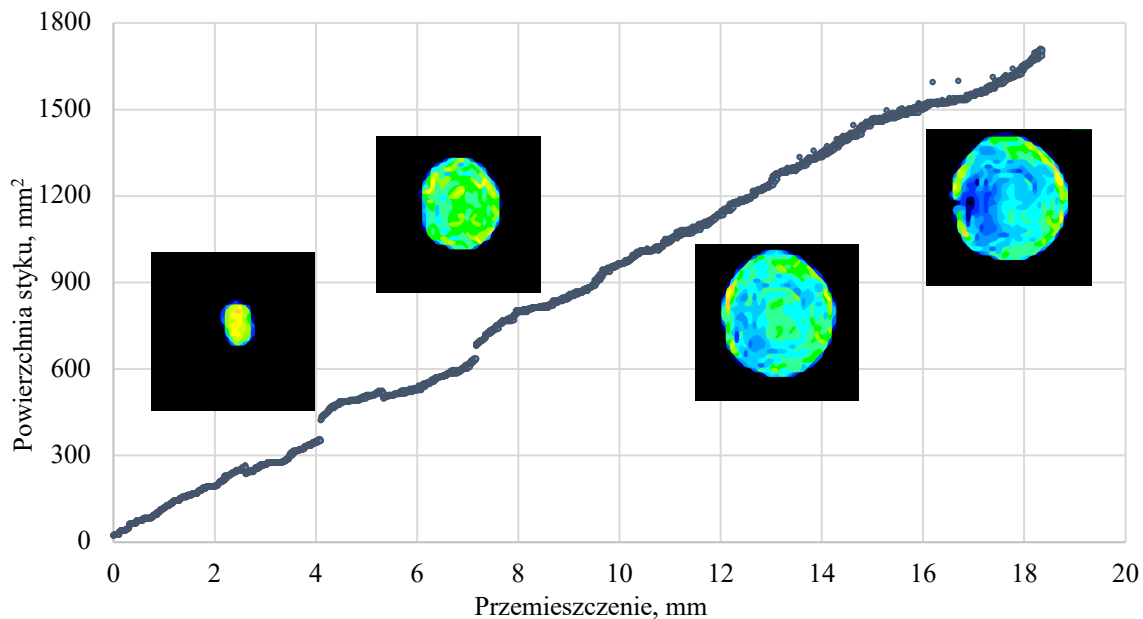
**Przemieszczenie w funkcji obciążenia** dla całych owoców wyznaczono w teście ściskania. Jabłka zostały obciążone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 w warunkach quasi-statycznych, przy prędkości obciążenia wynoszącej  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Na tej podstawie otrzymano wykresy siły w funkcji przemieszczenia, których przykład wraz z metodą uśrednienia pięciu powtórzeń danych w obrębie jednego z etapów dojrzałości owoców przedstawiono na rysunku 17. Uśrednione wykresy posłużyły następnie do walidacji modeli dyskretnych.



Rysunek 17. Przykładowe wyniki testów ściskania jabłek wraz z wykresem stanowiącym średnią z pięciu powtórzeń (opracowanie własne)

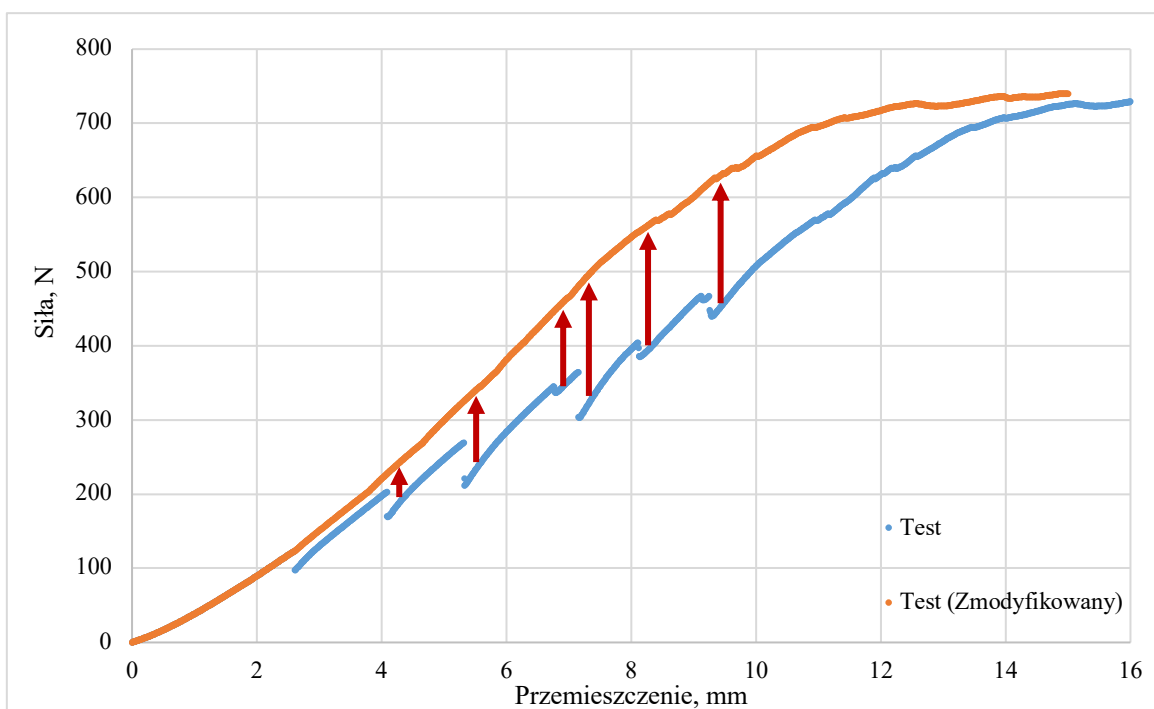
**Powierzchnie styku w funkcji obciążenia** wyznaczono przy pomocy urządzenia pomiarowego Tekscan I-Scan VHS System (Tekscan, Boston, Massachusetts, USA), w celu pozyskania danych do walidacji modeli MES. Wykres powierzchni styku w funkcji obciążenia wraz z przykładowymi warstwicami nacisków przedstawiono na rysunku 18. Powierzchnie styku odczytywano na podstawie warstwic nacisków w przedziałach co 50 N. Wyniki pomiarów powierzchni styku dla poszczególnych sił uśredniono w obrębie

poszczególnych etapów dojrzałości i porównano je z wynikami warstw nacisków modeli dyskretnych.



Rysunek 18. Wykres zmian powierzchni styku jabłek w funkcji przemieszczenia elementu roboczego wraz z przykładowymi warstwicami (opracowanie własne)

W związku z tym, że charakterystyczny dla świeżych owoców proces pęknięcia tkanki parenchymy (charakteryzujący się lokalnymi spadkami siły) uniemożliwia interpretację sprężystych właściwości materiału, dokonano modyfikacji wykresów, polegającej na usunięciu lokalnych spadków sił. Uzyskano w ten sposób wykresy adekwatne dla materiału sprężystego.



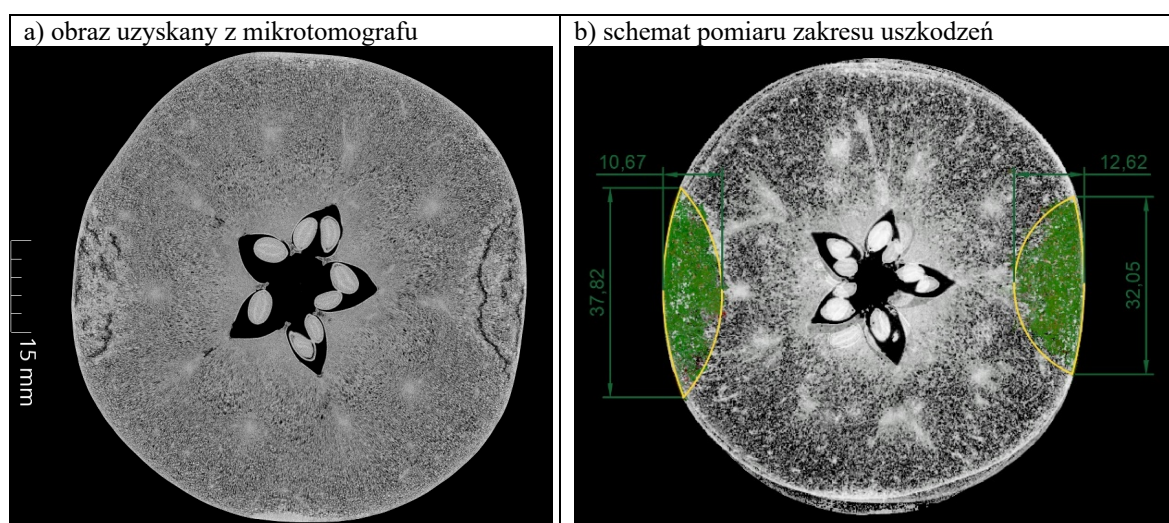
Rysunek 19. Metoda modyfikacji danych testowych (opracowanie własne)

Modyfikacja ta umożliwiła pozyskanie danych, które zostały uśrednione przy użyciu metody zaprezentowanej na [rysunku 19](#) i wykorzystane do walidacji modeli sprężystych ([rozdział 8.1.1](#)).

#### 5.4. Wyznaczenie zakresu uszkodzeń owoców na podstawie zdjęć mikrotomograficznych

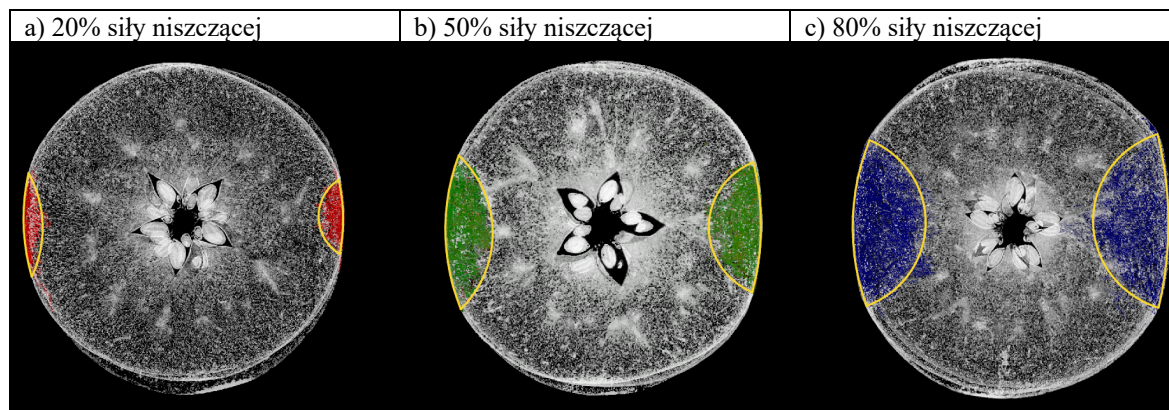
Na podstawie wyników testów ściskania jabłek na etapie dojrzałości zbiorczej ([rozdział 5.3.3](#)) wyznaczono średnią wartość obciążenia niszczącego owoc. Wartość tę wykorzystano w celu wyznaczenia zakresu uszkodzeń owoców na wszystkich etapach dojrzałości, które poddano obciążeniom wynoszącym 20%, 50% i 80% średniej siły niszczącej. Wartość sił wyniosła odpowiednio 146 N, 365 N i 585 N. Jabłka zostały obciążone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 w warunkach quasi-statycznych, przy prędkości obciążania wynoszącej  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Bezpośrednio po obciążeniu owoce zostały poddane skanowaniu z wykorzystaniem mikrotomografu komputerowego GE phoenix v tome x (General Electrics, Karolina Północna, USA) przy następujących parametrach: moc lampy 100 kV, natężenie prądu 400 A, liczba klatek 3000, czas skanowania jednej klatki 0,33 ms, wyciągnięcie średniej z 2 klatek. W rezultacie pozwoliło to na osiągnięcie rozdzielczości woksela wynoszącej 0,1 mm ([Rys. 20a](#)). Zakres uszkodzeń został zmierzony przy pomocy oprogramowania VG Studio MAX (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Niemcy). Schemat pomiaru i oznaczania zakresu uszkodzeń parenchymy jabłek przedstawiono na [rysunku 20b](#).



Rysunek 20. Metoda wyznaczania stref uszkodzeń jabłka: a) oryginalne zdjęcie skanu, b) zdjęcie poddane analizie obrazu (opracowanie własne)

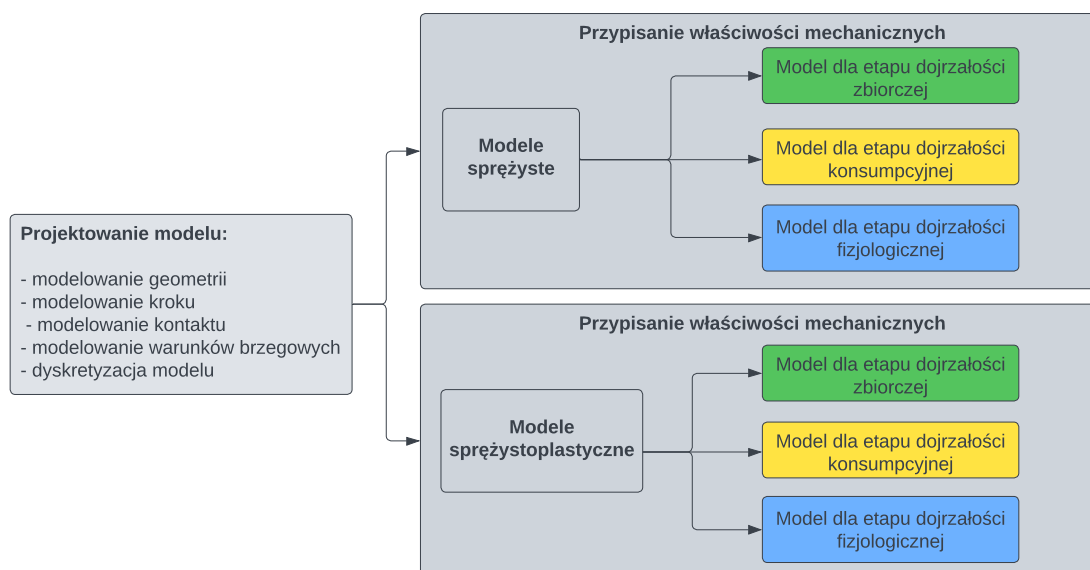
Rysunek 21 przedstawia przykładowe obrazy mikrotomograficzne z zaznaczonymi zakresami uszkodzeń jabłek, dla ustalonych wartości sił obciążających.



Rysunek 21. Przykładowy zakres uszkodzeń jabłek dla różnych wartości siły obciążającej (opracowanie własne)

### 5.5. Budowa modeli MES

W ramach pracy wykonano 6 wariantów modeli dyskretnych jabłek odmiany Chopin: modele sprężyste oraz sprężystoplastyczne dla trzech etapów dojrzałości owoców (zbiorczej, konsumpcyjnej i fizjologicznej). Geometria modeli, definicja kroku analizy, charakterystyka kontaktu, warunki brzegowe oraz dyskretyzacja modeli były dla wszystkich wariantów identyczne. Modele te różniły się jedynie właściwościami materiałowymi. Modele wykonano w programie Abaqus CAE. Schemat procesu budowy modeli dyskretnych przedstawiono na [rysunku 22](#).

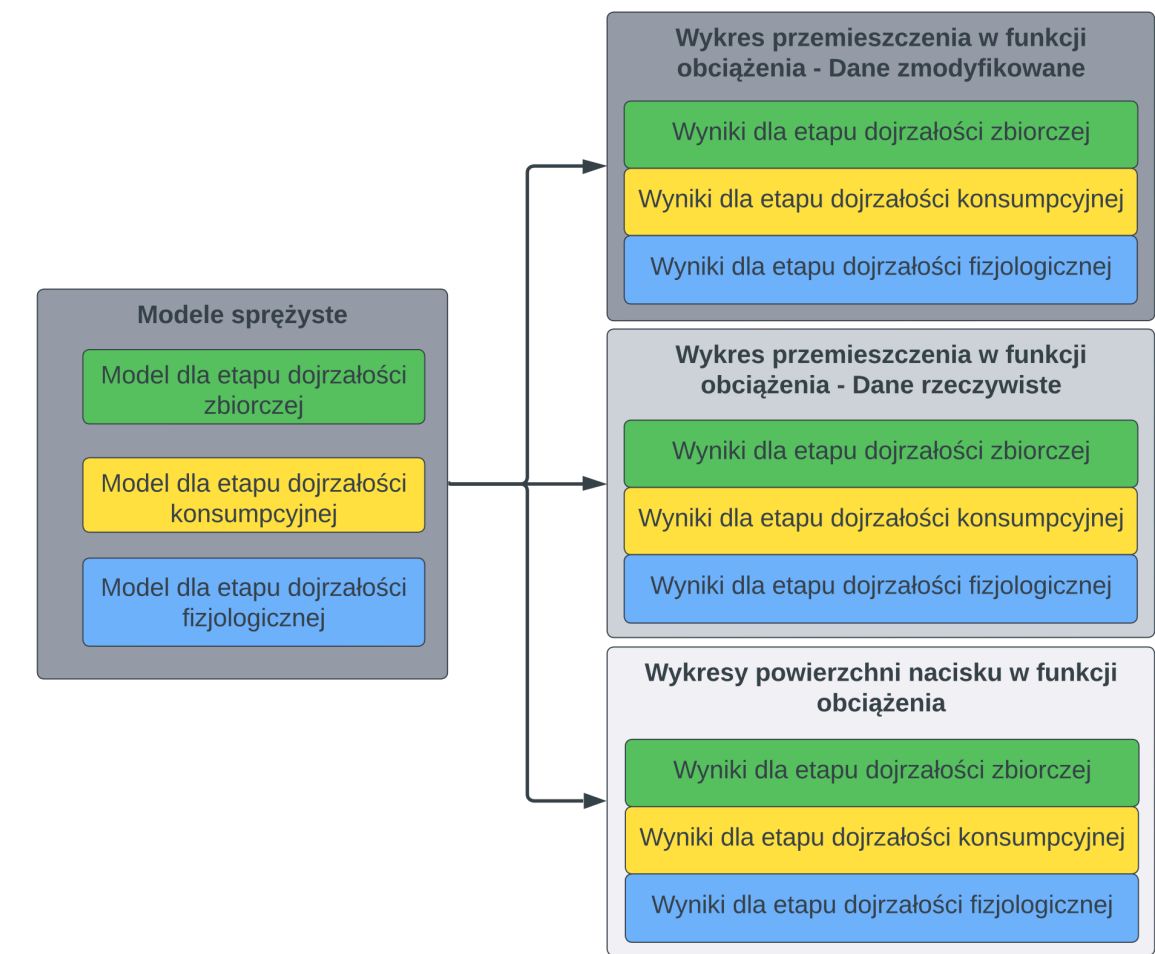


Rysunek 22. Schemat procesu budowy modeli dyskretnych (opracowanie własne)

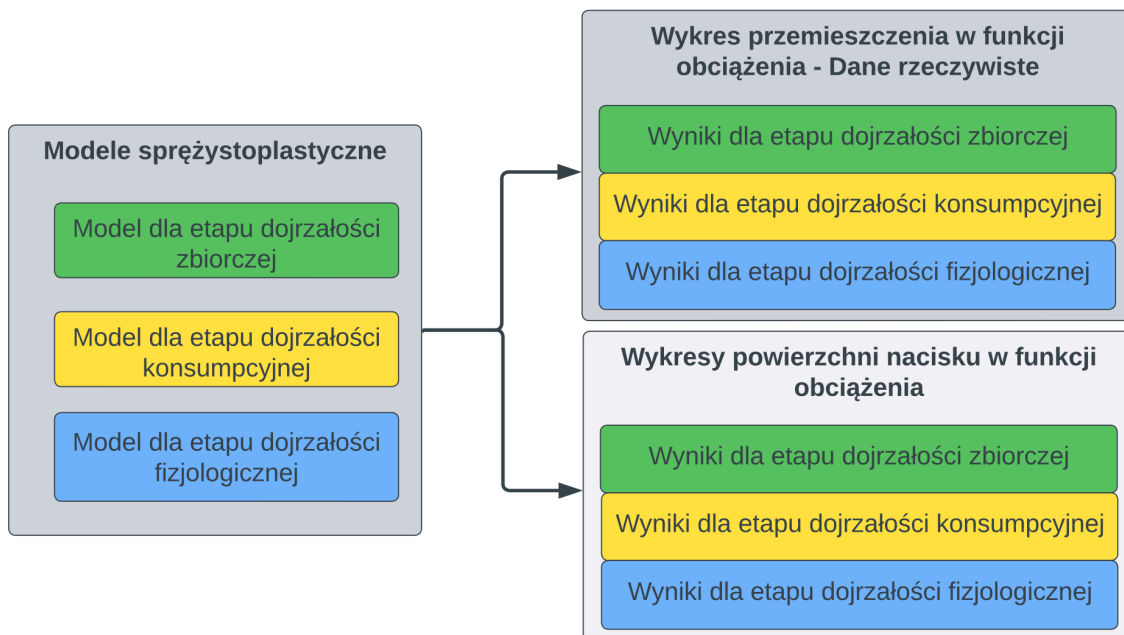
## 5.6. Walidacja modeli MES

Modele MES dla wszystkich wariantów poddano walidacji, w oparciu o wykresy rozrzutu, z wykorzystaniem wyników uzyskanych w testach ściskania całych jabłek (rozdział 6.3.1) oraz zmiany powierzchni styku w funkcji obciążenia (rozdział 6.3.2). W związku z ułożeniem danych testowych, do procesu walidacji łatwiej było pozyskać uporządkowane wartości przemieszczeń w funkcji siły niż siły w funkcji przemieszczenia. Dlatego też zdecydowano się oprzeć walidację o wartości przemieszczeń.

Walidację modeli sprężystych przeprowadzono dodatkowo w oparciu o zmodyfikowane wykresy wartości przemieszczeń w funkcji obciążenia, odzwierciedlające wyłącznie sprężyste właściwości materiału. Walidacja przeprowadzana była w obrębie konkretnego etapu dojrzałości owoców. Schemat procesu walidacji modelu sprężystego przedstawiono na rysunku 23 natomiast schemat walidacji modelu sprężystoplastycznego przedstawiono na rysunku 24.



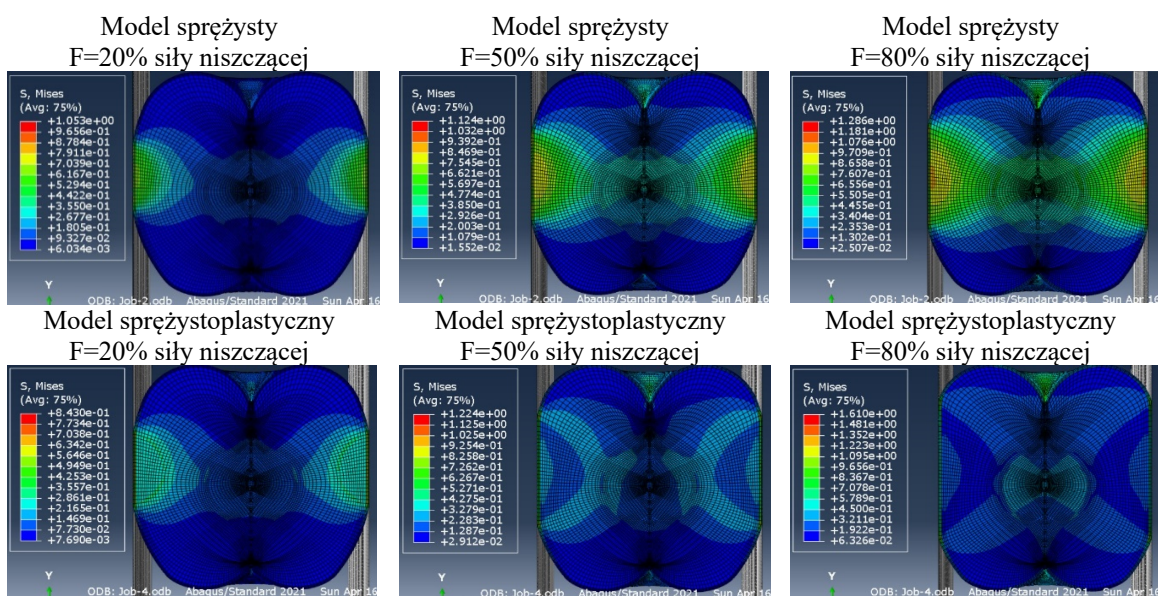
Rysunek 23. Schemat procesu walidacji modeli sprężystych (opracowanie własne)



Rysunek 24. Schemat procesu walidacji modeli sprężystoplastycznych (opracowanie własne)

### 5.7. Metodyka wyznaczenia naprężeń niszczących

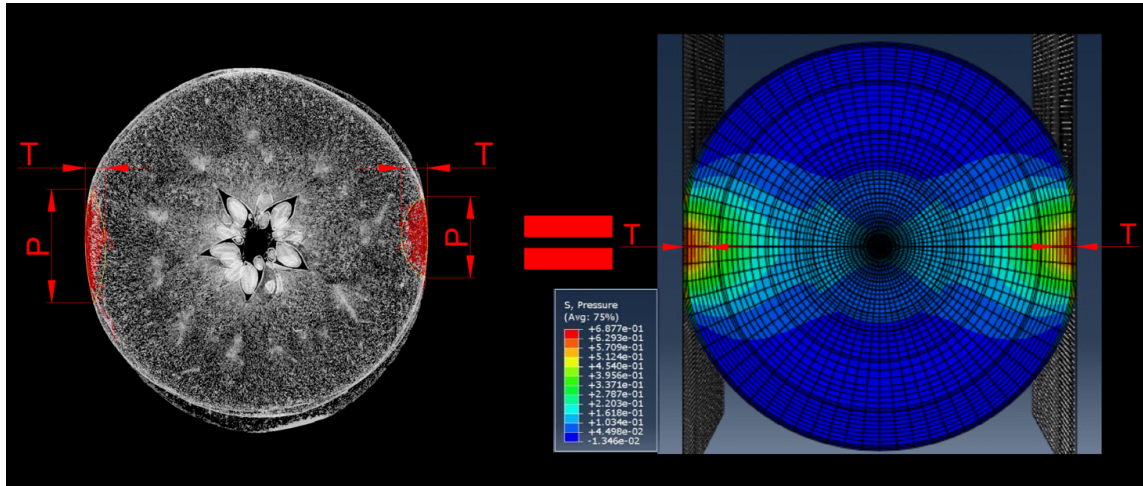
Na podstawie wyznaczonych głębokości uszkodzeń (rozdział 6.3.3) poddano analizie naprężenia wewnętrzne występujące w modelach. W tym celu wykorzystano sondę, która sprawdzała naprężenia we wskazanych węzłach modelu, na głębokościach wyznaczonych w badaniach empirycznych. Na tej podstawie uzyskano wartości naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystych i sprężystoplastycznych (Rys. 25).



Rysunek 25. Przykładowe wyniki warstwic naprężeń dla modelu sprężystego i sprężystoplastycznego (opracowanie własne)



Uzyskane wyniki następnie zestawiono i porównano w rozdziale 9.3 z naprężeniami niszczącymi tkankę parenchymy, uzyskanymi w badaniach empirycznych (rozdział 6.2.1). Rysunek 26 ilustruje metodę porównania obrazów tomograficznych z naprężeniami Hubera-Misesa występującymi w modelu.



Rysunek 26. Metoda wyznaczania naprężeń niszczących parenchymę (opracowanie własne)

## 6. Wyniki badań

### 6.1. Indeks Streifa oraz właściwości fizykochemiczne owoców

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań jędrności, zawartości ekstraktu i indeksu skrobiowego oraz wyznaczonego na ich podstawie indeksu Streifa, w poszczególnych terminach zbioru.

Tabela 1. Wyniki badań indeksu Streifa dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców

Etap dojrzałości	Jędrność, kG	Odchylenie standardowe
Dojrzałość zbiorcza	7,4	±0,24
Dojrzałość konsumpcyjna	6,9	±0,16
Dojrzałość fizjologiczna	5,8	±0,8
Etap dojrzałości	Zawartość ekstraktu, °Brix	Odchylenie standardowe
Dojrzałość zbiorcza	11,6	±0,49
Dojrzałość konsumpcyjna	14,0	±0,25
Dojrzałość fizjologiczna	14,6	±0,97
Etap dojrzałości	Indeks skrobiowy	Odchylenie standardowe
Dojrzałość zbiorcza	5	±0,6
Dojrzałość konsumpcyjna	7	±0,4
Dojrzałość fizjologiczna	9	±1,1
Etap dojrzałości	Indeks Streifa	
Dojrzałość zbiorcza	0,12	
Dojrzałość konsumpcyjna	0,07	
Dojrzałość fizjologiczna	0,04	

Na podstawie tabeli 1 można stwierdzić, że jędrność malała wraz z etapem rozwoju fizjologicznego, zawierając się w przedziale od 5,8 kG do 7,4 kG. Zawartość ekstraktu, podobnie jak indeks skrobiowy, wzrastały wraz z dojrzałością owoców. Dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej i fizjologicznej wartości były zbliżone i wyniosły kolejno 14,00°Brix i 14,06°Brix przy czym dla dojrzałości zbiorczej zawartość ekstraktu wyniosła 11,6°Brix. Wartości indeksu Streifa wyniosły 0,12 dla etapu dojrzałości zbiorczej, 0,07 dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej i 0,04 dla etapu dojrzałości fizjologicznej.

Tabela 2 przedstawia parametry owoców, które posłużyły do budowy modeli dyskretnych. Ponadto zmierzono średnie wymiary gniazd nasiennych owoców, których średnia wartość średnicy wyniosła 32 mm przy odchyleniu standardowym ±2,1 mm, natomiast średnia wartość wysokości wyniosła 39 mm przy odchyleniu standardowym ±3,06 mm.

Tabela 2. Wyniki pomiarów gęstości i wymiarów całych owoców

Etap dojrzałości	Objętość, kg·m <sup>3</sup>	Odchylenie standardowe	Średnica, mm	Odchylenie standardowe	Wysokość, mm	Odchylenie standardowe
Dojrzałość zbiorcza	995,16	±10,96	76,95	±1,16	64,56	±2,17
Dojrzałość konsumpcyjna	1037,21	±18,56	78,48	±1,83	63,79	±3,44
Dojrzałość fizjologiczna	1047,22	±20,24	77,88	±1,71	65,51	±3,58

Tabela 3 prezentuje wyniki właściwości chemicznych dla owoców zbieranych w poszczególnych terminach.

Tabela 3. Wyniki badań właściwości fizykochemicznych dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców

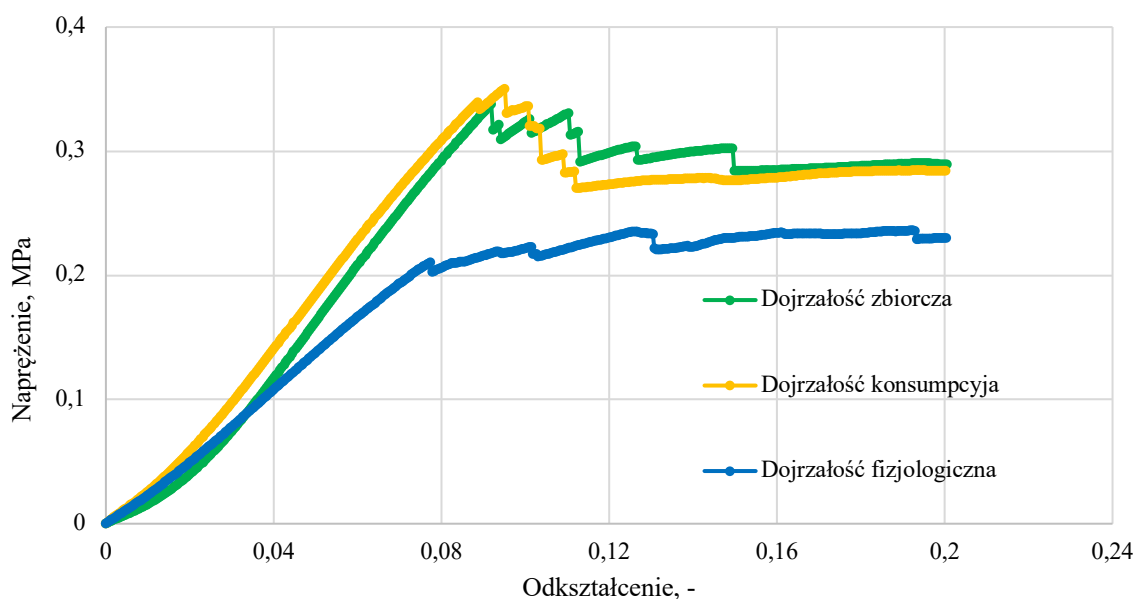
Etap dojrzałości	Kwasowość, % kwasu jabłkowego	Odchylenie standardowe, %
Dojrzałość zbiorcza	66	±5,89
Dojrzałość konsumpcyjna	83	±3,12
Dojrzałość fizjologiczna	78	±10,04
Etap dojrzałości	Zawartość wody, %	Odchylenie standardowe, %
Dojrzałość zbiorcza	85,57	±4,20
Dojrzałość konsumpcyjna	84,10	±1,80
Dojrzałość fizjologiczna	83,42	±4,30
Etap dojrzałości	Zawartość pektyn, %	Odchylenie standardowe, %
Dojrzałość zbiorcza	9,53	±0,28
Dojrzałość konsumpcyjna	7,20	±0,05
Dojrzałość fizjologiczna	4,07	±0,48

Najniższą zawartością kwasu jabłkowego, na poziomie 66%, charakteryzowały się owoce na etapie dojrzałości zbiorczej, z kolei najwyższą jego zawartość, wynoszącą 83%, osiągnęły owoce na etapie dojrzałości konsumpcyjnej. Na etapie dojrzałości fizjologicznej zawartość kwasu jabłkowego zmalała do 78%. Zawartość wody w owocach malała wraz z ich rozwojem fizjologicznym, zawierając się w przedziale od 83,42 do 85,57%. Zawartość pektyn w owocach malała wraz z ich dojrzałością osiągając następujące wartości: 9,53% dla etapu dojrzałości zbiorczej; 7,2% dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej i 4,07% dla etapu dojrzałości fizjologicznej.

## 6.2. Właściwości wytrzymałościowe tkanek

### 6.2.1. Właściwości parenchymy

Na [rysunku 27](#) przedstawiono uśrednione wykresy wyników pomiarów właściwości wytrzymałościowych tkanki parenchymy dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego jabłek. Wykonane one zostały w oparciu o wykresy siły w funkcji przemieszczenia i wymiary geometryczne próbki.



Rysunek 27. Wykresy średnich wartości naprężeń w funkcji odkształcenia tkanki parenchymy na poszczególnych etapach rozwoju fizjologicznego owoców

Na podstawie [rysunku 27](#) można stwierdzić, że tkanka parenchymy na etapie dojrzałości fizjologicznej charakteryzowała się najniższą wartością naprężeń niszczących, znaczenie odbiegającą od wartości naprężeń niszczących uzyskanych dla pozostałych stadiów rozwoju owoców.

Tkanka parenchymy na etapie dojrzałości konsumpcyjnej charakteryzowała się najwyższą wartością naprężeń niszczących. Wykazała również najwyższą sztywność, szczególnie w początkowym etapie procesu ściskania. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę wartości naprężeń niszczących, różnica pomiędzy etapem dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej była nieznaczna, mieszcząc się w granicy odchylenia standardowego. Początkowy etap przebiegu wykresu sprawił, że moduł sprężystości próbki parenchymy na etapie dojrzałości konsumpcyjnej był nieco wyższy od modułu sprężystości dla etapu dojrzałości zbiorczej ([tabela 4](#)). Na szczególną uwagę zasługuje fragment wykresu po przekroczeniu maksymalnych wartości naprężeń niszczących. Na wykresie można zauważyć, że tkanka, która początkowo wykazała się wyższą sztywnością, przenosi niższe

obciążenia od tkanki o niższym module sprężystości. Ta zależność miała kluczowe znaczenie w procesie modelowania materiału sprężystoplastycznego (rozdział 7.1.2).

Tabela 4. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych parenchymy

Etap dojrzałości	Odształcenie, -	Odchylenie standardowe	Naprężenie, MPa	Odchylenie standardowe	Moduł sprężystości, MPa	Odchylenie standardowe
Dojrzałość zbiorcza	0,085	±0,012	0,43	±0,085	5,04	±0,75
Dojrzałość konsumpcyjna	0,090	±0,018	0,42	±0,040	5,12	±0,86
Dojrzałość fizjologiczna	0,084	±0,010	0,32	±0,047	3,85	±0,78

Dla etapu dojrzałości zbiorczej naprężenia niszczące wyniosły 0,43 MPa przy module sprężystości 5,04 MPa. Z kolei dla dojrzałości konsumpcyjnej wartości wynosiły kolejno 0,42 MPa i 5,12 MPa. Tkanka na etapie dojrzałości fizjologicznej wykazała najniższą średnią wartość naprężeń niszczących wynoszącą 0,32 MPa oraz moduł sprężystości wynoszący 3,85 MPa.

W Tabeli 5 przedstawiono średnie wartości stałych Poissona, które zostały wykorzystane jako właściwości materiałowe niezbędne do budowy modeli dyskretnych owoców na poszczególnych etapach rozwoju fizjologicznego.

Tabela 5. Wyniki pomiarów współczynnika Poissona dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców

Etap dojrzałości	Wartość współczynnika Poissona, -	Odchylenie standardowe, -
Dojrzałość zbiorcza	0,25	± 0,03
Dojrzałość konsumpcyjna	0,21	±0,07
Dojrzałość fizjologiczna	0,35	±0,1

Najniższą wartość współczynnika Poissona wynoszącą 0,21 osiągnęły owoce na etapie dojrzałości konsumpcyjnej. Owoce na etapie dojrzałości zbiorczej charakteryzowały się nieco większą podatnością na odkształcenia poprzeczne, współczynnik Poissona dla tego etapu dojrzałości wyniósł 0,25. Najwyższym współczynnikiem Poissona charakteryzowały się natomiast owoce na etapie dojrzałości fizjologicznej, dla których wartość współczynnika wyniosła 0,35.

### 6.2.2. Właściwości tkanki epidermy

W tabeli 6 przedstawiono średnie z wyników odkształceń, naprężeń i modułów sprężystości epidermy, wyznaczonych na podstawie siły niszczącej. Wyniki następnie wykorzystano do określenia właściwości materiałowych modelu (rozdział 7.1.2).

Tabela 6. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych epidermy

Etap dojrzałości	Odkształcenie, -	Odchylenie standardowe	Naprężenie, MPa	Odchylenie standardowe	Moduł sprężystości, MPa	Odchylenie standardowe
Dojrzałość zbiorcza	0,072	±0,039	0,77	±0,31	10,78	±2,26
Dojrzałość konsumpcyjna	0,12	±0,021	0,85	±0,25	7,18	±1,29
Dojrzałość fizjologiczna	0,17	±0,042	0,89	±0,27	5,23	±1,86

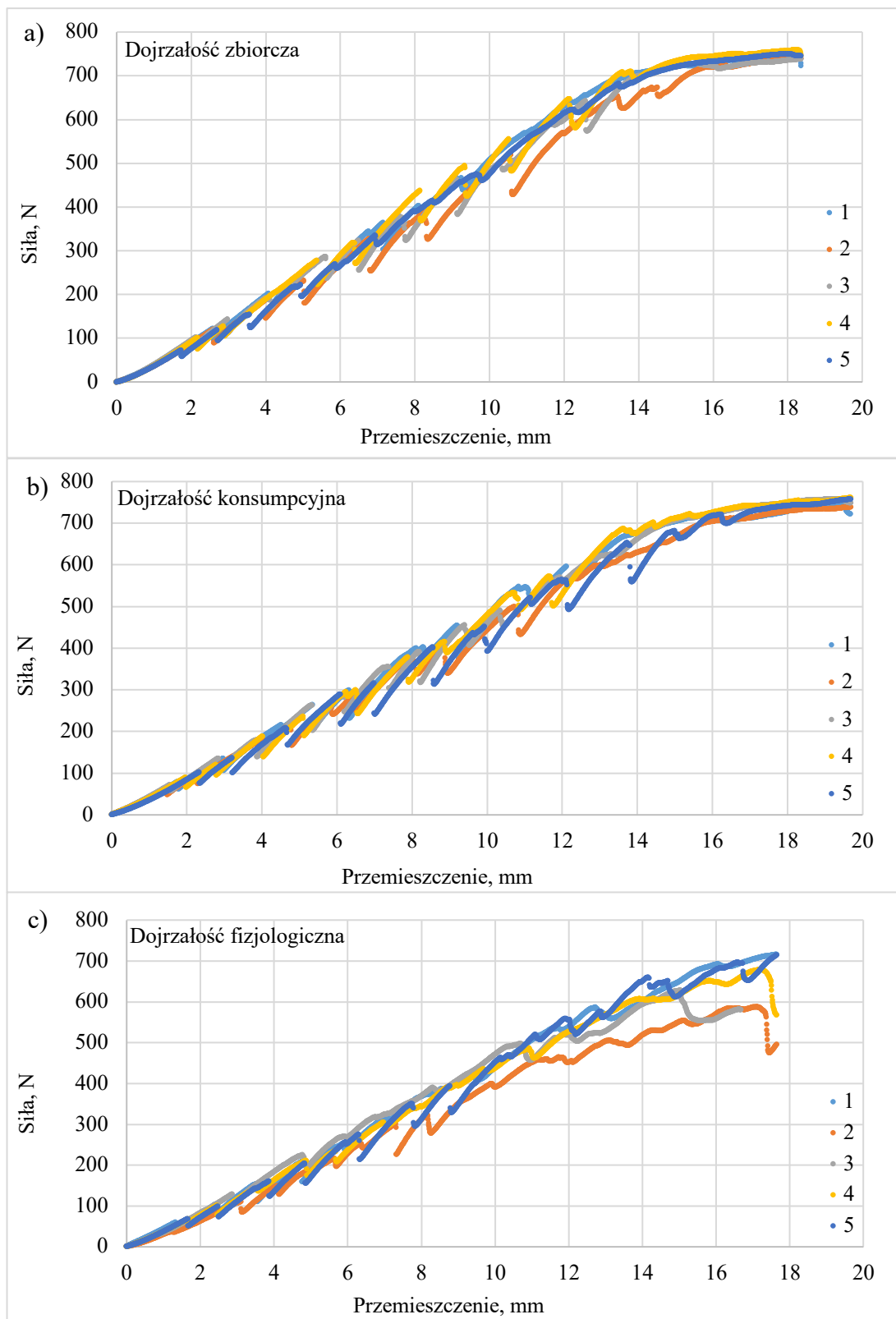
Wartości naprężeń niszczących dla etapu dojrzałości zbiorczej, konsumpcyjnej i fizjologicznej wyniosły kolejno 0,77 MPa, 0,85 MPa i 0,89 MPa. Moduł sprężystości malał wraz z dojrzałością owoców wynosząc 10,78 MPa dla owoców na etapie dojrzałości zbiorczej, 7,18 MPa dla owoców na etapie dojrzałości konsumpcyjnej i 5,23 MPa dla owoców na etapie dojrzałości fizjologicznej.

Podczas pomiarów właściwości wytrzymałościowych mierzono także grubość skórki owoców w celu wyznaczenia naprężeń niszczących. Średnia grubość skórki wynosiła 0,6 mm (odchylenie standardowe przy 30 powtórzeniach wyniosło ±0,05 mm). Wartość ta została wykorzystana do budowy modeli dyskretnych (rozdział 7.1.1).

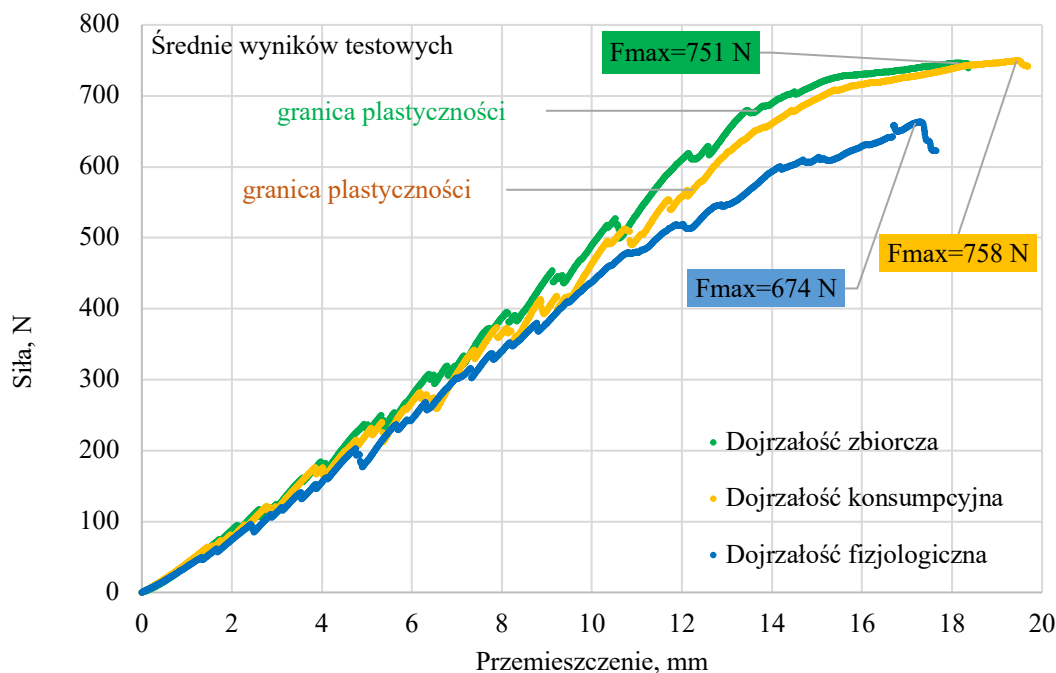
### 6.3. Test ściskania całych owoców

#### 6.3.1. Wykres siły w funkcji przemieszczenia

Na rysunku 28a,b,c przedstawiono wyniki testów całych owoców w postaci wykresów siły w funkcji przemieszczenia, dla 5 powtórzeń. Z kolei rysunek 29 przedstawia ich wartości uśrednione.



Rysunek 28. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia w teście ściskania dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców



Rysunek 29. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia w teście ściskania zawierające średnie wyników dla poszczególnych etapów dojrzałości

Na podstawie [rysunków 28 i 29](#) można stwierdzić, że częstość lokalnych spadków siły (wynoszących powyżej 10 N) podczas procesu ściskania występowała znacznie częściej dla owoców na etapie dojrzałości konsumpcyjnej, niż w przypadku owoców na etapie dojrzałości zbiorczej. Ponadto przebiegi wykresów dla dojrzałości konsumpcyjnej charakteryzowały się wyższą sztywnością, ale i większymi spadkami lokalnymi siły, przez co owoce te osiągały granicę plastyczności przy niższej wartości siły niż owoce na poziomie dojrzałości zbiorczej. Jest to wyraźnie widoczne na [rysunku 29](#).

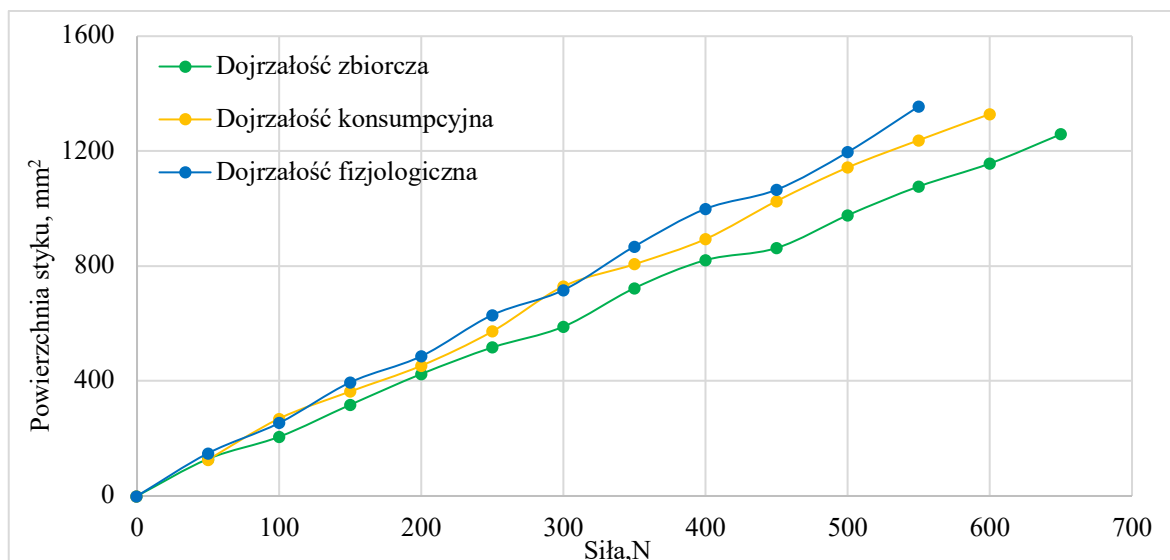
Owoce na etapie dojrzałości konsumpcyjnej osiągnęły wyższą siłę niszczącą wynoszącą 758 N, podczas gdy siła niszcząca dla owoców na etapie dojrzałości zbiorczej wyniosła 751 N, przy wartości przemieszczenia mniejszej o 1,2 mm. Pomimo osiągnięcia granicy plastyczności przy niższej wartości siły i przemieszczenia, owoce na etapie dojrzałości konsumpcyjnej charakteryzował znacznie dłuższy przebieg odkształceń plastycznych.

Owoce na etapie dojrzałości fizjologicznej charakteryzowała znacznie niższa wartość siły niszczącej, wynosząca 674 N. Zachowanie materiału miało raczej charakter plastyczny niż sprężysty, z mniejszą ilością oraz wielkością lokalnych spadków siły. Wyznaczenie granicy plastyczności w przypadku procesu ściskania całych jabłek na tym etapie dojrzałości było niemożliwe.



### 6.3.2. Zależność powierzchni styku jako funkcja obciążenia

Rysunek 30 przedstawia uśrednione wyniki warstwic nacisków powierzchniowych w teście ściskania całych owoców dla 5 powtórzeń. Średnie wartości wyników zestawiono w tabeli 7.



Rysunek 30. Wykresy średnich powierzchni styku jabłek w funkcji siły na poszczególnych etapach rozwoju fizjologicznego

Tabela 7. Zestawienie uśrednionych wartości wyników pomiaru powierzchni styku w teście ściskania owoców

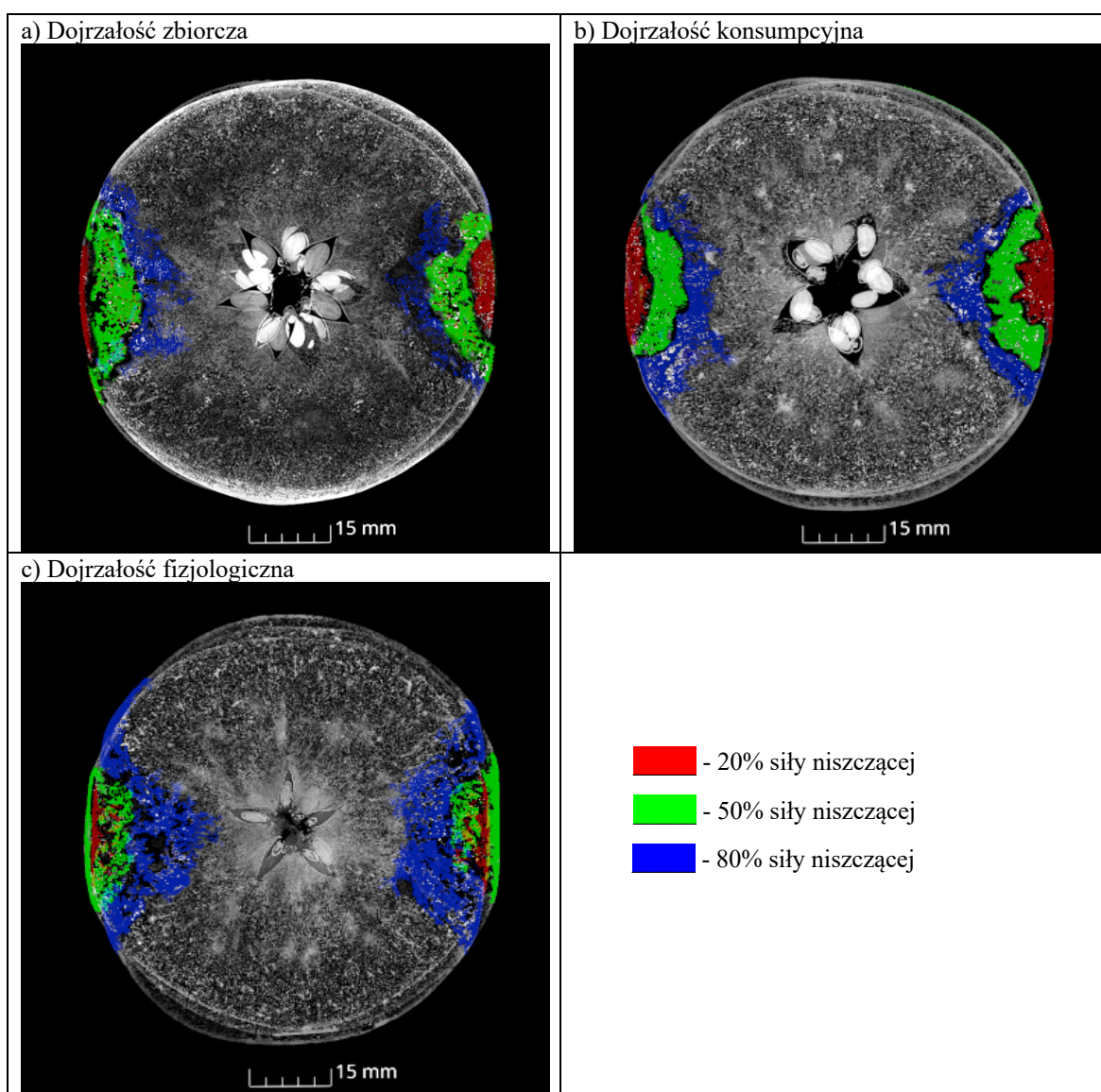
Siła, N	Dojrzałość zbiorcza	Dojrzałość konsumpcyjna	Dojrzałość fizjologiczna
	Powierzchnia nacisku, mm <sup>2</sup>		
0	0	0	0
50	129	126	149
100	206	269	254
150	317	364	395
200	424	453	486
250	517	573	630
300	589	730	717
350	723	807	869
400	821	894	999
450	863	1026	1066
500	977	1143	1197
550	1077	1238	1356
600	1157	1329	-
650	1259	-	-

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że owoce na etapie dojrzałości fizjologicznej charakteryzowały się większymi powierzchniami nacisku od pozostałych próbek, co świadczy o większej skłonności do odkształcania się materiału pod wpływem działających nań sił. Średnia powierzchnia styku owoców na etapie dojrzałości

fizjologicznej wyniosła 1356 mm<sup>2</sup> przy sile 550 N, podczas gdy dla najświeższych owoców wartość nacisków w tej sile wyniosła 1077 mm<sup>2</sup>, a dla owoców na etapie dojrzałości konsumpcyjnej 1238 mm<sup>2</sup>. Różnica ta jest widoczna już na początkowym etapie testu, podobnie jak różnica pomiędzy dojrzałością konsumpcyjną a zbiorczą, podczas gdy najświeższe owoce charakteryzują się najwyższą odpornością na odkształcenia pomimo nieznacznie niższego moduły sprężystości wyznaczonego w testach.

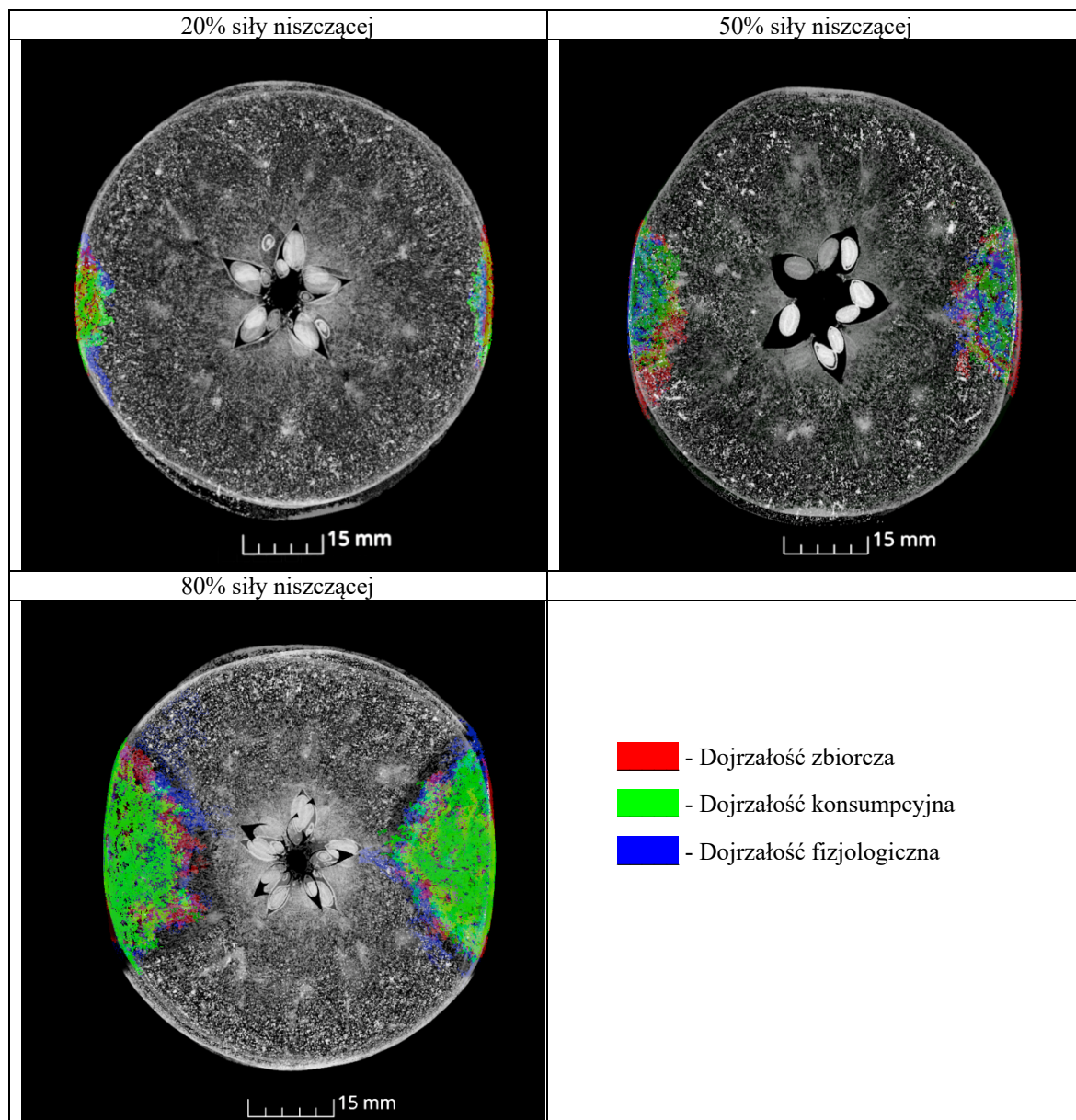
### 6.3.3. Zakres uszkodzeń owoców

Rysunek 31 przedstawia analizę obrazów mikrotomograficznych z wyznaczeniem zakresów uszkodzeń owoców na poszczególnych etapach rozwoju fizjologicznego, poddanych działaniu 20%, 50% i 80% siły niszczącej. Kolorami zaznaczono zakresy uszkodzeń dla poszczególnych sił obciążenia.



Rysunek 31. Wpływ wartości siły niszczącej na zakres uszkodzeń owoców

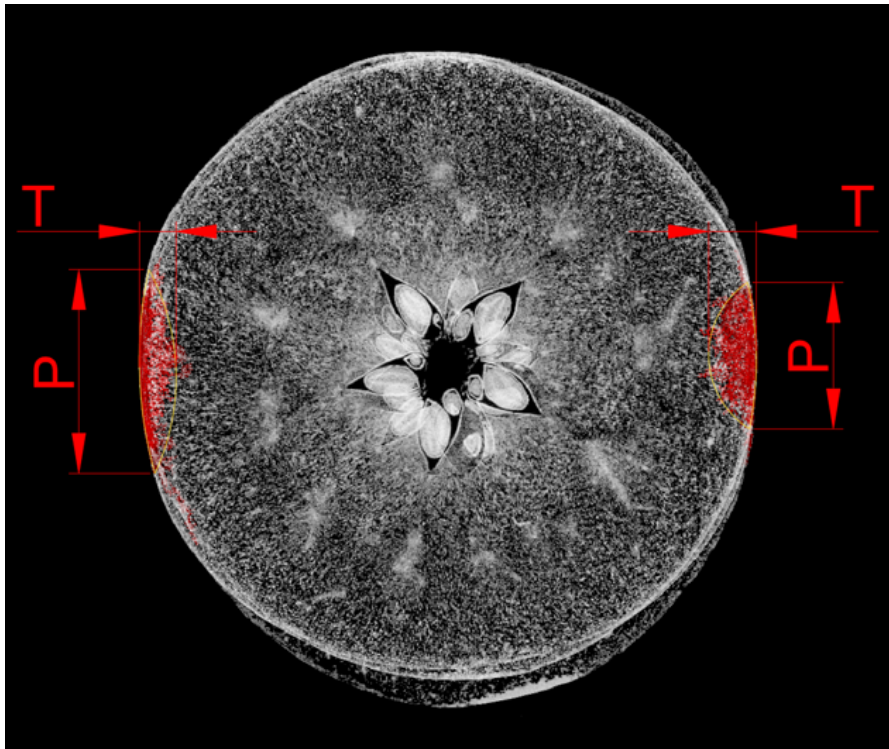
Na [rysunku 32](#) przedstawiono analizę obrazów mikrotomograficznych z wyznaczeniem zakresów uszkodzeń owoców poddanych działaniu 20%, 50% i 80% siły niszczącej. Kolorami zaznaczono zakresy uszkodzeń dla poszczególnych etapów dojrzałości owoców.



Rysunek 32. Wpływ etapu dojrzałości na zakres uszkodzeń owoców

Na podstawie [rysunku 31](#) można stwierdzić, że na zakres uszkodzeń wpływa wartość siły obciążającej, natomiast na podstawie [rysunku 32](#) nie można stwierdzić wpływu etapu dojrzałości na zakres uszkodzeń.

Na [rysunku 33](#) przedstawiono sposób wyznaczania wymiarów strefy uszkodzeń owoców. [Tabela 8](#) zawiera wyniki pomiarów zakresu uszkodzeń owoców wyznaczone na podstawie zdjęć mikrotomograficznych.



Rysunek 33. Metoda pomiaru zakresu uszkodzeń owoców

Tabela 8. Wymiary zakresu uszkodzeń owoców wyznaczone na podstawie zdjęć mikrotomograficznych

Etap dojrzałości	Siła niszcząca, %	Wymiary strefy zniszczenia tkanki parenchymy	
		Głębokość (T), mm	Średnica (P), mm
Dojrzałość zbiorcza	20	3,10	23,63
	50	11,50	29,38
	80	17,83	33,38
Dojrzałość konsumpcyjna	20	3,97	22,78
	50	10,85	28,74
	80	18,26	39,84
Dojrzałość fizjologiczna	20	3,57	22,83
	50	8,27	29,88
	80	18,31	39,05

Głębokość uszkodzeń, podobnie jak ich średnica, wzrastała wraz z zadawaną siłą. Dla 20% siły niszczącej (wynoszącej 146 N) głębokości obić wahały się w granicach 3,1-3,97 mm, natomiast średnice uszkodzeń wyniosły 22,83-23,63 mm. Dla wartości obciążenia wynoszącego 50% siły niszczącej (365 N) głębokości zawierały się w przedziale 8,27-11,5 mm, natomiast średnice wahały się w granicach 28,74-29,88 mm. Wartość obciążenia stanowiąca 80% siły niszczącej (584 N) generowała uszkodzenia o głębokościach wahaających się w granicach 17,83-18,31 mm oraz średnicach zawierających się w przedziale 33,38-39,84 mm.

W związku z brakiem istotnego wpływu etapu dojrzałości na zakres uszkodzeń owoców, wyniki dla poszczególnych sił niszczących uśredniono. Na ich podstawie, przy pomocy modelu dyskretnego, wyznaczono naprężenia Hubera-Misesa występujące na granicy strefy uszkodzeń owoców uzyskanych w badaniach doświadczalnych. Tabela z uśrednionymi głębokościami (T) uszkodzeń tkanki parenchymy, które wykorzystano w badaniach opisanych w [rozdziale 9](#), została przedstawiona w [tabeli 9](#)).

Tabela 9. Średnie głębokości uszkodzeń owoców dla poszczególnych wartości sił

Siła niszcząca, %	Wartość siły niszczącej, N	Średnia głębokość (T), mm
20	146	3,55
50	365	10,21
80	584	18,13

## 7. Modele dyskretne jabłek

### 7.1. Założenia modeli dyskretnych jabłek

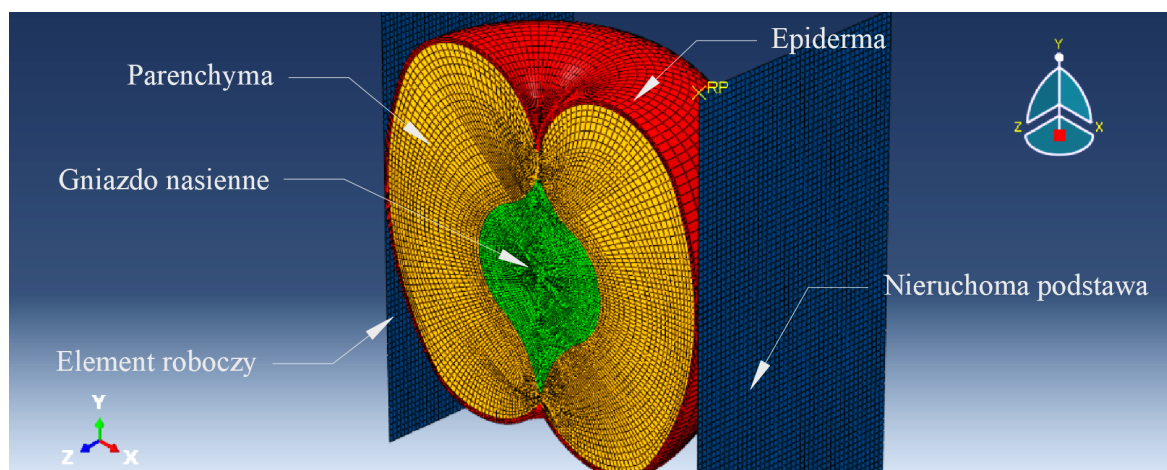
#### 7.1.1. Model geometryczny

W oparciu o uśrednione wyniki pomiarów geometrii jabłek (rozdział 5.2) zaprojektowano model owocu składający się z 3 elementów bryłowych 3D: gniazda nasiennego, tkanki parenchymy oraz epidermy o wymiarach podanych w tabeli 10.

Tabela 10. Podstawowe wymiary modelu i jego elementów

Średnica owocu	Wysokość owocu	Grubość epidermy	Średnica gniazda nasiennego	Wysokość gniazda nasiennego
mm				
77,5	64	0,6	32	39

Model zawierał również nieruchomą podstawę oraz ruchomy element roboczy. Obie płyty miały wymiary  $100 \times 50$  mm i były elementami powłokowymi typu 3D, o grubości 2 mm. Wyżej wymienione elementy modelu zostały opisane na rysunku 34.



Rysunek 34. Elementy wchodzące w skład modelu dyskretnego

### 7.1.2. Właściwości materiałowe tkanek

#### Właściwości sprężyste

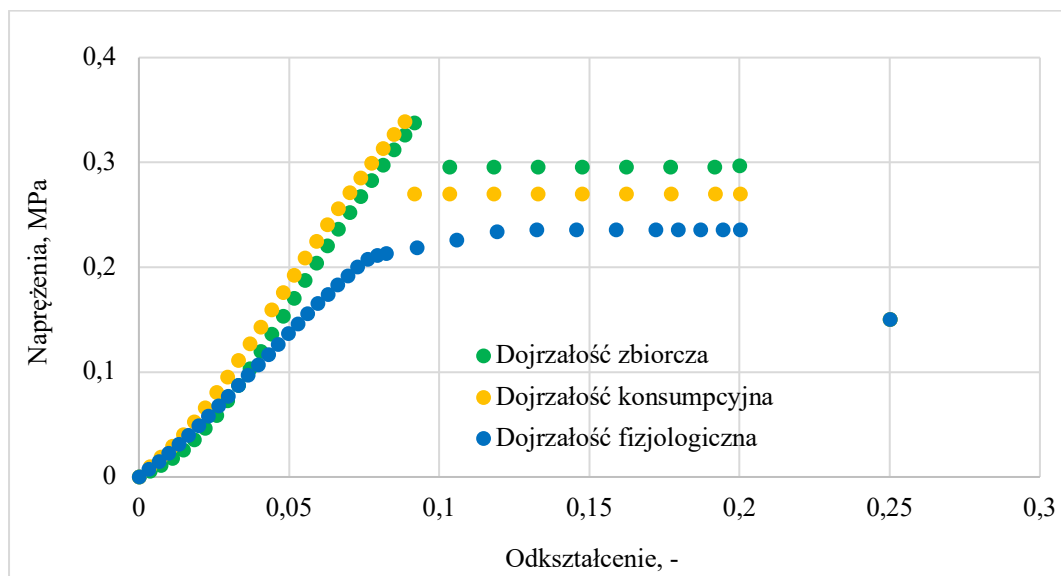
W tabeli 11 zawarto sprężyste właściwości materiałów dla poszczególnych elementów modelu owocu. Wartości modułów sprężystości dla parenchymy i skórki owoców zostały wyznaczone przy pomocy testów opisanych w rozdziałach 6.2.1 i 6.2.2. Z uwagi na to, że tkanka parenchymy odgrywa kluczową rolę w modelowaniu uszkodzeń owoców, do jej modelowania zastosowano wartości współczynników Poissona wyznaczone w testach. Z racji tego, że w badaniach gęstość wyznaczono dla całych owoców, podczas modelowania parenchymy, epidermy i gniazda nasiennego podano te same wartości gęstości, wyznaczone dla poszczególnych etapów dojrzałości owoców. Moduł sprężystości, współczynnik Poissona dla epidermy i gniazda nasiennego przyjęto w oparciu o dane literaturowe [125]. Wynikało to z uwagi na to, że różnice jakie mogłyby zaistnieć pomiędzy tymi parametrami nie wpływały w sposób istotny na rezultaty uzyskiwane podczas walidacji modeli dyskretnych. Dla nieruchomej podstawy oraz elementu roboczego przyjęto właściwości materiałowe charakterystyczne dla stali, odzwierciedlając rzeczywiste warunki pomiarowe. Modele, do budowy których wprowadzono dane określające wyłącznie właściwości sprężyste materiału, nazwano w dalszej części pracy modelami sprężystymi.

Tabela 11. Sprężyste właściwości materiałów przypisanych do poszczególnych elementów modelu

Parenchyma			
Etap dojrzałości	Moduł sprężystości, MPa	Stała Poissona, -	Gęstość, kg·m <sup>3</sup>
Dojrzałość zbiorcza	5,04	0,25	995
Dojrzałość konsumpcyjna	5,12	0,21	1037
Dojrzałość fizjologiczna	3,85	0,35	1047
Epiderma			
Etap dojrzałości	Moduł sprężystości, MPa	Stała Poissona, -	Gęstość, kg·m <sup>3</sup>
Dojrzałość zbiorcza	10,78	0,35	995
Dojrzałość konsumpcyjna	7,18	0,35	1037
Dojrzałość fizjologiczna	5,23	0,35	1047
Gniazdo nasienne			
Etap dojrzałości	Moduł sprężystości, MPa	Stała Poissona, -	Gęstość, kg·m <sup>3</sup>
Dojrzałość zbiorcza	20	0,35	995
Dojrzałość konsumpcyjna	20	0,35	1037
Dojrzałość fizjologiczna	20	0,35	1047
Stal			
	Moduł sprężystości, MPa	Stała Poissona, -	Gęstość, kg·m <sup>3</sup>
Stal	210 000	0,3	8000

### Właściwości sprężystoplastyczne

Na podstawie wyników pomiarów, przedstawionych w rozdziale 6.2.1, zmodyfikowano wykresy przebiegów naprężeń w funkcji odkształcenia w taki sposób, aby odzwierciedlały rzeczywiste dane i jednocześnie nie powodowały błędów występujących w trakcie kalibracji materiału (Rys. 35). W tym celu wygładzono przebiegi naprężeń występujące po etapie zniszczenia próbki. W następnym kroku wprowadzono dane do programu, co pozwoliło na wyznaczenie punktów plastycznych dla reszty przebiegów.



Rysunek 35. Dane zastosowane do kalibracji materiału sprężystoplastycznego

W tabeli 12 przedstawiono zmodyfikowane przez program obliczeniowy, wartości granic plastyczności i odkształceń plastycznych dla wyznaczonych punktów plastyczności. Modele do budowy których, oprócz danych określających właściwości sprężyste materiału, wprowadzono dane plastyczne, nazwano w dalszej części pracy modelami sprężystoplastycznymi.

Tabela 12. Właściwości plastyczne tkanki parenchymy

Dojrzałość zbiorcza	
Granica plastyczności, MPa	Odkształcenie plastyczne, -
0,29	0
0,29	$2,81 \cdot 10^{-4}$
0,15	0,21
Dojrzałość konsumpcyjna	
Granica plastyczności, MPa	Odkształcenie plastyczne, -
0,27	0
0,27	$2,62 \cdot 10^{-6}$
0,15	0,21
Dojrzałość fizjologiczna	
Granica plastyczności, MPa	Odkształcenie plastyczne, -



0,21	0
0,21	$2,62 \cdot 10^{-6}$
0,15	0,21

### 7.1.3. Modelowanie kroku analizy

Na tym etapie budowy modelu dyskretnego określono typ i czas trwania analizy oraz wielkość przyrostów (co dało możliwość określenia częstotliwości akwizycji danych). Szczegóły ustawień tego modułu przedstawiono w tabeli 13.

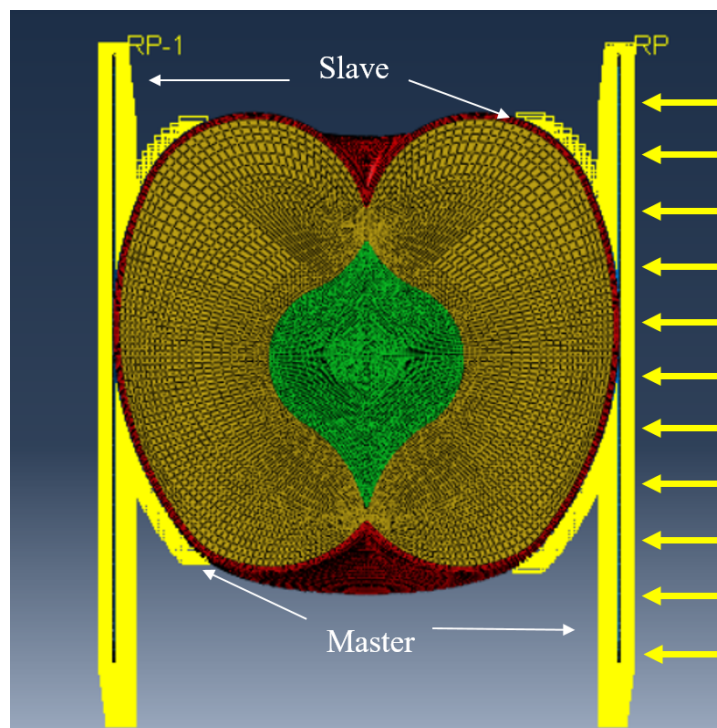
Tabela 13. Podstawowe parametry ustawienia kroku analiz

Typ analizy	Statyczna
Czas trwania analizy	1
Uwzględnianie nieliniowych efektów dużych deformacji i przemieszczeń	Włączone
Początkowa wielkość przyrostu	0,01
Minimalna wielkość przyrostu	$1 \cdot 10^{-8}$
Maksymalna wielkość przyrostu	0,01
Maksymalna liczba przyrostów	15 000

Obliczenia zostały wykonane przy zastosowaniu analizy statycznej. Włączenie funkcji uwzględniania nieliniowych efektów dużych deformacji i przemieszczeń umożliwiło kontrolę macierzy sztywności, która była aktualizowana po każdym przyroście. Dla maksymalnej wielkości przyrostów przyjęto wartość 0,01, aby różnica pomiędzy kolejnymi wynikami nie przekraczała przyrostu siły większego niż 1% siły zadanej. Minimalna wielkość przyrostu wynosiła  $1 \cdot 10^{-8}$ , ze względu na zastosowanie materiału sprężystoplastycznego, który dla wyższej wartości minimalnej przyrostu przerywał analizę w połowie zadanego czasu jej trwania, gdy znacząca część tkanki parenchymy przechodziła w stan odkształceń plastycznych.

### 7.1.4. Modelowanie kontaktu

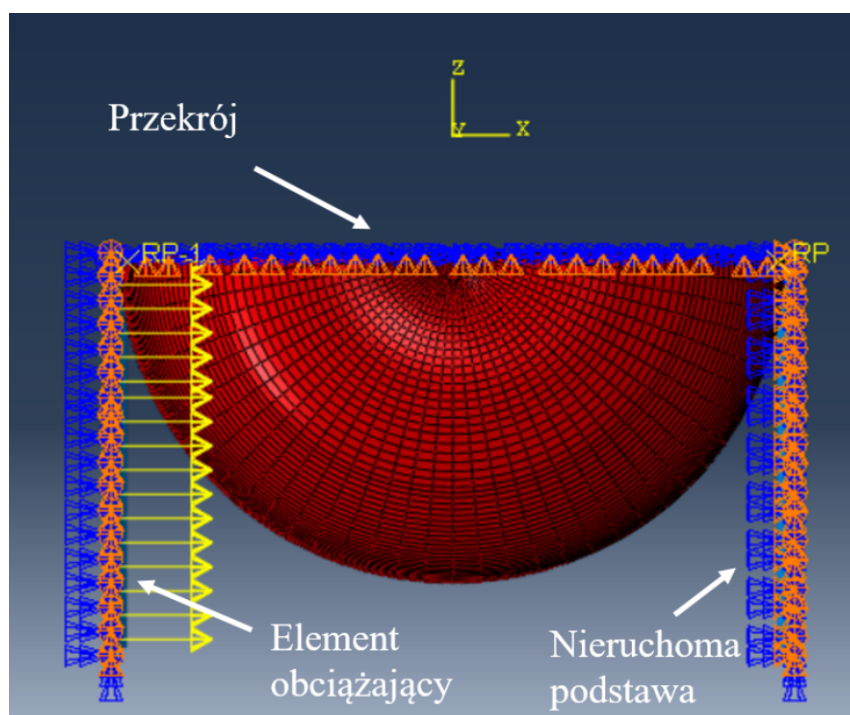
W tym module określono interakcję pomiędzy jabłkiem a płytami (nieruchomą podstawą i elementem roboczym). Typ kontaktu zdefiniowano jako „kontakt powierzchnia do powierzchni”, natomiast typ dyskretyzacji metody ustawiono jako „węzeł do powierzchni”. Płaszczyznę elementu roboczego zdefiniowano jako powierzchnię Master (z ang. „Pan”), jako że to ona wymuszała obciążenie. Natomiast powierzchnię kontaktu epidermy z powierzchnią Master zdefiniowano jako powierzchnię Slave (z ang. „Sługa”). Po stronie nieruchomej podstawy sytuację odwrócono. Epidermie przypisano rolę Master, natomiast podstawie przypisano rolę Slave (Rys. 36). Przyjęto wartość 0,2 dla współczynnika wygładzenia powierzchni Master. Dla zachowania stycznego ustawiono współczynnik tarcia równy 0,7. Zachowanie normalne zdefiniowano jako kontakt sztywny.



Rysunek 36. Schemat metody modelowania kontaktu

### 7.1.5. Modelowanie warunków brzegowych

W module dotyczącym warunków brzegowych zdefiniowano siłę skupioną oraz odjęto stopnie swobody i pozostawiono możliwość przemieszczania się elementów w pożądanych kierunkach. Rysunek 37 zawiera opis elementów którym przypisano warunki brzegowe, natomiast tabela 14 zawiera ich parametry.



Rysunek 37. Schemat metody modelowania warunków brzegowych

Tabela 14. Parametry warunków brzegowych przypisane do poszczególnych elementów modelu

Nieruchoma podstawa	$U1=U2=U3=0$ $UR1=UR2=UR3=0$
Element roboczy	Siła skupiona $0,09 \text{ N} \cdot 3965 \text{ węzłów} = 356,85 \text{ N}$ $U2=U3=0$ $UR1=UR2=UR3=0$
Przekrój	$U3=0$ $UR1=UR2=0$

Podstawa była utwierdzona we wszystkich kierunkach. Węzłom elementu roboczego przypisano siłę skupioną wynoszącą  $0,09 \text{ N}$  na każdy z nich i umożliwiono ich przemieszczenie wyłącznie w kierunku osi X. Przekrojowi owocu uniemożliwiono przemieszczenie w kierunku osi Z oraz rotację wokół osi X i Y.

### 7.1.6. Dyskretyzacja modelu

Tabela 15 przedstawia parametry dyskretyzacji dla całego modelu. Poniżej opisano parametry poszczególnych elementów wchodzących w skład modelu.

Tabela 15. Parametry dyskretyzacji całego modelu

Całkowita liczba węzłów	172051
Całkowita liczba elementów	170120
Liczba liniowych czworobocznych elementów typu S4	7544
Liczba liniowych elementów sześciennych typu C3D8	154152
Liczba liniowych elementów klinowych typu C3D6	5400
Liczba liniowych elementów czworościennych typu C3D4	3024

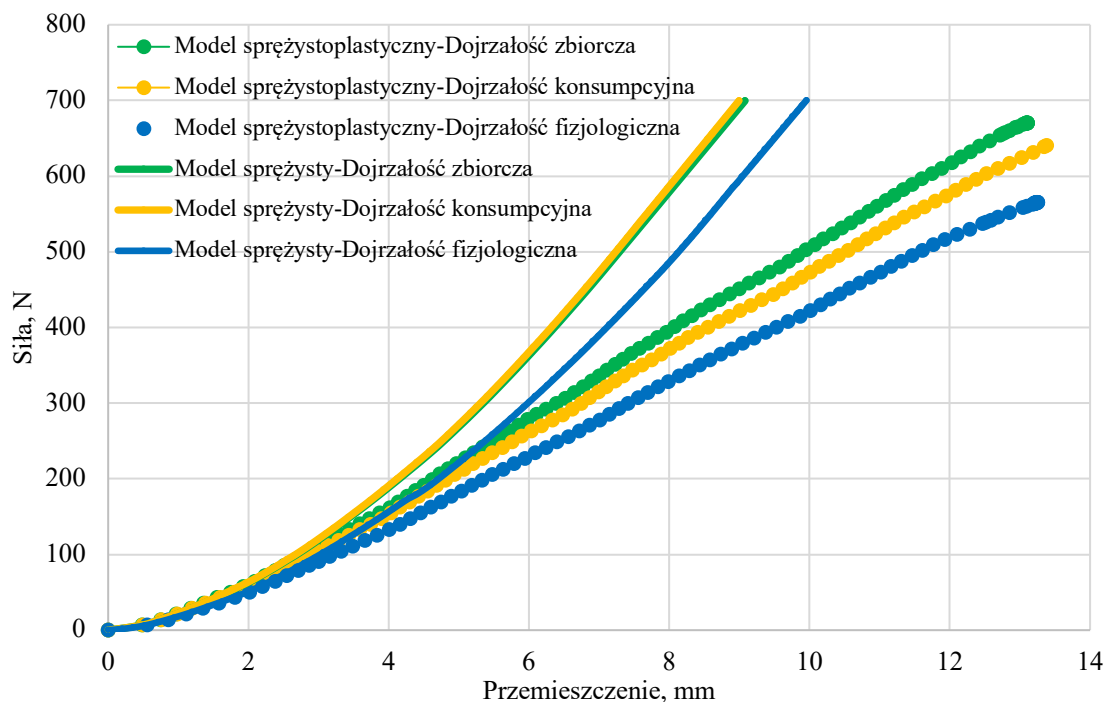
Tkanka parenchymy składała się z 91908 liniowych elementów sześciennych typu C3D8 oraz 1656 elementów klinowych typu C3D6. Tkanka epidermy składała się z 11983 liniowych elementów sześciennych typu C3D8 oraz 216 liniowych elementów klinowych typu C3D6. Gniazdo nasienne składało się z 50256 liniowych elementów sześciennych typu C3D8, 3528 liniowych elementów klinowych typu C3D6 oraz 3024 liniowych elementów czworościennych typu C3D4. W celu dyskretyzacji obu płyt użyto po 3444 liniowych czworobocznych elementów typu S4.

## 8. Walidacja modeli dyskretnych

### 8.1. Walidacja w oparciu o wykresy siły w funkcji przemieszczenia

W wyniku analizy statycznej uzyskano dane pozwalające na wygenerowanie wykresów przemieszczenia oraz siły w funkcji czasu (dla poszczególnych klatek, stanowiących przyrosty analizy) we wskazanych węzłach modelu. Następnie wykresy połączono poprzez wyeliminowanie zmiennej X (czas) i zastąpienie jej przemieszczeniem, natomiast siłę przyporządkowano do osi Y. Dane otrzymanych wykresów skopiowano do arkuszy Excel w celu porównania ich z danymi testowymi.

Rysunek 38 przedstawia wykresy siły w funkcji przemieszczenia modeli sprężystych i sprężystoplastycznych, dla wszystkich etapów dojrzałości owoców. Wykresy posłużyły do walidacji modeli dyskretnych.

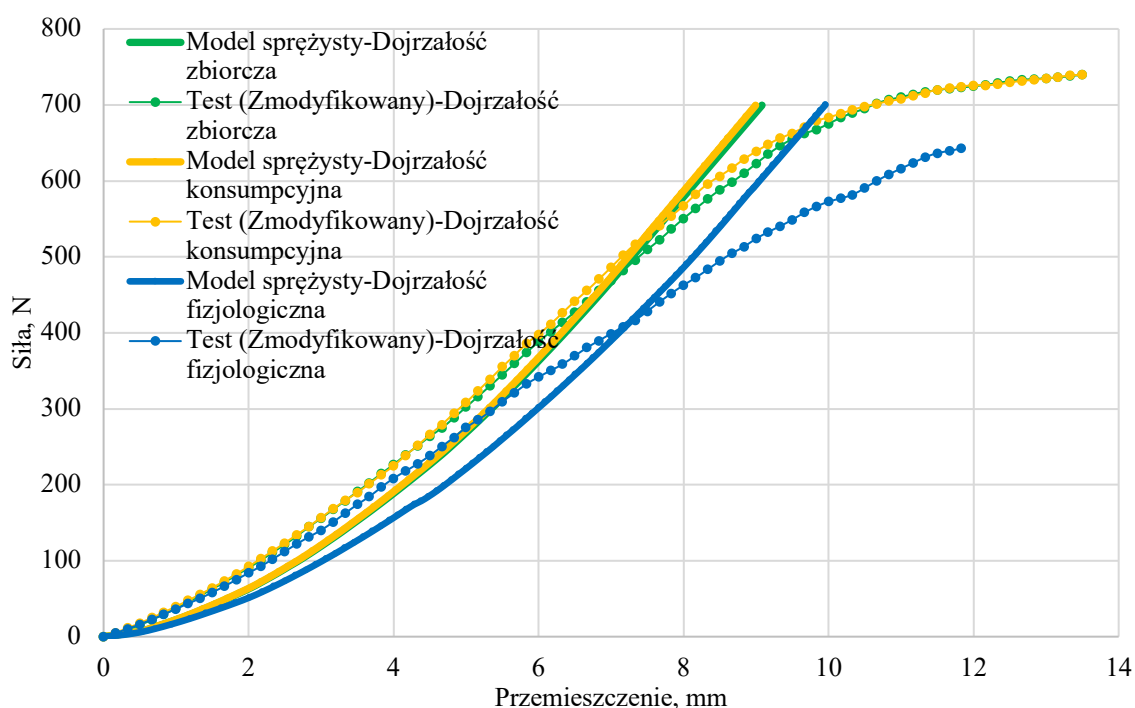


Rysunek 38. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia dla wszystkich wariantów modeli

Modele sprężyste porównywano z danymi testowymi oraz zmodyfikowanymi (wykonanymi według metodyki opisanej w rozdziale 5.3.3). Modele sprężystoplastyczne walidowano wyłącznie w oparciu o nieprzetworzone dane testowe.

### 8.1.1. Walidacja modeli sprężystych

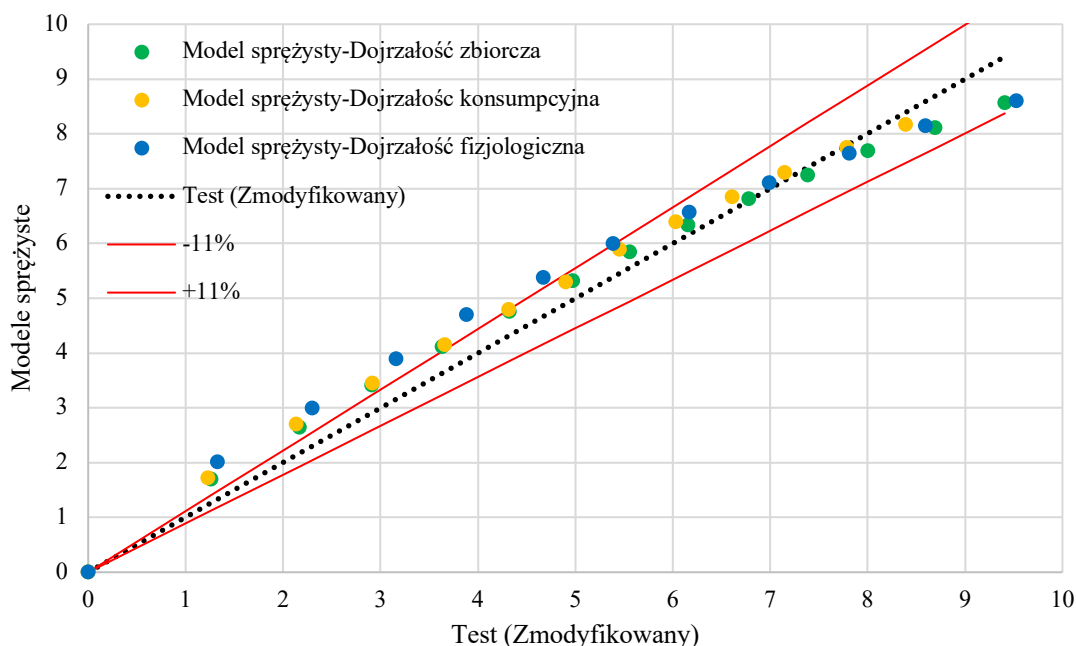
Rysunek 39 przedstawia wykresy siły w funkcji przemieszczenia, które posłużyły do pierwszego procesu walidacji modeli sprężystych. Liniami ciągłymi oznaczono wykresy uzyskane na podstawie badań modelowych, natomiast znacznikami oznaczono zmodyfikowane wykresy zależności obciążenia od przemieszczenia. Wyniki obliczeń numerycznych dla modeli sprężystych porównywano z właściwościami sprężystymi materiału, wynikającymi ze zmodyfikowanych wykresów. Zarówno dla danych modelowych jak i przetworzonych wyników testowych, kolorem zielonym oznaczono etap dojrzałości zbiorczej, pomarańczowym etap dojrzałości konsumpcyjnej, natomiast kolorem niebieskim oznaczono etap dojrzałości fizjologicznej. Przetworzone wykresy opisano jako „Test (Zmodyfikowany)”.



Rysunek 39. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia wykorzystane do walidacji modeli sprężystych w oparciu o zmodyfikowane wyniki testów

Badanie korelacji pomiędzy przetworzonymi danymi testowymi a wynikami modelowymi, uzyskanymi dla modeli sprężystych, przeprowadzono w oparciu o wykres rozrzutu dla przemieszczeń w funkcji siły (Rys. 40). Siła stanowiła zmienną niezależną, natomiast przemieszczenie zmienną zależną. Zmienną grupującą stanowiły poszczególne etapy dojrzałości owoców. Analizę dopasowania poszczególnych modeli oparto o średnie zakresy odchylenia danych modelowych od danych testowych, obliczone w programie Excel. Średnie z odchylenia dla wszystkich etapów dojrzałości naniesiono na wykresy rozrzutu,

natomiast średnie wartości odchyień i wartości dopasowania modeli dla poszczególnych etapów dojrzałości przedstawiono w tabeli 16.



Rysunek 40. Wykres rozrzutu wartości przemieszczeń modeli sprężystych porównywanych ze zmodyfikowanymi wynikami testów

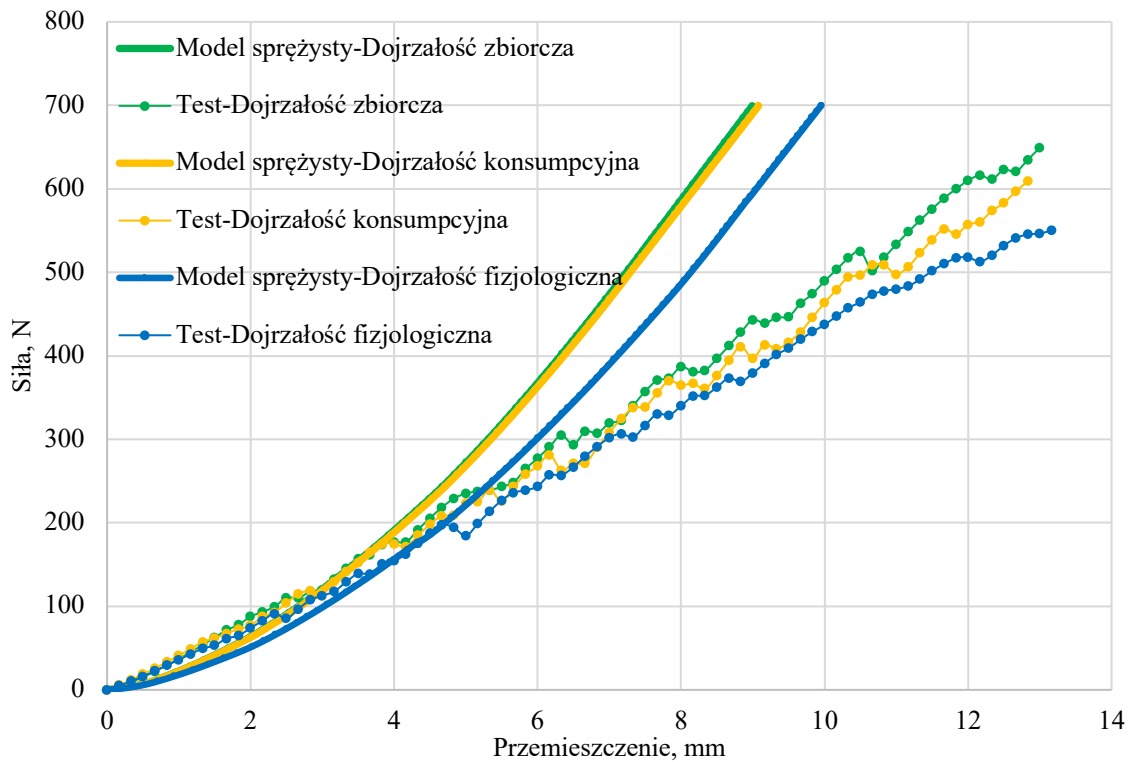
Tabela 16. Wartości odchyień i dopasowania modeli sprężystych do zmodyfikowanych wyników przemieszczeń w funkcji siły uzyskanych w trakcie testów

Etap dojrzałości	Zakres odchyień, %	Dopasowanie modelu, %
Dojrzałość zbiorcza	±9	91
Dojrzałość konsumpcyjna	±11	89
Dojrzałość fizjologiczna	±13	87
Bez podziału na grupy	±11	89

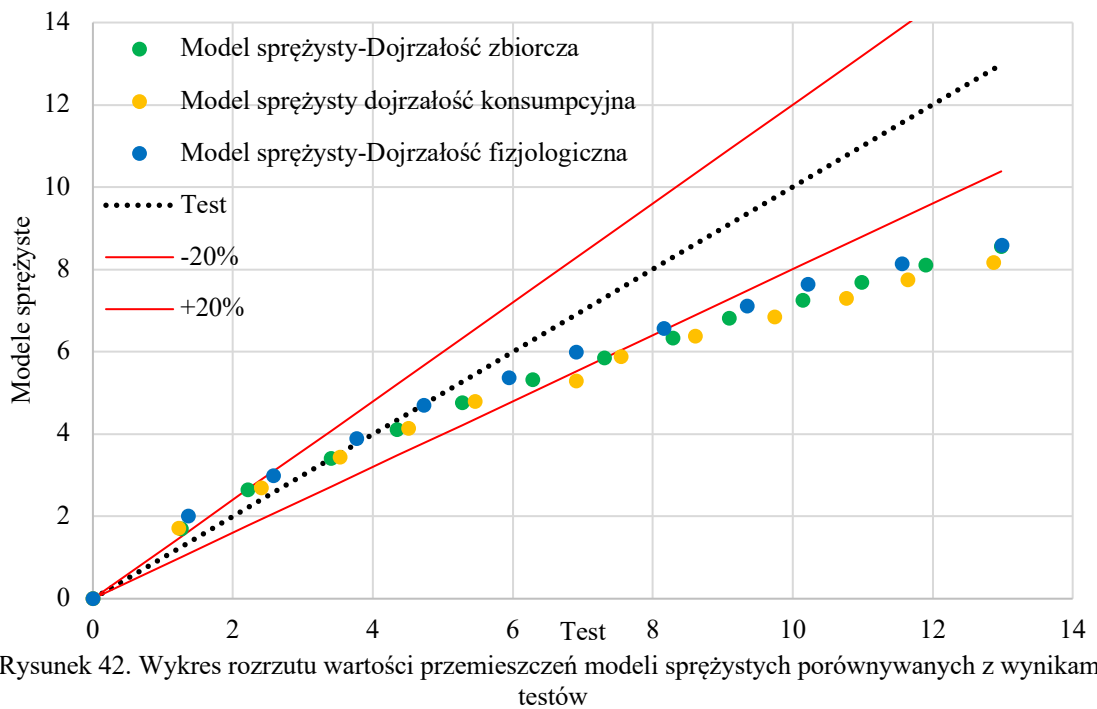
Średnie dopasowanie modeli sprężystych do wyników testów zmodyfikowanych wyniosło 89%. Najwyższą wartość dopasowania (91%) osiągnął model sprężysty dla etapu dojrzałości zbiorczej. Najniższą wartość (87%) osiągnął model dla etapu dojrzałości fizjologicznej. Model dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej osiągnął wartość dopasowania wynoszącą 89%.

Rysunek 41 przedstawia wykresy siły w funkcji przemieszczenia, które posłużyły do drugiego procesu walidacji modeli sprężystych. Liniami ciągłymi oznaczono wykresy uzyskane na podstawie badań modelowych, natomiast znacznikami oznaczono rzeczywiste dane uzyskane w testach. Zarówno dla danych modelowych jak i wyników badań empirycznych, kolorem zielonym oznaczono etap dojrzałości zbiorczej, pomarańczowym etap dojrzałości konsumpcyjnej, natomiast kolorem niebieskim oznaczono etap dojrzałości fizjologicznej.

Na [rysunku 42](#) przedstawiono walidację modeli sprężystych w oparciu o dane empiryczne, natomiast wyniki walidacji umieszczono w [tabeli 17](#).



Rysunek 41. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia wykorzystane do walidacji modeli sprężystych w oparciu o wyniki testów



Rysunek 42. Wykres rozrzutu wartości przemieszczeń modeli sprężystych porównywanych z wynikami testów

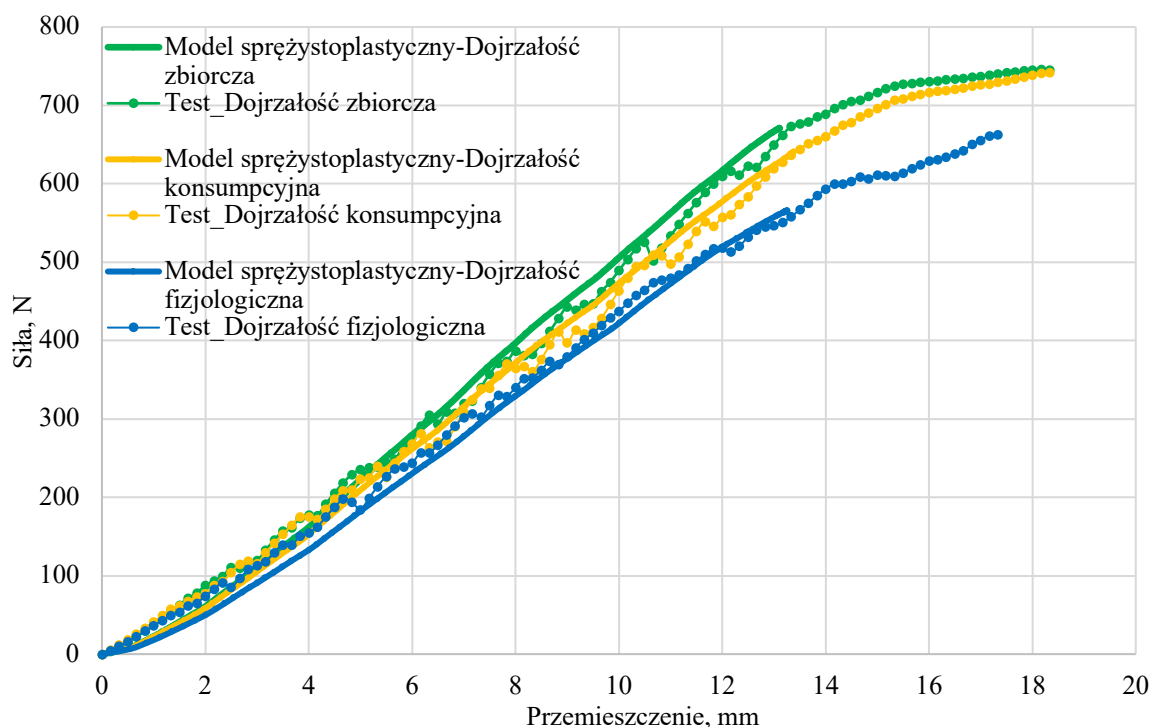
Tabela 17. Wartości odchyień i dopasowania modeli sprężystych do wyników przemieszczeń w funkcji siły uzyskanych w trakcie testów

Etap dojrzałości	Zakres odchyień, %	Dopasowanie modelu, %
Dojrzałość zbiorcza	±20	80
Dojrzałość konsumpcyjna	±21	79
Dojrzałość fizjologiczna	±19	81
Bez podziału na grupy	±20	80

Średnie dopasowanie modeli sprężystych do rzeczywistych wyników badań wyniosło 80%. Najwyższą wartość dopasowania (81%) osiągnął model sprężysty dla etapu dojrzałości fizjologicznej. Najniższą wartość (79%) osiągnął model dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej. Model dla etapu dojrzałości zbiorczej osiągnął wartość dopasowania wynoszącą 80%.

### 8.1.2. Walidacja modeli sprężystoplastycznych

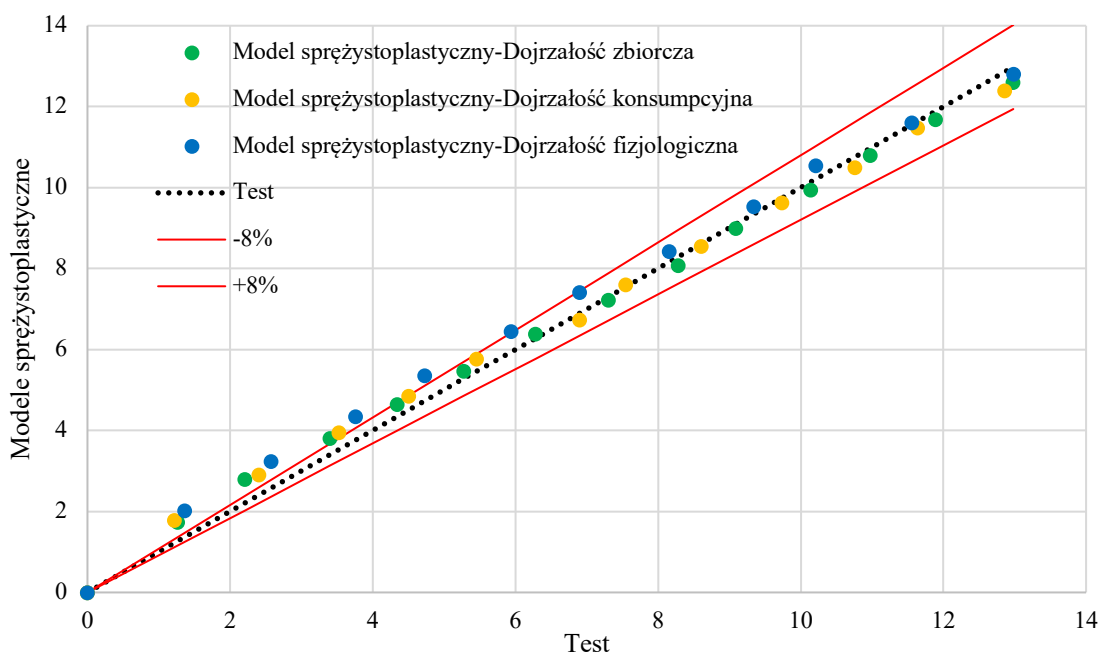
Rysunek 43 przedstawia wykresy siły w funkcji przemieszczenia, które posłużyły do procesu walidacji modeli sprężystoplastycznych. Liniami ciągłymi oznaczono wykresy uzyskane na podstawie badań modelowych, natomiast znacznikami oznaczono dane uzyskane w testach. Zarówno dla danych modelowych jak i wyników badań empirycznych, kolorem zielonym oznaczono etap dojrzałości zbiorczej, pomarańczowym etap dojrzałości konsumpcyjnej, natomiast kolorem niebieskim oznaczono etap dojrzałości fizjologicznej.



Rysunek 43. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia wykorzystane do walidacji modeli sprężystoplastycznych w oparciu o wyniki testów



Na [ryśunku 44](#) przedstawiono walidację modeli sprężystoplastycznych w oparciu o dane pochodzące z testów. Wyniki walidacji zawierające średnie wartości odchyleń oraz wartości dopasowania modeli umieszczono w [tabeli 18](#).



Rysunek 44. Wykres rozrzutu wartości przemieszczeń modeli sprężystoplastycznych porównywanych z wynikami testów

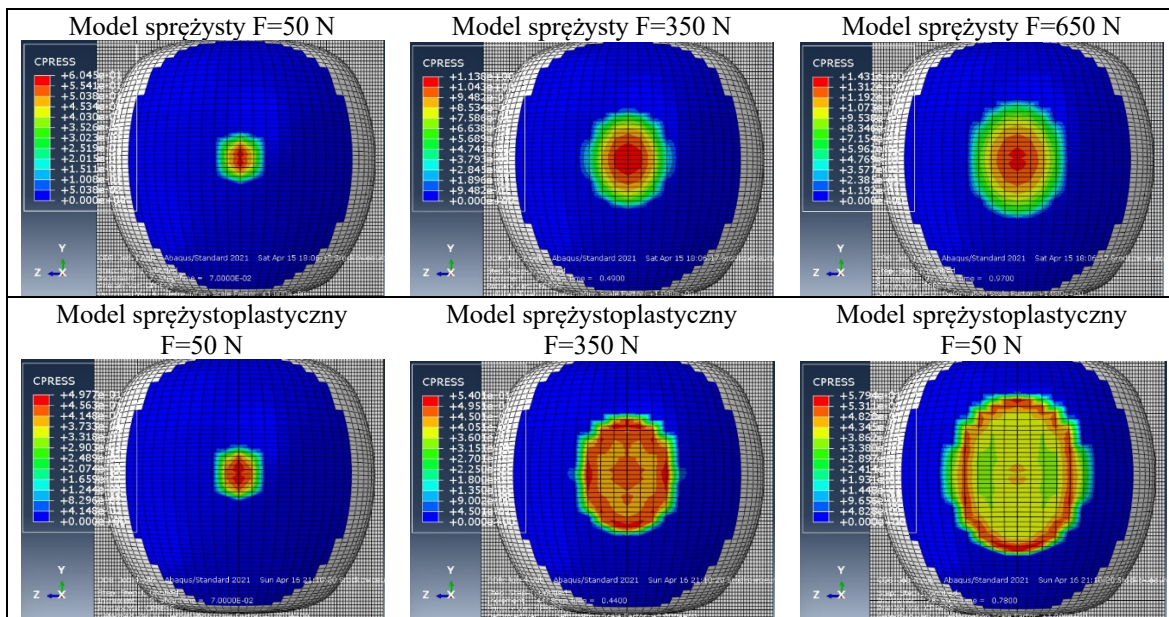
Tabela 18. Wartości odchyleń i dopasowania modeli sprężystoplastycznych do wyników przemieszczeń w funkcji siły uzyskanych w trakcie testów

Etap dojrzałości	Zakres odchyleń, %	Dopasowanie modelu, %
Dojrzałość zbiorcza	±6	94
Dojrzałość konsumpcyjna	±7	93
Dojrzałość fizjologiczna	±9	91
Bez podziału na grupy	±8	92

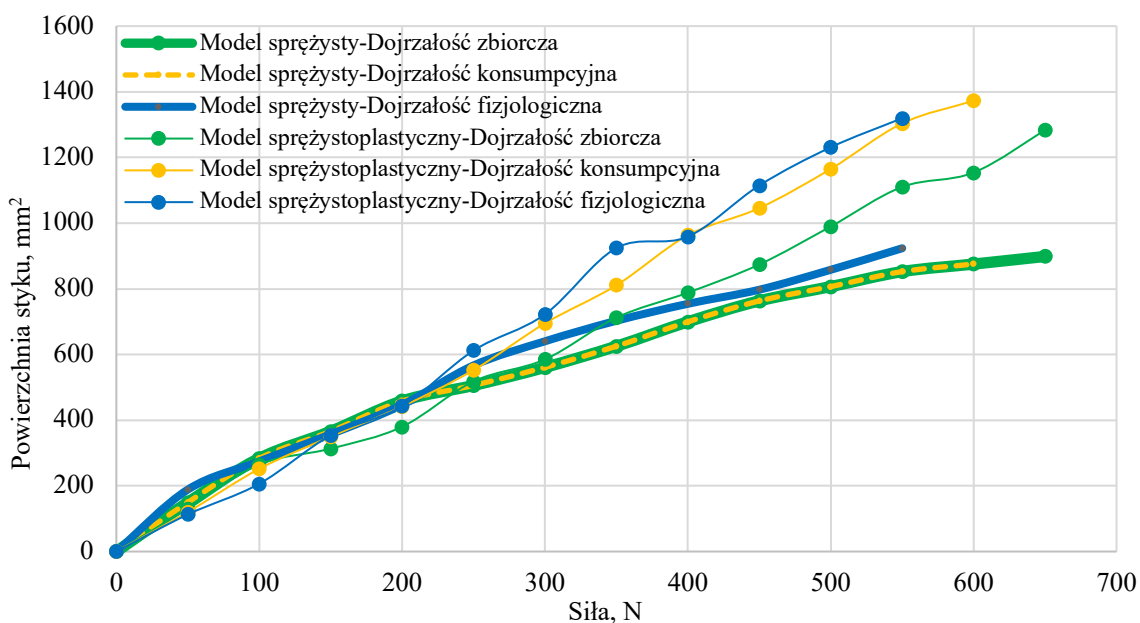
Średnie dopasowanie modeli sprężystoplastycznych do wyników badań wyniosło 92%. Najwyższą wartość dopasowania (94%) osiągnął model sprężystoplastyczny dla etapu dojrzałości zbiorczej. Najniższą wartość (91%) osiągnął model dla etapu dojrzałości fizjologicznej. Model dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej osiągnął wartość dopasowania wynoszącą 93%.

## 8.2. Walidacja w oparciu o zmianę powierzchni styku w funkcji obciążenia

Warstwie nacisków wyznaczano co 50 N ( $\pm 2,5$  N). Proces ten wymagał uprzedniego sprawdzenia numeru klatki przypisanej do konkretnej siły. Z powodu eliptycznego kształtu warstwic, mierzono promienie nacisków w kierunku osi Y i Z. Powierzchnię wyznaczano poprzez zastosowanie wzoru na pole powierzchni elipsy. Na [rysunku 45](#) przedstawiono przykładowe warstwie nacisków modeli sprężystych i sprężystoplastycznych, przy pomocy których wyznaczano powierzchnie styku modeli w trakcie obciążania. [Rysunek 46](#) przedstawia wyniki pomiarów warstwic uzyskane dla wszystkich wariantów modeli dyskretnych, które posłużyły do ich walidacji.



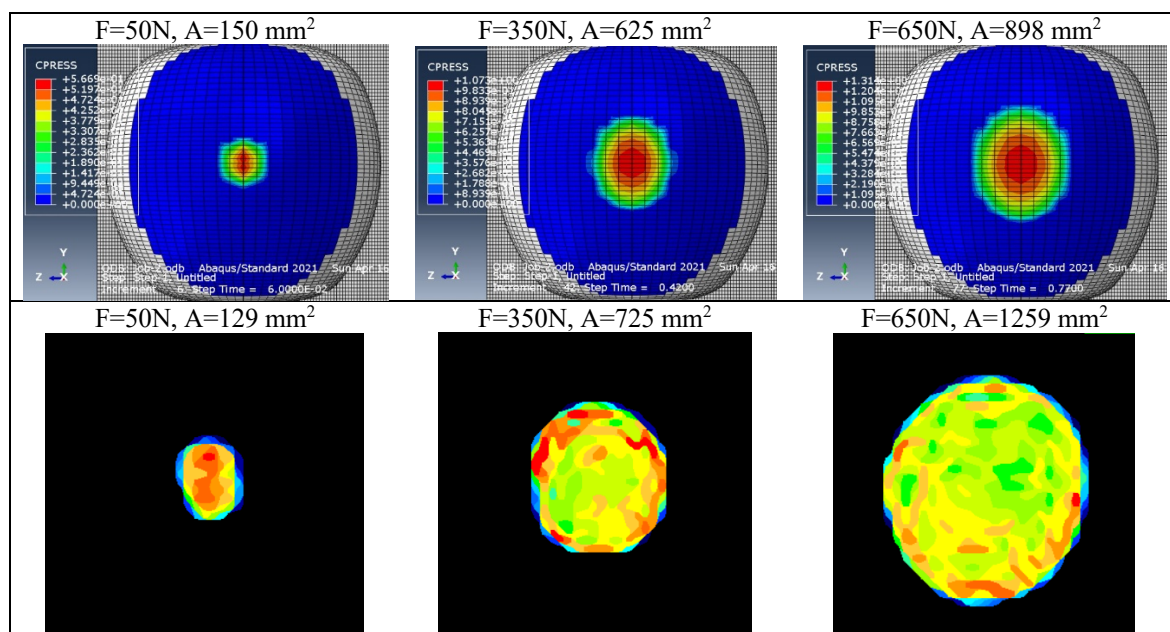
Rysunek 45. Przykładowe warstwie nacisków uzyskanych do walidacji modeli dyskretnych



Rysunek 46. Wykresy wartości powierzchni styku w funkcji siły uzyskanych do walidacji modeli sprężystych

### 8.2.1. Walidacja modeli sprężystych

Na [rysunku 47](#) przedstawiono przykładowe warstwy nacisków dla wyników modelowych oraz empirycznych.

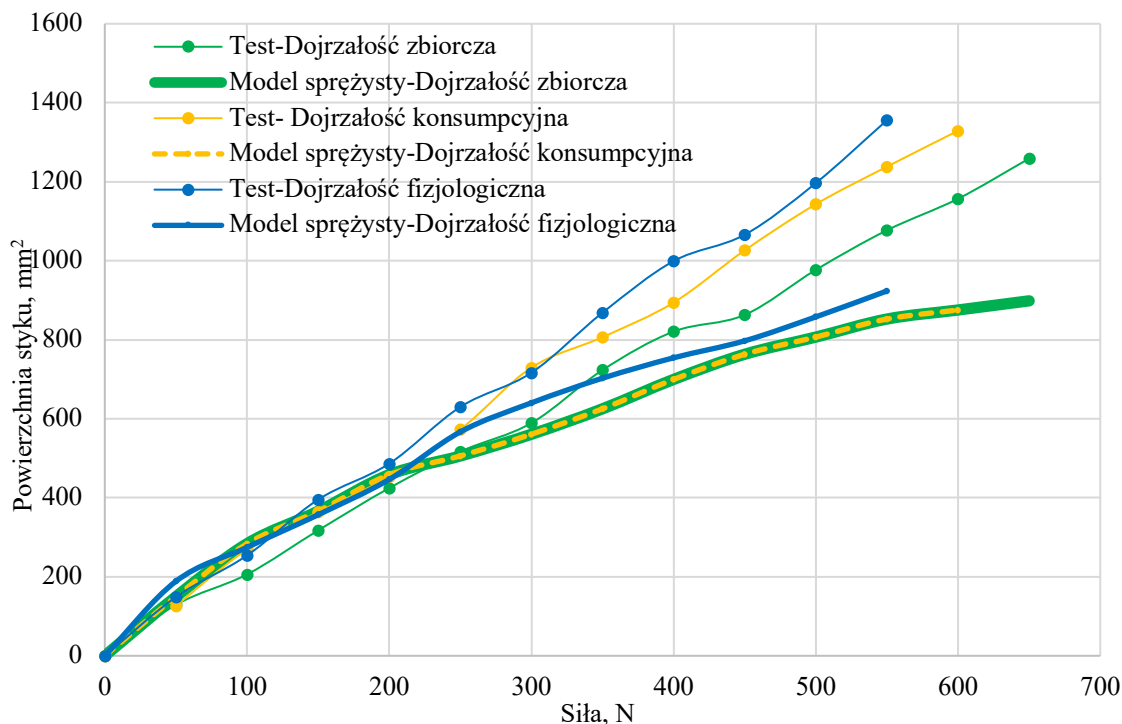


Rysunek 47. Przykładowe warstwy nacisków dla etapu dojrzałości zbiorczej, które posłużyły do walidacji modeli sprężystych

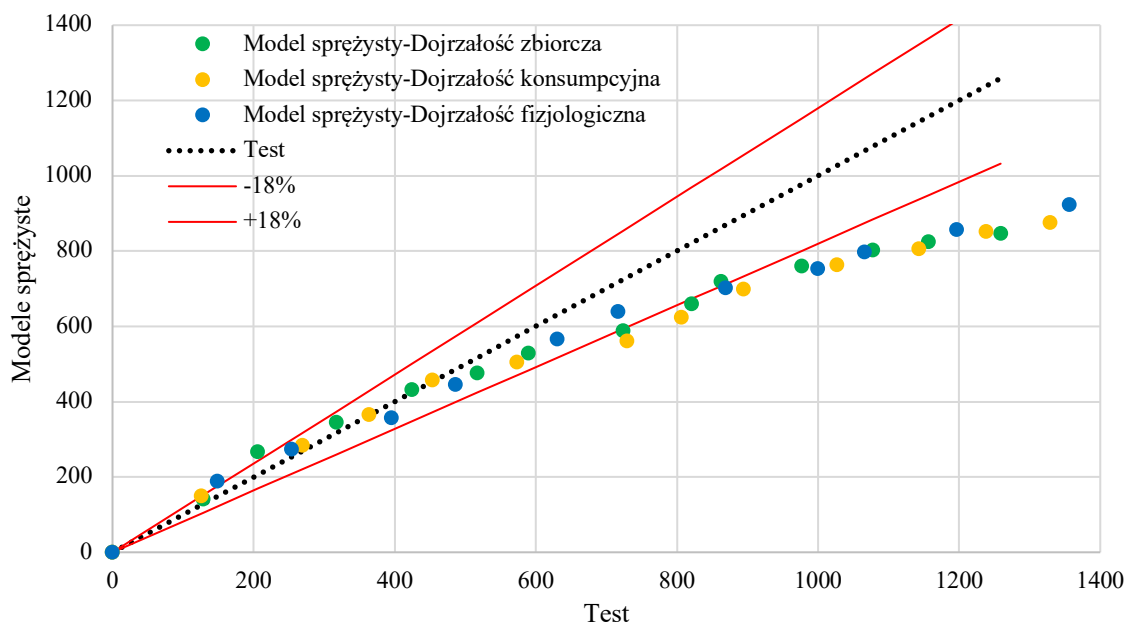
Na podstawie [rysunku 47](#) można stwierdzić, że rozkład nacisków w przypadku modeli sprężystych nie pokrywa się w wynikami testów. W badaniach empirycznych, w początkowym etapie ściskania, najwyższe wartości naprężeń obserwowano w środku powierzchni styku. W kolejnym etapie (który następował po pierwszym lokalnym spadku siły, czyli pierwszym trwałym uszkodzeniu materiału) najwyższą wartość naprężeń obserwowano na brzegach powierzchni kontaktu. Tendencja ta utrzymywała się do końca trwania testu i dotyczyła wszystkich etapów dojrzałości owoców.

[Rysunek 48](#) przedstawia wykresy powierzchni styku w funkcji siły, które posłużyły do procesu walidacji modeli sprężystych. Liniami ciągłymi oznaczono wykresy uzyskane na podstawie badań modelowych, natomiast znacznikami wskazano wyniki badań empirycznych. Zarówno dla danych modelowych jak i wyników badań empirycznych, kolorem zielonym oznaczono etap dojrzałości zbiorczej, pomarańczowym etap dojrzałości konsumpcyjnej, natomiast kolorem niebieskim oznaczono etap dojrzałości fizjologicznej.

Na [rysunku 49](#) przedstawiono walidację modeli sprężystych w oparciu o dane pochodzące z testów. Wyniki walidacji zawierające średnie wartości odchyłeń oraz wartości dopasowania modeli umieszczono w [tabeli 19](#).



Rysunek 48. Wykresy powierzchni styku w funkcji siły wykorzystane do walidacji modeli sprężystych



Rysunek 49. Wykres rozrzutu wartości powierzchni styku uzyskanych przez modele sprężyste

Tabela 19. Wartości odchyleń i dopasowania modeli sprężystych do wyników powierzchni styku uzyskanych w testach

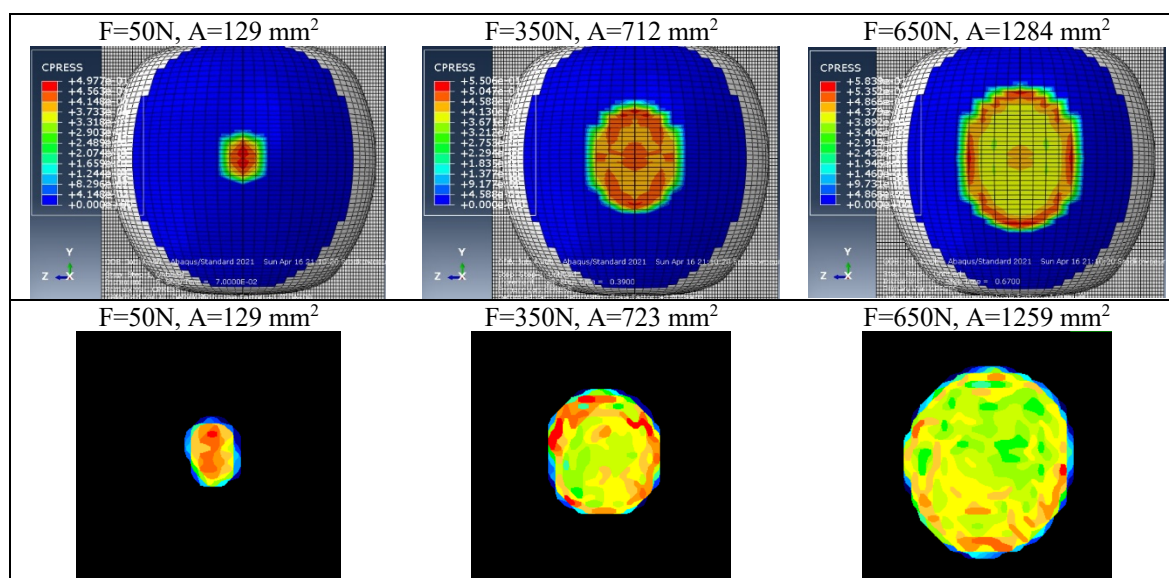
Etap dojrzałości	Zakres odchyleń, %	Dopasowanie modelu, %
Dojrzałość zbiorcza	±17	83
Dojrzałość konsumpcyjna	±18	82
Dojrzałość fizjologiczna	±18	82
Bez podziału na grupy	±18	82

Na [rysunku 48](#) można zauważyć, że wyniki powierzchni styku dla modeli odpowiadających dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej były zbliżone.

Średnie dopasowanie modeli sprężystych do wyników badań wyniosło 82%. Najwyższą wartość dopasowania (83%) osiągnął model sprężysty dla etapu dojrzałości zbiorczej. Modele dla etapów dojrzałości konsumpcyjnej i fizjologicznej osiągnęły wartość dopasowania wynoszącą 82%.

### 8.2.2. Walidacja modeli sprężystoplastycznych

Na [rysunku 50](#) przedstawiono przykładowe warstwy nacisków dla wyników modelowych oraz empirycznych.



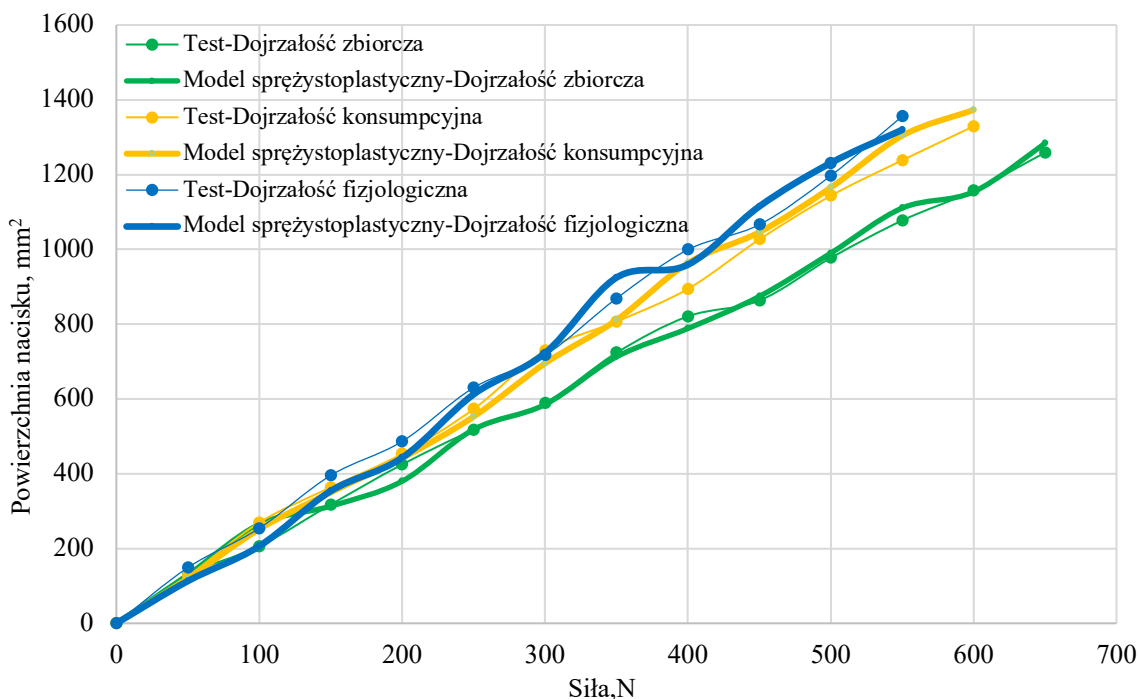
Rysunek 50. Przykładowe warstwy nacisków dla etapu dojrzałości zbiorczej, które posłużyły do walidacji modeli sprężystoplastycznych

Na podstawie [rysunku 50](#) można stwierdzić, że warstwy nacisków modeli sprężystoplastycznych znacznie lepiej pokrywają się z wynikami testów. Podobnie jak w badaniach empirycznych, w początkowym etapie ściskania, najwyższe wartości naprężeń można zaobserwować w środku powierzchni styku, natomiast w kolejnym etapie, najwyższą wartość naprężeń można zaobserwować na brzegach powierzchni kontaktu. Tendencja ta utrzymywała się do końca trwania testu i dotyczyła wszystkich etapów dojrzałości owoców.

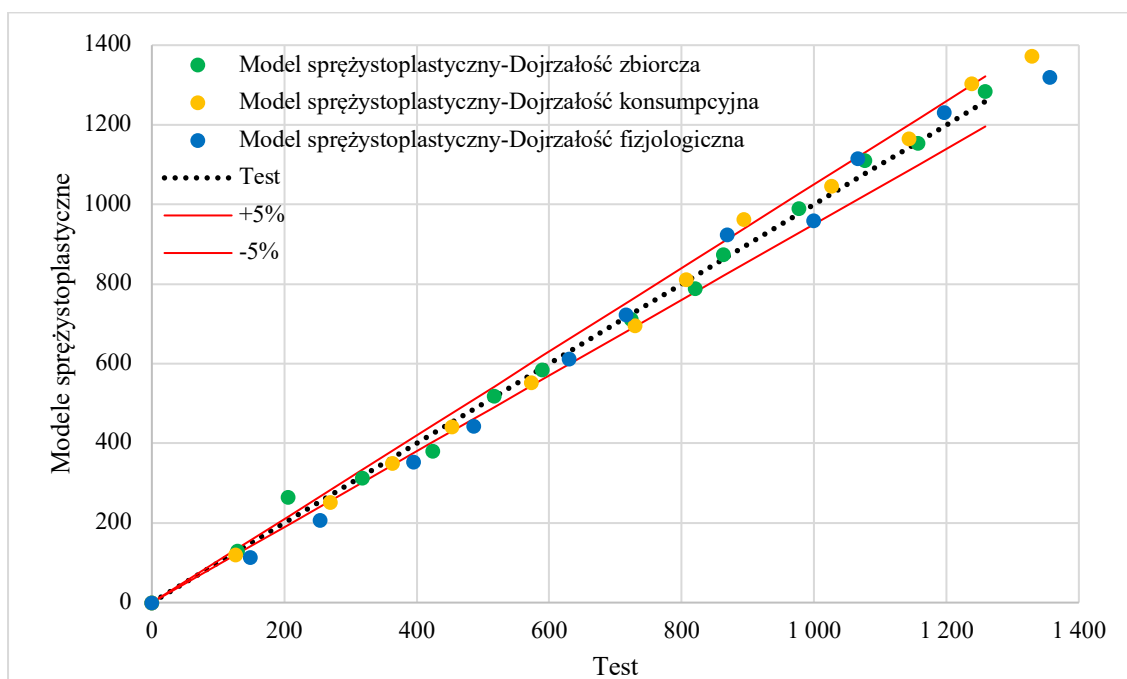
[Rysunek 51](#) przedstawia wykresy powierzchni styku w funkcji siły, które posłużyły do procesu walidacji modeli sprężystoplastycznych. Liniami ciągłymi oznaczono wykresy uzyskane na podstawie badań modelowych, natomiast znacznikami wskazano wyniki badań empirycznych. Zarówno dla danych modelowych jak i wyników badań empirycznych,

kolorem zielonym oznaczono etap dojrzałości zbiorczej, pomarańczowym etap dojrzałości konsumpcyjnej, natomiast kolorem niebieskim etap dojrzałości fizjologicznej.

Na [rysunku 52](#) przedstawiono walidację modeli sprężystoplastycznych w oparciu o dane pochodzące z testów. Wyniki walidacji zawierające średnie wartości odchyień oraz wartości dopasowania modeli umieszczono w [tabeli 20](#).



Rysunek 51. Wykresy powierzchni styku w funkcji siły wykorzystane do walidacji modeli sprężystoplastycznych



Rysunek 52. Wykres rozrzutu wartości powierzchni styku uzyskanych przez modele sprężystoplastyczne

Tabela 20. Wartości odchyłeń i dopasowania modeli sprężystoplastycznych do wyników powierzchni styku uzyskanych w testach

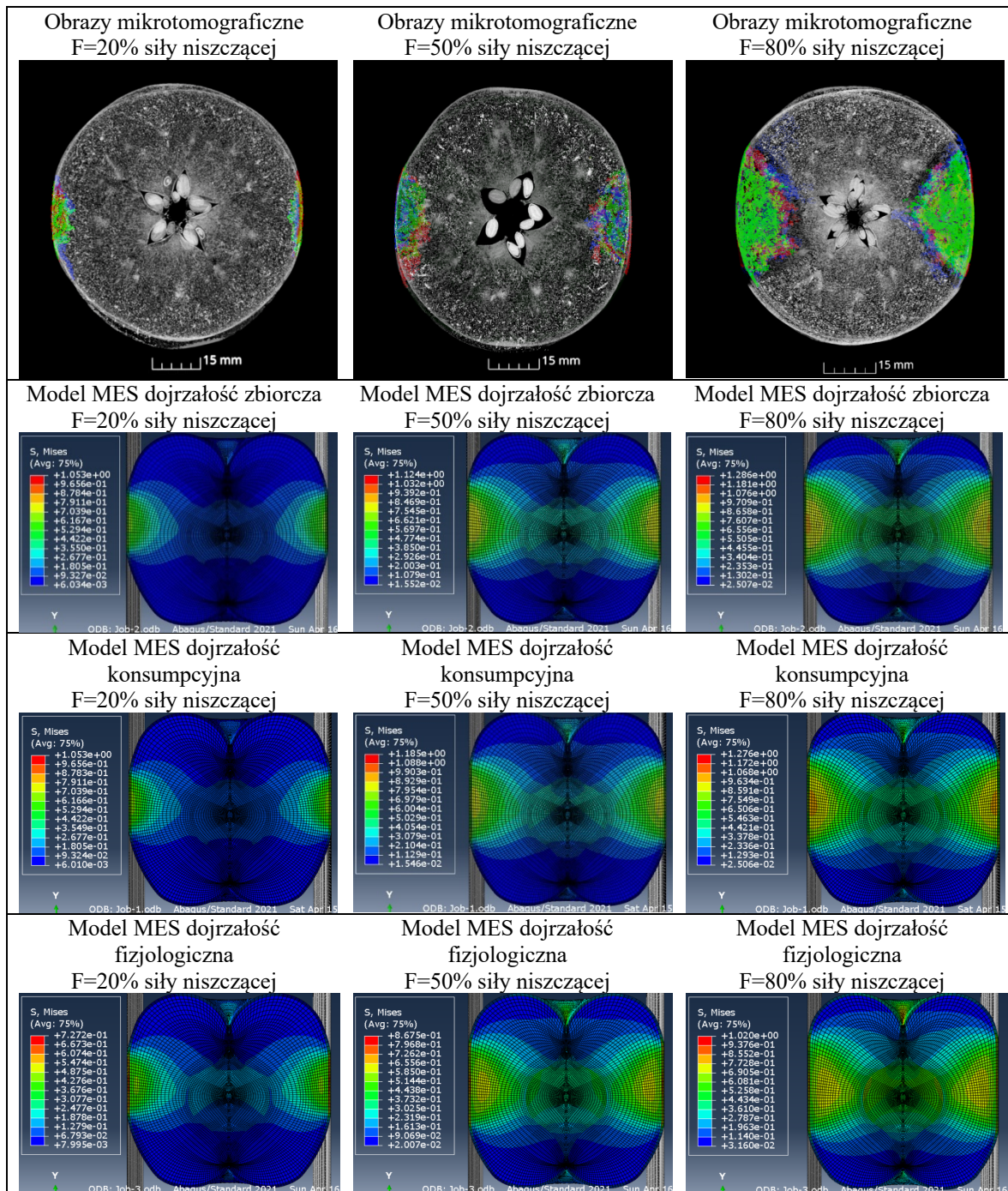
Etap dojrzałości	Zakres odchyłeń, %	Dopasowanie modelu, %
Dojrzałość zbiorcza	4	96
Dojrzałość konsumpcyjna	4	96
Dojrzałość fizjologiczna	8	92
Bez podziału na grupy	5	95

Średnie dopasowanie modeli sprężystoplastycznych do wyników badań wyniosło 95%. Najwyższą wartość dopasowania (96%) osiągnęły modele sprężystoplastyczne dla etapów dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej. Najniższą wartość (82%) osiągnął model dla etapu dojrzałości fizjologicznej.

## 9. Wyznaczenie naprężeń niszczących tkanę parenchymy

### 9.1. Wyznaczenie naprężeń niszczących dla modelu sprężystego

Rysunek 53 przedstawia zestawienie wyników obrazowania tomograficznego zakresu uszkodzeń owoców, wraz z wynikami naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystych, z uwzględnieniem etapów dojrzewania owoców oraz stopnia obciążenia. Wyniki analizy zestawiono w tabeli 21.



Rysunek 53. Obrazy mikrotomograficzne i warstwy naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystych



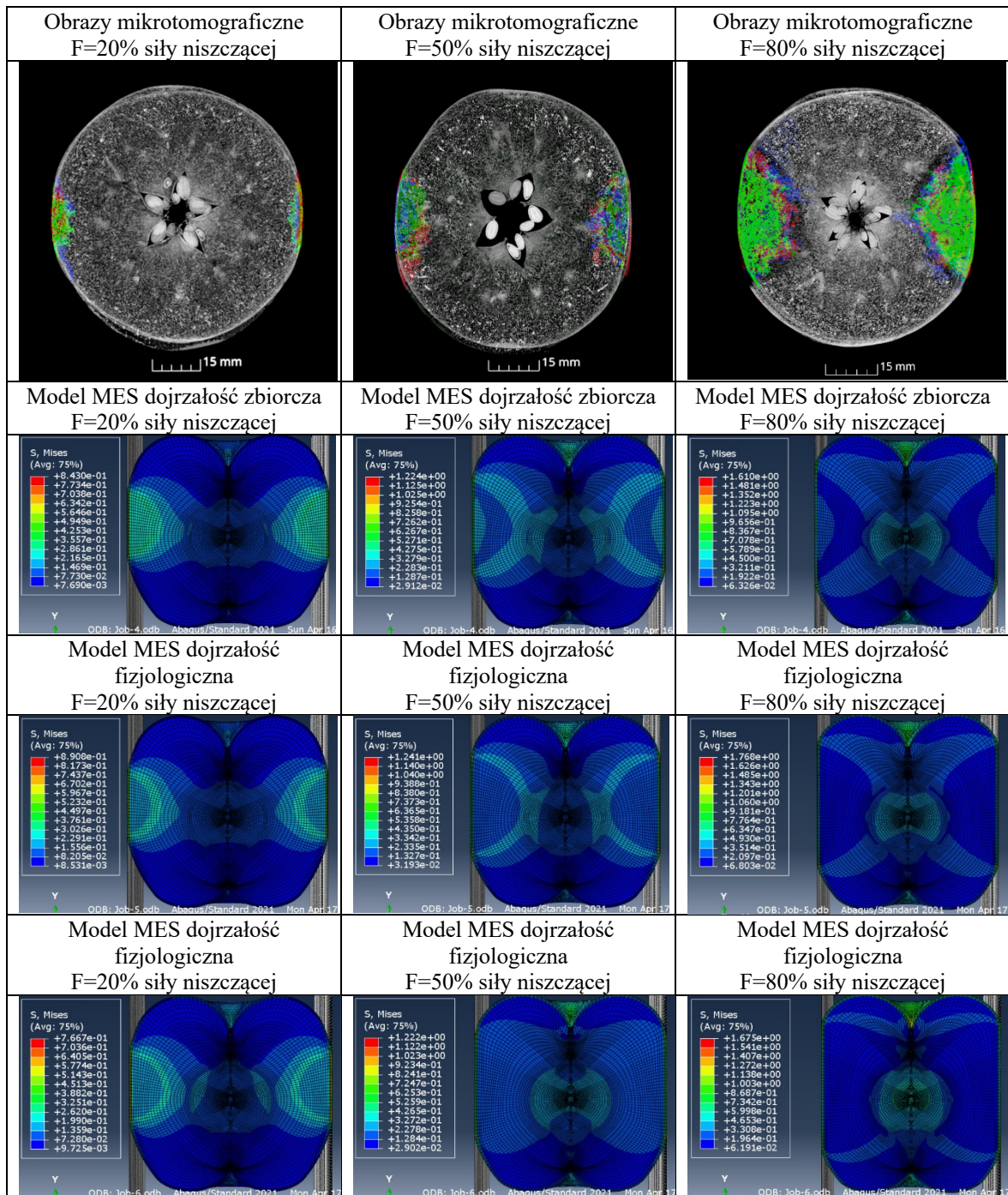
Tabela 21. Zestawienie wyników naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystych

Etap dojrzałości	Siła niszcząca, %	Naprężenia Hubera-Misesa, MPa	Średnia, MPa
Dojrzałość zbiorcza	20	0,59	0,63
	50	0,63	
	80	0,66	
Dojrzałość konsumpcyjna	20	0,59	0,63
	50	0,63	
	80	0,66	
Dojrzałość fizjologiczna	20	0,43	0,55
	50	0,57	
	80	0,64	

Na podstawie tabeli 21 można stwierdzić, że dla modeli sprężystych odpowiadających dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej, wyniki naprężeń Hubera-Misesa miały takie same wartości (przy zaokrągleniu do części setnych). W wyniku obciążenia ich 20% siły niszczącej, wartość naprężeń wyniosła 0,59 MPa na głębokości 3,55 mm. Dla 50% obciążenia niszczącego, wartość ta wyniosła 0,63 MPa na głębokości 10,21 mm, natomiast dla 80% obciążenia niszczącego, naprężenia osiągnęły wartość 0,66 MPa na głębokości 18,13 mm. Dla modelu odpowiadającego dojrzałości fizjologicznej wartości naprężeń, wraz ze wzrostem zadanej siły i głębokości pomiaru, wyniosły kolejno 0,43 MPa, 0,57 MPa i 0,64 MPa.

## 9.2. Wyznaczenie naprężeń niszczących dla modelu sprężystoplastycznego

Rysunek 54 przedstawia zestawienie wyników obrazowania tomograficznego zakresu uszkodzeń owoców, wraz z wynikami naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych, z uwzględnieniem etapów dojrzewania owoców oraz stopnia obciążenia. Wyniki analizy zestawiono w tabeli 22.



Rysunek 54. Obrazy mikrotomograficzne i warstwy naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych

Tabela 22. Zestawienie wyników naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych

Etap dojrzałości	Siła niszcząca, %	Naprężenia Hubera-Misesa, MPa	Średnia, MPa
Dojrzałość zbiorcza	20	0,25	0,19
	50	0,19	
	80	0,15	
Dojrzałość konsumpcyjna	20	0,22	0,18
	50	0,18	
	80	0,15	
Dojrzałość fizjologiczna	20	0,19	0,17
	50	0,17	
	80	0,15	

Wyniki naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych były znacznie niższe od naprężeń uzyskanych przez modele sprężyste. Było to związane z zadanymi parametrami właściwości plastycznych tkanki parenchymy. Elementy skończone zmniejszały przenoszone przez nie obciążenia po osiągnięciu punktów granicy plastyczności wprowadzonych do programu. Dla 20% obciążenia niszczącego wartości naprężeń wyniosły dla etapu dojrzałości: zbiorczej 0,25 MPa, konsumpcyjnej 0,22 MPa oraz fizjologicznej 0,19 MPa. Dla 50% obciążenia niszczącego naprężenia wyniosły kolejno: 0,19 MPa dla etapu dojrzałości zbiorczej, 0,18 MPa dla dojrzałości konsumpcyjnej i 0,17 MPa dla dojrzałości fizjologicznej. Przy wartości obciążenia równej 80% siły niszczącej, naprężenia dla wszystkich modeli wyniosły 0,15 MPa – zgodnie z wartością zaimplementowaną do plastycznych właściwości materiału (Tab. 22).

### 9.3. Porównanie wyznaczonych naprężeń niszczących z wynikami empirycznymi

W tabeli 23 zestawiono średnie wyniki naprężeń Hubera-Misesa, uzyskane dla modeli sprężystych i sprężystoplastycznych, w celu porównania ich z wynikami testów wytrzymałościowych dla tkanki parenchymy (przedstawionych w rozdziale 6.2.1).

Tabela 23. Zestawienie wyników naprężeń modelowych z wynikami uzyskanymi w badaniach empirycznych

Etap dojrzałości	Naprężenia Hubera-Misesa dla modeli sprężystych, MPa	Naprężenia Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych, MPa	Wyniki badań empirycznych, MPa
Dojrzałość zbiorcza	0,63	0,19	0,43
Dojrzałość konsumpcyjna	0,63	0,18	0,42
Dojrzałość fizjologiczna	0,55	0,17	0,32

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 23 można stwierdzić, że rząd wielkości naprężeń, zarówno dla modeli sprężystych jak i sprężystoplastycznych, odpowiada wynikom badań empirycznych. Modele sprężyste dla etapu dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej osiągają wartości naprężeń Hubera-Misesa bardziej zbliżone do wyników

empirycznych. W przypadku jabłek na etapie dojrzałości fizjologicznej, naprężenia występujące w modelu sprężystoplastycznym są bardziej zbliżone do wyników badań empirycznych.

## 10. Dyskusja

### 10.1. Właściwości fizykochemiczne

Porównując właściwości fizykochemiczne owoców (przedstawione w [rozdziale 6.1](#)) z badaniami uzyskanymi przez [Konopacką i Plocharskiego \(2003\)](#) można stwierdzić, że jabłka odmiany Chopin osiągają poszczególne stadia dojrzałości znacznie później niż inne, znane odmiany jesienne, takie jak Elstar, Jonagold czy Gloster. W celu wyznaczenia optymalnych warunków przechowywania wyżej wymienionych owoców, autorzy zbierali je na etapach dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej, podobnie jak przyjęto również w niniejszej pracy. Porównując uzyskane wyniki Indeksu Streifa można stwierdzić znaczącą różnicę pomiędzy odmianami Elstar i Gloster, a odmianą Chopin. Wartość indeksu Streifa na etapie dojrzałości zbiorczej wyniosła dla odmiany Elstar 0,72 a dla odmiany Gloster 0,50. W porównaniu z odmianą Chopin, której wartość indeksu Streifa na tym etapie dojrzałości wyniosła 0,12, można stwierdzić jej większe podobieństwo do odmiany Jonagold, która zgodnie z zaprezentowanymi w powyższej pracy wynikami, osiągnęła wartość indeksu Streifa wynoszącą 0,13. Dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej odmiana Chopin osiągnęła wartość indeksu Streifa 0,04, podczas gdy dla innych odmian wyniosła ona kolejno: Elstar 0,24; Gloster 0,32 i Jonagold 0,07. Owe podobieństwo wynika z wysokich wartości Indeksu skrobiowego i zawartości ekstraktu osiągniętych przez odmiany Chopin i Jonagold. Odmiana Chopin, w porównaniu ze wszystkimi wyżej wymienionymi odmianami, charakteryzowała się ponadto znacznie mniejszą jędrnością. Dla etapu dojrzałości zbiorczej jędrność odmiany Chopin wyniosła 7,4 kG, gdzie Jonagold (osiągający najniższe wartości jędrności wśród pozostałych odmian) uzyskał wartość jędrności wynoszącą 9,23 kG [17].

Odmiana Chopin klasyfikowana jest jako odmiana charakteryzująca się wysoką kwasowością, dzięki czemu jest odporna na długie przechowywanie. Zawartość kwasu jabłkowego u odmiany Chopin na etapie dojrzałości zbiorczej wyniosła 66%, natomiast na etapie dojrzałości konsumpcyjnej 83%. Krośniak i in. (2009) wykazali, że kwasowość ogólna w przeliczeniu na kwas jabłkowy zwiększa się wraz z rozwojem owoców i osiąga wartości maksymalne na kilka dni przed zbiorem [33]. W związku z tym można wywnioskować, że owoce pozyskane do badań na etapie dojrzałości zbiorczej nie zawierały pożądanej kwasowości, która umożliwiałaby ich długie przechowywanie. Z drugiej strony, należy również wziąć pod uwagę wyniki pomiarów indeksu Streifa. Owoce z jednej strony osiągnęły najwyższą kwasowość na etapie dojrzałości konsumpcyjnej, ale jednocześnie osiągnęły również wysokie stężenie cukrów stanowiących pożywkę dla drobnoustrojów

[132]. Ta zależność otwiera drzwi do dalszych i bardziej szczegółowych badań odmiany Chopin. Wysoka zawartość kwasu występująca wraz z wysoką zawartością ekstraktu na etapie dojrzałości konsumpcyjnej, może okazać się dobrym połączeniem w badaniach sensorycznych [133], [134].

## 10.2. Właściwości wytrzymałościowe parenchymy

Na podstawie danych zaprezentowanych w [rozdziale 6.2.1](#) można stwierdzić, że tkanka parenchymy na etapie dojrzałości konsumpcyjnej charakteryzowała się najwyższą wytrzymałością. Było to szczególnie widoczne w początkowym etapie procesu ściskania, gdy materiał wykazywał znacznie wyższą sztywność. Jednakże biorąc pod uwagę naprężenia niszczące tkankę, różnica pomiędzy etapem dojrzałości zbiorczej i konsumpcyjnej była nieznaczna, mieszcząc się w granicy odchylenia standardowego. To właśnie początkowy etap przebiegu wykresu sprawił, że moduł sprężystości próbki parenchymy na etapie dojrzałości konsumpcyjnej był nieco wyższy od modułu sprężystości dla etapu dojrzałości zbiorczej.

Takie zjawisko może wydawać się nielogiczne, biorąc pod uwagę fakt, że zgodnie z dostępnymi publikacjami ([22], [23], [42], [135]) wytrzymałość owoców spada wraz z enzymatycznym rozkładem pektyn. W badaniach przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy, zawartość pektyn dla najświeższych owoców wyniosła 9,53%, a dla etapu dojrzałości konsumpcyjnej 7,20%.

Owoce na etapie dojrzałości zbiorczej charakteryzowały się wyższą zawartością pektyn oraz niższą gęstością, wartością modułu sprężystości oraz niższymi lokalnymi spadkami sił, powstającymi podczas procesu ściskania całych owoców. Owoce na etapie dojrzałości konsumpcyjnej charakteryzowały się niższą zawartością pektyn, ale wyższą gęstością, modułem sprężystości i lokalnymi spadkami sił. Oznacza to, że większa gęstość owoców sprawiała, że tkanka parenchymy była bardziej sztywna [136], natomiast niższa zawartość pektyn (a dokładniej propektyny budującej blaszkę środkową) sprawiała, że tkanka w momencie procesu pęknięcia osiągała znacznie większe spadki siły, zachowując się w tym procesie jak materiał kruchy. Świadczą o tym także wartości stałych Poissona, wyznaczone podczas badań, a także zmodyfikowane wykresy siły w funkcji przemieszczenia. Po usunięciu lokalnych spadków i pozostawieniu jedynie sprężystych przebiegów, owoce na etapie dojrzałości konsumpcyjnej okazały się wytrzymalsze od owoców na etapie dojrzałości zbiorczej.

Sytuacja uległa zmianie wraz z osiągnięciem przez owoce dojrzałości fizjologicznej, kiedy to propektyna i pektyna ulega w znaczącym stopniu rozkładowi enzymatycznemu. Wtedy owe lokalne spadki siły zamieniły się w globalne przemieszczenia komórek względem siebie. Na tym etapie dojrzałości wciąż można było zaobserwować pojedyncze pęknięcia podczas procesu ściskania, niemniej już nie tak zintensyfikowane jak obserwowano podczas badań świeżych owoców [137], [138].

Ciekawe zagadnienie stanowiły wykresy naprężeń w funkcji odkształcenia dla tkanki parenchymy występujące w dalszym etapie testu ściskania, czyli po momencie zniszczenia próbki. Etap ten (zgodnie z zasadami badań wytrzymałościowych) powinien nie być już brany pod uwagę. Niemniej jednak zniszczona tkanka nadal przenosiła obciążenie, a więc podobnie jak w procesie ściskania całych owoców. Opis tego zjawiska został w ciekawy sposób przedstawiony przez [Cornuault i in. \(2018\)](#) [139]. Na tej podstawie zdecydowano się na wykonanie modeli sprężystoplastycznych, do których zaimplementowano wykresy wyników testów dla kostek parenchymy jabłek, uwzględniające zachowanie materiału po procesie zniszczenia.

### 10.3. Modele dyskretne

Dostępne w literaturze modele numeryczne jabłek w większości obejmują zagadnienia dynamiczne ([110], [116], [117], [119]–[126], [128], [140]–[142]), które można powiązać z procesem zbioru i transportu. Modelowanie statyczne przeprowadzane jest przeważnie dla samych fragmentów tkanek lub niskich wartości obciążeń, które można zastosować do modelowania procesu przechowywania owoców [118], [127], [143], [144]. Jeżeli modele mają służyć również do projektowania maszyn, które będą miały za zadanie przetwarzać owoce, należałoby zastosować modele statyczne.

Ponadto, ujęte w przeglądzie literatury modele owoców w większości przypadków były walidowane wyłącznie w oparciu o jedną zmienną [110], [120], [127], [128] lub wcale nie były walidowane [116], [122]–[124]. W niniejszej pracy przeprowadzono walidację w oparciu o dwa parametry: przemieszczenie w funkcji obciążenia oraz powierzchnię nacisku w funkcji obciążenia. Dodatkowo, badania zawarte w pozycjach przeglądu literatury nie obejmowały podstawowych analiz dotyczących określenia etapu dojrzałości modelowanych owoców.

W związku z tym, że modelowanie owoców i warzyw przy użyciu metody elementów skończonych staje się powszechne, należy kierować się interdyscyplinarnością i kompleksowością badań. Dobrym rozwiązaniem byłoby tworzenie modeli dla danej odmiany uwzględniając wszystkie etapy dojrzałości, z którymi ma styczność zarówno producent, sprzedawca jak i przetwórcza. Wykonywanie modeli owoców na podstawie właściwości wytrzymałościowych jabłek pobranych z półki supermarketu ([122], [123]) ma sens jeżeli celem jest opracowanie samej metodyki modelowania. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, iż prezentowana metodyka może nie pasować do tego samego owocu, na innym etapie dojrzenia. W niniejszej pracy zaimplementowane właściwości materiałowe parenchymy i epidermy dobrano na podstawie badań empirycznych, przeprowadzonych dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców. Dodatkowo w celu uzyskania możliwości kompleksowego porównania odmiany Chopin z innymi odmianami jabłek wykonano podstawowe analizy fizykochemiczne. Przyjęta metodyka modelowania jest uniwersalna i może posłużyć do każdego etapu rozwoju dojrzałości owoców.



## 11. Podsumowanie wyników badań

1. Dla poszczególnych etapów dojrzałości jabłek odmiany Chopin Indeks Streifa wahał się w przedziale od 0,04 do 0,12, zawartości pektyn od 9,53 do 4,07%, a zawartość kwasu jabłkowego od 66 do 78%. Wraz ze wzrostem etapu dojrzałości wzrastała zawartość ekstraktu oraz indeks skrobiowy natomiast malała zawartość pektyn i Indeks Streifa.
2. Najwyższym modułem sprężystości charakteryzowały się owoce na poziomie dojrzałości konsumpcyjnej (5,14 MPa). Moduł sprężystości dla owoców na etapie dojrzałości zbiorczej był niewiele niższy (5,04 MPa), natomiast moduł sprężystości owoców na etapie dojrzałości fizjologicznej wyniósł 3,85 MPa.
3. Stała Poissona dla owoców na poziomie dojrzałości zbiorczej była najmniejsza i wynosiła 0,25, dla dojrzałości konsumpcyjnej wyniosła 0,21, a dla dojrzałości fizjologicznej była najwyższa i wynosiła 0,35.
4. Walidacja modeli uwzględniających właściwości sprężyste, w oparciu o zmodyfikowany przebieg wykresu siły w funkcji przemieszczenia, wykazała współczynnik dopasowania wynoszący od 87% dla dojrzałości fizjologicznej do 91% dla dojrzałości zbiorczej. Z kolei walidacja modelu sprężystego w oparciu o rzeczywiste wyniki testu przebiegu obciążenia w funkcji odkształcenia wykazała współczynnik dopasowania wynoszący od 79% dla dojrzałości konsumpcyjnej do 81% dla dojrzałości fizjologicznej. Walidacja w oparciu o zmianę powierzchni kontaktu jabłka z elementem obciążającym była gorsza i wynosiła od 82 % dla dojrzałości zbiorczej do 83 % dla dojrzałości fizjologicznej.
5. Walidacja modeli uwzględniających właściwości sprężystoplastyczne, w oparciu o przebiegi procesu ściskania, wykazała współczynnik dopasowania wynoszący od 91% dla dojrzałości zbiorczej do 94% dla dojrzałości fizjologicznej. Walidacja w oparciu o zmianę powierzchni kontaktu jabłka z elementem obciążającym wynosiła od 92% dla dojrzałości zbiorczej do 96% dla dojrzałości fizjologicznej.
6. Porównanie obrazów mikrotomograficznych uszkodzonych jabłek oraz warstw naprężeń Hubera-Misesa wygenerowanych w modelu jabłek przy jednakowych wartościach sił obciążających pozwoliło na wyznaczenie naprężeń niszczących tkankę parenchymy. Naprężenia niszczące Hubera-Misesa mieściły się w przedziale 0,55-0,63 dla modelu sprężystego, oraz 0,17-0,19 dla modelu sprężystoplastycznego w zależności od stopnia dojrzałości i siły obciążającej.

## 12. Wnioski

1. Odmiana Chopin klasyfikowana jest jako odmiana charakteryzująca się wysoką kwasowością, dzięki czemu jest odporna na długie przechowywanie. Badania wykazały jednak, że owoce na etapie dojrzałości zbiorczej nie zawierały pożądanej kwasowości, a osiągnęły ją dopiero na etapie dojrzałości konsumpcyjnej. Wysoka zawartość kwasu występująca wraz z wysoką zawartością ekstraktu na etapie dojrzałości konsumpcyjnej może jednak okazać się dobrym połączeniem w badaniach sensorycznych.
2. Dla etapów dojrzałości poprzedzających dojrzałość fizjologiczną jabłek odmiany Chopin można stwierdzić, że wyższa gęstość owoców sprawia, że tkanka parenchymy jest bardziej sztywna.
3. W początkowej fazie dojrzewania jabłek, rozkład pektyn sprawia, że tkanka parenchymy w momencie procesu pęknięcia osiąga znacznie większe spadki siły, zachowując się podczas tego procesu jak materiał kruchy. Wraz z osiągnięciem przez owoce dojrzałości fizjologicznej owe lokalne spadki siły zamieniają się w globalne przemieszczenia komórek względem siebie.
4. Modele sprężystoplastyczne znacznie lepiej odzwierciedlają badania empiryczne. Wartość dopasowania modeli sprężystych wyniosła od 79% do 83%, natomiast wartość dopasowania modeli sprężystoplastycznych do danych empirycznych wyniosła od 91% do 96%.
5. Modele sprężyste są z kolei dobrze dopasowane do zmodyfikowanych wartości siły w funkcji przemieszczenia, odzwierciedlających sprężyste zachowanie jabłek w procesie ściskania. Wartości dopasowania modeli mieściły się w przedziale od 87% do 91%.
6. Zastosowanie mikrotomografii komputerowej i inżynierii odwrotnej opartej o zwalidowane modele numeryczne umożliwia modelowanie uszkodzeń i wyznaczenie naprężeń niszczących tkankę parenchymy jabłek.

### 13. Bibliografia

- [1] I. Vitanova, S. Dimkova, i D. Ivanova, „Biological characterization of the plum cultivars ‘Gabrovska’ and ‘Goulyaeva’”, *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, t. 12, nr 2004, 2004.
- [2] Zygmunt Hejnowicz, *Anatomia i histogeneza roślin naczyniowych*, t. 1. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002.
- [3] György Sitkei, „Mechanics of Agricultural Materials”, *Developments in Agricultural Engineering*, t. 8, 1986.
- [4] M. Bruggenwirth i M. Knoche, „Factors Affecting Mechanical Properties of the Skin of Sweet Cherry Fruit”, 2016.
- [5] Roman Stopa, „Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych”, Monografia, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław, 2010.
- [6] L. Bich, T. Pradeu, i J. F. Moreau, „Understanding Multicellularity: The Functional Organization of the Intercellular Space”, *Front Physiol*, t. 10, wrz. 2019, doi: 10.3389/fphys.2019.01170.
- [7] J. D. Gray, P. Kolesik, P. B. Høj, i B. G. Coombe, „Confocal measurement of the three-dimensional size and shape of plant parenchyma cells in a developing fruit tissue”, *Plant Journal*, t. 19, nr 2, s. 229–236, lip. 1999, doi: 10.1046/j.1365-313X.1999.00512.x.
- [8] P. P. Lewicki i R. Porzecka-Pawlak, „Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure”, *J Food Eng*, t. 66, nr 1, s. 43–50, sty. 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.02.032.
- [9] A. Zykwińska, J. F. Thibault, i M. C. Ralet, „Competitive binding of pectin and xyloglucan with primary cell wall cellulose”, *Carbohydr Polym*, t. 74, nr 4, s. 957–961, lis. 2008, doi: 10.1016/j.carbpol.2008.05.004.
- [10] A. G. J. Voragen, G. J. Coenen, R. P. Verhoef, i H. A. Schols, „Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls”, *Struct Chem*, t. 20, nr 2, s. 263–275, kwi. 2009, doi: 10.1007/s11224-009-9442-z.

- [11] H. A. Schols, E. Vierhuis, E. J. Bakx, i A. G. J. Voragen, „Different populations of pectic hairy regions occur in apple cell walls”, *Carbohydr Res*, 1995, doi: 10.1016/0008-6215(95)00155-M.
- [12] B. M. Yapo, „Rhamnogalacturonan-I: A structurally puzzling and functionally versatile polysaccharide from plant cell walls and mucilages”, *Polymer Reviews*, t. 51, nr 4, s. 391–413, 1 październik 2011. doi: 10.1080/15583724.2011.615962.
- [13] F. Sénéchal, C. Wattier, C. Rustérucchi, i J. Pelloux, „Homogalacturonan-modifying enzymes: Structure, expression, and roles in plants”, *J Exp Bot*, t. 65, nr 18, s. 5125–5160, paź. 2014, doi: 10.1093/jxb/eru272.
- [14] L. Billy *i in.*, „Relationship between texture and pectin composition of two apple cultivars during storage”, *Postharvest Biol Technol*, t. 47, nr 3, s. 315–324, mar. 2008, doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.07.011.
- [15] E. Bonnin i M. Lahaye, „Contribution of cell wall-modifying enzymes to the texture of fleshy fruits. The example of apple”, w *Journal of the Serbian Chemical Society*, Serbian Chemical Society, 2013, s. 417–427. doi: 10.2298/JSC121123004B.
- [16] J. Wei, F. Ma, S. Shi, X. Qi, X. Zhu, i J. Yuan, „Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit”, *Postharvest Biol Technol*, t. 56, nr 2, s. 147–154, maj 2010, doi: 10.1016/j.postharvbio.2009.12.003.
- [17] D. Konopacka i W. J. Plocharski, „Effect of storage conditions on the relationship between apple firmness and texture acceptability”, *Postharvest Biol Technol*, t. 32, nr 2, s. 205–211, maj 2004, doi: 10.1016/j.postharvbio.2003.11.012.
- [18] S. C. Fry, „Tansley review Primary cell wall metabolism: tracking the careers of wall polymers in living plant cells”, doi: 10.1111/j.1469-8137.2003.00980.x.
- [19] M. C. Mccann1 i K. Roberts, „Changes in cell wall architecture during cell elongation”, 1994.
- [20] L. Billy *i in.*, „Relationship between texture and pectin composition of two apple cultivars during storage”, *Postharvest Biol Technol*, 2008, doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.07.011.
- [21] W. G. T. Willats, L. McCartney, W. Mackie, i J. P. Knox, „Pectin: cell biology and prospects for functional analysis”, 2001.

- [22] P. Videcoq *i in.*, „Examining the contribution of cell wall polysaccharides to the mechanical properties of apple parenchyma tissue using exogenous enzymes”, *J Exp Bot*, t. 68, nr 18, s. 5137–5146, sie. 2017, doi: 10.1093/jxb/erx329.
- [23] M. Oey, E. Vanstreels, J. Debaerdemaeker, B. Tijskens, H. Ramon, i B. M. Nicolai, „Influence of Turgor on Micromechanical and Structural Properties of Apple Tissue”, w *13th World Congress of Food Science & Technology*, Les Ulis, France: EDP Sciences, 2006. doi: 10.1051/IUFoST:20060855.
- [24] P. Videcoq *i in.*, „Examining the contribution of cell wall polysaccharides to the mechanical properties of apple parenchyma tissue using exogenous enzymes”, *J Exp Bot*, t. 68, nr 18, s. 5137–5146, sie. 2017, doi: 10.1093/jxb/erx329.
- [25] A. J. Matas, G. López-Casado, J. Cuartero, i A. Heredia, „Relative humidity and temperature modify the mechanical properties of isolated tomato fruit cuticles”, *Am J Bot*, t. 92, nr 3, s. 462–468, 2005, doi: 10.3732/ajb.92.3.462.
- [26] M. A. Perini, I. N. Sin, G. A. Martinez, i P. M. Civello, „Measurement of expansin activity and plant cell wall creep by using a commercial texture analyzer”, *Electronic Journal of Biotechnology*, t. 26, s. 12–19, mar. 2017, doi: 10.1016/j.ejbt.2016.12.003.
- [27] C. M. G. C. Renard, A. G. J. Voragen, J.-E. Thibault, i & W. Pilnik, „Studies on Apple Protopectin. IV: Apple Xyloglucans and Influence of Pectin Extraction Treatments on their Solubility”, 1991.
- [28] C. Pratt, „Apple Flower and Fruit: Morphology and Anatomy”, 1988.
- [29] J. Zhu, D. Zhu, L. Wang, K. Xue, J. Liao, i S. Zhang, „Effects of compression damage on mechanical behavior and quality attributes of apple fruit”, *Food Sci Technol Res*, t. 28, nr 1, s. 53–65, 2022, doi: 10.3136/fstr.FSTR-D-21-00178.
- [30] J. P. Moore, J. M. Farrant, i A. Driouich, „A role for pectin-associated arabinans in maintaining the flexibility of the plant cell wall during water deficit stress”, *Plant Signal Behav*, t. 3, nr 2, s. 102–104, 2008, doi: 10.4161/psb.3.2.4959.
- [31] J. A. De Vries, F. M. Rombouts, A. G. J. Voragen, i W. Pilnik, „Enzymic degradation of apple pectins”, 1982.
- [32] M. Horbens, A. Feldner, M. Höfer, i C. Neinhuis, „Ontogenetic tissue modification in Malus fruit peduncles: The role of sclereids”, *Ann Bot*, t. 113, nr 1, s. 105–118, sty. 2014, doi: 10.1093/aob/mct262.

- [33] Mirosław Krośniak, Agnieszka Piotrowska, i Jan Błaszczuk, „Potencjał antyoksydacyjny oraz kwasowość w zależności od odmiany i zastosowanej podkładki w jabłkach z okolic Krakowa”, *Bromatologia i Chemia Toksykologiczna*, t. XLII, nr 3, s. 904–909, 2009.
- [34] M. Xu *i in.*, „Transcriptome analysis insight into ethylene metabolism and pectinase activity of apricot (*Prunus armeniaca* L.) development and ripening”, *Sci Rep*, t. 11, nr 1, grudz. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-92832-6.
- [35] A. B. A. Abu-Goukh i H. A. Bashir, „Changes in pectic enzymes and cellulase activity during guava fruit ripening”, *Food Chem*, t. 83, nr 2, s. 213–218, 2003, doi: 10.1016/S0308-8146(03)00067-0.
- [36] F. Singh, V. K. Katiyar, i B. P. Singh, „Analytical study of turgor pressure in apple and potato tissues”, *Postharvest Biol Technol*, t. 89, s. 44–48, mar. 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.11.007.
- [37] S. D. Castellarin, G. A. Gambetta, H. Wada, K. A. Shackel, i M. A. Matthews, „Fruit ripening in *Vitis vinifera*: Spatiotemporal relationships among turgor, sugar accumulation, and anthocyanin biosynthesis”, *J Exp Bot*, t. 62, nr 12, s. 4345–4354, sie. 2011, doi: 10.1093/jxb/err150.
- [38] J. A. Abbott, „Quality measurement of fruits and vegetables”, 1999.
- [39] R. E. Milad i K. A. Shackel, „Water Relations of Fruit End Cracking in French Prune (*Prunus domestica* L. cv. French)”, 1992.
- [40] L. M. Blackman, D. P. Cullerne, P. Torreña, J. Taylor, i A. R. Hardham, „RNA-Seq analysis of the expression of genes encoding cell wall degrading enzymes during infection of lupin (*Lupinus angustifolius*) by *Phytophthora parasitica*”, *PLoS One*, t. 10, nr 9, wrz. 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0136899.
- [41] F. Jiang *i in.*, „Disassembly of the fruit cell wall by the ripening-associated polygalacturonase and expansin influences tomato cracking”, *Hortic Res*, t. 6, nr 1, grudz. 2019, doi: 10.1038/s41438-018-0105-3.
- [42] A. Zdunek, A. Kozioł, J. Cybulska, M. Lekka, i P. M. Pieczywek, „The stiffening of the cell walls observed during physiological softening of pears”, *Planta*, t. 243, nr 2, s. 519–529, luty 2016, doi: 10.1007/s00425-015-2423-0.

- [43] N. Ekrami-Rad, J. Khazaei, i M. H. Khoshtaghaza, „Selected mechanical properties of pomegranate peel and fruit”, *Int J Food Prop*, t. 14, nr 3, s. 570–582, maj 2011, doi: 10.1080/10942910903291920.
- [44] Z. Li, F. Miao, i J. Andrews, „Mechanical Models of Compression and Impact on Fresh Fruits”, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, t. 16, nr 6. Blackwell Publishing Inc., s. 1296–1312, 1 listopad 2017. doi: 10.1111/1541-4337.12296.
- [45] Z. Li i C. Thomas, „Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits”, *Trends in Food Science and Technology*, t. 35, nr 2. s. 138–150, luty 2014. doi: 10.1016/j.tifs.2013.12.001.
- [46] T. Fadiji, C. Coetzee, P. Pathare, i U. L. Opara, „Susceptibility to impact damage of apples inside ventilated corrugated paperboard packages: Effects of package design”, *Postharvest Biol Technol*, t. 111, s. 286–296, 2016, doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.09.023.
- [47] T. Fadiji, C. Coetzee, L. Chen, O. Chukwu, i U. L. Opara, „Susceptibility of apples to bruising inside ventilated corrugated paperboard packages during simulated transport damage”, *Postharvest Biol Technol*, t. 118, s. 111–119, 2016, doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.04.001.
- [48] S. Zarifneshat, A. Rohani, H. R. Ghassemzadeh, M. Sadeghi, E. Ahmadi, i M. Zarifneshat, „Predictions of apple bruise volume using artificial neural network”, *Comput Electron Agric*, t. 82, s. 75–86, 2012, doi: 10.1016/j.compag.2011.12.015.
- [49] Ł. Kuta, R. Stopa, P. Komarnicki, M. Słupska, i K. Górecki, „Determination of permissible load in selected parts of the human musculoskeletal system while feeding cows with maize silage”, *Applied Sciences (Switzerland)*, t. 10, nr 20, 2020, doi: 10.3390/app10207125.
- [50] Z. Li i C. Thomas, „Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits”, *Trends Food Sci Technol*, t. 35, nr 2, s. 138–150, 2014, doi: 10.1016/j.tifs.2013.12.001.
- [51] M. S. Razavi, A. Golmohammadi, R. Sedghi, i A. Asghari, „Prediction of bruise volume propagation of pear during the storage using soft computing methods”, *Food Sci Nutr*, t. 8, nr 2, s. 884–893, 2020, doi: 10.1002/fsn3.1365.

- [52] U. L. Opara i P. B. Pathare, „Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce-A review”, *Postharvest Biol Technol*, t. 91, s. 9–24, 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.12.009.
- [53] Z. Hussein, O. A. Fawole, i U. L. Opara, „Harvest and Postharvest Factors Affecting Bruise Damage of Fresh Fruits”, *Hortic Plant J*, t. 6, nr 1, s. 1–13, 2020, doi: 10.1016/j.hpj.2019.07.006.
- [54] L. A. Giefer, J. D. A. Castellanos, M. M. Babr, i M. Freitag, „Deep learning-based pose estimation of apples for inspection in logistic centers using single-perspective imaging”, *Processes*, t. 7, nr 7, 2019, doi: 10.3390/pr7070424.
- [55] P. Komarnicki, R. Stopa, D. Szyjewicz, Ł. Kuta, i T. Klimza, „Influence of Contact Surface Type on the Mechanical Damages of Apples Under Impact Loads”, *Food Bioproc Tech*, t. 10, nr 8, s. 1479–1494, 2017, doi: 10.1007/s11947-017-1918-z.
- [56] H. J. Timmermans A, Ambuko J, Belik W, „Food Losses and Waste in the Context of sustainable food systems”, *HLPE, Rome*, nr June, s. 1–117, 2014, [Online]. Dostępne na: <http://www.fao.org/3/a-i3901e.pdf>
- [57] P. Komarnicki, R. Stopa, Ł. Kuta, i D. Szyjewicz, „Determination of apple bruise resistance based on the surface pressure and contact area measurements under impact loads”, *Comput Electron Agric*, t. 142, s. 155–164, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.08.028.
- [58] J. Blahovec, „Stress Relaxation in cherry fruit”, 1996.
- [59] J. Wang, „Anisotropic relaxation properties of pear”, *Biosyst Eng*, t. 85, nr 1, s. 59–65, maj 2003, doi: 10.1016/S1537-5110(03)00017-5.
- [60] M. Peleg i J. F. Calzada, „Stress relaxation of deformed fruits and vegetables”.
- [61] „58. Evaluation of Stress-Relaxation in Fruit Tissue”.
- [62] B. H. Hassan, A. M. Alhamdan, i A. M. Elansari, „Stress relaxation of dates at khalal and rutab stages of maturity”, *J Food Eng*, t. 66, nr 4, s. 439–445, luty 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.014.
- [63] T. Wu, J. A. Abbott, i J. A. Abbott, „Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices”, 2002. [Online]. Dostępne na: [www.elsevier.com/locate/postharvbio](http://www.elsevier.com/locate/postharvbio)



- [64] A. G. Chakespari, A. Rajabipour, i H. Mobli, „Anisotropic Relaxation and Creep Properties of Apple (cv. Shafi Abadi and Golab Kohanz)”, *Advance Journal of Food Science and Technology*, t. 2, nr 4, s. 200–205, 2010.
- [65] W. Kuang i S. O. Nelson, „Dielectric relaxation characteristics of fresh fruits and vegetables from 3 to 20 GHz”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, t. 32, nr 2, s. 114–122, 1997, doi: 10.1080/08327823.1997.11688332.
- [66] M. Grotte, F. Duprat, D. Loonis, i E. Piétri, „Mechanical properties of the skin and the flesh of apples”, *Int J Food Prop*, t. 4, nr 1, s. 149–161, mar. 2001, doi: 10.1081/JFP-100002193.
- [67] J. Wang, Q. Cui, H. Li, i Y. Liu, „Mechanical properties and microstructure of apple peels during storage”, *Int J Food Prop*, t. 20, nr 5, s. 1159–1173, maj 2017, doi: 10.1080/10942912.2016.1203934.
- [68] F. Roger Harker, M.G.H. Stec, I.C. Hallett, i C.L. Bennett, „Texture of parenchymatous plant tissue: a comparison between tensile and other instrumental and sensory measurements of tissue strength and juiciness”, *Postharvest Biol Technol*, t. 11, nr 1997, s. 63–72, 1997, doi: 10.1016/S0925-5214(97)00018-5.
- [69] M. Thielen, T. Speck, i R. Seidel, „Viscoelasticity and compaction behaviour of the foam-like pomelo (*Citrus maxima*) peel”, *J Mater Sci*, t. 48, nr 9, s. 3469–3478, maj 2013, doi: 10.1007/s10853-013-7137-8.
- [70] S. T. A. R. Kajuna, W. K. Bilanski, i G. S. Mittal, „Effect of ripening on the parameters of three stress relaxation models for banana and plantain”, *Appl Eng Agric*, t. 14, nr 1, s. 55–61, 1998, doi: 10.13031/2013.19356.
- [71] Z. Xu i W. Chen, „A fractional-order model on new experiments of linear viscoelastic creep of Hami Melon”, *Computers and Mathematics with Applications*, t. 66, nr 5, s. 677–681, wrz. 2013, doi: 10.1016/j.camwa.2013.01.033.
- [72] G. Winisdorffer *i in.*, „Analysis of the dynamic mechanical properties of apple tissue and relationships with the intracellular water status, gas distribution, histological properties and chemical composition”, *Postharvest Biol Technol*, t. 104, s. 1–16, cze. 2015, doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.02.010.

- [73] C. Xu i Y. Li, „Development of carrot parenchyma softening during heating detected *in vivo* by dynamic mechanical analysis”, *Food Control*, t. 44, s. 214–219, 2014, doi: 10.1016/j.foodcont.2014.04.009.
- [74] J. Wang, D. Zheng, Q. Cui, S. Xu, i B. Jiang, „Study on tensile mechanical property and microstructure of fruit and vegetable peels”, *INMATEH - Agricultural Engineering*, t. 59, nr 3, s. 227–236, 2019, doi: 10.35633/INMATEH-59-25.
- [75] C. Xu i Y. Li, „Development of carrot parenchyma softening during heating detected *in vivo* by dynamic mechanical analysis”, *Food Control*, t. 44, s. 214–219, 2014, doi: 10.1016/j.foodcont.2014.04.009.
- [76] J. J. Benítez, S. Guzmán-Puyol, F. Vilaplana, J. A. Heredia-Guerrero, E. Domínguez, i A. Heredia, „Mechanical Performances of Isolated Cuticles Along Tomato Fruit Growth and Ripening”, *Front Plant Sci*, t. 12, grudz. 2021, doi: 10.3389/fpls.2021.787839.
- [77] R. L. Jackman, D. W. Stanley, R. L. Jackman, i D. W. Stanley, „CREEP BEHAVIOUR OF TOMATO PERICARP TISSUE AS INFLUENCED BY AMBIENT TEMPERATURE RIPENING AND CHILLED STORAGE”, 1995.
- [78] D. S. Thompson, „Extensiometric determination of the rheological properties of the epidermis of growing tomato fruit”.
- [79] K. Onoszko, „Metody stosowane w badaniach nieniszczących”, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, t. 4a, nr 2012, s. 11–14, 2012.
- [80] R. Lu i V. M. Puri, „Characterization of nonlinear behavior of apple flesh under stress relaxation”, *J Rheol (N Y N Y)*, t. 36, nr 2, s. 303–318, luty 1992, doi: 10.1122/1.550347.
- [81] D. Schoorl i J. E. Holt, „Bruise resistance measurements in apples”, *J Texture Stud*, t. 11, nr 4, s. 389–394, 1980.
- [82] J. E. Holt, D. Schoorl, i C. Lucas, „Prediction of Bruising in Impacted Multilayered Apple Packs”, 1981.
- [83] S. Cárdenas-Pérez, J. J. Chanona-Pérez, J. V. Méndez-Méndez, G. Calderón-Domínguez, R. López-Santiago, i I. Arzate-Vázquez, „Nanoindentation study on apple tissue and isolated cells by atomic force microscopy, image and fractal

- analysis”, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, t. 34, s. 234–242, kwi. 2016, doi: 10.1016/j.ifset.2016.02.004.
- [84] A. Zdunek i A. Kurenda, „Determination of the elastic properties of tomato fruit cells with an atomic force microscope”, *Sensors (Switzerland)*, t. 13, nr 9, s. 12175–12191, wrz. 2013, doi: 10.3390/s130912175.
- [85] R.F. Cook *i in.*, *Handbook of Nanoindentation With Biological Applications*, 1. wyd. Jenny Stanford Publishing, 2010.
- [86] S. Cárdenas-Pérez, J. J. Chanona-Pérez, J. V. Méndez-Méndez, G. Calderón-Domínguez, R. López-Santiago, i I. Arzate-Vázquez, „Nanoindentation study on apple tissue and isolated cells by atomic force microscopy, image and fractal analysis”, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, t. 34, s. 234–242, kwi. 2016, doi: 10.1016/j.ifset.2016.02.004.
- [87] R. Khodabakhshian, A. Naeemi, i M. R. Bayati, „Determination of texture properties of banana fruit cells with an atomic force microscope: A case study on elastic modulus and stiffness”, *J Texture Stud*, t. 52, nr 3, s. 389–399, cze. 2021, doi: 10.1111/jtxs.12594.
- [88] T. Yokokura, Y. Nakashima, Y. Yonemoto, Y. Hikichi, i Y. Nakanishi, „Method for measuring Young’s modulus of cells using a cell compression microdevice”, *Int J Eng Sci*, t. 114, s. 41–48, maj 2017, doi: 10.1016/j.ijengsci.2017.02.002.
- [89] T. Yokokura, Y. Nakashima, Y. Yonemoto, Y. Hikichi, i Y. Nakanishi, „Measurement of cell mechanical properties by cell compression microdevice”, w *2015 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, MHS 2015*, 2016. doi: 10.1109/MHS.2015.7438339.
- [90] S. Tian i H. Xu, „Nondestructive Methods for the Quality Assessment of Fruits and Vegetables Considering Their Physical and Biological Variability”, *Food Engineering Reviews*, t. 14, nr 3. Springer, s. 380–407, 1 wrzesień 2022. doi: 10.1007/s12393-021-09300-0.
- [91] S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, i P. A. Soni, „Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review”, w *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2018, s. 3690–3698. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.

- [92] P. D. C. Sanchez, N. Hashim, R. Shamsudin, i M. Z. Mohd Nor, „Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review”, *Trends Food Sci Technol*, t. 96, nr April 2019, s. 208–221, 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2019.12.027.
- [93] M. S. Razavi, A. Asghari, M. Azadbakh, i H. A. Shamsabadi, „Analyzing the pear bruised volume after static loading by Magnetic Resonance Imaging (MRI)”, *Sci Hortic*, t. 229, nr November 2017, s. 33–39, 2018, doi: 10.1016/j.scienta.2017.10.011.
- [94] D. Pietro Cavallo, M. Cefola, B. Pace, A. F. Logrieco, i G. Attolico, „Non-destructive and contactless quality evaluation of table grapes by a computer vision system”, *Comput Electron Agric*, t. 156, nr December 2018, s. 558–564, 2019, doi: 10.1016/j.compag.2018.12.019.
- [95] P. Komarnicki, R. Stopa, D. Szyjewicz, i M. Młotek, „Evaluation of bruise resistance of pears to impact load”, *Postharvest Biol Technol*, t. 114, s. 36–44, 2016, doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.11.017.
- [96] Z. Du, X. Zeng, X. Li, X. Ding, J. Cao, i W. Jiang, „Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables”, *Trends Food Sci Technol*, t. 99, nr February, s. 133–141, 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2020.02.024.
- [97] Z. Stropek i K. Gołacki, „A new method for measuring impact related bruises in fruits”, *Postharvest Biol Technol*, t. 110, s. 131–139, 2015, doi: 10.1016/j.postharvbio.2015.07.005.
- [98] Z. Stropek i K. Gołacki, „Bruise susceptibility and energy dissipation analysis in pears under impact loading conditions”, *Postharvest Biol Technol*, t. 163, nr September 2019, 2020, doi: 10.1016/j.postharvbio.2020.111120.
- [99] D. W. Pang, C. J. Studman, N. H. Banks, i P. H. Baas, „Rapid assessment of the susceptibility of apples to bruising”, *Journal of Agricultural and Engineering Research*, t. 64, nr 1, s. 37–47, 1996, doi: 10.1006/jaer.1996.0044.
- [100] K. K. Patel, M. A. Khan, i A. Kar, „Recent developments in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce—an overview”, *J Food Sci Technol*, t. 52, nr 1, s. 1–26, 2015, doi: 10.1007/s13197-012-0917-3.

- [101] Y. He, Q. Xiao, X. Bai, L. Zhou, F. Liu, i C. Zhang, „Recent progress of nondestructive techniques for fruits damage inspection: a review”, *Crit Rev Food Sci Nutr*, t. 0, nr 0, s. 1–19, 2021, doi: 10.1080/10408398.2021.1885342.
- [102] R. Stopa, P. Komarnicki, D. Szyjewicz, i Ł. Kuta, „Modeling of carrot root radial press process for different shapes of loading elements using the finite element method”, *Int J Food Prop*, t. 20, s. S340–S352, grudz. 2017, doi: 10.1080/10942912.2017.1296862.
- [103] P. Komarnicki, R. Stopa, Ł. Kuta, i D. Szyjewicz, „Determination of apple bruise resistance based on the surface pressure and contact area measurements under impact loads”, *Comput Electron Agric*, t. 142, s. 155–164, lis. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.08.028.
- [104] E. Diels *i in.*, „Assessment of bruise volumes in apples using X-ray computed tomography”, *Postharvest Biol Technol*, t. 128, s. 24–32, cze. 2017, doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.01.013.
- [105] Z. Du, Y. Hu, N. Ali Buttar, i A. Mahmood, „X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review”, *Food Science and Nutrition*, t. 7, nr 10. Wiley-Blackwell, s. 3146–3160, 1 październik 2019. doi: 10.1002/fsn3.1179.
- [106] Ogiela M. R., „Dopasowanie krzywej tonalnej i równoważenie poziomów szarości przy kontrastowaniu i wstępnej wizualizacji struktur w analizie zdjęć medycznych”, *Computer Science, Wydawnictwa AGH*, t. 2, s. 81–92, 2000.
- [107] L. Schoeman, P. Williams, A. du Plessis, i M. Manley, „X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT) for non-destructive characterisation of food microstructure”, *Trends in Food Science and Technology*, t. 47. Elsevier Ltd, s. 10–24, 1 styczeń 2016. doi: 10.1016/j.tifs.2015.10.016.
- [108] L. De Chiffre, S. Carmignato, J. P. Kruth, R. Schmitt, i A. Weckenmann, „Industrial applications of computed tomography”, *CIRP Ann Manuf Technol*, t. 63, nr 2, s. 655–677, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.011.
- [109] E. Herremans *i in.*, „Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars”, *Postharvest Biol Technol*, t. 87, s. 42–50, sty. 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.08.008.

- [110] H. Chen i J. De Baerdemaeker, „Finite element based modal analysis of fruit firmness”, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, t. 36, nr 6, s. 1827–1833, 1993, doi: 10.13031/2013.28529.
- [111] F. Duprat, ; M Grotte, ; E Pietri, ; D Loonis, i C. J. Studman, „The Acoustic Impulse Response Method for Measuring the Overall Firmness of Fruit”, 1997.
- [112] Z. Fathizadeh, M. Aboonajmi, i S. R. H. Beygi, „Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response”, *Sci Horti*, t. 262, luty 2020, doi: 10.1016/j.scienta.2019.109073.
- [113] Sueli R. i Fabiano A.N.F, *New Food Engineering Research Trends*. Nova Science Publishers, 2008.
- [114] S. Fan, C. Li, W. Huang, i L. Chen, „Detection of blueberry internal bruising over time using NIR hyperspectral reflectance imaging with optimum wavelengths”, *Postharvest Biol Technol*, t. 134, s. 55–66, grudz. 2017, doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.08.012.
- [115] B. M. Nicolai i in., „Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review”, *Postharvest Biology and Technology*, t. 46, nr 2, s. 99–118, listopad 2007. doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.06.024.
- [116] P. Pascoal-Faria i N. Alves, „Studying apple bruise using a finite element method analysis”, w *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., lip. 2017. doi: 10.1063/1.4992667.
- [117] N. Zulkifli, N. Hashim, H. H. Harith, i M. F. Mohamad Shukery, „Finite element modelling for fruit stress analysis - A review”, *Trends in Food Science and Technology*, t. 97. Elsevier Ltd, s. 29–37, 1 marzec 2020. doi: 10.1016/j.tifs.2019.12.029.
- [118] X. Liu, Z. Cao, L. Yang, H. Chen, i Y. Zhang, „Research on Damage Properties of Apples Based on Static Compression Combined with the Finite Element Method”, *Foods*, t. 11, nr 13, lip. 2022, doi: 10.3390/foods11131851.
- [119] R. Lu, A. K. Srivastava, i H. A. A. Ababneh, „Finite element analysis and experimental evaluation of bioyield probes for measuring apple fruit firmness”, *Trans ASABE*, t. 49, nr 1, s. 123, 2006.

- [120] R. Abbaszadeh, A. Rajabipour, H. Sadrnia, M. J. Mahjoob, M. Delshad, i H. Ahmadi, „Application of modal analysis to the watermelon through finite element modeling for use in ripeness assessment”, *J Food Eng*, t. 127, s. 80–84, kwi. 2014, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.11.020.
- [121] D. Du, B. Wang, J. Wang, F. Yao, i X. Hong, „Prediction of bruise susceptibility of harvested kiwifruit (*Actinidia chinensis*) using finite element method”, *Postharvest Biol Technol*, t. 152, s. 36–44, cze. 2019, doi: 10.1016/j.postharvbio.2019.02.013.
- [122] H. K. Celik, A. E. W. Rennie, i I. Akinci, „Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method”, *J Food Eng*, t. 104, nr 2, s. 293–298, 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020.
- [123] H. K. Celik, „Determination of bruise susceptibility of pears (Ankara variety) to impact load by means of FEM-based explicit dynamics simulation”, *Postharvest Biol Technol*, t. 128, s. 83–97, cze. 2017, doi: 10.1016/j.postharvbio.2017.01.015.
- [124] E. Ahmadi, H. Barikloo, i M. Kashfi, „Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers”, *Comput Electron Agric*, t. 121, s. 1–11, luty 2016, doi: 10.1016/j.compag.2015.11.017.
- [125] E. Dintwa, M. Van Zeebroeck, H. Ramon, i E. Tijskens, „Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit”, *Postharvest Biol Technol*, t. 49, nr 2, s. 260–276, sie. 2008, doi: 10.1016/j.postharvbio.2008.01.012.
- [126] D. Szyjewicz, Ł. Kuta, P. Działak, i R. Stopa, „An attempt to model the surface pressures of apples using the finite element method”, *Applied Sciences (Switzerland)*, t. 11, nr 16, sie. 2021, doi: 10.3390/app11167579.
- [127] R. Stopa, P. Komarnicki, Ł. Kuta, D. Szyjewicz, i M. Słupska, „Modeling with the finite element method the influence of shaped elements of loading components on the surface pressure distribution of carrot roots”, *Comput Electron Agric*, t. 167, 2019, doi: 10.1016/j.compag.2019.105046.
- [128] C. J. Coetzee i S. G. Lombard, „The destemming of grapes: Experiments and discrete element modelling”, *Biosyst Eng*, t. 114, nr 3, s. 232–248, mar. 2013, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.12.014.

- [129] R. Stopa, D. Szyjewicz, P. Komarnicki, i Ł. Kuta, „Determining the resistance to mechanical damage of apples under impact loads”, *Postharvest Biol Technol*, t. 146, nr August, s. 79–89, 2018, doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.08.016.
- [130] T. Guz, „Oznaczanie indeksu skrobiowego jabłek metodą komputerowej analizy obrazu”, Lublin, 2003.
- [131] Pijanowski E., Mrożewski S., Horubała A., i Jarczyk A., *Technologia produktów owocowych i warzywnych*. Warszawa: PWRiL, 1973.
- [132] T. Chen, D. Ji, Z. Zhang, B. Li, G. Qin, i S. Tian, „Advances and Strategies for Controlling the Quality and Safety of Postharvest Fruit”, *Engineering*, t. 7, nr 8. Elsevier Ltd, s. 1177–1184, 1 sierpień 2021. doi: 10.1016/j.eng.2020.07.029.
- [133] E. Mehinagic, G. Royer, R. Symoneaux, F. Jourjon, i C. Prost, „Characterization of odor-active volatiles in apples: Influence of cultivars and maturity stage”, *J Agric Food Chem*, t. 54, nr 7, s. 2678–2687, kwi. 2006, doi: 10.1021/jf052288n.
- [134] J. Lee, M. C. Jeong, i K. H. Ku, „Chemical, physical, and sensory properties of 1-MCP-treated Fuji apple (*Malus domestica* Borkh.) fruits after long-term cold storage”, *Appl Biol Chem*, t. 60, nr 4, s. 363–374, sie. 2017, doi: 10.1007/s13765-017-0288-6.
- [135] M. C. Alamar, E. Vanstreels, M. L. Oey, E. Moltó, i B. M. Nicolai, „Micromechanical behaviour of apple tissue in tensile and compression tests: Storage conditions and cultivar effect”, *J Food Eng*, t. 86, nr 3, s. 324–333, cze. 2008, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.10.012.
- [136] J. F. V Vincent, „Relationship between Density and Stiffness of Apple Flesh”, 1989.
- [137] A. A. Khan i J. F. V Vincent, „Compressive stiffness and fracture properties of apple and potato parenchyma”, Whiteknights Reading, Berkshire, United Kingdom, lip. 1993.
- [138] A. A. Khan i J. F. V Vincent, „Anisotropy in the fracture properties of apple flesh as investigated by crack-opening tests”, Whiteknights, Reading, Berkshire, United Kingdom, lis. 1993.
- [139] V. Cornuault, S. Pose, i J. P. Knox, „Extraction, texture analysis and polysaccharide epitope mapping data of sequential extracts of strawberry, apple, tomato and



- aubergine fruit parenchyma”, *Data Brief*, t. 17, s. 314–320, kwi. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.01.013.
- [140] E. Dintwa *i in.*, „A finite element model for mechanical deformation of single tomato suspension cells”, *J Food Eng*, t. 103, nr 3, s. 265–272, kwi. 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.10.023.
- [141] G.-W. Kim, G.-S. Do, Y. Bae, i Y. Sagara, „Analysis of Mechanical Properties of Whole Apple Using Finite Element Method Based on Three-Dimensional Real Geometry”.
- [142] M. Van Zeebroeck *i in.*, „The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Case study of vibration damage during apple bulk transport”, *Postharvest Biol Technol*, t. 41, nr 1, s. 92–100, lip. 2006, doi: 10.1016/j.postharvbio.2006.02.006.
- [143] R. Stopa, P. Komarnicki, D. Szyjewicz, i Ł. Kuta, „Modeling of carrot root radial press process for different shapes of loading elements using the finite element method”, *Int J Food Prop*, t. 20, nr March, s. S340–S352, 2017, doi: 10.1080/10942912.2017.1296862.
- [144] G.-W. Kim *i in.*, „Determination of the Viscoelastic Properties of Apple Flesh under Quasi-Static Compression Based on Finite Element Method Optimization”.

## 14. Spis stron www

www1 - <https://www.e-sadownictwo.pl/wiadomosci/z-kraju/6607-chopin-nowa-polska-odmiana-jabloni-sad-sggw-2018> (dostęp 15.05.2023)

www2 - [https://www.wikiwand.com/pl/Ściana\\_komórkowa](https://www.wikiwand.com/pl/Ściana_komórkowa) (dostęp 15.05.2023)

www3 - <https://pl.wikipedia.org/wiki/Turgor> (dostęp 15.05.2023)

www4 - [https://pl.wikipedia.org/wiki/Mikroskop\\_sił\\_atomowych](https://pl.wikipedia.org/wiki/Mikroskop_sił_atomowych) (dostęp 15.05.2023)

## 15. Spis rysunków

Rysunek 1. Budowa ściany komórkowej [www2] .....	9
Rysunek 2. Wpływ turgoru na ścianę komórkową [www3].....	11
Rysunek 3. Metoda pomiaru objętości obić z zastosowaniem techniki niszczącej [81] .....	15
Rysunek 4. Metoda pomiaru właściwości materiału z zastosowaniem mikroskopii sił atomowych (AFM) [www4] .....	17
Rysunek 5. Metoda pomiaru właściwości wytrzymałościowych komórek przy użyciu mikrouządzenia ( <i>opracowanie własne na podstawie [89]</i> ).....	18
Rysunek 6. Metoda wyznaczania obić owoców z zastosowaniem tomografii komputerowej [104].....	20
Rysunek 7. Porównanie metody MRI z tomografią komputerową [109].....	20
Rysunek 8. Modelowanie odpowiedzi akustycznej jabłka w programie Abaqus CAE ( <i>opracowanie własne</i> ).....	21
Rysunek 9. Schemat stanowiska pomiarowego do testów akustycznych ( <i>opracowanie własne</i> ).....	22
Rysunek 10. Wizualizacja naprężeń Hubera-Misesa występujących w warstwiczy przekroju jabłka ( <i>opracowanie własne</i> ) .....	24
Rysunek 11. Modele marchwi obciążone elementami o różnych kształtach [127].....	26
Rysunek 12. Walidacja modelu DEM procesu odszypułkowania winogron [128].....	27
Rysunek 13. Metoda wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych parenchymy ( <i>opracowanie własne</i> ).....	32
Rysunek 14. Metoda modyfikacji danych do kalibracji materiału sprężystoplastycznego ( <i>opracowanie własne</i> ).....	33
Rysunek 15. Metoda wyznaczenia współczynnika Poissona tkanki parenchymy ( <i>opracowanie własne</i> ).....	33
Rysunek 16. Metoda wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych epidermy ( <i>opracowanie własne</i> ).....	34
Rysunek 17. Przykładowe wyniki testów ściskania jabłek wraz z wykresem stanowiącym średnią z pięciu powtórzeń ( <i>opracowanie własne</i> ).....	35
Rysunek 18. Wykres zmian powierzchni styku jabłek w funkcji przemieszczenia elementu roboczego wraz z przykładowymi warstwicami ( <i>opracowanie własne</i> ).....	36
Rysunek 19. Metoda modyfikacji danych testowych ( <i>opracowanie własne</i> ) .....	36

Rysunek 20. Metoda wyznaczania stref uszkodzeń jabłka: a) oryginalne zdjęcie skanu, b) zdjęcie poddane analizie obrazu ( <i>opracowanie własne</i> ).....	37
Rysunek 21. Przykładowy zakres uszkodzeń jabłek dla różnych wartości siły obciążającej ( <i>opracowanie własne</i> ).....	38
Rysunek 22. Schemat procesu budowy modeli dyskretnych ( <i>opracowanie własne</i> ).....	38
Rysunek 23. Schemat procesu walidacji modeli sprężystych ( <i>opracowanie własne</i> ).....	39
Rysunek 24. Schemat procesu walidacji modeli sprężystoplastycznych ( <i>opracowanie własne</i> ).....	40
Rysunek 25. Przykładowe wyniki warstwicy naprężeń dla modelu sprężystego i sprężystoplastycznego ( <i>opracowanie własne</i> ).....	40
Rysunek 26. Metoda wyznaczania naprężeń niszczących parenchymę ( <i>opracowanie własne</i> ).....	41
Rysunek 27. Wykresy średnich wartości naprężeń w funkcji odkształcenia tkanki parenchymy na poszczególnych etapach rozwoju fizjologicznego owoców.....	44
Rysunek 28. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia w teście ściskania dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców.....	47
Rysunek 29. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia w teście ściskania zawierające średnie wyniki dla poszczególnych etapów dojrzałości.....	48
Rysunek 30. Wykresy średnich powierzchni styku jabłek w funkcji siły na poszczególnych etapach rozwoju fizjologicznego.....	49
Rysunek 31. Wpływ wartości siły niszczącej na zakres uszkodzeń owoców.....	50
Rysunek 32. Wpływ etapu dojrzałości na zakres uszkodzeń owoców.....	51
Rysunek 33. Metoda pomiaru zakresu uszkodzeń owoców.....	52
Rysunek 34. Elementy wchodzące w skład modelu dyskretnego.....	54
Rysunek 35. Dane zastosowane do kalibracji materiału sprężystoplastycznego.....	56
Rysunek 36. Schemat metody modelowania kontaktu.....	58
Rysunek 37. Schemat metody modelowania warunków brzegowych.....	58
Rysunek 38. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia dla wszystkich wariantów modeli.....	60
Rysunek 39. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia wykorzystane do walidacji modeli sprężystych w oparciu o zmodyfikowane wyniki testów.....	61
Rysunek 40. Wykres rozrzutu wartości przemieszczeń modeli sprężystych porównywanych ze zmodyfikowanymi wynikami testów.....	62
Rysunek 41. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia wykorzystane do walidacji modeli sprężystych w oparciu o wyniki testów.....	63

Rysunek 42. Wykres rozrzutu wartości przemieszczeń modeli sprężystych porównywanych z wynikami testów .....	63
Rysunek 43. Wykresy siły w funkcji przemieszczenia wykorzystane do walidacji modeli sprężystoplastycznych w oparciu o wyniki testów .....	64
Rysunek 44. Wykres rozrzutu wartości przemieszczeń modeli sprężystoplastycznych porównywanych z wynikami testów.....	65
Rysunek 45. Przykładowe warstwy nacisków pozyskanych do walidacji modeli dyskretnych.....	66
Rysunek 46. Wykresy wartości powierzchni styku w funkcji siły pozyskanych do walidacji modeli sprężystych .....	66
Rysunek 47. Przykładowe warstwy nacisków dla etapu dojrzałości zbiorczej, które posłużyły do walidacji modeli sprężystych .....	67
Rysunek 48. Wykresy powierzchni styku w funkcji siły wykorzystane do walidacji modeli sprężystych .....	68
Rysunek 49. Wykres rozrzutu wartości powierzchni styku uzyskanych przez modele sprężyste .....	68
Rysunek 50. Przykładowe warstwy nacisków dla etapu dojrzałości zbiorczej, które posłużyły do walidacji modeli sprężystoplastycznych .....	69
Rysunek 51. Wykresy powierzchni styku w funkcji siły wykorzystane do walidacji modeli sprężystoplastycznych .....	70
Rysunek 52. Wykres rozrzutu wartości powierzchni styku uzyskanych przez modele sprężystoplastyczne .....	70
Rysunek 53. Obrazy mikrotomograficzne i warstwy naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystych .....	72
Rysunek 54. Obrazy mikrotomograficzne i warstwy naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych .....	74

## 16. Spis tabel

Tabela 1. Wyniki badań indeksu Streifa dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców .....	42
Tabela 2. Wyniki pomiarów gęstości i wymiarów całych owoców .....	42
Tabela 3. Wyniki badań właściwości fizykochemicznych dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców .....	43
Tabela 4. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych parenchymy.....	45
Tabela 5. Wyniki pomiarów współczynnika Poissona dla poszczególnych etapów rozwoju fizjologicznego owoców .....	45
Tabela 6. Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych epidermy .....	46
Tabela 7. Zestawienie uśrednionych wartości wyników pomiaru powierzchni styku w teście ściskania owoców .....	49
Tabela 8. Wymiary zakresu uszkodzeń owoców wyznaczone na podstawie zdjęć mikrotomograficznych.....	52
Tabela 9. Średnie głębokości uszkodzeń owoców dla poszczególnych wartości sił.....	53
Tabela 10. Podstawowe wymiary modelu i jego elementów.....	54
Tabela 11. Sprężyste właściwości materiałów przypisanych do poszczególnych elementów modelu.....	55
Tabela 12. Właściwości plastyczne tkanki parenchymy.....	56
Tabela 13. Podstawowe parametry ustawienia kroku analiz .....	57
Tabela 14. Parametry warunków brzegowych przypisane do poszczególnych elementów modelu.....	59
Tabela 15. Parametry dyskretyzacji całego modelu.....	59
Tabela 16. Wartości odchylenia i dopasowania modeli sprężystych do zmodyfikowanych wyników przemieszczeń w funkcji siły uzyskanych w trakcie testów .....	62
Tabela 17. Wartości odchylenia i dopasowania modeli sprężystych do wyników przemieszczeń w funkcji siły uzyskanych w trakcie testów .....	64
Tabela 18. Wartości odchylenia i dopasowania modeli sprężystoplastycznych do wyników przemieszczeń w funkcji siły uzyskanych w trakcie testów .....	65
Tabela 19. Wartości odchylenia i dopasowania modeli sprężystych do wyników powierzchni styku uzyskanych w testach .....	68
Tabela 20. Wartości odchylenia i dopasowania modeli sprężystoplastycznych do wyników powierzchni styku uzyskanych w testach .....	71

Tabela 21. Zestawienie wyników naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystych.....	73
Tabela 22. Zestawienie wyników naprężeń Hubera-Misesa dla modeli sprężystoplastycznych .....	75
Tabela 23. Zestawienie wyników naprężeń modelowych z wynikami uzyskanymi w badaniach empirycznych.....	75