

**AUTOREFERAT**  
**Opis osiągnięcia naukowego**

---

**Dr inż. Zbigniew Stropek**

Katedra Inżynierii Mechanicznej i Automatyki

Wydział Inżynierii Produkcji

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin

e-mail: [zbigniew.stropek@up.lublin.pl](mailto:zbigniew.stropek@up.lublin.pl)

---

**Lublin 2016**

---

## SPIS TREŚCI

<b>1. Dane personalne.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....</b>	<b>3</b>
<b>4. Wskazanie osiągnięcia.....</b>	<b>4</b>
4.1. Określenie osiągnięcia.....	4
4.2. Wprowadzenie.....	5
4.3. Cel badań .....	8
4.4. Materiał, stanowiska pomiarowe i metody badawcze.....	9
4.5. Wyniki badań.....	11
4.6. Omówienie wyników badań w odniesieniu do postawionych celów naukowych....	15
4.7. Podsumowanie.....	20
4.8. Kierunek przyszłych badań.....	20
4.9. Bibliografia.....	21

## 1. DANE PERSONALNE

Imię i Nazwisko: **Zbigniew Stropek**

Miejsce pracy: Katedra Inżynierii Mechanicznej i Automatyki  
Wydział Inżynierii Produkcji  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
ul. Głęboka 28,  
20-612 Lublin

## 2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE - Z PODANIEM NAZWY, MIEJSCA I ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ:

- a) magister inżynier, kierunek: mechanika i budowa maszyn, specjalność: samochody i ciągniki, Politechnika Lubelska. Wydział Mechaniczny, 30.06.1995 r., temat pracy magisterskiej: *Badania porównawcze skuteczności oczyszczania spalin dla silników autobusów komunikacji miejskiej*. promotor: dr inż. Piotr Szczęsny.
- b) doktor nauk rolniczych, w dyscyplinie inżynieria rolnicza - specjalność agrofizyka. Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Techniki Rolniczej, 15.05.2003 r., temat pracy doktorskiej: *Modelowanie charakterystyk lepkością wybranych owoców i warzyw*. promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Gołacki.

## 3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH:

**01.10.1995-26.06.2003** - asystent, Akademia Rolnicza w Lublinie, Wydział Techniki Rolniczej, Zakład Teorii Maszyn i Automatyki,

**26.06.2003 - do chwili obecnej** - adiunkt, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji,

26.06.2003 - 1.10.2011 - Zakład Teorii Maszyn i Automatyki,

1.10.2011 - do chwili obecnej - Katedra Inżynierii Mechanicznej i Automatyki

#### 4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 ROKU O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. NR 65, POZ. 595 ZE ZM.)

##### 4.1. OKREŚLENIE OSIĄGNIĘCIA

###### a) Tytuł osiągnięcia naukowego

#### CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE JABŁEK W WARUNKACH OBCIĄŻENIA UDAROWEGO

###### b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, nazwa wydawnictwa, rok wydania, numer)

Osiągnięcie stanowi monotematyczny cykl publikacji, wydanych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

Lp	Autorzy, tytuł, czasopismo, rok wydania, numer, strony, (pkt wg MNiSW, IF)
O1	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2007. Relation between mass and drop height at impact causing bruising of apple. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, Vol. 57, No 2(A), 165-167 ( <b>IF = 0, MNiSW=6</b> )
O2	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2008. Effect of mass on impact parameters of apples., Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN 8, 223-230. ( <b>IF= 0, MNiSW= 6</b> )
O3	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2010. Determining the coefficient of restitution of apples at different impact velocities., Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN 10, 417-424 ( <b>IF = 0, MNiSW=9</b> )
O4	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2013. The effect of drop height on bruising of selected apple varieties. Postharvest Biology and Technology 85, 167-172 ( <b>IF = 2.628, MNiSW=40</b> )
O5	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2015. A new method for measuring impact related bruises in fruits. Postharvest Biology and Technology 110, 131-139. ( <b>IF<sub>2014</sub>= 2.223, MNiSW=40</b> )
O6	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2016. Quantity assessment of plastic deformation energy under impact loading conditions of selected apple cultivars Postharvest Biology and Technology 115, 9-17. ( <b>IF<sub>2014</sub> = 2.223, MNiSW<sub>2015</sub>=40</b> )
O7	<b>Stropek Z.</b> , Gołacki K., 2016. Methodological aspects of determining apple mechanical properties during impact. International Journal of Food Properties, <a href="http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2015.1063069">http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2015.1063069</a> ( <b>IF<sub>2014</sub> = 0.915, MNiSW<sub>2015</sub>=25</b> )

##### ŁĄCZNIE:

- **Impact Factor**            7.989
- **Punkty MNiSW**            166

*Punktacja MNiSW - zgodnie z rokiem wydania. W przypadku publikacji z 2016 roku podano punktację na podstawie Komunikatu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 23 grudnia 2015 r.*  
*Impact Factor (IF) - zgodnie z rokiem wydania. W przypadku publikacji z 2015 i 2016 roku podano IF z 2014 roku.*

Oświadczenia współautora prac określające szczegółowo jego indywidualny wkład w powstanie publikacji znajdują się w **Załączniku 4**.

**c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

W latach 2007-2015 realizowałem studia literaturowe i prace badawcze związane z reakcją i odpornością mechaniczną jabłek w warunkach obciążeń udarowych. Uzyskane rezultaty opublikowałem w postaci cyklu prac (**OI-O7**), które uważam za swoje największe osiągnięcie w dotychczasowej działalności naukowej i przedkładam jako podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

#### **4.2. WPROWADZENIE**

Zagadnienie właściwości mechanicznych materiałów roślinnych należy do ważnych obszarów ówczesnych badań. Powszechna tendencja do mechanizacji zbioru i operacji pozbiorowych wiąże się ze wzrostem ilości uszkodzeń i pogorszeniem jakości owoców stąd też wynika konieczność prowadzenia badań nad określeniem ich mechanicznych właściwości. Znajomość tych właściwości jest także konieczna w procesie projektowania maszyn zbierających i sortujących. Straty wywołane mechanicznym uszkodzeniem rozmaitych produktów rolniczych w tym także owoców i warzyw są szacowane na całym świecie na setki milionów. Sparks (1976) w latach siedemdziesiątych poprzedniego wieku oszacował straty powstałe w wyniku mechanicznych uszkodzeń na 25-50% w ziemniakach, 30% w truskawkach, 60% w sałacie, 25% w pomidorach, 17% w brzoskwiniach, 20-30% w melonach, 11% w papryce, 8% w ogórkach, i 8% w jabłkach. W latach dziewięćdziesiątych w Japonii pozbiorowe straty w warzywach osiągały 10-30%. W Korei straty warzyw obliczano na 26%, a owoców na 10%. Na Filipinach straty w warzywach szacowano na 42%, a w owocach na 28% (FFTC, 1994). Schaper i Varns (1986) identyfikowali główne przyczyny strat w kolejnych etapach od zbioru do przetwarzania na przykładzie ziemniaka i stwierdzili, że jest to zbiór (5-15%), przeładunek przed przechowywaniem (15-45%) i transport od przechowywania do przetworzenia (5-20%). Szacuje się, że zmniejszenie strat w łańcuchu rynkowym o połowę spowodowałoby powstanie zasobów żywności dla 1 miliarda ludzi bez konieczności tworzenia nowych obszarów produkcji roślinnej. Hyde i in. (1990) pokazał, że każde zmniejszenie o 1% ilości uszkodzeń ziemniaków w USA tylko w jednym stanie Washington generowałoby 3 mln dolarów oszczędności dla przemysłu.

Innym aspektem jest wzrastająca świadomość wśród konsumentów dotycząca jakości produktów. Wymusiła ona np. opracowanie lepszych maszyn sortujących, w których wykorzystano większą znajomość mechanicznych właściwości materiałów roślinnych i ich reakcji na różnego rodzaju obciążenia. Badania przeprowadzone w USA w latach osiemdziesiątych poprzedniego wieku na przemysłowych liniach pakujących pokazały, że 75% jabłek było obitych już przed zapakowaniem, natomiast na końcu linii pakujących ilość obitych jabłek sięgała 89% (Bartram i in., 1983). W innych badaniach przemysłowych linii pakujących stwierdzono, że obiciu uległo nawet 100% zapakowanych jabłek (Brown i in., 1989).

Obszar badań właściwości fizycznych materiałów pochodzenia biologicznego wymaga zastosowania zasad i praw klasycznej mechaniki, która między innymi zajmuje się zjawiskiem uderzenia. Definiuje się je jako nagłe, krótkotrwałe zetknięcie się ciał, przy którym następuje skończona zmiana ich pędów. Uderzenie cechuje występowanie sił o dużej wartości, które powstają i zanikają w bardzo krótkim czasie rzędu milisekund. Zwykle uderzeniu towarzyszą fale naprężeń, które rozchodzą się od punktu styku i rozprzestrzeniają się dalej na cały obszar zderzających się ciał. Dodatkowo występuje również zjawisko lokalnego styku, które charakteryzuje się tym, że stan naprężeń w punkcie kontaktu różni się znacznie od stanu w obszarach odległych od miejsca zderzenia.

Udary można zaliczyć do podstawowych i ważnych zjawisk, które zasługują na specjalną uwagę ze względu na występowanie w wielu operacjach rolniczych. Są one nie tylko jednym z najbardziej powszechnych powodów mechanicznego uszkodzenia produktów rolniczych podczas zbioru oraz późniejszego transportu, przeładunku, sortowania i przechowywania, ale także ich charakterystyki są wykorzystywane do oceny jakościowej materiału. W owocach i warzywach można wyróżnić fizyczny i chemiczny aspekt uszkodzeń udarowych. Aspekt fizyczny to mechaniczne zniszczenie tkanek. Wystąpienie uszkodzenia w wyniku uderzenia zależy od struktury tkanki komórkowej owocu. W przypadku jabłka tkanka posiada duże przestrzenie międzykomórkowe wypełnione powietrzem (Holt i in., 1981). Podczas uderzenia komórki odkształcają się sprężysto przy powierzchni styku, aż do wystąpienia ich uszkodzenia. Granica pomiędzy obszarem odkształceń sprężystych i plastycznych (nieodwracalnych) przesuwana się w głąb owocu, aż cała energia uderzenia będzie rozproszona przez uszkodzone komórki lub zgromadzona w sprężysto rozszerzonych ściankach komórkowych. Aspekt chemiczny to przebarwienie występujące w obszarze uszkodzenia będące następstwem enzymatycznego i nieenzymatycznego utleniania

fenolowych substancji biorących udział w reakcji. W wyniku obciążenia udarowego następuje pęknięcie błon komórkowych i mieszanie się substratu z enzymem.

Uderzenie jest przyczyną powstawania różnego rodzaju uszkodzeń takich jak: obicia, przebicia, otarcia, przecięcia i pęknięcia. Jednak obicie jest najbardziej powszechnym i najczęstszym typem uszkodzenia mechanicznego występującego w owocach i warzywach. Brown i in. (1990) na podstawie swoich badań dotyczących zmniejszenia uszkodzeń jabłek na liniach pakujących oszacowali, że przeciętych jabłek było tylko 1-4%, przebitych 3%, natomiast pozostałe uszkodzenia były spowodowane obiciem. Obicie jest rodzajem podskórnego uszkodzenia tkanki bez pęknięcia skórki spowodowane działaniem nadmiernej siły na powierzchnię owocu. Wizualnym skutkiem obicia jest przebarwienie uszkodzonej tkanki, które pojawia się po około 12 godzinach od wystąpienia uderzenia.

Podstawy teoretyczne zjawiska uderzenia zostały opracowane przez Goldsmitha (1960). Jednakże praktyczne zastosowanie zaproponowanych rozwiązań w rolnictwie nastęrcza wiele trudności. Produkty rolnicze charakteryzują się dużą złożonością zachowania i różnią się znacznie od masowo wytwarzanych materiałów konstrukcyjnych. Składają się z żywej tkanki i stale ulegają zmianom w kształcie i wielkości. Dodatkowo oddychanie i inne aspekty procesów życiowych utrudniają stworzenie kompletnego opisu zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem. Materiały biologiczne najczęściej opisuje się jako niehomogeniczne, anizotropowe i nieliniowo lepkosprężyste. W związku z tym teoretyczna analiza obciążenia udarowego produktów rolniczych prowadzi często do skomplikowanych matematycznych równań, a istnienie formuł analitycznych jest obwarowane wieloma założeniami i uproszczeniami.

Dotychczasowe badania procesu uderzenia były określane przy założeniu, że uczestniczące obiekty traktuje się jako ciała sztywne, dla których obowiązuje prawo zachowania pędu. Jednakże takie założenie nie sprawdza się w przypadku wyznaczania wartości naprężenia, siły reakcji czy deformacji ponieważ uniemożliwia to uwzględnienie takich cech uderzenia jak propagacja fal naprężenia i odkształcenia czy lokalne zjawisko styku ciał. Stąd też najczęściej wyniki badań przedstawia się w postaci makroskopowego opisu zjawiska uderzenia z punktu widzenia mechaniki ośrodka ciągłego. Takie podejście pozwala wyznaczyć wiele parametrów i dostarczyć informacji o zachowaniu się materiałów rolniczych pod obciążeniem udarowym.

Dlatego też podejmuje się badania mające na celu odtworzenie warunków obciążeń udarowych jakim podlegają owoce i warzywa podczas zbioru oraz innych operacji pozbiorowych (Li i Thomas, 2014). Do najpowszechniej stosowanych metod należą testy

zrzutu (Ragni i Berardinelli, 2001; Menesatti i Paglia, 2001; Lewis i in., 2007; Celik i in., 2011; Ozbek i in., 2014) oraz testy wahadłowe (Bollen i in., 2001; Polat i in., 2012; Komarnicki i in., 2016). Alternatywną metodą jest zamocowanie produktu na stałe i zrzucanie na niego ciężaru o znanej masie i kształcie z określonej wysokości (Yen i Wan, 2003; Van Canneyt i in., 2003; Jarimopas i in., 2007; Ahmadi i in., 2010; Abedi i Ahmadi, 2014). Badania udarowe ukierunkowane są na pomiar i następnie ocenę ilościową wielkości obicia (Bollen i in., 1999; Kabas, 2010). Kolejnym obszarem badań jest określenie zależności między rozmiarem obicia a parametrami mechanicznymi udaru takimi jak: maksymalna siła reakcji, energia uderzenia, energia pochłonięta, prędkość uderzenia, wysokość zrzutu (Kitthawee i in., 2011; Boydas i in., 2014). Innym kierunkiem badań jest wyznaczanie czynników wpływających na uszkodzenia wywołane przez obicie. Powstawanie obicia oraz jego wielkość zależy od wielu warunków takich jak: odmiana, stopień dojrzałości, data zbioru, temperatura, nawodnienie, pogoda (Van Zeebroeck i in., 2007). Ale na obicie wpływają również czynniki związane z samym owocem zarówno makroskopowe takie jak: wielkość i kształt owocu (masa, promień krzywizny), jędrność, turgor (Opara, 2007) jak i mikroskopowe: wytrzymałość ścian komórkowych, sprężystość i kształt komórek (Devaux i in., 2005; Vanstreels i in., 2005; Alamar i in., 2008).

Według Mohsenina (1986) najlepszym opisem mechanicznego zachowania się owocu podczas obciążenia jest zależność siła-przemieszczenie lub naprężenie-odkształcenie. Natomiast analizując zjawisko uderzenia należy pamiętać, że dla większości produktów rolniczych zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem jest funkcją czasu. W sytuacji gdy mamy do czynienia z wyższymi prędkościami oraz owocami i warzywami, które w stanie dojrzałym są miękkie, uderzenie nie może być rozpatrywane wyłącznie jako sprężyste. Stąd też związki konstytutywne muszą być powiązane z analizą wyjaśniającą niesprężystą deformację. W związku z tym rozwiązanie problemu uderzenia materiałów biologicznych traktowanych jako lepko-sprężysto-plastyczne opisywałoby dokładniej zjawisko udaru w rolnictwie.

#### 4.3. CEL BADAŃ

Głównym celem badań prowadzonych i zaprezentowanych w publikacjach **O1-O7** stanowiących osiągnięcie naukowe było:

1. Określenie kryterium zniszczenia tkanki jabłka w warunkach obciążenia udarowego w odniesieniu do całych owoców i walcowych próbek.



2. Opracowanie nowej metody obliczania energii deformacji plastycznych oraz przedstawienie innych sposobów obliczania energii pochłoniętej podczas uderzenia.
3. Wyznaczenie parametrów najlepiej opisujących początek wystąpieniem obicia podczas uderzenia.
4. Analiza zależności pomiędzy parametrami opisującymi udar, własnościami wytrzymałościowymi tkanki owocu a wielkościami charakteryzującymi skutki udarów.
5. Ocena wpływu masy na parametry uderzenia jabłek oraz określenie granicy obicia jabłek w zależności od ich masy i wysokości zrzutu.

#### **4.4. MATERIAŁ, STANOWISKA POMIAROWE I METODY BADAWCZE**

Badania przeprowadzano na jabłkach różnych odmian zebranych w sadzie doświadczalnym Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Podstawowym kryterium wyboru odmian jabłek był ich kształt najbardziej zbliżony do kulistego. Eliminowało to duży rozrzut wielkości pola powierzchni obicia oraz ułatwiało jego wyznaczenie, które w tym przypadku miało najczęściej kształt elipsy lub okręgu. Stąd też testowano następujące odmiany: "Freedom", "Rubin", "Rajka", "Florina", "Jester", "Pinowa", "Royal Gala". W pracach, których celem było określenie wpływu masy na badane parametry wybierano jabłka o masie 80-190 g (**O1**) oraz 120-180 g (**O2**). Natomiast w pracach, które miały na celu wyeliminowanie wpływu masy i kształtu (promienia krzywizny) na wielkość obicia wszystkie owoce miały masę 185-190 g i średnicę maksymalną 80-85 mm (**O3**) albo masę 170-180 g oraz średnicę maksymalną 75-80 mm (**O4-O6**). W pracach (**O4-O6**) innym ważnym kryterium wyboru odmian jabłek była ich jędrność. W pracy **O7** przedmiotem badań były walcowe próbki jabłek odmiany "Braeburn" o trzech średnicach 10, 15, 20 mm oraz trzech długościach 17, 19, 21 mm.

W badaniach udarowych zastosowano dwa rodzaje stanowisk pomiarowych. W obu wykorzystano zasadę działania wahadła. Pierwsze stanowisko służyło do badania całych owoców (**O1-O6**) natomiast drugie do testowania walcowych próbek miąższu jabłka (**O7**). W pierwszym stanowisku pomiarowym elementem uderzającym było jabłko. Wahadło składało się z pary podtrzymujących żyłek i elementu mocującego owoc w postaci plastikowej płytki i dwóch trzpieni, które były wbijane w jabłko. Zrzucany owoc uderzał w pionowy talerzyk, który był wkręcony w czujnik siły przymocowany do nieodkształcalnej stalowej płyty. Drugie stanowisko pomiarowe składało się z wahadła o sztywnym ramieniu zakończonym walcowym młotem, w którym umieszczony był czujnik siły. Kowadło, w którym również zamontowano czujnik siły było przymocowane do betonowej pionowej ściany. Walcowa

próbka była mocowana w kowadle do pionowego talerzyka wkręconego w czujnik za pomocą wazeliny technicznej.

Najczęściej wynikiem testów udarowych owoców są charakterystyki siła-czas i przemieszczenie-czas. Wyznaczenie przebiegu siły w czasie podczas uderzenia nie przysparza trudności. Natomiast określenie zależności przemieszczenie-czas sprawia większe problemy. W związku z tym pierwsze stanowisko przez cały okres badań podlegało ciągłej modernizacji. W pracach (**O1**, **O2**) wysokość zrzutu (prędkość uderzenia) była określana za pomocą skali z naniesionymi wielkościami odpowiadającymi określonym wartościom wysokości swobodnego spadku. Prędkość odbicia obliczano z prawa zachowania pędu. Powszechnie wiadomo, że podczas uderzenia występują straty energii spowodowane drganiami, deformacjami plastycznymi lub pękaniem ciał oraz rozproszeniem energii związanej z własnościami lepkosprężystymi zderzających się ciał. Aby precyzyjnie określić wartość energii rozproszonej podczas uderzenia istotne jest obliczenie wielkości energii kinetycznej przed i po uderzeniu. To wymagało wyznaczenia prędkości uderzenia, a zwłaszcza prędkości odbicia w sposób bezpośredni. Uzyskano to w pracach (**O3**, **O4**) dzięki dwóm parom znajdujących się naprzeciw siebie diod rozstawionych w odległości 15 mm od siebie. Diody emitowały dwie wiązki światła, które były przesłaniane przy spadku i odsłaniane przy odbiciu jabłka. Podłączone do cyfrowego oscyloskopu TDS 1002B firmy Tektronik diody wyzwały odpowiednio sygnał pionowo narastający i opadający. Wykorzystując dodatkowo program komunikacyjny Open Choice można było wyznaczyć czas potrzebny na przemieszczenie jabłka w obrębie rozpatrywanego odcinka 15 mm podczas zrzutu i odbicia. W pracach **O2** i **O4** pomiar siły podczas uderzenia realizowano za pomocą piezoelektrycznego czujnika siły, model 2311-10 o czułości 2.27 mV/N i zakresie pomiarowym  $\pm 2200$  N. Z czujnikiem współpracował rejestrator mikroprocesorowy, który przesyłał dane do komputera. Częstotliwość próbkowania rejestratora mikroprocesorowego wynosiła 153.6 kHz.

Kolejnym etapem rozwijania badań udarowych było wyznaczenie przebiegu przemieszczenie-czas w sposób bezpośredni. Tradycyjna metoda polegała na pomiarach przyspieszenia w czasie oraz dwukrotnym całkowaniu przy obliczeniu prędkości początkowej z zasady zachowania energii (Lichtensteiger i in., 1988; Jaren i Garcia-Pardo, 2002). Jednak podwójne całkowanie prowadzi do dużych niedokładności wyznaczania przebiegów (Fluck i Ahmed, 1973; Musiol i Harty, 1991; Van Zeebroeck i in., 2003). Aby tego uniknąć próbowano wyznaczać przebiegi przemieszczenia w czasie z pomiarów bezpośrednich (Jarimopas i in., 1990; Bajema i in., 1998; Tijskens i in., 2003). Jednak powyższe systemy pomiarowe służące do określenia przemieszczenia w czasie były na stałe, w sposób

mechaniczny związane ze stanowiskiem pomiarowym. Przy takim sposobie zamocowania czujników występujące podczas uderzenia drgania mechaniczne stanowiska zniekształcają wyniki pomiarów.

Zastosowanie niezależnego systemu pomiarowego z kamerą do szybkich zdjęć pozwoliło na wyeliminowanie wpływu drgań mechanicznych na pomiar przebiegów czasowych przemieszczeń podczas uderzenia. W pracach (**O5**, **O6**) do analizy uderzenia jabłka w sztywną pionową powierzchnię użyto cyfrowej kamery do szybkich zdjęć Phantom Miro M320S firmy Vision Research oraz obiektyw o stałej ogniskowej wynoszącej 50 mm. Przebieg uderzenia rejestrowano przy użyciu oprogramowania Phantom Camera Control (PCC-2) przy rozdzielczości 1024x768 pikseli oraz prędkości 3300 klatek na sekundę. Do wyznaczenia przebiegów przemieszczenia i prędkości jabłka w czasie użyto oprogramowania Tema Motion Version 3.8 firmy Image Systems, które pozwalało na analizę ruchu jabłka w zarejestrowanym obrazie. Do wyznaczenia przebiegu siły reakcji w czasie zastosowano rejestrator LMS SCADAS firmy Siemens, który był zintegrowany z oprogramowaniem LMS Test.Xpress do pomiaru, gromadzenia i analizy danych. Siła reakcji była rejestrowana z częstotliwością 10 kHz, a pomiar był wyzwalany za pomocą funkcji triggera po przekroczeniu wartości 0.5 N. Pomiar siły podczas uderzenia realizowano za pomocą piezoelektrycznego czujnika siły, model 2311-10 o czułości 2.27 mV/N i zakresie pomiarowym  $\pm 2200$  N.

W pracy **O7** badania polegały na uderzeniu w próbkę młotem i jednoczesnej rejestracji na obu końcach próbki przebiegu siły reakcji w czasie. Pomiar siły podczas uderzenia realizowano za pomocą piezoelektrycznych czujników siły, model 2311-100 o czułości 22.5 mV/N i zakresie pomiarowym  $\pm 220$  N. Z czujnikiem współpracował rejestrator mikroprocesorowy, który przesyłał dane do komputera. Częstotliwość próbkowania rejestratora mikroprocesorowego wynosiła 153.6 kHz. Do osi wahadła był zamontowany bezstykowy czujnik kąta WMU45SK, który umożliwiał pomiar kąta odchylenia ramienia wahadła od pionu, a tym samym wyznaczenie wysokości zrzutu i prędkości uderzenia. Zastosowana metodyka pozwalała między innymi na wyznaczenie prędkości rozchodzenia się fali naprężenia w badanej próbce.

#### **4.5. WYNIKI BADAŃ**

Przedstawione publikacje opisują monotematyczny i spójny cykl badań udarowych jabłek. W dwóch pierwszych pracach (**O1-O2**) testowano jabłka o różnych masach. W pracy **O1** przeprowadzono pomiary na kilku odmianach jabłek w warunkach różnych kombinacji mas owoców i wysokości zrzutu aby określić związek pomiędzy masą, prędkością

początkową uderu i poziomem energii powodującej uszkodzenie tkanki mięszu jabłek. Przeprowadzono analizę, stosując estymację nieliniową mającą na celu znalezienie funkcji, która najdokładniej wyznaczałaby granicę pomiędzy nieuszkodzonymi i uszkodzonymi jabłkami. Zależność pomiędzy masą jabłka i wysokością zrzutu była najlepiej opisana funkcją hiperboliczną. Wyniki tych badań wykorzystano podczas określania metodyki badań w pracy **O2** przy ustalaniu wysokości zrzutu, która była wyższa niż granica obicia dla testowanych mas jabłek. W pracy **O2** określono wpływ masy jabłek na parametry charakteryzujące wytrzymałość materiału takie jak: energia odkształceń plastycznych, energia pochłonięta podczas uderzenia, ciśnienie uplastycznienia, maksymalna wartość siły reakcji oraz pole powierzchni obicia. Zastosowano metodę CHMI wielokrotnego zrzutu ze stałej wysokości (Bajema i Hyde, 1998) polegającą na kilkukrotnym zrzućaniu owocu z tej samej wysokości aż do ustabilizowania się wysokości odbicia. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono statystycznie istotny wpływ masy jabłka na pole powierzchni styku uderzenia, maksymalną siłę reakcji oraz energię pochłonięta podczas uderzenia. Całkowita energia odkształceń plastycznych oraz ciśnienie uplastycznienia były niezależne od masy.

Prace **O1** i **O2** pokazały istotny wpływ masy owoców na parametry udarowe. W związku z tym w kolejnych pracach (**O3-O6**) dokonywano selekcji jabłek w celu wyeliminowania wpływu masy i kształtu (promienia krzywizny) owoców na badane wielkości.

W pracy **O3** uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji opisujące zależność pomiędzy polem powierzchni obicia a parametrami uderzenia jak: prędkość uderzenia, prędkość odbicia, energia uderzenia, energia odbicia, energia pochłonięta podczas uderzenia oraz współczynnik restytucji. W tych samych badaniach wyznaczono współczynnik restytucji energii jabłka, który malał w sposób nieliniowy wraz ze wzrostem prędkości uderzenia przy czym największy spadek wartości współczynnika restytucji występował dla niższych wartości prędkości uderzenia. Współczynnik restytucji przyjmował wartości od 0.55 do 0.8 dla określonych odmian jabłek w badanym zakresie prędkości. Dodatkowo zauważono, że dla każdej odmiany przy prędkości uderzenia wynoszącej  $0.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  występowała wysoka wartość odchylenia standardowego współczynnika restytucji. Oznaczało to, że dla prędkości uderzenia znajdujących się w pobliżu wartości  $0.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  istniała granica plastyczności jabłek. Duży rozrzut wartości współczynnika restytucji wynikał z faktu, że część jabłek podczas uderzenia odkształcało się sprężysto co odpowiadało wysokim wartościom współczynnika restytucji, a w części jabłek występowały nieodwracalne deformacje plastyczne powodujące niższe wartości współczynnika restytucji. Dokładniejsze wyznaczenie

granicy plastyczności wymaga zwiększenia ilości punktów pomiarowych w spodziewanym zakresie prędkości oraz uwzględnienia masy uderzanych owoców co wykazano w pracach **O1** i **O2** oraz w innych publikacjach (Lang, 1994; McGlone i in., 1997).

W pracy **O4** uzyskano w sposób bezpośredni jednocześnie trzy podstawowe wielkości charakteryzujące uderzenie: prędkość uderzenia, prędkość odbicia i przebieg siły reakcji w czasie. To umożliwiło sprawdzenie prawa zachowania pędu dla ciała lepkosprężystego jakim jest jabłko i obliczenie energii rozproszonej podczas uderzenia, która była związana z deformacjami plastycznymi o czym świadczyły dwa fakty. Wartość energii rozproszonej była prawie równa 0 dla dwóch najmniejszych prędkości uderzenia ( $0.125$  i  $0.25$ )  $\text{m s}^{-1}$ . Natomiast przy prędkościach uderzenia większych od  $0.25$   $\text{m s}^{-1}$  energia rozproszona przyjmowała wartości większe od 0 i wzrastała wraz z prędkością uderzenia. Dla wszystkich badanych odmian jabłek o masie (170-180) g prędkości udaru równa  $0.25$   $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  była prędkością bezpieczną, przy której nie powstawały obicia. Potwierdzają to wyniki badań przedstawione w pracy **O3**. W przeprowadzonym eksperymencie parametrem pozwalającym na najlepsze oszacowanie obicia była objętość obicia. Parametr ten związany jest zarówno z głębokością obicia jak i polem powierzchni obicia. Stwierdzenie w owocach większej od zera wartości objętości obicia świadczyło o przekroczeniu naprężeń krytycznych dla jabłek o określonej masie i promieniu krzywizny w miejscu uderzenia. Rozpatrywano także wpływ prędkości uderzenia na parametry charakteryzujące przebieg uderzenia. Były nimi: maksymalna siła reakcji, czas uderzenia, czas liczony od początku uderzenia do osiągnięcia maksymalnej siły reakcji oraz energia rozproszona. Najsilniejszą współzależność uzyskano pomiędzy maksymalną siłą reakcji i prędkością uderzenia. Następnie wzięto pod uwagę zależności pomiędzy wyżej wymienionymi parametrami a prędkością uderzenia oraz zależność pomiędzy objętością obicia i prędkością uderzenia. To umożliwiło określenie współzależności pomiędzy objętością obicia a poszczególnymi parametrami opisującymi uderzenie. Parametrami najlepiej powiązаныmi z objętością obicia wszystkich odmian jabłek były maksymalna siła reakcji oraz energia rozproszona w owocu podczas udaru.

Celem nadrzędnym badań udarowych było otrzymanie przebiegów przemieszczenie-czas w sposób bezpośredni bez potrzeby dwukrotnego całkowania przebiegu przyspieszenie-czas, co związane jest z dużymi błędami obliczeniowymi. Uzyskano to w pracy **O5** dzięki zastosowaniu kamery do szybkich zdjęć oraz oprogramowania Tema Motion. Dodatkową zaletą użycia kamery do szybkich zdjęć było wyeliminowanie drgań mechanicznych pochodzących od stanowiska, które mają wpływ na dokładność wyznaczania przebiegów czasowych siły reakcji i deformacji podczas uderzenia. W pracy wyznaczono również

parametry opisujące przebieg i skutki uderzenia takie jak: deformacja trwała, odprężenie sprężyste po uderzeniu. Obliczono także wartość maksymalnego naprężenia podczas udarów. W kolejnym etapie powiązано wyznaczone parametry uderzenia z wystąpieniem obicia. Przeprowadzone badania pokazały, że parametrami, które najlepiej opisują początek powstawania uszkodzenia w warunkach obciążeń udarowych były: deformacja trwała i maksymalne naprężenie. Stała wartość maksymalnego naprężenia w całym zakresie testowanych prędkości uderzenia powodujących obicie ( $0.5-1.5 \text{ m s}^{-1}$ ) potwierdziła słuszność kryterium naprężenia krytycznego w odniesieniu do całych owoców w warunkach obciążeń udarowych. Prędkość uderzenia wynosząca  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  dla jabłek o masie (170-180) g była prędkością krytyczną, przy której występował początek obicia. Wynik ten znalazł swoje potwierdzenie w pracach **O3** i **O4**. Prędkość uderzenia równa  $0.25 \text{ m s}^{-1}$  powodowała powstanie pola powierzchni obicia około  $1 \text{ cm}^2$  co odpowiada obowiązującym standardom dotyczącym klasyfikacji jakości jabłek. Deformacja będąca wynikiem sprężystego odprężania się jabłka po ustaniu uderzenia zmieniała się od 0.1 do 0.3 mm dla wszystkich odmian w całym zakresie testowanych prędkości uderzenia.

W pracy **O6** kontynuowano badania przy użyciu kamery do szybkich zdjęć. Przedstawiono nową metodę obliczania energii deformacji plastycznych w warunkach obciążeń udarowych. Polegała ona na wyznaczeniu różnicy pomiędzy wartościami energii pochłoniętej z przebiegu siła-deformacja oraz ze wzorów na energię kinetyczną jabłka przed i po uderzeniu. Było to możliwe dzięki rejestracji przebiegu siły reakcji i przemieszczenia w czasie co w dalszej kolejności pozwoliło na wyznaczenie krzywej siła-deformacja. Wyznaczono także wartości współczynnika restytucji, określono jego zależność od prędkości uderzenia oraz powiązано ten parametr z początkiem wystąpienia obicia. Określono również podatność na obicie trzech odmian jabłek przy różnych prędkościach uderzenia. W badaniach stwierdzono wzrost wartości energii deformacji plastycznych wraz ze wzrostem prędkości uderzenia. Przeprowadzone badania pokazały, że współczynnik restytucji jest parametrem pozwalającym dobrze określić początek powstawania obicia jabłek w warunkach obciążeń udarowych. Duże wartości odchylenia standardowego współczynnika restytucji wykazały, że obicia jabłek o masie 170-180 g pojawiają się przy prędkości uderzenia  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ . Potwierdzają to wyniki badań z pracy **O3**. W zakresie prędkości uderzenia, przy której występowało obicie ( $0.75-1.5 \text{ m s}^{-1}$ ) uzyskano rosnącą zależność pomiędzy podatnością na obicie jabłek i prędkością uderzenia.

W pracy **O7** na przykładzie jabłek odmiany "Braeburn" zbadano wpływ wymiarów walcowych próbek oraz prędkości uderzenia na przebieg udaru i otrzymane parametry

wytrzymałościowe. Przeprowadzono analizę regresji wielokrotnej w celu określenia wpływu wartości trzech wybranych zmiennych niezależnych: prędkości uderzenia, długości próbki i średnicy próbki na zmienne zależne takie jak: maksymalna siła reakcji w młocie, naprężenie zniszczenia, odkształcenie zniszczenia, przemieszczenie, prędkość rozchodzenia się fali uderzenia, energię uderzenia, energię pochłoniętą w wyniku przejścia przez próbkę fali naprężenia, moduł sieczny, sztywność tkanki i wytrzymałość tkanki. Wyznaczono również prędkość rozchodzenia się fali naprężenia w próbce oraz obliczono procentowy udział energii pochłoniętej w wyniku przejścia fali naprężenia przez próbkę w energii uderzenia powodującej zniszczenie próbki. Analiza liniowej regresji wielokrotnej wykazała, że średnica próbki jest parametrem mającym wpływ na wartości energii uderzenia, energii pochłoniętej oraz sztywności tkanki. Warunki eksperymentu określone poprzez długość i średnicę próbki oraz prędkość uderzenia posiadały niewielki wpływ na wartości podstawowych parametrów wytrzymałościowych jak naprężenie zniszczenia, odkształcenie zniszczenia i wytrzymałość tkanki. Najwyższą wartość współczynnika korelacji 0.57 stwierdzono dla zależności odkształcenia zniszczenia od prędkości uderzenia. Wyznaczona prędkość fali uderzenia była wielkością niezależną od wymiarów próbki (długości i średnicy) oraz prędkości uderzenia. W przypadku mięszu jabłka odmiany "Braeburn" wyniosła ona  $292.5 \text{ m s}^{-1}$ . Długości i średnica próbki oraz prędkość uderzenia w badanym zakresie zmian nie miały wpływu na wartość procentowego udziału energii pochłoniętej w energii uderzenia, który wynosił 9.9%. Eksperyment dowiódł ważności kryterium naprężenia krytycznego podczas udaru walcowych próbek.

#### **4.6. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ W ODNIESIENIU DO POSTAWIONYCH CELÓW NAUKOWYCH**

##### **Cel 1.**

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają odpowiedzieć na pytanie co ostatecznie decyduje o zniszczeniu tkanek jabłka w warunkach obciążenia udarowego. Czy jest to przekroczenie określonej wartości naprężenia czy może odkształcenia próbki? W pracy **O7** pokazano, że wraz ze wzrostem prędkości uderzenia odkształcenie zniszczenia wzrastało a naprężenie zniszczenia pozostawało na zbliżonym poziomie i było równe około 0.4 MPa. To dowodzi słuszności kryterium naprężenia krytycznego w odniesieniu do walcowych próbek jabłek w warunkach obciążenia udarowego. Otrzymana średnia wartość naprężenia zniszczenia może być także interpretowana jako maksymalne naprężenie jakie tkanka jabłka może przenieść w warunkach udaru.

W związku z tym interesujące stało się pytanie na ile wartość ta wyznaczona dla walcowych próbek jabłka jest zbieżna z tym samym parametrem wyznaczonym dla całych owoców?

W pracy **O5** badano parametry wytrzymałościowe w odniesieniu do całych owoców. Liniowa zależność pomiędzy maksymalną siłą reakcji i polem powierzchni styku oznacza stałą wartość maksymalnego naprężenia dla zastosowanych w eksperymencie prędkości uderzenia. Stała wartość maksymalnego naprężenia mająca miejsce od prędkości uderzenia  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  świadczy, że o zniszczeniu tkanek jabłka decyduje przekroczenie określonej wartości naprężenia. Stąd też eksperyment dowodzi słuszności kryterium naprężenia krytycznego w odniesieniu do całych owoców testowanych w udarowych warunkach obciążenia. Otrzymane średnie wartości naprężenia mogą być zatem traktowane jako wartości niszczące, a więc takie maksymalne wartości, które jest w stanie przenieść tkanka jabłka. Średnie wartości maksymalnego naprężenia osiągały wartości (0.3-0.42) MPa. Inny sposób prezentacji otrzymanych w pracy **O4** wyników pokazuje, że średnia wartość maksymalnego naprężenia dla badanych odmian jabłek zawierała się w zakresie (0.4-0.5) MPa. Różnica w wartościach naprężenia maksymalnego pomiędzy pracami **O4** i **O5** może wynikać z różnego stopnia uwodnienia jabłek, który nie był przedmiotem badań. Średnie wartości naprężenia zniszczenia uzyskane dla walcowych próbek (**O7**) i całych owoców (**O5**) w warunkach obciążenia udarowego posiadały zbliżone wartości. Biorąc pod uwagę fakt, że jędrność jabłek "Braeburn" z pracy **O7** (Bobelyn i in., 2010) mieści się w zakresie zmienności jędrności jabłek z prac **O4** i **O5** można stwierdzić, że oba eksperymenty przeprowadzone na całych jabłkach i walcowych próbkach wykazują zgodność pod względem jakościowym i ilościowym w odniesieniu do otrzymanych wartości naprężenia zniszczenia.

## **Cel 2.**

W pracy **O6** przedstawiono nową metodę obliczenia energii deformacji plastycznych będącej różnicą pomiędzy wartościami energii pochłoniętej uzyskanej z przebiegu siła-deformacja oraz obliczonej ze wzorów na energię kinetyczną przed i po uderzeniu jabłka. Wartości energii pochłoniętej obliczone na podstawie krzywej siła-deformacja uwzględniają udział energii deformacji trwałych, które występowały podczas uderzenia. Natomiast wartości uzyskane ze wzorów na energię kinetyczną nie mogą uwzględniać charakteru odkształceń jakie miały miejsce podczas zderzenia jabłka w sztywną, płaską powierzchnię. Podobne wartości energii sprężystej uzyskane z krzywej siła-przemieszczenie i ze wzorów na energię kinetyczną świadczyły, że podczas odbicia nie występowały deformacje trwałe, a tylko miały miejsce deformacje sprężyste. A więc deformacje trwałe występowały od początku zderzenia do osiągnięcia maksymalnej deformacji. Dlatego też można wyznaczyć energię deformacji



plastycznych odejmując od siebie wartości energii pochłoniętej uzyskane ze wzorów na energię kinetyczną i z krzywej siła-przemieszczenie. O tym, że są to deformacje plastyczne świadczyły dwa fakty: zerowe wartości energii deformacji plastycznych dla dwóch najmniejszych prędkości uderzenia 0.25 i 0.5 m s<sup>-1</sup>, przy których nie występowało obicie oraz wzrost wartości energii deformacji plastycznych wraz ze wzrostem prędkości uderzenia w zakresie (0.75-1.5 ) m s<sup>-1</sup>, przy których występowało obicie.

Podczas uderzenia mają miejsce różne zjawiska wywołujące rozproszenie energii. Energia ta rozprasza się nie tylko lokalnie w obrębie obszaru obicia ale także w całym owocu. W przypadku jabłek, których tkanka komórkowa składa się w 25% z porów powietrznych (Miles i Rehkgler, 1973; Gan-Mor i Galili, 1987; Roudot i in., 1991; Baritelle i Hyde, 2001) energia ta rozprasza się lokalnie w przeciwieństwie do innych rodzajów owoców i warzyw o dużej zawartości wody (brzoskwinia, ziemniak, pomidor).

Energia pochłonięta uwzględnia deformacje plastyczne, deformacje lepkie, drgania tłumione oraz tarcie o płytę podczas uderzenia. Dokładne określenie udziału poszczególnych składników energii rozpraszanej w materiale na skutek wymienionych wyżej zjawisk jest bardzo trudne.

Istnieje wiele badań dotyczących rozproszenia energii podczas uderzenia. Bajema i Hyde (1998) stosowali metodę CHMI Constant Height Multiple Impact, na podstawie której z energii uderzenia wyznaczali: energię sprężystą, energię odkształceń plastycznych i energię deformacji lepkich. Założyli, że energia deformacji lepkich jest stała przy każdym uderzeniu i zawiera energię drgań. Inaczej zagadnienie podziału energii przedstawili Dintwa i in. (2008). Według nich energia kinetyczna uderzenia przekształcana jest w trzy postacie energii. Pierwsza jest energią potencjalną związaną z wytrzymałością materiału. Druga jest energią drgań związaną z falami naprężenia rozchodzącymi się w ciałach podczas uderzenia. Trzecia jest energią rozproszenia związaną z niesprężystymi deformacjami wynikającymi ze sprężystoplastycznej, lepko-sprężystej lub lepko-sprężysto-plastycznej natury materiału oraz z pęknięciami w strukturze materiału. Van Zeebroeck i in. (2007a) stwierdzili, że energia pochłonięta może być podzielona na energię plastyczną i lepłą. Założyli, że stosunek pomiędzy energią lepłą i plastyczną jest stały dla danej energii uderzenia niezależnie od stopnia dojrzałości i temperatury owocu. Widać stąd, że różni autorzy przyjmowali różne sposoby interpretacji podziału energii podczas uderzenia.

W pracy **O7** przeprowadzono testy udarowe na walcowych próbkach jabłek. Wyznaczono wartości energii pochłoniętej powstałej w wyniku przejścia fali naprężenia przez próbkę dla różnych jej rozmiarów oraz prędkości uderzenia. Stwierdzono że średnia wartość

procentowego udziału energii pochłoniętej w energii uderzenia powodującej zniszczenie próbki w przyjętych warunkach eksperymentu była stała i wynosiła 9.9%.

W pracy **O4** obliczano energię rozproszoną na podstawie wyznaczonego wcześniej pędu rozproszonego. Wartość energii rozproszonej była równa 0 dla dwóch najniższych prędkości uderzenia (0.125 i 0.25) m s<sup>-1</sup>. Natomiast przy prędkościach uderzenia większych od 0.25 m s<sup>-1</sup> energia rozproszona przyjmowała wartości większe od 0 i zwiększała się wraz z prędkością uderzenia.

### **Cel 3.**

W pracach **O5** i **O6** szukano parametrów, które najlepiej określałyby początek powstawania uszkodzenia w warunkach obciążeń udarowych. Na podstawie tych prac stwierdzono, że parametrami pozwalającym dobrze określić początek występowania obicia jabłek były: deformacja trwała i maksymalne naprężenie (**O5**) oraz współczynnik restytucji (**O6**). Średnie wartości maksymalnego naprężenia i deformacji trwałej różniły się istotnie statystycznie pomiędzy prędkościami uderzenia 0.25 m s<sup>-1</sup> i 0.5 m s<sup>-1</sup> dla każdej odmiany. Przy prędkości uderzenia 0.25 m s<sup>-1</sup> jabłka nie ulegały obiciu, a przy prędkości 0.5 m s<sup>-1</sup> występowało już obicie. Wartość współczynnika restytucji dla najniższej prędkości uderzenia 0.25 m s<sup>-1</sup>, przy której nie występowało obicie jabłek wyniosła powyżej 0.8, a przy prędkości uderzenia 0.75 m s<sup>-1</sup> gdzie wszystkie jabłka były obite nie przekraczała 0.7. Między prędkościami uderzenia 0.25 m s<sup>-1</sup> i 0.75 m s<sup>-1</sup> występowały statystycznie istotne różnice pomiędzy średnimi wartościami współczynnika restytucji dla wszystkich trzech badanych odmian jabłek. Stąd też powyższe wielkości mogą być użyte do określenia początku powstawania obicia jabłka. Podobne wyniki dotyczące współczynnika restytucji uzyskano w pracy **O3** pomimo zastosowania innego systemu pomiarowego przy wyznaczaniu prędkości uderzenia i prędkości odbicia.

### **Cel 4.**

W pracach **O3** i **O4** dokonano analizy zależności pomiędzy parametrami opisującymi zjawisko udaru jak: prędkość uderzenia, prędkość odbicia, siła maksymalna, czas uderzenia, czas liczony od początku uderzenia do osiągnięcia maksymalnej siły reakcji, energia uderzenia, energia odbita, energia pochłonięta podczas uderzenia, współczynnik restytucji a wielkościami opisującymi jego skutek jak: powierzchnia obicia, głębokość obicia i objętość obicia. W pracy **O3** na przykładzie odmiany "Rubin" korelowano wartości pola powierzchni obicia z różnymi parametrami. Mimo, że największe wartości współczynnika korelacji

uzyskano dla prędkości uderzenia i prędkości odbicia wydaje się, że lepszymi parametrami charakteryzującymi obicie jabłek podczas uderzenia są: energia uderzenia, energia odbicia oraz energia pochłonięta podczas uderzenia gdyż te wielkości uwzględniają dodatkowo masę uderzanego owocu (Brusewitz i Bartsch, 1989). Podczas tych badań masa jabłek była prawie identyczna ze względu na przyjęte założenia eksperymentalne. W pracy **O4** rozpatrywano wpływ prędkości uderzenia na parametry charakteryzujące przebieg uderzenia. Były nimi: maksymalna siła reakcji, czas uderzenia, czas liczony od początku uderzenia do osiągnięcia maksymalnej siły reakcji oraz energia pochłonięta podczas uderzenia. Następnie wzięto pod uwagę zależności pomiędzy wyżej wymienionymi parametrami a prędkością uderzenia oraz zależność pomiędzy objętością obicia i prędkością uderzenia. To umożliwiło określenie współzależności pomiędzy objętością obicia a poszczególnymi parametrami opisującymi uderzenie. Parametrami, które najlepiej określały zmiany wartości objętości obicia były maksymalna siła reakcji oraz energia pochłonięta podczas uderzenia. W pracy **O7** przeprowadzono analizę regresji wielokrotnej w celu określenia wpływu trzech wybranych zmiennych niezależnych: prędkości uderzenia, długości próbki i średnicy próbki na zmienne zależne takie jak: maksymalna siła reakcji w młocie, naprężenie zniszczenia, odkształcenie zniszczenia, przemieszczenie, prędkość rozchodzenia się fali uderzenia, energię uderzenia, energię pochłoniętą w wyniku przejścia przez próbkę fali naprężenia, moduł sieczny, sztywność tkanki i wytrzymałość tkanki. Stwierdzono statystycznie istotny wpływ średnicy próbki na maksymalną siłę reakcji, energię uderzenia, energię pochłoniętą oraz sztywność tkanki. Uzyskane zależności pomiędzy parametrami opisującymi przebieg uderzenia lub własnościami wytrzymałościowymi tkanki owocu, a wielkościami charakteryzującymi skutki uderzeń mogą posłużyć do opracowania modeli do określania wrażliwości jabłek na obicia oraz przewidywania następstw ich uderzeń.

#### **Cel 5.**

W pracach **O1** i **O2** poddano testom jabłka o różnych masach. Wyniki badań przedstawione w pracy **O1** wykazały, że maksymalna wartość energii uderzenia powodującej uszkodzenie tkanki miąższu jabłek zmieniała się przy różnych połączeniach masy jabłka i wysokości zrzutu, co oznacza, że te wielkości są niezależne od siebie i mają różny wpływ na początek powstawania uszkodzenia w miąższu jabłek. Zależność pomiędzy masą jabłka i wysokością zrzutu dla maksymalnej energii uderzenia, która nie powodowała jeszcze uszkodzenia miąższu jabłka była najlepiej opisana funkcją hiperboliczną. Wyniki badań uzyskane w pracy **O1** posłużyły następnie do określenia wysokości zrzutu jabłek w pracy **O2**. W pracy **O2**

stwierdzono statystycznie istotny wpływ masy jabłka na pole powierzchni styku, maksymalną siłę reakcji oraz energię pochłoniętą podczas uderzenia. W przeprowadzonym eksperymencie masa jabłek nie miała wpływu na wartość energii odkształceń plastycznych oraz ciśnienie uplastycznienia. Względna ustabilizowana wysokość odbicia była wysoko skorelowana z masą jabłek odmian "Florina" i "Royal Gala". Jednakże nie uzyskano statystycznie istotnych różnic między średnimi wartościami wysokości odbicia dla różnych wartości masy.

#### **4.7. PODSUMOWANIE**

Przeprowadzone w pracach **O7** oraz **O5** i **O4** eksperymenty udowodniły słuszność kryterium naprężenia krytycznego w odniesieniu do walcowych próbek jabłek oraz całych owoców testowanych w warunkach obciążenia udarowego.

Badania pokazały, że parametrami, które najlepiej opisywały początek występowania obicia jabłek w warunkach obciążeń udarowych były deformacja trwała i maksymalne naprężenie (**O5**) oraz współczynnik restytucji (**O6** i **O3**).

Ważnym osiągnięciem jest również opracowanie nowej metody obliczenia energii deformacji plastycznych (**O6**).

Uzyskano wysokie wartości współczynników korelacji opisujące zależność pomiędzy polem powierzchni obicia a parametrami uderzenia takimi jak: prędkość uderzenia, prędkość odbicia, energia uderzenia, energia odbicia, energia pochłonięta podczas uderzenia oraz współczynnik restytucji (**O3**). Natomiast parametrami najlepiej powiązаныmi z objętością obicia były maksymalna siła reakcji oraz energia rozproszona (**O4**). Przeprowadzona analiza liniowej regresji wielokrotnej wykazała, że średnica próbki była parametrem mającym wpływ na energię uderzenia, energię pochłoniętą oraz sztywność tkanki (**O7**).

Wyniki zawarte w pracy **O1** pokazały, że maksymalna wartość energii uderzenia powodującej uszkodzenie tkanki miąższu jabłek zmieniała się przy różnych kombinacjach masy jabłka i wysokości zrzutu, co oznacza, że te wielkości są niezależne od siebie i mają różny wpływ na początek powstawania uszkodzenia w miąższu jabłek. W pracy **O2** stwierdzono statystycznie istotny wpływ masy jabłka na pole powierzchni styku, maksymalną siłę reakcji oraz energię pochłoniętą podczas uderzenia.

#### **4.8. KIERUNEK PRZYSZŁYCH BADAŃ**

Studia literaturowe oraz doświadczenie eksperymentalne wynikające z przeprowadzonych dotychczas testów pozwalają na określenie nowych przyszłościowych kierunków badań. Problemem nurtującym naukowców zwłaszcza zajmujących się

ograniczeniem strat związanych z uszkodzeniem jabłek na liniach sortujących i pakujących jest występowanie obić pomimo spadków z wysokości niższych od progu obicia (Fadiji i in., 2016; Zhu i in., 2016). Związane jest to z efektem kumulowania uderzenia polegającym na wielokrotnym uderzeniu jabłka z prędkościami dużo mniejszymi niż wartość krytyczna powodująca obicie. Stąd też należałoby się skupić nad badaniami reakcji owoców przy niskich prędkościach uderzenia aby wyeliminować lub chociaż ograniczyć te uszkodzenia, które należy zaliczyć do podprogowych. Kolejnym zagadnieniem jest kwestia czasu pomiaru wielkości obicia po uderzeniu. Powszechnie stosowaną praktyką jest pozostawienie uderzanych owoców w temperaturze pokojowej na okres 24 godzin od chwili wystąpienia uderzenia tak, aby pozwolić na przebarwienie się uszkodzonej tkanki i lepiej mierzyć obszar obicia. Natomiast przy niskich prędkościach uderzenia należałoby oczekiwać, że widoczne oznaki obicia w temperaturze pokojowej pojawią się dopiero po czasie dłuższym niż 24 godziny. To może mieć miejsce zwłaszcza przy miękkich odmianach jabłek charakteryzujących się niższą jędrnością. W związku z tym dogłębne zrozumienie reakcji jabłek przy niskich prędkościach uderzenia wymaga przeprowadzenia nowych testów dla większej liczby prędkości w zakresie 0-0.5 m s<sup>-1</sup>, wydłużenia czasu określenia wielkości obicia od chwili uderzenia oraz sprawdzenia efektu kumulowania uderzenia.

#### 4.9. BIBLIOGRAFIA

1. Abedi, G., Ahmadi, E., 2014. Bruise susceptibilities of Golden Delicious apples as affected by mechanical impact and fruit properties. *Journal of Agricultural Science* 152, 439-447.
2. Ahmadi, E., Ghassemzadeh, H.R., Sadeghi, M., Moghaddam, M., Neshat, S.Z., 2010. The effect of impact and fruit properties on the bruising of peach. *Journal of Food Engineering* 97, 110-117.
3. Alamar, M.C., Vanstreels, E., Oey, M.L., Molto, E., Nicolai, B.M., 2008. Micromechanical behaviour of apple tissue in tensile and compression test: storage conditions and cultivar effect. *Journal of Food Engineering* 86, 324-333.
4. Bajema, R., Hyde G.M. 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. *Transactions of the ASAE* 41(5), 1399-1405.
5. Bajema, R., Hyde, G.M., Peterson, K., 1998. Instrumentation design for dynamic axial compression of cylindrical tissue samples. *Transactions of the ASAE* 41(3), 747-754.
6. Baritelle, A.L., Hyde, G.H., 2001. Commodity conditioning to reduce impact bruising. *Postharvest Biology and Technology* 21, 331-339.
7. Bartram, R., Fountain, J., Olsen, K., O'Rourke, D., 1983. Washington State apple condition at retail, 1982-83. (Eating Quality). In *Proc. Wash. State Hort. Assoc.* 79, 36-46.
8. Bobelyn, E., Serban, A.S., Nicu, M., Lammertyn, J., Nicolai, B.M., Saeys, W., 2010. Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biology and Technology* 55, 133-143.
9. Bollen, A.F., Cox, N.R., Dela Rue, B.T., Painter, D.J., 2001. A descriptor for damage susceptibility of population of produce. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(4), 391-395.

10. Bollen, A.F., Nguyen, H.X., Dela Rue, B.T., 1999. Comparison of methods for estimating the bruise volume of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research* 74, 325-330.
11. Boydas, M.G., Ozbek, I.Y., Kara, M., 2014. An efficient laser sensor system for apple impact bruise volume estimation. *Postharvest Biology and Technology* 89, 49-55.
12. Brown, G.K., Burton, C.L., Sargent, S.A., Schulte Pason, N.L., Timm, E.J., Marschall, D.E., 1989. Assessment of apple damage on packing lines. *Applied Engineering in Agriculture* 5, 475-484.
13. Brown, G.K., Schulte Pason, N.L., Timm, E.J., Burton, C.L., Marschall, D.E., 1990. Apple packing line impact damage reduction. *Applied Engineering in Agriculture* 6, 759-764.
14. Brusewitz, G.H., Bartsch, J.A., 1989. Impact parameters related to post harvest bruising of apples. *Transactions of the ASAE* 32(3), 953-957.
15. Celik, H.K., Rennie, A.E.W., Akinci, I., 2011. Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering* 104, 293-298.
16. Devaux, M.F., Barakat, A., Robert, P., Bouchet, B., Guillon, F., Navez, B., Lahaye, M., 2005. Mechanical breakdown and cell wall structure of mealy tomato pericarp tissue. *Postharvest Biology and Technology* 37, 209-221.
17. Dintwa E., Van Zeebroeck M., Ramon H., Tijssens E., 2008. Finite element method of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 49, 260-276.
18. Fadiji, T., Coetzee, C., Pathare, P., Opara, U.L., 2016. Susceptibility to impact damage of apples inside ventilated corrugated paperboard packages: Effects of package design. *Postharvest Biology and Technology* 111, 286-296.
19. Fluck, R.C., Ahmed, E.M., 1973. Impact testing of fruits and vegetables. *Transactions of the ASAE* 16(4), 660-666.
20. Food and Fertilizer Technology Center (FFTC), 1994. *Postharvest Losses of Fruit and Vegetables in Asia*, <http://www.fftc.agnet.org/library/abstract/ac1993d.html>
21. Gan-Mor, S., Galili, N., 1987. Model for failure and plastic-flow in dynamic loading of spheres. *Transactions of the ASAE* 30, 1506-1511.
22. Goldsmith, W., 1960. *Impact - The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. Edward Arnold Ltd, London.
23. Holt J. E., Schoorl D., Lucas C., 1981. Prediction of bruising in impacted multilayered apple packs. *Transactions of the ASAE* 24(1), 242-247.
24. Hyde, G.M., Zhang, W., Brown, G.K., Timm, E.J., 1990. Instrumented sphere evaluation of potato packing line impacts: a progress report, *ASAE Paper No. 90-6029*, American Society of Agricultural Engineers, Columbus, Ohio.
25. Jaren, C., Garcia-Pardo, E., 2002. Using non-destructive impact testing for sorting fruits. *Journal of Food Engineering* 53, 89-95.
26. Jarimopas, B., Sarig, Y., Peiper, U.M., Manor, G., 1990. Instrumentation for measuring the response of apples subjected to impact loading. *Computers and Electronics in Agriculture* 5, 255-260.
27. Jarimopas, B., Singh, S.P., Sayasoonthorn, S., Singh, J., 2007. Comparison of package cushioning materials to protect post-harvest impact damage to apples. *Packaging Technology and Science* 20, 315-324.
28. Kabas, O., 2010. Methods of measuring bruise volume of pear (*Pyrus Communis* L.). *International Journal of Food Properties* 13, 1178-1186.
29. Kitthawee, U., Pathaveerat, S., Srirungruang, T., Slaughter, D., 2011. Mechanical bruising of young coconut. *Biosystems Engineering* 109, 211-219.
30. Komarnicki, P., Stopa, R., Szyjewicz, D., Młotek, M., 2016. Evaluation of bruise resistance of pears to impact load. *Postharvest Biology and Technology* 114, 36-44.
31. Lang, Z., 1994. The influence of mass and velocity on the maximum allowable impact energy of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57, 213-216.
32. Lewis, R., Yoxall, A., Canty, L.A., Reina Romo, E., 2007. Development of engineering design tools to help reduce apple bruising. *Journal of Food Engineering* 83, 356-365.
33. Li Z., Thomas C., 2014. Quantitative evaluation of mechanical damage of fresh fruits. *Trends in Food Science and Technology* 35, 138-150.

34. Lichtensteiger, M.J., Holmes, R.G., Hamdy, M.Y., Blaisdell, J.L., 1988. Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. *Transactions of the ASAE* 31(2), 595-602.
35. McGlone, V.A., Jordan, R.B., Schaare, P.N., 1997. Mass and drop-height influence on kiwifruit firmness by impact force. *Transactions of the ASAE* 40, 1421-1428.
36. Menesatti, P., Paglia, G., 2001. Development of drop damage index of fruit resistance to damage. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80(1), 53-64.
37. Miles, J.A., Rehkugler, G.E., 1973. A failure criterion for apple flesh. *Transactions of the ASAE* 16, 1148-1153.
38. Mohsenin, N.N., 1986. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon & Breach Science Publishers, New York., USA.
39. Musiol, C., Harty, D., 1991. The use of numerical integration for the estimation of displacement from an accelerometer signal. Application note 12, nCode International Ltd.
40. Opara, U.L., 2007. Bruise susceptibilities of 'Gala' apples as affected by orchard management practices and harvest date. *Postharvest Biology and Technology* 43, 47-54.
41. Ozbek, I.Y., Boydas, M.G., Kara, M., Demir, B., 2014. Low cost measurement setup based on a piezoelectric microphone for estimating apple bruising using Shannon entropy. *Postharvest Biology and Technology* 98, 23-29.
42. Polat, R., Aktas, T., Ikinici, A., 2012. Selected mechanical properties and bruise susceptibility of nectarine fruit. *International Journal of Food Properties* 15, 1369-1380.
43. Ragni, L., Berardinelli, A., 2001. Mechanical behaviour of apples and damage during sorting and packaging. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78(3), 273-279.
44. Roudot, A.C., Duprat, F., Wenian, C., 1991. Modelling the response of apples to loads. *Journal of Agricultural Engineering Research* 48, 249-259.
45. Schaper, L.A., Varns, J.L., 1986. Mass and energy losses in potato marketing chain. *Transactions of the ASAE* 29, 331-340.
46. Sparks, W.C., 1976. Losses in potatoes and lesser fruits and vegetables. In *Proceedings of the National Food Loss Conference*, M.V. Zaehring and J.O. Early, eds, pp.7-16. University of Idaho, Boise, ID, USA.
47. Tijskens, E., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., 2003. Discrete element modelling for process simulation in agriculture. *Journal of Sound and Vibration* 266, 493-514.
48. Van Canneyt, T., Tijskens, E., Ramon, H., Verschoore, R., Sonck, B., 2003. Characterisation of potato-shaped instrumented device. *Biosystems Engineering* 86, 275-285.
49. Vanstreels, E., Alamar, M.C., Verlinden, B.E., Enninghorst, A., Loodts, J.K.A., Tijskens, E., Ramon, H., Nikolai, B.M., 2005. Micromechanical behaviour of onion epidermal tissue. *Postharvest Biology and Technology* 37, 163-173.
50. Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Darius, P., De Ketelaere, B., Ramon, H., Tijskens, E., 2007. The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. *Postharvest Biology and Technology* 46, 10-19.
51. Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Darius, P., Ketelaere, B., Ramon, H., Tijskens, E., 2007a. The effect of fruit properties on the bruise susceptibility of tomatoes. *Postharvest Biology and Technology* 45, 168-175.
52. Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Van Liedekerke, P., Deli, V., De Baerdemaeker, J., Ramon, H., 2003. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device. *Journal of Sound and Vibration* 266, 465-480.
53. Yen, M., Wan, Y., 2003. Determination of textural indices of guava fruit using discriminate analysis by impact force. *Transactions of the ASAE* 46(4), 1161-1166.
54. Zhu, Q., Guan, J., Huang, M., Lu, R., Mendoza, F., 2016. Predicting bruise susceptibility of 'Golden Delicious' apples using hyperspectral scattering technique. *Postharvest Biology and Technology* 114, 86-94.

