

AUTOREFERAT

PRZEDSTAWIAJĄCY OPIS DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH

Dr inż. Piotr Komarnicki

UNIwersytet PRZYRODNICZY WE WROCLAWIU
WYDZIAŁ PRZYRODNICZO-TECHNOLOGICZNY
INSTYTUT INŻYNIERII ROLNICZEJ

WROCLAW, 2017

Spis treści

1. Imię i Nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):	
a) tytuł osiągnięcia naukowego.....	3
b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy).....	3
c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	5
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.....	30

1. Imię i Nazwisko

Piotr Komarnicki

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **Stopień doktora: Nauk Rolniczych w zakresie Inżynierii Rolniczej**, nadany uchwałą Rady Wydziału Rolniczego Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z dnia 7 października 2008 roku na podstawie rozprawy doktorskiej pod tytułem: *„Wpływ wielokierunkowego strumienia powietrza na efektywność sitowego procesu rozdzielczego”*. Promotor: Dr hab. Jerzy Bieniek prof. nadzw., recenzenci: Prof. dr hab. Kazimierz Dreszer, Dr hab. Leszek Romański, prof. nadzw.
- **Tytuł magistra inżyniera** przyznany przez Wydział Rolniczy Akademii Rolniczej we Wrocławiu dnia 25 czerwca 2004 roku na podstawie przebiegu studiów i pracy dyplomowej zatytułowanej: *„Wpływ strumienia powietrza na czystość ziarna na sicie daszkowym”*. Pracę zrealizowano pod opieką dr. hab. Jerzego Bieńka, prof. nadzw. Ocena końcowa bardzo dobry z wyróżnieniem Rady Wydziału.
- **Tytuł zawodowy inżyniera w zakresie inżynierii rolno-spożywczej** przyznany przez Wydział Rolniczy Akademii Rolniczej we Wrocławiu dnia 25 lutego 2003 roku na podstawie przebiegu studiów. Nagroda Dziekana i Rady Wydziału Rolniczego Akademii Rolniczej we Wrocławiu za wyróżniające wyniki w nauce.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

Stanowisko - adiunkt (od 1 lutego 2009 r. do chwili obecnej)

(umowa o pracę na czas określony od 01.02.2009–31.01.2011 r.)

(aneks do umowy o pracę na czas określony od 31.01.2011–31.01.2018 r.)

Instytut Inżynierii Rolniczej,

Wydział Przyrodniczo-Technologiczny

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

„Ocena stopnia uszkodzeń mechanicznych materiału biologicznego na podstawie pomiarów nacisków powierzchniowych”

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

Jako osiągnięcie naukowe stanowiące wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej przedstawiono cykl 10 publikacji powiązanych tematycznie:

1. Stopa, R., Komarnicki, P., Młotek, M., 2013. Zmiana nacisków powierzchniowych jabłek w teście pelzania. *Inżynieria Rolnicza*, 4(147), 313–324. **(5 pkt. MNiSW)**
2. Stopa, R., Komarnicki, P., Młotek, M., 2014. Rozkłady nacisków powierzchniowych dla awokado przy stałej wartości obciążenia. *Inżynieria Rolnicza*, 1(149), 209–220. **(5 pkt. MNiSW)**
3. Młotek, M., Stopa, R., Komarnicki, P., Szyjewicz, D., Kuta Ł., 2015. Surface pressure distributions for pears at a constant value of load. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, Vol. 15, Issue 3, 189–194. PRINT ISSN 2284–7995. **(10 pkt. MNiSW)**
4. Komarnicki, P., Stopa, R., Młotek, M., 2013. Wpływ relaksacji naprężeń na zmiany nacisków powierzchniowych jabłek. *Inżynieria Rolnicza*, 3(145), 127–138. **(5 pkt. MNiSW)**
5. Stopa, R., Stępień, B., Komarnicki, P., Porczyk, M., 2012. Wpływ wielokrotnego obciążania korzenia marchwi na wartość nacisków powierzchniowych. *Inżynieria Rolnicza*, 2(136), 315–324. **(5 pkt. MNiSW)**
6. Stopa, R., Komarnicki, P., Młotek, M., 2013. Rozkłady nacisków powierzchniowych jabłek przy obciążeniach udarowych. *Inżynieria Rolnicza*, 3(145), 363–374. **(5 pkt. MNiSW)**
7. Stopa, R., Komarnicki, P., Młotek, M., 2014. Distribution of surface pressure of avokado fruit at impact loads. *Agricultural Engineering*, 2(150), 163–174. **(5 pkt. MNiSW)**
8. Komarnicki, P., Stopa, R., 2013. Badania wrażliwości jabłek na stłuczenia przy obciążeniach o charakterze udarowym. *Inżynieria Rolnicza*, 3(146), 131–143. **(5 pkt. MNiSW)**
9. Komarnicki, P., Stopa, R., Szyjewicz, D., Kuta, Ł., Klimza, T., 2017. Influence of contact surface type on the mechanical damages of apples under impact loads. *Food and Bioprocess Technology*, Vol. 10, Issue 8, 1479–1494. **(35 pkt. MNiSW, IF = 2,576)**
10. Komarnicki, P., Stopa, R., Szyjewicz, D., Młotek, M., 2016. Evaluation of bruise resistance of pears to impact load. *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 114, s. 36–44. **(40 pkt. MNiSW, IF = 3,248)**

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

1. Wstęp

Wyniki najnowszych danych Organizacji Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) wskazują na wzrost globalnej produkcji owoców i warzyw na świecie. Polska od lat zaliczana jest do grupy największych eksporterów jabłek w Europie, co przy zbiorach sięgających 4 mln ton sprawia, że jest znaczącym partnerem handlowym dla wielu krajów. Według informacji USDA od sierpnia 2014 roku polski eksport owoców drastycznie zmniejszył się po wprowadzeniu przez Rosję embarga na produkty z UE. W związku z tym ograniczeniem producenci rolni, sadownicy zmuszeni zostali do poszukiwania nowych rynków zbytu, których wymagania dotyczące jakości są jeszcze bardziej restrykcyjne.

Ciągły wzrost kosztów produkcji oraz niska cena skupu powodują, że plon owoców uzyskany z powierzchni hektara musi być coraz większy, aby produkcja stawała się opłacalna. Zwiększone wymagania konsumentów związane z dużym nasyceniem rynku owocami oraz konkurencją owoców importowanych zmuszają producentów do poprawy ich jakości oraz minimalizowania strat. Zapewnienie wysokich zbiorów przy zachowaniu najwyższej jakości produktu jest często trudne do osiągnięcia ze względu na anomalie pogodowe, takie jak przymrozki czy gradobicia, które dziesiątkują uprawy. Wydaje się, że największy wpływ na minimalizowanie strat przy utrzymaniu wysokich norm jakościowych ma zapewnienie odpowiednich warunków podczas zbioru, jak również w procesach pozbiorowych. Dlatego też jakość owoców i warzyw staje się czynnikiem decydującym o skuteczności ich sprzedaży, w związku z czym doskonalone są techniki kontroli i sterowania jakością (Kuczyński 2003, Rudziński 2011, Rybczyński 2007).

Współczesne trendy wskazują na wzrost zainteresowania produktami delikatesowymi. Owoce delikatesowe są bardziej wymagające w procesie produkcji, co z reguły generuje większe koszty. Przygotowanie produktów do bezpośredniego spożycia wiąże się zwykle z mniejszą odpornością na uszkodzenia, co wymaga szczególnej dbałości w procesie zbioru. Ocena sensoryczna cech jakościowych stanowi podstawę późniejszej akceptowalności nowych produktów przez sadowników, sprzedawców a przede wszystkim konsumentów (Płocharski i Konopacka 1999). Zmianę nastawienia w kierunku produkcji owoców delikatesowych może ułatwić określenie parametrów wytrzymałościowych pozwalających na zmniejszenie strat w czasie zbioru, transportu, przeładunków oraz przechowywania. Wydaje się, że za decydujący parametr należy uznać naciski powierzchniowe pozwalające na zdefiniowanie wielkości granicznych przy oddziaływaniu mechanicznym w układzie owoc – owoc i owoc – podłoże, z uwzględnieniem kształtu owocu, rodzaju powierzchni oddziałującej na owoc, wartości siły obciążającej oraz właściwości wytrzymałościowych tkanki. W związku z tym problem nacisków powierzchniowych ma ważne znaczenie niemal we wszystkich dziedzinach produkcji rolnej i nie może być pomijany, gdyż dotyczy zagadnienia kontaktowego będącego wynikiem działania siły skupionej na niewielkiej powierzchni styku. Niewątpliwie spowodowane jest to zarówno kształtem owoców i warzyw, który najczęściej jest kulisty, jak również wynika z wielowarstwowej budowy tkanki roślinnej.

2. Problematyka badawcza

Warunkiem opłacalności produkcji owoców i warzyw jest wysoka jakość, która powinna być zapewniona zarówno podczas ich pozyskiwania jak i w trakcie procesów pozbiorowych. Należy zauważyć, że w Polsce w dalszym ciągu dominuje produkcja ilościowa, która charakteryzuje się zwiększonym udziałem owoców o średniej i niższej jakości. W związku z tym priorytetowym celem powinno być ograniczenie produkcji ilościowej na rzecz zwiększenia udziału produkcji jakościowej. Dla konsumenta ważnym wskaźnikiem oceny jakości jest wygląd zewnętrzny. Oczekują oni owoców dojrzałych, jędrnych i wolnych od uszkodzeń (Bollen i in. 2001).

W procesach pozbiorowych dochodzi do powstawania uszkodzeń mechanicznych przy przeładunkach, transporcie, czy składowaniu, podczas których owoce poddawane są różnym obciążeniom udarowym, dynamicznym czy quasi-statycznym. Badania wskazują, że procesy te generują do 50% całkowitych uszkodzeń (Mohsenin 1986, Opara 2007).

2.1. Uszkodzenia przy obciążeniach stałych w czasie

Wysokouwodnione materiały biologiczne są typowymi obiektami charakteryzującymi się właściwościami reologicznymi, które pod działaniem stałych obciążeń zmieniają się w czasie, zachowując się jednocześnie jak ciała stałe i płynne (Kolowca 2005). Dlatego zaliczane są do materiałów lepko-sprężystych, charakteryzujących się niską odpornością. Materiał ten jest wrażliwy i w wyniku z obniżonej wytrzymałości tkanki miąższu ulega często uszkodzeniom mechanicznym. Uszkodzenia takie określane mianem odgnieień spowodowane są ściskaniem wielu warstw materiału podczas przechowywania. Projektując procesy przetwórcze nie należy zapominać o stworzeniu odpowiednich warunków do przechowywania surowców. Duże znaczenie, oprócz zapewnienia odpowiedniej temperatury i wilgotności, ma sposób ułożenia materiału oraz ilość warstw wiążąca się z jego obciążeniem. Z uwagi na zazwyczaj długi okres przechowywania, dochodzący do kilku miesięcy, nie można pominąć wpływu czynnika czasu na efekty działania obciążenia w stosunku do przechowywanego materiału. Przy ściskaniu tkanki miąższu dochodzi do przesuwania komórek spowodowanego obecnością przestrzeni międzykomórkowych wypełnionych powietrzem, które mogą dochodzić do 25% (Jakubczyk i Lewicki 2003, Jakubczyk i Uziak 2005, Peleg 1980). Do badań podatności materiałów roślinnych na uszkodzenia najbardziej odpowiednie są wskaźniki zależne nie tylko od zmian fizjologicznych w uszkodzonych tkankach, ale przede wszystkim określane na podstawie wytrzymałości materiału (Stropek i in. 2009). Trudności w badaniach reologicznych polegają na dobraniu właściwej metody pomiaru w celu uzyskania pełnej informacji o cechach mechanicznych, charakterystycznych dla badanego materiału. Badania reologiczne materiałów biologicznych przeprowadza się najczęściej w oparciu o dwa podstawowe testy: pełzania oraz relaksacji (Chen i Chen 1986). W procesie relaksacji obserwuje się zmiany naprężeń w warunkach stałego odkształcenia jako funkcji czasu. W przypadku składowania wysokouwodnionego materiału w warstwach jest to proces niepożądany i dlatego ma bardzo ważne znaczenie praktyczne. Powszechnie stosowaną metodą w ocenie właściwości lepko-sprężystych owoców jest test ściskania. Wyniki przebiegu testu aproksymuje się równaniami wykładniczymi, wywodzącymi się od modelu Maxwella. Budowane w ten sposób modele matematyczne pozwalają co prawda na interpretację zmiennych fizycznych stanu obiektu badań, ale są próbą idealizacji rzeczywistego obiektu i wymagają wprowadzenia szeregu uproszczeń w obliczeniach, w tym nieuwzględnienia masy materiału (Bohdziewicz 2005, Gołacki i in. 1999; Stropek i Gołacki, 2006). Z analizy literatury dotyczącej badań reologicznych wynika, że brakuje

eksperymentów uwzględniających zagadnienia kontaktowe owoców i warzyw w kontekście krytycznych nacisków powierzchniowych.

2.2. Uszkodzenia przy obciążeniach zmiennych

Duże znaczenie dla odpowiedniej jakości surowca mają uszkodzenia powstałe w wyniku działania wielokrotnie powtarzających się obciążeń ściskających. W procesie ściskania materiałów pochodzenia biologicznego następują nieodwracalne zmiany w strukturze wewnętrznej, polegające najczęściej na uszkodzeniu tkanek, mające wpływ na ich właściwości wytrzymałościowe. W początkowej fazie obciążania po wyparciu gazów i wypełnieniu przestrzeni komórkowych rozpoczyna się proces migracji cieczy powodującej odkształcenia ścian komórkowych (Blachovec 1985). Powstaje rodzaj umocnienia materiału, będący skutkiem przenoszenia obciążenia przez składniki tkanki roślinnej o wyższej wytrzymałości, jakimi są ściany komórkowe (Konstankiewicz i in. 1996, Konstankiewicz i Pukos 1998, Lippert 1995). Zniszczenie ścian komórkowych i wypływ cieczy na zewnątrz komórek rozpoczynają proces prowadzący do powstania zjawisk o charakterze nieodwracalnym powodujących zniszczenie materiału. Każde kolejne obciążenie stwarza sytuację, w której zmieniają się parametry początkowe procesu ściskania.

Poznanie wpływu ilości cykli obciążania na wartość nacisków powierzchniowych ma ważne znaczenie praktyczne pozwalające na rozwiązywanie problemów związanych np. z oceną stopnia odporności surowca rolniczego na uszkodzenia związane z wielokrotnym obciążaniem oraz z określeniem jakości przechowalniczej po zabiegach mających na celu pozyskanie surowca rolniczego.

2.3. Uszkodzenia przy obciążeniach udarowych

Najliczniejszą grupę stanowią uszkodzenia mechaniczne będące wynikiem obciążeń o charakterze udarowym. Udar materiału biologicznego jest zjawiskiem polegającym na oddziaływaniu krótkotrwałego i gwałtownego wzrostu obciążenia, w wyniku którego dochodzi do natychmiastowego zniszczenia struktury tkanki komórkowej. Powszechnie spotykane są uderzenia, będące wynikiem zrzutu owoców lub warzyw na twardą powierzchnię lub inne owoce. Następstwem uderzeń jest powstawanie różnych uszkodzeń mechanicznych takich jak obicia czy pęknięcia. Na wielkość uszkodzenia wpływa rodzaj powierzchni, z którą mają kontakt, wysokość zrzutu i prędkość w chwili uderzenia. Z tego względu ważna jest odpowiednia amortyzacja udarów, która pozwala na pochłanianie części energii uderzenia i zmniejsza jej ilość rozpraszającą się w owocach. Powoduje to rozłożenie siły uderzenia na większej powierzchni styku owoców, zmniejszając nacisk na tkanki i prawdopodobieństwo wystąpienia obić. W praktyce stosowane są różne sposoby zabezpieczeń materiału biologicznego podczas transportu poprzez wykorzystanie pojazdów posiadających pneumatyczne dodatkowe elementy tłumiące drgania, wyposażenia wnętrza pojemników w materiały ochronne mające bezpośredni kontakt z materiałem roślinnym (Fadiji i in. 2016a, 2016b, Pathare i in. 2012).

Z analizy literatury wynika, że najwięcej badań poświęconych jest obciążeniom udarowym owoców jabłek ze względu na ich dużą wrażliwość. Czynnikiem wpływającym na uszkodzenia jest również odmiana owoców. Niektóre odmiany ze względu na różne właściwości miąższu i skórki są bardziej podatne na obicia niż inne. Jabłka '*Golden Delicious*' są odmianą wrażliwą i łatwiej ulegają przebarwieniom z uwagi na jasną skórkę, natomiast '*Gala*' czy '*Jonagold*' ze względu na czerwony kolor skórki posiadają mniej widocznych obić, które ujawniają się dopiero po jej usunięciu.

W większości przypadków obicia owoców są interpretowane jako miejsca enzymatycznie brązowiejącej tkanki pod skórą owocu, będących skutkiem gwałtownych obciążeń zmiennych o charakterze udarowym (Ahmadi i in. 2010, 2012, Blahovec i Paprštejn 2005, Fu i in. 2016). W wyniku lokalnego przekroczenia dopuszczalnych nacisków powierzchniowych dochodzi do pęknięcia ścian komórkowych tkanek miękkich, z których po wydostaniu się płynu dochodzi do mieszania się substancji i reakcji utleniania. W zależności od siły uderzenia obicia przyjmują różny odcień zabarwienia.

Obicia zdeterminowane są wielkością owoców oraz kształtem. Dojrzałe owoce przyjmują różne kształty w tym: okrągłe, stożkowate, spłaszczone, ukośne, podługne a także owalne. Dlatego też bardzo ważny wpływ na rodzaj i wielkość uszkodzenia mają obciążenia kontaktowe charakteryzujące się działaniem siły skupionej na małą powierzchnię styku (Shirvani i in. 2014, Van Zeebroeck i in. 2004). Zagadnienie naprężeń kontaktowych jest jednym z bardziej skomplikowanych problemów teorii sprężystości w szczególności dla materiałów pochodzenia biologicznego. Jedną z najczęściej stosowanych w praktyce metod obliczania nacisków powierzchniowych oparta jest na wzorach – wynikających z teorii Hertza. Stosowanie tych wzorów w odniesieniu do materiałów pochodzenia biologicznego nie ma większego uzasadnienia teoretycznego ze względu na założenia, przy których zostały wyprowadzone. Teoria Hertza zakłada liniowy charakter odkształcenia w zależności od obciążenia oraz dotyczy niewielkich wartości odkształceń (Stopa 2010). W przypadku materiałów biologicznych są to trudne do spełnienia warunki, gdyż ze względu na swoje lepko-sprężyste właściwości podatny jest na duże deformacje, które dodatkowo wywołują tarcie w strefie styku. Mimo tych ograniczeń badania niektórych autorów wykazały, że zastosowanie teorii sprężystości może w wielu przypadkach prowadzić do budowy godnych zaufania wskaźników opisujących współpracę między najważniejszymi zmiennymi takimi jak nacisk powierzchniowy i czas kontaktu, chociaż błędy w ocenach powierzchni kontaktu mogą sięgać 20% (Siyami i in. 1988; Rabelo i in. 2001).

Dla materiałów biologicznych wiedza na temat wpływu kształtu powierzchni styku, sił tarcia w strefie styku, nieregularnego kształtu stykających się ciał lub sił adhezji na rozkład nacisków powierzchniowych jest praktycznie niewyjaśniony. W przypadku obciążeń udarowych zdarza się, że nawet niewielka siła powoduje w materiale o stosunkowo wysokich właściwościach wytrzymałościowych miejscowe przekroczenie dopuszczalnych wartości nacisków powierzchniowych, co w efekcie prowadzi do zniszczenia struktury wewnętrznej materiału.

Analiza literatury i badania własne oceny podatności owoców na obicia pozwoliły stwierdzić, że najbardziej obiektywne są wskaźniki bazujące na wytrzymałości materiału. Spośród nich można wyróżnić maksymalny nacisk powierzchniowy przenoszony przez tkanki bez wywoływania dalszych uszkodzeń, odporność na obicia i próg obicia. W różnych opracowaniach podatność lub odporność na obicia opisywane są związkami energii obicia i objętości obicia (Blahovec 1999, Opara i in. 2007, Opara i Pathare 2014). W literaturze znany jest sposób określenia energii obicia jabłek poprzez wykorzystanie techniki wielokrotnego zrzucania owoców z ustalonej wysokości i rejestrowania wartości energii pochłoniętej podczas kolejnych odbić (Bajema i Hyde, 1998, Barikloo i Ahmadi 2013, Gołacki i in. 2009, Stropiek i Gołacki, 2010). Rodriguez Sinobas i in. (1991) przeprowadzili badania upuszczania gruszek z różnych wysokości, na podstawie których określili zależność pomiędzy otrzymanymi wielkościami obić a wynikami pomiarów jędrności. Dzięki temu wyjaśnili istotną rolę odgrywaną przez skórkę owocu. Ważnym zagadnieniem, w tego typu badaniach jest trudność w oszacowaniu wysokości odbicia, która jest potrzebna do obliczenia rzeczywistej energii uderzenia pochłanianej przez produkty biologiczne powodującej uszkodzenia. Niewątpliwie w ocenie wrażliwości owoców na obicia równie istotnym aspektem jest sposób wyznaczenia objętości obicia. Wyznaczenie objętości obicia jest

problematyczne na co zwrócili uwagę Bollen i in. (1999). Pomiar ten jest pracochłonny i obarczony błędami. Uzyskane wartości zależą od wielu czynników np. sposobu usunięcia skórki, promienia krzywizny, temperatury czy czasu przechowywania owoców po udarze. Pang i in. (1996) w swoich badaniach wykazali, że powierzchnia obicia jest lepszym parametrem do oceny obić świeżych owoców niż objętość obicia. Autorzy stwierdzili, że bardziej wiarygodnymi wskaźnikami obić cechują się pomiary, które dotyczą mniejszych stłuczeń – bliskich progów handlowych około 1 cm², a podstawą do oceny obić powinna być inicjacja i widoczność obicia. Progiem obicia definiuje się wysokość uderzenia, przy której pojawia się stłuczenie owocu o określonym kształcie, masie i powierzchni udaru. Odporność i próg obicia wyznaczone są w warunkach obciążeń zbliżonych do naturalnych szczególnie w odniesieniu do prędkości i energii uderzenia. Z doniesień literaturowych wynika, że wiele badań prowadzonych było dla obciążeń o charakterze udarowym (Celik i in. 2011, Shafie i in. 2015, Studman i in. 1997, Van Zeebroeck i in. 2003). Pomimo czynionych wysiłków brak jest nadal satysfakcjonującego opisu teoretycznego reakcji tkanki roślinnej na obciążenia udarowe oraz uniwersalnych metod i technik do oceny odporności owoców na takie obciążenia. Większość dotychczasowych badań dotyczących wpływu obciążeń udarowych na materiał biologiczny skoncentrowanych jest na tradycyjnych metodach wykorzystujących czujniki siły i opartych na pomiarach obciążeń skupionych, co nie daje pełnej informacji o przebiegu udaru. Taką informację można uzyskać na podstawie rozkładów nacisków powierzchniowych, które uwzględniają zagadnienie kontaktowe, natomiast przy pomiarze energii zagadnienie to jest pomijane. W literaturze brakuje badań odporności owoców na uszkodzenia opartych na pomiarach obciążeń występujących na określonej powierzchni styku, umożliwiające analizę warstwicznych rozkładów nacisków powierzchniowych w odniesieniu do objętości stłuczonej tkanki.

W związku z powyższym konieczne jest poznanie mechanizmów powstawania uszkodzenia i ich skutków podczas udaru, gdyż może to przyczynić się do poprawy jakości produktów, obniżenia kosztów produkcji oraz cen dla konsumentów. W celu minimalizacji strat niezbędna jest wiedza o przebiegu udaru i skutkach naprężeń kontaktowych związanych z oddziaływaniem siły skupionej na niewielką powierzchnię styku. Dzięki metodzie wykorzystania rozkładów nacisków powierzchniowych w momencie zderzenia i komputerowej analizie obrazów jako narzędzia do dokładnego wyznaczenia objętości zdeformowanej tkanki roślinnej można w sposób precyzyjny i wiarygodny wyznaczać odporność na obicia, która daje więcej informacji na temat przebiegu udaru.

Wszystkie powyższe i aktualne przesłanki ukierunkowujące aspekty w dziedzinie badań wytrzymałościowych materiału biologicznego znajdują odzwierciedlenie w przedstawionym monotematycznym cyklu prac stanowiącym osiągnięcie habilitacyjne.

3. Cel badań

Celem przeprowadzonych badań przedstawionych w monotematycznym cyklu publikacji była ocena uszkodzeń mechanicznych wybranych owoców i warzyw dla różnych warunków obciążeń na podstawie rozkładów nacisków powierzchniowych.

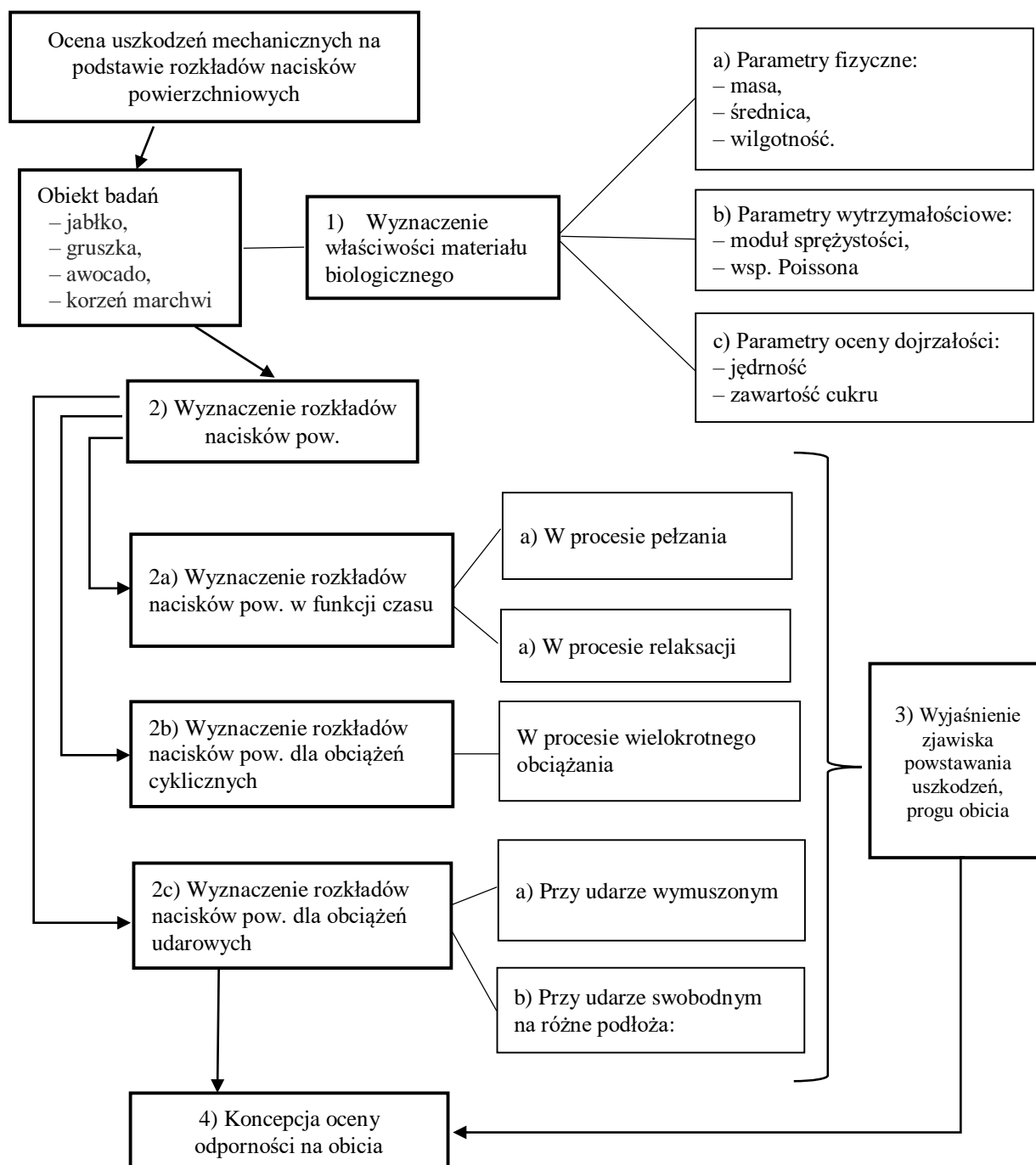
Realizacja powyższego celu wymagała w szczególności:

- a) wyznaczenia parametrów dotyczących właściwości fizycznych, wytrzymałościowych oraz oceny dojrzałości materiału biologicznego,
- b) wyznaczenia warstw, rozkładów oraz wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych występujących podczas procesów reologicznych, dla obciążeń cyklicznych oraz udarowych,
- c) wyjaśnienia mechanizmu powstawania uszkodzeń w tym przedstawienia sposobu oceny progu uszkodzenia,
- d) przedstawienie metody oceny jakościowej i ilościowej odporności owoców na uszkodzenia mechaniczne.

W pracy sformułowano następujące hipotezy badawcze:

1. *H1: W miarę wzrostu obciążenia owocu proporcjonalnemu zwiększeniu ulega powierzchnia styku, która skutkuje utrzymywaniem się średnich nacisków powierzchniowych na stałym poziomie.*
2. *H2: Istnieje istotna zależność między naciskami powierzchniowymi oraz objętością obicia wysokowodnionego materiału biologicznego w warunkach obciążeń udarowych.*

Kolejność etapów realizacji celu pracy przedstawiono na poniższym schemacie blokowym:



Rys. 1. Schemat realizacji celu pracy

4. Wyniki badań

4.1. Analiza nacisków powierzchniowych w warunkach obciążeń o charakterze reologicznym

W pierwszym etapie badań skoncentrowano się na przedstawieniu wyników pomiarów nacisków powierzchniowych w funkcji czasu w teście promieniowego ściskania całych owoców jabłek, gruszek, awokado oraz korzenia marchwi (4.b-1, 4.b-2, 4.b-3, 4.b-4). Wszystkie prezentowane eksperymenty były przeprowadzone w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Przed przystąpieniem do badań oraz w celu zachowania powtarzalności wyników pomiarów wyznaczone zostały podstawowe własności materiału, który wyselekcjonowano pod względem geometrycznym oraz masowym. Jednorodny materiał poddawano ocenie dojrzałości opisując parametrem jędrności. W czasie realizacji pomiarów dbano o zachowanie stałej wilgotności surowca, który pobierano z chłodni, gdzie panowały ściśle kontrolowane warunki.

W publikacji (4.b-1) postanowiono sprawdzić jakim zmianom ulegały rozkłady nacisków powierzchniowych jabłek w procesie pełzania. Zastosowanym materiałem badawczym były jabłka odmiany *Ligol* charakteryzujące się zwiększoną twardością i kruchością miąższu. W pierwszym etapie badań przeprowadzono test ściskania owoców ułożonych w pozycji bocznej pomiędzy dwiema równoległymi elementami roboczymi maszyny wytrzymałościowej Instron w celu sprawdzenia wytrzymałości doraźnej – granicznej wartości obciążenia. Wyznaczenie wartości siły niszczącej F_{max} , było podstawą do obliczenia wartości obciążenia początkowego. Jego wartość założono na poziomie $0,3 \cdot F_{max}$ co odpowiadało wartości 70,1 N przy wartości przemieszczenia początkowego 4,4 mm. Czas trwania testu pełzania, wynosił 1200 s. Na dolnej nieruchomej płycie maszyny zamocowano ultra cienki czujnik nacisków, który stanowił część systemu Tekscan (4.b-1). Pomiar nacisków powierzchniowych w trakcie testu pełzania polegał na jednoczesnej rejestracji siły obciążającej oraz całkowitej powierzchni styku jabłka z elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej.

Obserwacja przebiegów średnich nacisków powierzchniowych jabłek *Ligol* nie wykazała istotnych zmian w czasie trwania testu. Po ustabilizowaniu się obciążenia wartości nacisków utrzymywały się na poziomie 0,195 MPa. Wykazano natomiast, że interpretacja jedynie średnich wartości nacisków powierzchniowych w aspekcie zachowania się jabłek pod wpływem obciążenia może prowadzić do błędnych wniosków, gdyż istotne znaczenie ma kształt rozkładów i warstwic ze strefami występowania lokalnych wartości nacisków maksymalnych. Analiza warstwic nacisków w czasie narastania obciążenia do ustalonej wartości pozwoliła stwierdzić, że strefa styku jabłka z elementem maszyny wytrzymałościowej miała charakter punktowy z wyraźnym maksimum nacisków w środkowym obszarze styku, co w podobny sposób zinterpretowali Herold i in. (2001). W centralnej strefie styku rozkłady nacisków powierzchniowych przyjmowały maksymalne wartości 0,375 MPa. Kluczową obserwacją tych badań były zmiany warstwic nacisków w trakcie procesu pełzania. W przedziale czasu 20–1200 s zauważono stopniowy wzrost powierzchni występowania maksymalnych nacisków przy jednoczesnym zmniejszaniu się ich wartości lokalnych. Objawiało się to wyrównaniem rozkładów nacisków powierzchniowych w dwóch prostopadłych przekrojach. W końcowej fazie testu, po upływie 1200 s nastąpiło wyraźne ujednorodnienie nacisków na powierzchni styku. Strefa styku maksymalnych wartości nacisków powierzchniowych z przedziału pomiędzy 0,250 MPa do 0,320 MPa obejmowała około 75% całkowitej powierzchni styku, podczas gdy na początku testu wynosiła 35%. W publikacji (4.b-1) porównano również zmiany wartości nacisków dla obszarów leżących w centralnej strefie styku oraz w okolicach strefy zewnętrznej. Zaobserwowano asymptotyczny wzrost wartości nacisków powierzchniowych w strefie zewnętrznej, przy jednoczesnym ich spadku w strefie centralnej. Na podstawie analizy

wartości nacisków dla obu stref ustalono, że stabilizacja wartości następowała po upływie około 500 s od rozpoczęcia testu.

Zaobserwowane w trakcie testów pełzania zmiany nacisków powierzchniowych mogą prowadzić do niebezpiecznego wzrostu ich wartości krytycznych decydujących o trwałym uszkodzeniu tkanki roślinnej czego dowodem są widoczne odgniecenia owoców występujące podczas dłuższego przechowywania w większych pojemnikach.

W analogiczny sposób dokonano wyznaczenia warstwic i rozkładów nacisków powierzchniowych podczas testu promieniowego ściskania w funkcji czasu dla świeżego owocu awokado odmiany *Fuerte* (4.b-2). Badania dla tego typu owocu podyktowane były przede wszystkim ich dużą wrażliwością na uszkodzenia oraz kształtem. Awokado jest owocem podatnym na przebarwienia szczególnie przy zbiorach wykonywanych po deszczu (Everett i in. 2008). Z badań przeprowadzonych przez Baryeh (2002) wynika, że właściwości wytrzymałościowe awokado bezpośrednio po zbiorze są wysokie, ale ulegają gwałtownemu pogorszeniu już po 7 dniach. Stwierdził także, że świeże owoce można pakować w drewniane pojemniki do 35 warstw, ale już po 15 dniach składowania zalecane są tylko dwie warstwy. W publikacji (4.b-2) zaprezentowano wyniki eksperymentów procesu wzrostu odkształceń w funkcji czasu przy stałej wartości obciążenia początkowego na poziomie 134,8 N, stanowiącego 20% maksymalnej siły niszczącej przy przemieszczeniu początkowym 4,7 mm. Zarówno dla jabłek *Ligol* jak i awokado *Fuerte* zwiększenie czasu pełzania ponad 1200 s nie wpływało na charakter przebiegu zmian wartości nacisków powierzchniowych. W badaniach zauważono, że na początku procesu pełzania (po 190 s) średnie wartości nacisków powierzchniowych osiągały wartości 0,328 MPa, które stopniowo zmniejszały się do poziomu 0,309 MPa po upływie 500 s, malejąc kolejno do 0,295 MPa przy końcu testu. Otrzymane rezultaty badań wskazywały, że po osiągnięciu założonego obciążenia wartości maksymalnych nacisków (wygenerowane na poziomie 0,574 MPa) na powierzchni kontaktu występowały regularnie w centralnej strefie styku. Taki sam wynik otrzymano po czasie 500 s pełzania, obserwując jedynie spadek maksymalnych nacisków do poziomu 0,509 MPa. W końcowej fazie testu (po 1200 s) zarejestrowano tylko nieznaczne wyrównanie rozkładów maksymalnych nacisków powierzchniowych, które zmniejszyły się do 0,475 MPa. Takie zachowanie materiału biologicznego należy tłumaczyć odkształceniem o charakterze sprężystym spowodowanym bardzo wolnym ruchem płynów ze stref o większym ciśnieniu do obszarów gdzie znajdują się wolne przestrzenie komórkowe bez destrukcji tkanek. Interesującym spostrzeżeniem była dynamika zmian wartości nacisków powierzchniowych. Zauważono że w początkowej fazie testu (190–500 s) prędkość zmniejszania się maksymalnych nacisków była czterokrotnie większa niż w fazie końcowej, zaś prędkość zmniejszania się średnich nacisków okazała się trzydziestokrotnie większa niż w fazie końcowej.

Podobne wyniki otrzymano podczas badań gruszek odmiany *Lukasówka* poddawanych stałym obciążeniom w czasie (4.b-3). Owoce tej odmiany posiadały dość sprężysty miąższ oraz dużą masę średnio 215 g. W odróżnieniu od poprzednich owoców obciążenie początkowe stanowiące 30% wartości siły niszczącej wynosiło 234 N i było ponad trzykrotnie większe od jabłek *Ligol*. Najwyższe wartości maksymalnych nacisków powierzchniowych na poziomie 0,638 MPa zarejestrowano po uzyskaniu wymaganego obciążenia początkowego, przy średnich wartościach 0,429 MPa. W trakcie testów pełzania gruszek stwierdzono, że maksymalne i średnie wartości nacisków powierzchniowych uległy znacznej redukcji. Różnice prędkości zmniejszania się maksymalnych nacisków w pierwszej fazie procesu pełzania (180–500 s) były około dwukrotnie większe od wartości średnich. Zauważono, że pod koniec testu nastąpiło umiarkowane wyrównanie rozkładu nacisków na powierzchni styku owocu z elementem maszyny. Taka kompensacja wynikała z niewielkiego wzrostu powierzchni kontaktu, natomiast w dalszym ciągu szczytowe wartości nacisków utrzymywały się w centralnej strefie styku. Świadczy to o tym, że powierzchnia styku tkanki była ciągle

sprężysta. Ujawnienie się zaś deformacji trwałej byłoby wynikiem gwałtownego obniżenia się wartości nacisków w środku powierzchni styku.

Użyte do badań egzotyczne owoce awokado odmiany *Fuerte* oraz gruszki *Lukasówka* charakteryzowały się bardzo dobrymi właściwościami sprężystymi w trakcie długotrwałego obciążania, o czym świadczyły praktycznie niezróżnicowane rozkłady maksymalnych nacisków powierzchniowych występujących w środkowej strefie styku, typowe dla zagadnień kontaktowych. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że analiza warstw i rozkładów nacisków powierzchniowych pozwoliła na poprawną identyfikację zmian zachodzących w materiale biologicznym w tym reakcję tkanki roślinnej na długotrwałe obciążenie w czasie.

W publikacji (4.b-4) postanowiono zweryfikować jakie zmiany rozkładów nacisków powierzchniowych jabłek *Ligol* wystąpią podczas testów relaksacji. Relaksacja materiału biologicznego w odróżnieniu od pełzania miała na celu obserwację zmian obciążeń w warunkach stałego odkształcenia jako funkcji czasu. W przypadku składowania wysokouwodnionego materiału w warstwach w wyniku zmian naprężeń może dochodzić do jego deformacji plastycznych będących źródłem uszkodzeń mechanicznych, co jest zjawiskiem niepożądanym i dlatego ma ważne znaczenie praktyczne (Stropek i Gołacki 2005, Stępień 2009). W badaniach odkształceniom poddawano cały owoc przy ustalonej wartości przemieszczenia początkowego na poziomie 4,4 mm, co stanowiło 20% przemieszczenia maksymalnego. Reakcją materiału na stałe odkształcenie były zarejestrowane zmiany obciążeń, które zmniejszały się równomiernie (od 150 s) od wartości maksymalnej 90,5 N na początku procesu relaksacji do 78,3 N przy końcu (do 1200 s), co stanowiło 86,5% wartości początkowej. Zarejestrowane wartości pól powierzchni styku owocu z elementem roboczym maszyny wynosiły średnio 396 mm² i wykazały niezmienny charakter przebiegu. Z tego też względu powierzchnia styku nie wpłynęła na średnią wartość nacisków powierzchniowych, które w czasie relaksacji zmniejszały się od 0,23 MPa do 0,19 MPa. Ponadto w badaniach zauważono, że w przedziale czasu 300–1200 s nastąpiło wyrównanie rozkładów maksymalnych wartości nacisków powierzchniowych oraz spadek wartości od 0,32 MPa do poziomu 0,27 MPa na końcu testu relaksacji. Obserwacja przebiegu zmian maksymalnych nacisków powierzchniowych w czasie 0–1200 s pozwoliła stwierdzić, że gwałtowny ich przyrost występował podczas narastania obciążenia do osiągnięcia stałej wartości przemieszczenia początkowego i uwidaczniał się w centralnej strefie styku na poziomie 0,38 MPa. Należy podkreślić, że wiązało się to z niewielką ściśliwością cieczy wypełniającej wolne przestrzenie międzykomórkowe tkanki mięszu, która wywołała wzrost nacisków na tej powierzchni oddziaływania. Wpływ miała również charakterystyczna budowa komórkowa tkanek, lepko-sprężyste właściwości i kulisty kształt jabłek. Jak wynika z doniesień literaturowych wraz ze wzrostem prędkości deformacji materiałów biologicznych zmniejszeniu ulegają wartości modułów sprężystości oraz współczynników lepkości dynamicznej (Gołacki 1996). Analogicznie wzrost prędkości deformacji wywołuje wzrost ilości mikrouszkodzeń. Podejrzewa się, że istnieje taka krytyczna wartość prędkości obciążania zadawanego we wstępnej fazie relaksacji, po przekroczeniu której gwałtownie rośnie stopień rozwarstwiania tkanek oraz nasilenie przepływu płynów (Zhao i in. 2017). Dlatego też etap procesu relaksacji związany z narastaniem obciążenia do osiągnięcia stałej wartości jest najbardziej niebezpieczny z punktu widzenia ewentualnych uszkodzeń jabłek.

W związku z powyższymi rozważaniami oraz uwzględniając wyniki publikacji (4.b-1, 4.b-3, 4.b-4) udowodniono słuszność hipotezy H1: głoszącej, że w miarę wzrostu obciążenia owocu proporcjonalnemu zwiększeniu ulega powierzchnia styku, która skutkuje utrzymaniem się średnich nacisków powierzchniowych na stałym poziomie. Należy podkreślić, że w ocenie materiału biologicznego na długotrwałe odkształcenie lub obciążenie w czasie kluczowe znaczenie odgrywa wiedza o rozkładach nacisków powierzchniowych, gdyż dzięki niej

możliwe jest np. wyznaczenie wartości parametrów, przy których materiał traci właściwości sprężyste. Na tej podstawie można ocenić jaka krytyczna wartość nacisku, obciążenia lub prędkości jego narastania destrukcyjnie wpływają na strukturę tkanki roślinnej.

4.2. Analiza nacisków powierzchniowych w warunkach wielokrotnego obciążania

Kolejny etap badań miał na celu wyznaczenie zmian wartości nacisków powierzchniowych dla korzenia marchwi odmiany *Karotka* poddawanej procesowi wielokrotnego obciążania (4.b-5). Pomiaru nacisków przedstawiono w zależności od wartości obciążenia maksymalnego, prędkości wymuszenia obciążenia oraz średnicy próbki podczas sześciu cykli ściskania promieniowego oraz porównano je z wartościami teoretycznymi obliczonymi w oparciu o wzory Hertz'a. Test wielokrotnego obciążania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej oraz specjalnego przyrządu, które wraz z oprogramowaniem IRIS Laboratory, pozwoliły na dokładny pomiar powierzchni styku próbki z podporą (Stopa 2010). Otrzymane rezultaty badań wykazały, że wartości nacisków powierzchniowych ulegają wyraźnemu zmniejszeniu w kolejnych cyklach obciążenia. Lee i in. (2016) w testach histerezy jabłek również obserwowali straty energii. Średnie wartości nacisków p_{sr} obliczone na podstawie pomiaru pola powierzchni styku próbki z podłożem zmniejszały się od 0,46 MPa w pierwszym cyklu obciążenia do 0,41 MPa w czwartym, co stanowiło 11% wartości początkowej. Największa ich zmiana na poziomie 6,7% wystąpiła po pierwszym cyklu obciążenia. Kolejne cykle obciążeń nie wpływały na zmiany wartości nacisków powierzchniowych. Uzasadnieniem powyższego zjawiska był wzrost pola powierzchni styku próbki z płaską płytą maszyny wytrzymałościowej w poszczególnych cyklach obciążenia. Ponadto w publikacji (4.b-5) wykazano, że na podstawie teorii Hertz'a uzyskuje się stałe, ponad dwukrotnie zawyżone od danych doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych p_{Hmax} , które nie dają możliwości uwzględniania cyklicznych zmian obciążeń. Potwierdzeniem powyższego są wyniki Bohdziewicza (2008) wskazujące na znaczne rozbieżności obliczeń teorii Hertz'a przy wyznaczaniu współczynników sprężystości warzyw w funkcji odkształcenia względnego w warunkach cyklicznych zmian obciążenia. Można zatem stwierdzić, że możliwości wykorzystania uproszczonych równań, opracowanych na podstawie teorii Hertz'a, w odniesieniu do niektórych gatunków warzyw są znaczne ograniczone.

Analizując wartości nacisków p_{srmax} obliczonych z uwzględnieniem eliptycznego rozkładu wzdłuż powierzchni styku próbki z podłożem dla trzech wielkości siły promieniowej $F_{10}=41$ N, $F_{20}=83$ N i $F_{30}=102$ N stwierdzono, że wzrost siły promieniowej determinował wzrost nacisków, ale nie wpływał na tendencję zmian. Po sześciu cyklach obciążenia względna zmiana nacisków powierzchniowych wynosiła około 12%, przy czym największy spadek nacisków odnotowano po pierwszym cyklu na poziomie 7%. Podobnej ocenie podlegał wpływ prędkości wymuszania maksymalnej siły promieniowej na wartość nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia (od $v_1 = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do $v_3 = 5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Analizując pierwszy cykl obciążenia zauważono, że wraz ze wzrostem prędkości obciążania wartości nacisków powierzchniowych zmniejszają się od 0,59 do 0,55 MPa, a więc o 6,8%. Uzyskane wyniki potwierdzają fakt, że prędkość wymuszania obciążenia nie wpływała na charakter zmian wartości nacisków powierzchniowych. Istotny wpływ na wartości nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążeń wykazały natomiast zmienne średnice próbek. Nie wpływały one na tendencję zmian nacisków ale porównując przebiegi dla zakresów średnic $\varphi_1=25\text{--}30$ mm i $\varphi_2=35\text{--}40$ mm wartości nacisków powierzchniowych różniły się między sobą o 33%. Dla badanych średnic próbek zmniejszanie się wartości nacisków powierzchniowych po 6 cyklach obciążenia wynosiło 14%.

Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdziła (dla $P < 0,05$), że wartość nacisków powierzchniowych w kolejnych cyklach obciążenia zależy istotnie od wielkości siły promieniowej, prędkości jej wymuszania oraz średnicy próbek.

4.3. Analiza nacisków powierzchniowych w warunkach obciążeń udarowych

Zachowanie się materiału biologicznego pod wpływem stałego lub cyklicznego obciążania jest ważnym zagadnieniem z punktu widzenia oceny przechowalniczej. Podczas obciążania niewielkimi prędkościami materiał wykazuje silne właściwości lepko-sprężyste, co jest spowodowane wyparciem gazów i zmniejszeniem przestworów międzykomórkowych. Na skutek tego rozpoczyna się powolny proces migracji cieczy powodującej odkształcenia ścian komórkowych. W rezultacie podczas testów reologicznych zauważa się, że taki charakter obciążenia umożliwia osiągnięcie wyższych wartości naprężeń niszczących niż przy obciążeniu udarowym. Najczęstszą jednak utratę jakości owoców obserwuje się podczas oddziaływań obciążeń o charakterze udarowym dla takich procesów jak zbiór, transport, przeładunki czy sortowanie. Dlatego też ważnym etapem monotematycznego cyklu badań były analizy rozkładów nacisków powierzchniowych przy obciążeniach udarowych oraz ich wpływ na degradację tkanki roślinnej (**4.b-6, 4.b-7, 4.b-8, 4.b-9, 4.b-10**).

W publikacji (**4.b-6**) przedstawiono pomiary dotyczące wpływu obciążeń o charakterze udarowym na kształt warstwic i rozkładów nacisków powierzchniowych dla jabłek odmiany *Ligol*. Eksperymenty przeprowadzono na stanowisku pomiarowym własnej konstrukcji, którego funkcjonowanie opierało się na zasadzie mechanizmu wahadła. Obciążenie udarowe wymuszano poprzez zmianę kąta początkowego ramienia wahadła, na końcu którego zamocowany był owoc oraz odważniki umożliwiające zmianę prędkości zderzenia. Pomiary warstwic nacisków powierzchniowych w momencie uderzenia zrealizowano przy pomocy aparatury Tekscan wyposażonej w ultra cienki czujnik High-Speed, który w czasie rzeczywistym umożliwiał jednoczesny pomiar siły chwilowej i wielkość pola powierzchni kontaktu owocu z płaszczyzną zderzaka. Testy udarowe owoców przeprowadzono dla zmiennych kątów ramienia wahadła (wysokości zrzutu), zmiennych wariantów obciążeń (prędkości zderzenia), obserwacji podlegała także liczba impulsów odbić w funkcji czasu aż do zatrzymania. Analiza dla I wariantu obciążenia przy masie 0,5 kg (owoc + ciężarek), wysokości zrzutu 0,2 m umożliwiły uzyskać prędkość zderzenia owocu równą $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i energię 1 J. Zaobserwowano, że wahadło ulegało całkowitemu zatrzymaniu po około 10 uderzeniach jabłka o zderzak. Przeprowadzone analizy średnich nacisków powierzchniowych dla I wariantu obciążenia wykazały, że po pierwszych trzech impulsach wartości nacisków powierzchniowych ulegały zmniejszeniu od 0,27 MPa do stabilnego poziomu 0,12 MPa.

Kształt impulsu siły był symetryczny i regularny zarówno w fazie zderzenia jak i odbicia bez względu na prędkość oraz energię zderzenia. Czas trwania pierwszego impulsu od rozpoczęcia kontaktu owocu do jego zakończenia wynosił 8 ms. Analiza warstwic maksymalnych nacisków powierzchniowych po czasie 1 ms trwania pierwszego impulsu wykazała, że wartości osiągały 0,337 MPa i charakteryzowały się równomiernym rozkładem na powierzchni styku. W końcowej fazie odbicia czyli w 7 ms trwania impulsu charakter rozkładu nacisków nie uległ istotnym zmianom, natomiast zwiększeniu uległa nieco powierzchnia kontaktu. Otrzymane rozkłady maksymalnych nacisków powierzchniowych wykazały niewielkie zmniejszenie wartości w centralnej strefie styku, co mogło świadczyć o niewielkich deformacjach trwałych z przewagą odkształceń sprężystych. Uzyskane obrazy warstwicowe uwiarykowały, że większość komórek jabłka występujących w strefie kontaktu brała jeszcze udział w oddawaniu energii sprężystej. W II wariantcie obciążenia przy masie 0,8 kg, wysokości zrzutu 0,85 m uzyskano prędkość zderzenia $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz energię 6,7 J. W

tym etapie eksperymentu zdecydowanie zmniejszyła się liczba odbić owocu od powierzchni oporowej do 5 impulsów i dodatkowo nie następowało wyrównanie wartości nacisków podczas kolejnych uderzeń. W momencie rozpoczęcia zderzenia, po 1 ms czasu trwania impulsu kontakt owocu z powierzchnią zderzaka miał charakter punktowy. Zaobserwowano, że przy małym polu powierzchni kontaktu maksymalne wartości nacisków powierzchniowych skupiały się bardzo szybko w centrum strefy styku i wynosiły 0,337 MPa, czyli podobnie jak dla I wariantu obciążenia. W wyniku gwałtownego działania siły chwilowej na małą powierzchnię styku następował wzrost ciśnienia płynów komórkowych w strefie kontaktu, co przy braku możliwości ich przemieszczania się prowadziło do odkształceń o charakterze plastycznym a także uszkodzenia komórek. W rezultacie uszkodzone środkowe strefy tkanki jabłek utraciły właściwości sprężyste. Powyższy mechanizm procesu niszczenia tkanek powtarzał się w miarę wzrostu powierzchni kontaktu badanego jabłka, co zauważono już po 3 ms trwania impulsu. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych o takiej samej wartości 0,337 MPa występowały na obrzeżach powierzchni styku, czyli w miejscach gdzie w strefę kontaktu stopniowo wkraczały niezniszczone partie komórek mogące przenosić obciążenie. Zauważono że dla II wariantu obciążenia czas kontaktu pierwszego impulsu wydłużył się do 10 ms.

Przeprowadzone badania wykazały, że zjawisko uderzenia materiału roślinnego jest złożonym procesem zachodzącym w krótkim czasie, który można rejestrować przy wykorzystaniu wysokoczułych czujników nacisku. Interpretacja warstw i rozkładów nacisków powierzchniowych w poszczególnych fazach trwania impulsu oraz w zależności od ich liczby pozwoliła dokładnie ocenić zmiany charakteru odkształcenia, a także wyznaczyć maksymalne wartości nacisków, które destrukcyjnie oddziałują na materiał biologiczny.

W pracy (4.b-7) w analogiczny sposób jak w publikacji (4.b-6) postanowiono ustalić reakcję owoców awokado na obciążenia o charakterze uderzeniowym. W związku z tym, że owoce awokado podczas przeładunków, transportu, czy sortowania podlegają różnym obciążeniom dynamicznym czy uderzeniowym są podatne na uszkodzenia mechaniczne, takie jak obicia powodujące straty dla przedsiębiorców. Dlatego owoce transportowane są w stanie niedojrzałym, co znacznie zwiększa odporność na uszkodzenia mechaniczne. Jednakże podczas dostawy bezpośrednio do odbiorcy końcowego, owoce muszą mieć zachowany odpowiedni stopień dojrzałości. Badania właściwości wytrzymałościowych awokado przeprowadzone przez Baryeh (2000) wykazały, że bezpośrednio po zbiorze są one bardzo wysokie, stopień elastyczności wynosił 87%, ale 15 dni po zbiorze obniżył się do 40%. Na podstawie wykonanych badań uderzeniowych podczas swobodnego spadania z wysokości 0,5 m autor zaobserwował, że bezpośrednio po zbiorze 25% owoców zostało uszkodzonych, podczas gdy po 15 dniach przechowywania uszkodzenia wzrosły do 90%.

Celem publikacji (4.b-7) było wyznaczenie warstw i rozkładów nacisków powierzchniowych dla owoców awokado odmiany *Fuerte* za pomocą eksperymentu w warunkach obciążeń uderzeniowych przy dwóch różnych prędkościach i energii zderzenia.

Badanie obciążeń uderzeniowych świeżych owoców przeprowadzono dla dwóch różnych wariantów parametrów testowych, które otrzymano poprzez zmianę kąta nachylenia ramienia wahadła (wysokości zrzutu) dla 30° (0,1 m) oraz 45° (0,2 m). Uzyskano dzięki temu zmianę prędkości zderzenia od 1,4 m·s⁻¹ do 2,0 m·s⁻¹ oraz odpowiednio energii uderzenia od 0,5 J do 1 J. W przypadku I wariantu do całkowitego zatrzymania wahadła, niezbędne było 6 uderzeń awokado o powierzchnię oporową. Wartości średnich nacisków powierzchniowych spadały w kolejnych impulsach od 0,48 MPa do 0,11 MPa, podczas gdy siła uderzenia zmieniała się w zakresie 141 N do 4 N. Analiza pierwszego impulsu wykazała że całkowity czas kontaktu owocu z powierzchnią oporową od chwili rozpoczęcia kontaktu do jej zakończenia wynosił 11,16 ms. Zauważono, że każde uderzenie posiadało dwa charakterystyczne maksima, które dzieliły impuls na dwie części. Czas trwania pierwszego etapu obejmował 4,75 ms, natomiast

drugiego 6,41 ms. Ze względu na deformację miąższu owoców awokado, a tym samym zmianę powierzchni kontaktu owocu z powierzchnią oporową, przebieg zmian nacisków był łagodniejszy. Wartości nacisków uzyskane w drugim etapie impulsu były wyraźnie niższe niż w pierwszym. Dla pierwszego etapu maksymalne wartości nacisków otrzymano na poziomie 0,699 MPa, natomiast dla drugiego 0,595 MPa. Powyższe zachowanie owoców awokado podczas uderzenia można wytłumaczyć oddziaływaniem pestki, której masa stanowiła około 25% masy całego owocu przy module elastyczności 700 razy większym niż moduł elastyczności miąższu. Analiza warstw nacisków powierzchniowych dla pierwszego impulsu wykazała, że we wszystkich jego etapach wartości maksymalne występowały w centralnej strefie styku. Taki rozkład nacisków jednoznacznie oznaczał niewielką wartość odkształceń plastycznych tkanki miąższu w strefie największych obciążeń i przeważających odkształceń sprężystych, które powodowały odbijanie owocu od powierzchni oporowej. Z tego wynika, że większość komórek, które znajdowały się w środkowej strefie styku, brała udział w odzyskaniu energii sprężystej zgromadzonej podczas uderzenia.

Obserwacja II wariantu przy wyższych wartościach prędkości i energii w chwili uderzenia wykazała, że obraz nacisków powierzchniowych w strefie kontaktu nie zmienił się znacząco. Pojedynczy impuls dla drugiego wariantu obciążenia w początkowej fazie uderzenia miał podobny przebieg jak dla I wariantu. W początkowej chwili uderzenia (po 1,77 ms) kontakt owocu miał charakter punktowy, a przy niewielkiej powierzchni styku maksymalne wartości nacisku wynosiły 0,612 MPa. W kolejnej fazie impulsu w wyniku sił bezwładności sztywnej pestki naciski powierzchniowe nieco wzrosły do 0,656 MPa.

Opisany w publikacji (4.b-7) mechanizm zjawisk zachodzących podczas obciążeń udarowych owoców awokado o powierzchnię oporową nie doprowadził do zniszczenia tkanki miąższu i powstania odkształceń trwałych. Można sądzić, że zależało to od specyficznych właściwości tkanki miąższu oraz charakterystycznej budowy warstwowej owoców. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych pojawiały się zawsze blisko centralnego punktu styku i znikwały na granicy obszaru w miejscach, gdzie nowe partie komórek wchodziły do strefy kontaktu. Rozkłady nacisków powierzchniowych owoców awokado ujawniły, że dzięki szczególnym właściwościom tkanki miąższu dochodziło do niewielkiej utraty właściwości sprężystych, inaczej jak miało to miejsce w przypadku badań jabłek *Ligol* (4.b-6), których brak przy II wariantcie badań miał decydujący wpływ na deformację trwałą i uszkodzenia mechaniczne.

W badaniach udarowych istotnym zagadnieniem jest możliwość wyznaczenia parametrów krytycznych, które decydują o podatności owoców na uszkodzenia. Ocena wrażliwości owoców na obicia należy przeprowadzić na podstawie wyznaczonych objętości obitych obszarów, a także wielkości nacisków powierzchniowych, które uzależnione są od wartości sił oddziałujących na niewielką powierzchnię kontaktu. W publikacji (4.b-8) rozpatrywano wpływ obciążeń o charakterze udarowym w kontekście podatności na obicia jabłek odmiany *Lobo* przy zmiennych wartościach wysokości zrzutu i liczbie uderzeń. Pomiar przeprowadzono na tym samym stanowisku, które opisano w publikacjach (4.b-6, 4.b-7). Test obciążenia udarowego jabłek wykonano seriami po 10 uderzeń przypadających na jeden owoc, dla zmiennych wartości kątów pochylenia początkowego ramienia wahadła w zakresie 10–60°, co odpowiadało wysokościami zrzutu od 8 do 250 mm. Po każdym odbiciu owocu od zderzaka ramię wahadła zatrzymywano i mocowano ponownie w położeniu wyjściowym, następnie wykonywano pomiar z takiej samej wysokości. Zastosowany do badań system Tekscan obliczał naciski powierzchniowe w momencie uderzenia podczas jednoczesnej rejestracji wartości impulsów sił chwilowych oraz pola powierzchni kontaktu owocu z nieruchomą płytą zderzaka. Po zrealizowaniu badań udarowych przeprowadzono komputerową analizę obrazu obić jabłek. Wykorzystując metodykę opracowaną przez Holt i Schoorl (1977) wyznaczono objętości stłuczenia materiału o kształcie okrągłym. Kluczowym

elementem pracy (**4.b-8**) była ocena jakościowa wrażliwości jabłek Lobo na obicia, którą przedstawiono na podstawie wyznaczonej objętości stłuczenia w funkcji wysokości uderzenia oraz siły chwilowej. Analiza rozkładów średnich sił chwilowych w funkcji liczby uderzeń wykazała, że zrzut owoców z wysokości od 8 do 30 mm nie powodował statystycznie istotnych zmian podczas kolejnych uderzeń, których wartości stabilnie utrzymywały od 57 do 106 N. Interpretacja zarejestrowanej powierzchni kontaktu w funkcji liczby uderzeń pozwoliła uwidocznić zmiany jakie zachodziły w badanym materiale biologicznym. Zauważono, że podczas pierwszych czterech uderzeń następował stopniowy wzrost powierzchni kontaktu aż do ustabilizowania się wartości podczas kolejnych uderzeń. Zjawisko takie było widoczne dla uderzeń z wysokości ponad 30 mm.

W wyniku kilkukrotnego gwałtownego działania zbyt dużej siły zniszczeniu ulegały coraz to większe obszary powierzchni styku, aż do osiągnięcia maksimum. Do wysokości zrzutu 30 mm nie zaobserwowano takiego zachowania materiału, co wskazywało jeszcze na sprężysty charakter odkształcenia. Połączenie informacji dotyczących sił chwilowych oraz pola powierzchni styku pozwoliło wyznaczyć średnie naciski powierzchniowe, których wartości w analogiczny sposób zmniejszały się podczas 4 pierwszych uderzeń od 0,256 MPa aż do asymptotycznego ustabilizowania się na poziomie 0,16 MPa. W publikacji wykazano ponadto, że pomimo oddziaływania czterokrotnie większej siły w momencie uderzenia, naciski powierzchniowe nie ulegały zmianie w istotny sposób. Wynikało to z faktu, że po czwartym uderzeniu następował proporcjonalny wzrost siły nacisku oraz pola powierzchni styku. Na podstawie wyników analiz warstwic nacisków powierzchniowych zauważono, że podczas pierwszego uderzenia następowała koncentracja nacisków w centralnej strefie styku, co wskazywało, że komórki jabłka w tym obszarze, brały udział w oddawaniu energii sprężystej skupionej w chwili zderzenia. Kolejne uderzenia (od czwartego w zwyż) cechowało występowanie maksymalnych wartości nacisków na obrzeżach powierzchni styku, przy gwałtownym zmniejszeniu się wartości w środkowej strefie styku. Powyższe zjawisko zaobserwowane również w publikacji (**4.b-6**) wynikało z nagłego wzrostu ciśnienia płynów komórkowych, co przy braku swobody ich przemieszczania się w przestrzeniach międzykomórkowych powodowało niszczenie komórek i deformację plastyczną materiału. Na podstawie wyników komputerowej analizy obrazów wyznaczono zmiany objętości deformacji w funkcji wysokości zrzutu oraz sił, które wykazały gwałtowny ponad sześciokrotny wzrost wartości objętości z 363 mm³ do 2330 mm³ dla zrzutów z wysokości od 8 mm do 30 mm. Dla tych wysokości zrzutu przyrost sił chwilowych był około dwukrotny od 57 do 106 N.

*Przedstawione w pracach (**4.b-6**, **4.b-7**, **4.b-8**) wyniki potwierdziły słuszność hipotezy H1: głoszącej, że w miarę wzrostu obciążenia owocu proporcjonalnemu zwiększeniu ulega powierzchnia styku, która powoduje utrzymywanie się średnich nacisków powierzchniowych na stałym poziomie.*

W powyższej publikacji (**4.b-8**) obserwacja zarejestrowanych zmian pola powierzchni kontaktu pozwoliła dostrzec istotne różnice w zachowaniu się materiału podczas kilkukrotnych i jednakowych uderzeń, co świadczyło o występowaniu odkształceń plastycznych, wywołanych zbyt dużą siłą. Przeprowadzone badania dowodzą o niskiej odporności jabłek Lobo na stłuczenia, o której decyduje niewielka wytrzymałość tkanek mięszu. Wykazano, że badane jabłka posiadały dużą wrażliwość na obciążenia o charakterze udarowym.

W ocenie zachowania się materiału biologicznego pod wpływem obciążeń o charakterze udarowym niezwykle ważną rolę odgrywa kontakt owoców z podłożem. W związku z tym w publikacji (**4.b-9**) za cel badań przyjęto wyznaczenie wpływu właściwości wytrzymałościowych podłoża na stopień uszkodzeń mechanicznych wrażliwych jabłek Golden Delicious poddawanych obciążeniom udarowym podczas spadku swobodnego. W szczególności rozpatrywano zagadnienie kontaktowe oraz jego skutki w oparciu o

wyznaczone rozkłady nacisków powierzchniowych na styku owoc-podłoże przy zmiennych wysokościach zrzutu. Testy udarowe jabłek wykonano na stanowisku pomiarowym własnej konstrukcji, które posiadało sztywną stalową ramę, a w podstawie płaską i masywną betonową płytę, na którą grawitacyjnie zrzucano badany owoc. Zrzuty swobodne przeprowadzono oddzielnie dla czterech różnych podłoży, które umieszczano w podstawie stanowiska. Materiały podłoża stanowiły kolejno: beton, drewno świerkowe o grubości 5 mm, karton-tekstura falista pięciowarstwowa o grubości 5 mm oraz pianka polietylenowa o grubości 3 mm. Dla materiału betonowego, drewnianego i kartonowego czujniki nacisku mocowano na powierzchni tych podłoży, natomiast dla pianki polietylenowej pod nią w celu eliminacji błędów związanych ze sztywnością czujnika. Pomiary przeprowadzono seriami po jednym uderzeniu przypadających na jeden owoc, dla piętnastu wysokości udaru (10–150 mm), czterech podłoży i w pięciu powtórzeniach. Po wykonaniu testów udarowych obite owoce oznaczono i przechowano w temperaturze pokojowej przez 3 dni, w celu wybarwienia się uszkodzonych tkanek. Następnie wykorzystując komputerową analizę obrazu dokonano pomiarów objętości obić jabłek. W literaturze spotykane są różne sposoby pomiaru objętości: (bruise thickness method (Mohsenin 1986)), (full-depth method (Saltveit, 1984)), (enclosed volume (Holt i Schoorl 1977)), (unbruised volume removed (Pang i in. 1992)), (ellipsoid (Hung i Prussia (1989))). W publikacji (4.b-9) obliczenia przeprowadzono posługując się metodyką „enclosed volume–zamkniętej objętości” dla kształtu eliptycznego, w związku z tym, że pozwoliła uzyskać zadowalające wyniki. Badania na ten temat prowadził Kabas (2010), który zauważył, że dla wielu owoców obliczanie objętości jest bardziej poprawne gdy powierzchnię stłuczenia opisuje się kształtem eliptycznym.

W oparciu o system Tekscan (oprogramowanie I-Scan) oraz komputerową analizę obrazu możliwe było wyznaczenie krytycznych zakresów wysokości uderzeń oraz średnich nacisków powierzchniowych wywołujących powstawanie trwałej deformacji tkanki jabłek *Golden Delicious*. W pracy porównano również zmiany wartości powierzchni kontaktu w chwili zderzenia z rzeczywistą powierzchnią obicia owocu i przedstawiono je w funkcji wysokości udaru dla czterech badanych podłoży. Stosunek powierzchni obicia A_b do powierzchni kontaktu A_c zdefiniowano jako względną powierzchnię obicia.

Przeprowadzone analizy wyników przebiegów średnich impulsów sił, powierzchni kontaktu oraz nacisków powierzchniowych wykazały potęgowy wzrost wartości wraz ze wzrostem wysokości zrzutu. Przebiegi średnich impulsów sił posiadały podobny charakter zarówno dla podłoża betonowego, drewnianego oraz tekturowego, dla których maksymalne wartości mieściły się w zakresie 140–160 N dla uderzeń z wysokości 150 mm. Zastosowana aparatura badawcza pozwoliła zaobserwować również jaki istotny wpływ ma rodzaj podłoża na uzyskiwane wyniki powierzchni kontaktu owocu z czujnikiem. Zarejestrowane wartości powierzchni kontaktu w chwili zderzenia na podłożu pianki polietylenowej potwierdziły około dwukrotny wzrost wartości w porównaniu do pozostałych materiałów. W rezultacie zastosowanie pianki spowodowało istotne, ponad dwukrotne zmniejszenie nacisków powierzchniowych. Dla podłoża tekturowego redukcja średnich nacisków w funkcji wysokości zrzutu w porównaniu do podłoża betonowego zmieniała jedynie od 10-20%. Świadczyło to że podłoże tekturowe było stosunkowo sztywne. Z uwagi na działanie siły skupionej na mniejszej powierzchni kontaktu należy sądzić, że z punktu widzenia uszkodzeń mechanicznych korzystne są podłoża miękkie i sprężyste, które w największym stopniu absorbują energię uderzenia.

Przeprowadzona komputerowa analiza obrazu obić wykazała, że po trzech dniach przechowywania owoców w temperaturze otoczenia pojawienie się brązowiejących stłuczeń zależało wyraźnie od materiału podłoża oraz wysokości udaru. Pierwsze oznaki obić zaobserwowano dla podłoża betonowego oraz drewnianego już przy wysokości uderzenia wynoszącej 10 mm. Dla tektury falistej zmiana zabarwienia tkanki jabłka wystąpiła przy

uderzeniu z wysokości 40 mm, natomiast zrzut na piankę polietylenową powodował pojawienie się obicia pod skórą dopiero przy udarze z wysokości 90 mm. Powyższe obserwacje potwierdziła analiza warstwic i rozkładów nacisków powierzchniowych, dla której przy zrzucie owocu z wysokości 10 mm na podłoże betonowe strefa maksymalnych nacisków powierzchniowych występowała w środku powierzchni kontaktu, osiągając wartość 0,45 MPa. Oszacowano, że przy tym uderzeniu została osiągnięta krytyczna wartość nacisków powierzchniowych, gdyż rozkład nacisków przy zrzucie z wysokości 30 mm wskazywał na zdecydowane przesunięcie maksymalnych wartości ($p_{\max}=0,48$ MPa) do zewnętrznych stref styku, natomiast w strefie centralnej nastąpił wyraźny spadek wartości do 0,28 MPa. Analiza warstwic i rozkładów nacisków powierzchniowych na podłożu tekturowym umożliwiła zaś obserwację występowania lokalnych pasowych stref maksymalnych nacisków powierzchniowych wynikających z falistej budowy tego materiału, co wykazało progowe obicie z wysokości 40 mm. Badania warstwic i rozkładów nacisków na podłożu pianki polietylenowej wykazały dużą rozpiętość pola powierzchni kontaktu, w której niewielką strefę zajmowały maksymalne naciski powierzchniowe ($p_{\max}=0,34$ MPa) przy uderzeniu z wysokości 80 mm. Spadek swobodny owocu z wysokości 90 mm spowodował powiększenie obszaru występowania maksymalnych nacisków powierzchniowych i charakterystyczne spłaszczenie rozkładu do krytycznego poziomu 0,41 MPa. Kolejne zwiększanie wysokości udaru do 110 mm wywołało przesunięcie stref maksymalnych nacisków na obrzeża powierzchni styku. Podobne rezultaty uzyskali Dwyer-Joyce i Drinkwater (1998), Marshall i in. (2004) którzy w swoich badaniach wykorzystywali fale ultradźwiękowe. W wyniku pomiarów otrzymali rozkłady nacisków powierzchniowych w funkcji siły obciążającej oraz rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych zarejestrowali również w centralnym punkcie styku jabłka z urządzeniem obciążającym. Wyniki te różnią się od efektów badań uzyskanych przez Herolda i in. (2001), które wykazały, że tak się dzieje tylko do pewnej granicznej wartości, po przekroczeniu której następuje gwałtowna utrata nośności przez komórki położone w centralnym punkcie styku, a maksymalne wartości nacisków położone są na jego krawędzi. Badania przeprowadzone przez Ahmadi i in. (2016), Lu i in. (2010) podczas pomiarów kolizji jabłek ze sztywną płytą oraz wzajemnych uderów owoców, wykazały również, że fala maksymalnych naprężeń w trakcie zderzenia przesuwa się od centralnego punktu zderzenia do zewnętrznych obszarów styku. Sądzi się, że ta graniczna wartość odpowiada punktowi biologicznego zniszczenia materiału (bioyield point).

Ponadto w publikacji (4.b-9) porównano ze sobą wpływ średnich nacisków powierzchniowych oraz wysokości zrzutu na wartości objętości obicia dla czterech badanych podłoży. Przeprowadzone pomiary wykazały, że udar z wysokości 10 mm zapoczątkował występowanie obić, których wartości objętości były podobne dla podłoża betonowego na poziomie 120 mm^3 i 114 mm^3 dla drewnianego. Lokalnie największe wartości objętości obicia na poziomie 1818 mm^3 zaobserwowano dla podłoża drewnianego przy zrzucie owocu z wysokości 150 mm, oraz przy zrzucie na beton z wysokości 130 mm. Zrzut owoców na tekturę falistą spowodował obicie o objętości 120 mm^3 przy udarze z wysokości 40 mm, natomiast zrzut z 90 mm na piankę polietylenową generował zauważalne obicie około 235 mm^3 . Zjawisko swobodnego spadku jabłek *Golden Delicious* wykorzystali również w swoich badaniach Chen i Yazdani (1991). Badając wpływ wysokości zrzutu i rodzaju podłoża na stopień obicia jabłek uzyskali zgodne wyniki z powyższymi. Podczas udaru owoców na sztywną stalową blachę otrzymali średnie objętości obicia na poziomie 1700 mm^3 , przy zrzucie z wysokości 150 mm. Natomiast podczas uderzenia na stalową płytę pokrytą warstwą gąbki o grubości 3,18 mm zaobserwowali obicie o objętości na poziomie 200 mm^3 dopiero od wysokości około 100 mm.

Przeprowadzone badania wskazują, że inicjacja uszkodzeń na podłożu sztywnym ma najistotniejsze znaczenie przy najniższych wysokościach zrzutu. Uzyskane wyniki pomiarów wykazały bardzo gwałtowny wzrost potęgowej objętości obić wraz ze zwiększaniem się nacisków powierzchniowych ($P < 0,05$). Przyrosty te utrzymywały się w wąskich zakresach nacisków, które dla betonu wynosiły od 0,32–0,41 MPa, natomiast dla drewna 0,26–0,34 MPa. Powyższe wyniki wykazały, że udary na podłoże bardzo sztywne (betonowe, drewniane) nawet z niewielkiej wysokości generowały wysokie wartości nacisków powierzchniowych, które miały istotny wpływ na powstawanie uszkodzeń mechanicznych badanych jabłek. Na podstawie wyników badań objętości stłuczenia w funkcji wysokości udaru przeprowadzono analizę regresji, która pozwoliła wyznaczyć modele predykcyjne objętości dla każdego z czterech podłoży. Wszystkie wyznaczone modele charakteryzowały się poprawną liniową zależnością co potwierdzały wysokie wartości współczynników korelacji przekraczające 0,95 w przypadku betonu, drewna i pianki oraz 0,92 dla podłoża z faktury falistej.

W ostatnim etapie badań porównano ze sobą zmierzone powierzchnie obicia oraz zarejestrowane przez system Tekscan powierzchnie kontaktu, które analizowano w funkcji wysokości udaru, dla czterech podłoży. Celem takiego porównania było oszacowanie w jakim stopniu materiał podłoża absorbował część energii uderzenia. W badaniach wykazano, że pianka polietylenowa w największym stopniu pochłaniała energię zderzenia co wynikało z najniższego stosunku powierzchni obitej do powierzchni kontaktu na poziomie 35% przy zrzucie owocu z wysokości 150 mm. Studman i in. (1997) podczas testów udarowych jabłek McIntosh z udziałem wahadła także zauważyli różnice pomiędzy powierzchnią obitą oraz kontaktu dochodzącymi do 85%. W publikacji (4.b-9) zaobserwowano, że dla podłoża betonowego oraz drewnianego przy początkowej wysokości zrzutu 10 mm powierzchnia obita stanowiła już około 85% powierzchni kontaktu. Natomiast zrzut z wysokości 130 mm dla twardego podłoża betonowego powodował, że powierzchnia obicia była od 110 do 130% większa od powierzchni kontaktu. Uzasadnieniem i potwierdzeniem tej sytuacji były obrazy warstwowe, w których dla tych wysokości zderzeń zauważono koncentracje maksymalnych nacisków powierzchniowych na zewnętrznych strefach styku.

Uzyskane w publikacjach (4.b-7, 4.b-8, 4.b-9) wyniki pozwoliły stwierdzić że zasadniczym czynnikiem wpływającym na powstawanie trwałych uszkodzeń materiału biologicznego jest lokalne przekroczenie maksymalnych nacisków na powierzchni kontaktu owocu z podłożem. Niezależnie od rodzaju podłoża trwałe uszkodzenie tkanki miękkiszkowej jabłka rozpoczynało się w centralnym punkcie styku. Wraz ze wzrostem energii zderzenia w centralnym punkcie w wyniku trwałego odkształcenia tkanka roślinna traciła zdolność przenoszenia obciążenia. Większa część obciążenia przenoszona była przez obszar położony na granicy strefy styku.

4.4. Ocena odporności na obicia

Kolejnym etapem badań finalizującym monotematyczny cykl publikacji była ocena jakościowo-ilościowa uszkodzeń materiału biologicznego w zależności od zmian nacisków powierzchniowych występujących przy obciążeniach o charakterze udarowym. Wyniki tych badań przedstawione zostały w publikacji (4.b-10). Podstawowym celem niniejszej pracy było ustalenie parametru pozwalającego wyznaczyć odporność na obicia gruszek *Clapp's Favorite* przy pomiarze wielkości możliwie w największym stopniu charakteryzującej badany obiekt. Taką wielkością był nacisk powierzchniowy uwzględniający kształt, obciążenie, właściwości wytrzymałościowe oraz odpowiadającą mu objętość stłuczenia. Z odpornością na obicia związana była konieczność wyznaczenia progu obicia, którą określono na podstawie

pomiaru zmian powierzchni styku gruszki z powierzchnią oporową. Wymagało to pomiaru wartości rozkładu i warstwic nacisków powierzchniowych oraz wyznaczenia objętości obicia. Testy obciążeń udarowych gruszek wykonano na stanowisku badawczym opisanym w artykułach (4.b-6, 4.b-7, 4.b-8). W oparciu o zmodyfikowaną metodę IHMI (Increasing-Height Multiple-Impact) (Bajema i Hyde 1998) przeprowadzono testy udarowe polegające na wielokrotnym zrzucie owocu z tej samej wysokości, szacując tym samym próg obicia. Wykonano serię 10 uderzeń przypadających na jeden owoc, dla wartości kątów pochylenia ramienia wahadła w zakresie 5–70°, co odpowiadało wysokościami zrzutu od 2 do 328 mm. Zgodnie z metodyką przedstawioną w publikacji (4.b-9) wyznaczono objętości obicia.

Uzyskane wyniki badań przebiegów sił chwilowych w funkcji ilości uderzeń wskazywały, że liczba uderzeń nie wpływała znacząco na zmiany ich wartości ($P > 0.05$), gdyż utrzymywały się na wyrównanych poziomach, świadczyły również o tym obliczone statystycznie niskie wartości współczynnika zmienności. Natomiast analiza przebiegów pól powierzchni styku wykazała istotny wpływ ilości uderzeń na wartość pola powierzchni dla różnych wysokości spadku ($P < 0.05$). Wyraźną tendencję zmian zauważono począwszy od wysokości zrzutu równej 46 mm. Od tej wysokości zrzutu pole powierzchni styku zwiększało się początkowo od wartości 206 mm² stopniowo osiągając ustalony poziom 284 mm² po 3-4 uderzeniu. Powyższe zjawisko zaobserwowano także podczas badań jabłek *Lobo* (4.b-8), na skutek wielokrotnego działania dużego obciążenia stopniowo dochodziło do trwałej deformacji coraz większych obszarów powierzchni styku aż do uzyskania maksimum. Przeprowadzone badania wykazały, że dla wychylenia wahadła odpowiadającego wysokości zrzutu 30 mm nie zaobserwowano takiego zachowania materiału, gdyż deformacja miała jeszcze charakter sprężysty (utrzymana była stała wartość powierzchni kontaktu średnio 232 mm²). W konsekwencji przyrostu powierzchni kontaktu wartości średnich nacisków powierzchniowych ulegały zmniejszaniu po 3–4 uderzeniu (od 0,421 MPa do 0,325 MPa), co szczególnie zauważono dla wysokości zrzutu 46 mm. Zaobserwowano występowanie najwyższych wartości średnich nacisków dla pierwszego uderzenia, który uznano za kluczowy w powstawaniu deformacji obicia. Wyniki powyższych badań są zgodne opracowaniem Lu i in. (2010), którzy również zauważyli dla jabłek *Sannfuji* zbliżoną stabilizację charakteru przebiegu średnich nacisków w funkcji wysokości uderzenia na powierzchni drewnianej na poziomie 0.35 MPa. Analiza warstwic nacisków powierzchniowych w publikacji (4.b-10) pozwoliła na obserwację zmian kształtu i rozmiaru rzeczywistych stref oddziaływania maksymalnych wartości sił chwilowych na danej powierzchni styku. Po pierwszym uderzeniu nastąpiło skupienie maksymalnych nacisków powierzchniowych w środkowym obszarze styku, natomiast po 3 i kolejnym uderzeniu obszar ten przesunął się na obrzeża powierzchni kontaktu, co skutkowało spadkiem wartości nacisków powierzchniowych w środkowej strefie styku. Stwierdzono, że zanik właściwości sprężystych komórek w centralnej strefie styku, spowodowany był brakiem ich udziału w przenoszeniu obciążenia i deformacją o charakterze trwałym.

Kolejnym etapem badań w publikacji (4.b-10) była komputerowa analiza obrazu uszkodzeń której wyniki posłużyły do wyznaczenia objętości obicia. Zauważono, że w przypadku nieznacznego obicia podczas uderzenia z wysokości 17 mm nie występowały rozległe uszkodzenia tkanek wewnątrz miąższu, powodujących silne odbarwienia struktury, natomiast były widoczne jedynie w niewielkim stopniu pod skórą. Wyniki tych analiz zostały potwierdzone z pracami innych naukowców, którzy wykazali, że oddziaływanie małych obciążeń nie wywołuje widocznych obić, natomiast pojawiają się one po przekroczeniu pewnego poziomu energii uderzenia (Jarimopas i in. 2007, Mohsenin 1996). Obserwacja obrazów wielokrotnych obić gruszek *Clapp's Favorite* wykazała na zwiększanie się deformacji wraz ze wzrostem wysokości obicia, które rozpraszają się wyraźnie w głąb materiału (przyrost objętości zniszczonych tkanek). Wielokrotny udar z dużej wysokości

powodował również spłaszczenie obicia widoczne na przekroju. Analiza regresji potwierdziła liniowy przyrost objętości obicia wraz ze zwiększaniem wysokości zrzutu przy wysokim współczynniku determinacji ($R^2=0.98$, $P<0.05$). Przy wysokości zrzutu 46 mm i siłach chwilowych na poziomie 100 N otrzymano objętości obicia nie większe niż 1660 mm³. Zbliżone wyniki otrzymał Van Zeebroeck (2005), który przy zmiennych wysokościach i prędkościach udaru od 0.3 m·s⁻¹ do 1.1 m·s⁻¹ uzyskiwał siły chwilowe z przedziału 30 N do 100 N, co odpowiadało wyznaczonym objętościom obicia od 100 mm³ do 1100 mm³. Rozbieżności wartości niewątpliwie wynikały z rodzaju użytego materiału oraz warunków przeprowadzonego eksperymentu.

Kluczowym etapem eksperymentów w publikacji (4.b-10) była ocena odporności owoców gruszek na obicia. *W badaniach założono, że odporność na uszkodzenia mechaniczne można poprawnie wyznaczyć na podstawie relacji nacisku powierzchniowego do objętości obicia.* Przy jej wyznaczaniu postanowiono zastąpić powszechnie używany parametr (energię zaabsorbowaną podczas obicia) naciskami powierzchniowymi ze względu na istotę oddziaływania dużych sił skupionych na niewielkiej powierzchni styku. Odniesienie ustabilizowanych średnich nacisków powierzchniowych do objętości obicia pozwoliło wyznaczyć zaproponowany parametr jakościowy – wskaźnik odporności na obicia BRI (Bruise Resistance Index). Na jego podstawie obliczono opcjonalny względny wskaźnik odporności na obicia BRI%, który odniesiono do wartości maksymalnej BRI i wyrażono w %. Analiza wyników wykazała, że w zakresie wysokości zrzutu od 0 do 50 mm następuje bardzo gwałtowny spadek wartości wskaźnika BRI% do około 10%, co opisano zależnością potęgową z wysokim współczynnikiem determinacji ($R^2=0.97$, $P<0.05$). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości wskaźników BRI% powyżej 8% nie wywoływały destrukcyjnych zmian wewnątrz materiału i dlatego można je uznać jako krytyczny próg odporności badanych gruszek na obicia, odpowiadający uderom z wysokości do 30–46 mm. Zaproponowana metoda badawcza potwierdziła więc niską odporność gruszek *Clapp's Favorite* na obicia, niebezpieczną z punktu widzenia procesów pozbiorowych. *Zaproponowana w pracy (4.b-10) metoda oceny odporności udowodniła słuszność hipotezy H2: głoszącej, że istnieje istotna zależność między naciskami powierzchniowymi oraz objętością obicia wysokouwodnionego materiału biologicznego w warunkach obciążeń udarowych.*

Powyższe prace stanowiące monotematyczny ciąg publikacji wykazały że pomimo zastosowania różnych metod pomiarowych czy też materiałów roślinnych uzyskane wyniki są logicznie poprawne. Poruszana problematyka zagadnień kontaktowych materiałów biologicznych ma ważne znaczenie użytkowe. Stwierdzono, że naciski powierzchniowe są skutecznym parametrem w ocenie uszkodzeń mechanicznych, pozwalającym wyznaczyć zmiany charakteru deformacji materiału biologicznego. Wykazano, że inicjację uszkodzenia owoców w warunkach obciążeń stałych czy też udarowych dobrze charakteryzują parametry maksymalnych nacisków na powierzchni kontaktu oraz zaobserwowanych odkształceń trwałych. Zaprezentowane metody badawcze, a w szczególności wykorzystanie czujników nacisków powierzchniowych można praktycznie zastosować przy dostarczaniu informacji na temat ryzyka uszkodzeń mechanicznych dla różnych charakterów obciążeń. Korzystnym rezultatem powyższych badań była również koncepcja nowej metody oceny odporności opartej na pomiarach nacisków powierzchniowych oraz objętości obić, dzięki której w skuteczny sposób można ustalić progowe parametry udaru nie powodujące trwałych uszkodzeń materiału biologicznego.

Przeprowadzone badania, których wyniki opublikowano w dziesięciu oryginalnych pracach naukowych, mogą wnosić nowe wartości poznawcze i aplikacyjne w zakresie poprawy warunków podczas pozyskiwania surowca, procesów pozbiorowych, a także przyczynić się do minimalizacji strat i polepszenia jakości produktów rolniczych.

5. Wnioski

1. W materiale biologicznym poddawany długotrwałym i niezmiennym obciążeniom w czasie, w sposób zauważalny dochodzi do stopniowego zwiększania się obszarów maksymalnych wartości nacisków powierzchniowych, które dla jabłek *Ligol* stanowiły od 35% na początku testu do 75% całkowitej powierzchni kontaktu owocu na końcu testu. W końcowej fazie testu pełzania jabłek *Ligol* wartość nacisków powierzchniowych w strefie centralnej ulegała obniżeniu przy jednoczesnym wzroście w strefie granicznej.

2. Wysokie tempo redukcji nacisków powierzchniowych w początkowej fazie procesu pełzania jest korzystne z punktu widzenia uszkodzeń materiału biologicznego. Pomimo wzrostu odkształcenia w czasie powierzchnia kontaktu owoców awokado *Fuerte* oraz gruszek *Lukasówka* z podłożem nie ulegała widocznej zmianie, dlatego podczas tych testów wykluczone zostały warunki inicjujące destrukcję tkanki wywołującą rozpoczęcie procesów gnilnych.

3. Relaksacja naprężeń jabłek *Ligol* skutkowałą spadkiem wartości obciążenia od wartości początkowej o około 13,5%, natomiast nie obserwowano zmian pola powierzchni styku w czasie. Zróżnicowaniu ulegały obszary występowania maksymalnych wartości nacisków powierzchniowych, które stopniowo zwiększały się i wyrównywały rozkłady poprzeczne. Spośród wszystkich badanych materiałów biologicznych jabłka odmiany *Ligol* wydają się być bardziej wrażliwe na długotrwałe obciążenia jak i odkształcenia w czasie.

4. Testy wielokrotnego obciążania próbek korzenia marchwi *Karotka* wykazały, że maksymalne naciski powierzchniowe ulegały istotnemu zmniejszeniu w zakresie od 11 do 14% niezależnie od wielkości siły promieniowej, jej prędkości wymuszania czy średnicy próbek. W każdym przypadku spadek nacisków powierzchniowych obserwowany był podczas czterech pierwszych cykli obciążeń, przy czym największe obniżenie na poziomie 6–7% występowało po pierwszym cyklu obciążenia. Wykorzystanie teorii Hertz'a do obliczania nacisków powierzchniowych materiału biologicznego może prowadzić do błędnych wyników, gdyż powoduje ponad dwukrotnie zawyżanie wartości w porównaniu do badań empirycznych.

5. Badania udarowe jabłek *Ligol* wykazały, że rozkład nacisków powierzchniowych zależy od energii zderzenia jabłka. Wraz ze zwiększaniem energii zderzenia zmianie ulegał kształt rozkładów nacisków od typowego punktowego, charakterystycznego dla odkształceń sprężystych, do zdeformowanego w centralnej strefie z maksymalnymi wartościami występującymi na krawędziach powierzchni styku, świadczących o odkształceniach plastycznych. Ujawniono, że energia zderzenia w niewielkim stopniu wpływała na wartość maksymalnych nacisków powierzchniowych, gdyż wraz z jej wzrostem proporcjonalnie zwiększała się siła oddziaływania oraz wielkość powierzchni styku. Progresja energii udaru wpływała na wydłużenie czasu kontaktu owoców jabłek *Ligol* z przeszkodą.

6. Warstwice nacisków powierzchniowych dla owoców awokado *Fuerte* nieznacznie zależą od energii zderzenia, których średnie wartości wzrastały od 0,403 MPa (dla I wariantu $E=0,5$ J) do 0,476 MPa (dla II wariantu $E=1$ J). Masa pestki miała znaczący wpływ na rozkład nacisków powierzchniowych podczas pojedynczego impulsu, który ulegał podziałowi na dwie fazy. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych były rozmieszczone w pobliżu punktu środkowego kontaktu owoców awokado z przeszkodą zarówno w fazie wchodzenia w kontakt, jak i w fazie odbicia. Rozkłady nacisków powierzchniowych ujawniły, że dzięki

szczególnym właściwościom tkanki mięszu owoców awokado dochodziło do niewielkiej utraty właściwości sprężystych.

7. Liczba uderzeń jabłek nie ma większego wpływu na zmiany średnich sił chwilowych w miejscu kontaktu. Początkowy wzrost oddziaływania powierzchni kontaktu determinował zmniejszanie się średnich nacisków powierzchniowych podczas kolejnych uderzeń, dla których najwyższe wartości występowały zawsze podczas pierwszego uderzenia, natomiast stabilizacji ulegały po czwartym uderzeniu. Dwukrotny wzrost obciążenia powodował gwałtowny około sześciokrotny wzrost wartości objętości obicia. Dla jabłek *Lobo* progową wysokość zrzutu około 30 mm, uznano za wartość dopuszczalną, niewywołującą znacznych odkształceń o charakterze trwałym.

8. Testy udarowe na różnych podłożach wykazały, że wrażliwe jabłka *Golden Delicious* nie powinny być dopuszczone do spadku na sztywną powierzchnię, nawet z bardzo małej wysokości. Stosowanie podłoży o niskich parametrach wytrzymałościowych wykonane np. z pianki polietylenowej zwiększają powierzchnię kontaktu i redukują wartość nacisków ponad dwukrotnie. Ponadto udar jabłek na podłożu pianki polietylenowej został silnie wytłumiony, gdyż pojawienie się obicia wystąpiło dopiero przy zrzucie z wysokości 90 mm. Pianka polietylenowa wpływała na pochłanianie energii uderzenia, potwierdziło to porównanie wartości powierzchni obicia do powierzchni kontaktu, które nie przekraczały 35% przy zrzucie owocu z wysokości 150 mm. Podczas spadku swobodnego na podłoże o niskiej sztywności istotne znaczenie ma próg obicia, który określa wysokość zrzutu powyżej której pojawia się obicie.

9. Znacznie zwiększony udział powierzchni obicia względem powierzchni kontaktu (dla twardego podłoża betonowego oraz drewnianego) spowodowany był trwałą deformacją tkanek mięszizowych jabłek *Golden Delicious*, która nastąpiła również na skutek fali naprężeń w pobliżu stref maksymalnych nacisków powierzchniowych, gdzie przekroczone zostały krytyczne ich wartości. Powiązanie informacji dotyczących rozkładów nacisków powierzchniowych oraz wyników komputerowej analizy obrazu pozwoliło na lepsze zrozumienie zjawiska powstawania uszkodzeń oraz poprawną ocenę ilościową – wyznaczenie progów obicia, przy których następowała degradacja materiału roślinnego.

10. Wysokość zrzutu gruszek *Clapp's Favorite* z przedziału 30–46 mm przy maksymalnej sile nie przekraczającej 100 N stanowiła dopuszczalną wartość progową, niewywołującą odkształceń o charakterze plastycznym. Do wysokości zrzutu około 30 mm wielkość pola powierzchni kontaktu utrzymywała się na wyrównanym poziomie, natomiast po jej przekroczeniu następował wzrost wartości podczas 3–4 pierwszych uderzeń. Analiza wartości nacisków powierzchniowych w funkcji objętości obicia wykazała zróżnicowany charakter przebiegu, przy którym wzrost objętości powyżej 2400 mm³ skutkowało utrzymaniem wartości nacisków powierzchniowych na wyrównanym średnim poziomie 0,370 MPa.

11. Przedstawiona metoda badawcza potwierdziła niską odporność gruszek *Clapp's Favorite* na obicia na poziomie BRI_% wynoszącym 8%, która może być graniczną z punktu widzenia procesów pozbiorowych. Zaproponowany sposób oceny jakościowej odporności owoców na obicia na podstawie wyznaczonych nacisków powierzchniowych oraz objętości stłuczenia umożliwił szybką i skuteczną interpretację zachowania się materiału biologicznego pod wpływem obciążeń o charakterze udarowym.

Bibliografia

1. Ahmadi, E., Ghassemzadeh, H.R., Sadeghi, M., Moghaddam, M., Zarif Neshat, S., 2012. Dynamic modeling of peach fruit during normal impact. *J. Food Eng.* 35, 483–504.
2. Ahmadi, E., Ghassemzadeh, H.R., Sadeghi, M., Moghaddam, M., Zarif Neshat, S., 2010. The effect of impact and fruit properties on the bruising of peach. *J. Food Eng.* 97, 110–117.
3. Ahmadi, E., Barikloo, H., Kashfi, M., 2016. Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Comput. Electron. Agric.* 121, 1–11.
4. Bajema, R.W., Hyde, G.M., 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. *Trans. ASAE*, 41(5), 1399–1405.
5. Barikloo, H., Ahmadi, E., 2013. Evaluation of impact effect and fruit properties on apple dynamic behavior. *Aust J. Crop Sci.* 7(11), 1661–1669.
6. Baryeh, E.A. 2000. Strength Properties of Awocado Pear. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76, Issue 4, 389–397.
7. Blahovec, J., 1985. Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to me chanical damage. *Papers of the 31 International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 57–64.
8. Blahovec, J., 1999. Bruise resistance coefficient and bruise sensitivity of apples and cherries. *Int. Agrophys.* 13, 315–322.
9. Blahovec, J., Paprštein, F., 2005. Susceptibility of pear varieties to bruising. *Postharvest Biol. Technol.* 38, 231–238.
10. Bohdziewicz, J., 2005. Próba doboru modelu reologicznego tkanki warzyw rzepowatych na podstawie testu relaksacji naprężeń. *Acta Agrophysica*, vol. 5, 3, 525–534.
11. Bohdziewicz, J., 2008. Ocena możliwości wyznaczenia współczynnika sprężystości warzyw o kształcie kulistym. *Inżynieria Rolnicza*, 4(102), 133–139.
12. Bollen, A.F., Nguyen, H.X., Dela Rue, B.T., 1999. Comparison of methods for estimating the bruise volume of apples. *J. Agric. Eng. Res.* 74(4), 325–330.
13. Bollen, A.F., Cox, N.R., Dela Rue, B.T., Painter, D.J., 2001. A descriptor for damage susceptibility of a population of produce. *J. Agric. Eng. Res.* 78(4), 391–395.
14. Celik, H.K., Rennie, A.E.W., Akinci, I., 2011. Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *J. Food Eng.* 104, 293–298.
15. Chen, P.; Chen, S., 1986. Stress-relaxation functions of apples under high loading rates. *Transactions of the ASAE*, 29(6), 1754–1759.
16. Chen, P., Yazdani, R., 1991. Predition of apple bruising due to impact on different surfaces. *Transaction of the ASAE*, 34(3), 956–961.
17. Dwyer-Joyce, R.S., Drinkwater, B.W., 1998. Analysis of contact pressure using ultrasonic reflection. *Proceedings of 11th Annual Conference on Experimental Mechanics, Balkema, Rotterdam*, 747–754.
18. Everett, K.R., Hallett, I.C., Rees-George, J., Chynoweth, R.W., Pak, H.A., 2008. Avocado lenticel damage: The cause and the effect on fruit quality. *Postharvest Biology and Technology*, 48(3), 383–390.
19. Fadji, T., Coetzee, C., Pathare, P., Opara, U.L., 2016a. Susceptibility to impact damage of apples inside ventilated corrugated paperboard packages: Effects of package design. *Postharvest Biol. Technol.* 111, 286–296.
20. Fadji, T., Coetzee, C., Chen, L., Chukwu, O., Opara, U.L., 2016b. Susceptibility of apples to bruising inside ventilated corrugated paperboard packages during simulated transport damage. *Postharvest Biol. Technol.* 118, 111–119.
21. Fu, H., He, L., Ma, S., Karkee, M., Chen, D., Zhang, Q., Wang, S., 2016. Bruise Responses of Apple-to-Apple Impact. *IFAC-Papers OnLine*, Vol. 49, Issue 16, 347–352.
22. Gołacki, K., 1996. Prędkość i energia w procesie deformacji materiału roślinnego na przykładzie korzeni marchwi. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 425, 61–66.
23. Gołacki, K., Bobin, G., Stropek, Z., 2009. Bruise resistance of apples (Melrose variety). *Teka Kom. Mot. Energ. Roln. PAN* 9, 40–47.
24. Gołacki, K., Stropek, Z., Graboś, A., 1999. Test relaksacji naprężeń w materiale biologicznym w warunkach obciążenia dynamicznego – realizacja techniczna. *Inżynieria Rolnicza*, 1(99), 111–117.
25. Herold, B., Geyer, M., Studman, C.J., 2001. Fruit contact pressure distributions–equipment. *Comput. Electron. Agric.* 32, 167–179.
26. Holt, J.E., Schoorl, D., 1977. Bruising and energy dissipation in apples. *J. Texture Stud.* 7, 421–432.
27. Hung, Y., Prussia, S., 1989. Effect of maturity and storage time on the bruise susceptibility of peaches (cv. Red Globe). *Trans. ASAE* 32, 1377–1382.

28. Jakubczyk, E., Lewicki, P.P., 2003. Właściwości mechaniczne tkanki jabłka w odniesieniu do jej struktury. *Acta Agrophysica*, vol. 2, 3, 549–557.
29. Jakubczyk, E.; Uziak, D., 2005. Charakterystyka instrumentalnych metod badania właściwości mechanicznych wybranych owoców i warzyw. *Inżynieria Rolnicza*, 11(71), 181–189.
30. Jarimopas, B., Singh, S.P., Sayasoonthorn, S., Singh, J., 2007. Comparison of package cushioning materials to protect post-harvest impact damage to apples. *Packag. Technol. Sci.* 20, 315–324.
31. Kabas, O., 2010. Methods of measuring bruise volume of pear (*Pyrus communis* L.). *Int. J. Food Prop.* 13, 1178–1186.
32. Kolowca, J., 2005. Właściwości reologiczne mięszu jabłek o zróżnicowanej strukturze. *Inżynieria Rolnicza*, 6(66), 355–359.
33. Konstankiewicz, K., Pukos, A., Zdunek, A., 1996. Teorie odkształceń materiałów biologicznych w świetle relaksacji naprężeń. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 443, 353–363.
34. Konstankiewicz, K., Pukos, A., 1998. Metodyczne aspekty w badaniach nad nową mechaniką rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 2(3), 5–20.
35. Kuczyński, A.P., 2003. Ocena jędrności przechowywanych jabłek przy zastosowaniu statystycznej metody redukcji wymiarów w modelu. *Acta Agrophysica*, Vol. 2, 4, 787–802.
36. Lee, J.W., Tan, J., Waluyo, S., 2016. Hysteresis characteristics and relationships with the viscoelastic parameters of apples. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(1), 36–42.
37. Lippert, F., 1995. Methode zur induktion der Rissbildung bei Sprossknollen von Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes* L.). *Gartenbauwissenschaft*, 60(4), 187–190.
38. Lu, F., Ishikawa, Y., Kitazawa, H., Satake, T., 2010. Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique. *J. Food Eng.* 96, 614–620.
39. Marshall, M.B., Lewis, R., Drinkwater, B.W., Dwyer-Joyce, R.S., 2004. An ultrasonic approach for contact stress mapping in joints and concentrated contacts. *J. Strain Anal. Eng. Des.* 39 (4), 339–350.
40. Mohsenin, N.N., 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, Second ed. Gordon and Breach, New York, USA.
41. Mohsenin, N.N., 1996. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publishers, New York, pp. 498.
42. Opara, L.U., 2007. Bruise susceptibilities of 'Gala' apples as affected by orchard management practices and harvest date. *Postharvest Biol. Technol.* 43, 47–54.
43. Opara, U.L., Pathare, P.B., 2014. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce – A review. *Postharvest Biol. Technol.* 91, 9–24.
44. Opara, U.L., Al-Ghafri, A., Agzoun, H., Al-Issai, J., Al-Jabri, F., 2007. Design and development of a new device for measuring susceptibility to impact damage of fresh produce. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 35, 245–251.
45. Pang, W., Studman, C.J., Ward, G.T., 1992. Bruising damage in apple-to-apple impact, *J. Agric. Eng. Res.* 52, 229–240.
46. Pang, D.W., Studman C.J., Banks N.H., Baas, P.H., 1996. Rapid assessment of the susceptibility of apples to bruising. *J. Agric. Eng. Res.* 64, 37–48.
47. Pathare, P.B., Opara, U.L., Vigneault, C., Delele, M.A., Al-Said, F.A.J., 2012. Design of packaging vents for cooling fresh horticultural produce. *Food Bioprocess Technol.* 5, 2031–2045.
48. Peleg, M. (1980). Linearization of Relaxation and Creep Curves of Solid Biological Materials. *J. Rheology*, 24, 451–463.
49. Płocharski, W. J.; Konopacka, D., 1999. The relations between mechanical and sensory parameters of apples. *Acta Horticulture*, 485, 309-318.
50. Rabelo, G.F., Fabbro, I.M., Linares, A.W., 2001. Contact stress area measurement of spherical fruit. *Proceedings of Sensors in Horticulture III*, 195–200.
51. Rodriguez Sinobas, L., Ruiz-Altisent, M., Plaza Perez, J.L., 1991. Bruise development and fruit response of pear (cv. 'Blanquilla') under impact conditions. *J. Food Eng.* 14 (4), 289–301.
52. Rudziński, R., 2011. *Zasady przechowywania i magazynowania towarów pochodzenia rolniczego*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach. Administracja i Zarządzanie, T. 15, 88, 113–126.
53. Rybczyński, R., 2007. Jędrność jabłek w warunkach obrotu handlowego. *Acta Agrophysica*, vol. 10, 2, 437–443.
54. Saltveit, M.E., 1984. Effects of temperature on firmness and bruising of 'Starkrimson Delicious' and 'Golden Delicious' apples. *Hort. Science* 19, 550–551.
55. Siyami, S., Brown, G.K., Burgess, G.J., Gerrisch, J.B., Tennes, B.R., Burton, C.L., Zapp, R.H., 1988. Apple impact bruise prediction models. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 41, 1038–1046.
56. Shafie, M.M., Rajabipour, A., Castro-Garcia, S., Jimenez-Jimenez, F., Mobli, H., 2015. Effect of fruit properties on pomegranate bruising. *Int. J. Food Prop.* 18, 1837–1846.

57. Shirvani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi–Varnamkhasi, M., 2014. Measurement and evaluation of the apparent modulus of elasticity of apple based on Hooke's, Hertz's and Boussinesq's theories. *Measurement* 54, 133–139.
58. Stępień, B., 2009. Modyfikacja cech mechanicznych i reologicznych wybranych warzyw pod wpływem różnych metod suszenia. Monografie LXXIX. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. ISSN 1898-1151.
59. Stopa, R., 2010. Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych. Monografie XCIII. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. ISSN 1898-1151.
60. Stropiek, Z., Gołacki, K., 2005. Wyznaczanie zmiennego w czasie modułu odkształcenia postaciowego i objętościowego miąższu jabłka na podstawie testu relaksacji naprężeń. *Acta Sci. Pol., Technica Agraria* 4(1), 61–68.
61. Stropiek, Z., Gołacki, K., 2006. Metoda porównania przebiegów krzywych relaksacji naprężeń różnych materiałów roślinnych. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 473–479.
62. Stropiek, Z., Gołacki, K., 2010. Determining the coefficient of restitution of apples at different impact velocities. *Teka Kom. Mot. Energ. Roln. PAN* 10, 417–424.
63. Stropiek, Z.; Gołacki, K.; Rowiński, P., 2009. Wyznaczanie progu obicia jabłek. *Acta Agrophysica*, 13(1), 261–272.
64. Studman, C.J., Brown, G.K., Timm, E.J., Schulte, N.L., Vreede, M.J., 1997. Bruising on blush and non-blush sides in apple-to-apple impacts. *Trans. ASAE*, 40(6), 1655–1663.
65. Van Zeebroeck, M., 2005. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. PhD Thesis No. 643. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, K.U. Leuven.
66. 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. *J. Sound Vib.* 266, 465–480.
67. Van Zeebroeck, M., Dintwa, E., Tijskens, E., Deli, V., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., Ramon, H., 2004. Determining tangential contact force model parameters for viscoelastic materials (apples) using a rheometer. *Postharvest Biol. Technol.* 33, 111–125.
68. Zhao, W., Fang, Y., Zhang, Q., Guo, Y., Gao, G., Yi, X., 2017. Correlation analysis between chemical or texture attributes and stress relaxation properties of 'Fuji' apple. *Postharvest Biology and Technology*, 129, 45–51.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

5.1. Problematyka badawcza

Przebieg działalności naukowej w latach 2009 – 2017.

W mojej dotychczasowej pracy naukowej można wyodrębnić trzy zakresy tematyczne badań:

1. (2009–2011) zagadnienia z zakresu inżynierii systemów agrotechnicznych:

- Analiza rozkładu strumienia powietrza w komorze modelowego pneumatyczno-sitowego zespołu czyszczącego kombajnu zbożowego.

Na początku pracy naukowej, zarówno przed, jak i krótko po uzyskaniu stopnia doktora moje zainteresowania skoncentrowane były wokół problematyki procesu separacji sitowo-aerodynamicznej ruchomego złoża ziarnistego oraz zmian konstrukcyjnych w separatorach stosowanych w kombajnach do zbioru zbóż, w szczególności pracujących w warunkach terenów nachylonych. Celem badań było określenie zjawisk zachodzących podczas procesu separacji i czyszczenia na sicie żaluzjowym płaskim z zastosowaniem dodatkowego bocznego strumienia powietrza oraz wyznaczenie wpływu wspomaganie tegoż strumienia na efektywność procesu rozdzielczego. Wykazano, że polepszenie warunków pracy zespołu czyszczącego bez konieczności konstruowania drogich i skomplikowanych układów można osiągnąć poprzez odpowiednie sterowanie powietrzem, czyli zmianę kierunku i natężenia jego strumienia pod sitem. Efektami uzyskanych wyników badań było opracowanie zgłoszeń, na podstawie których udzielone zostały dwa patenty na wynalazki pt.: *”Zespół kierowania czyszczącego strumienia powietrza w kombajnie zbożowym”* oraz *„Zespół czyszczenia aerodynamicznego kombajnu zbożowego”*. Wyniki badań z tego okresu posłużyły do opracowania kilku oryginalnych prac twórczych, które przedstawiono w załączniku 3 (przed doktoratem: **3.4-1, 3.4-2, 3.4-3, 3.4-4, 3.4-5, 3.4-6**, oraz po doktoracie: **3.3-1**).

- Analiza wykorzystania systemu monitoringu GPS w efektywnym zarządzaniu gospodarstwem.

Kolejnym etapem mojej działalności naukowej było odbycie w 2010 roku stażu zagranicznego w Republice Czeskiej (Czech University of Life Sciences Prague). Jednym z kluczowych zadań podczas realizacji pobytu była analiza efektywności pracy nowoczesnych maszyn rolniczych wyposażonych w systemy rolnictwa precyzyjnego. Przeprowadzona została ocena monitoringu ruchu – parametrów eksploatacyjnych pracy pojazdów rolniczych wykorzystujących satelitarny system lokalizowania. Dokonano weryfikacji funkcjonowania systemu w gospodarstwie przeprowadzona na podstawie porównania różnic pomiędzy raportami zarejestrowanymi przez system monitoringu GPS, a wykazami kart pracowniczych. Opracowane analizy potwierdziły, że podstawowym celem wdrożenia systemu monitoringu jest szeroko pojęta kontrola funkcjonowania parku pojazdów oraz zatrudnionej kadry pracowników, których optymalizacja pracy przyczynia się do obniżenia kosztów, podniesienia produktywności firmy oraz jakości wykonywanych usług. Rezultatami badań z tego zakresu było przygotowanie dwóch publikacji, które przedstawiono w załączniku 3 (**3.3-3, 3.3-4**).

- Optymalizacja doboru maszyn rolniczych oparta na kryteriach intensywności użytkowania oraz czasu agrotechnicznego.

W związku z zainteresowaniami obejmującymi projektowanie procesów technologicznych w produkcji roślinnej, eksploatacją sprzętu rolniczego, optymalizacją doboru maszyn w rolnictwie w 2010 roku odbyłem również staż dydaktyczno-naukowy na Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie. Konsultacje z kadrą naukową i ugruntowana wiedza pozwoliła na przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych i opracowanie koncepcji oceny racjonalnego doboru maszyn rolniczych. W badaniach wyznaczone zostały optymalne zakresy wykorzystania maszyn przy spełnieniu warunku podstawowych wymagań agrotechnicznych oraz określonym progu wydajności eksploatacyjnej. Wyniki powyższych badań przedstawiono w publikacji (3.3-5), którą zawarto w załączniku 3.

2. (2011–2014) zagadnienia z zakresu odnawialnych źródeł energii:

Drugoplanowym etapem mojej aktywności naukowej była współpraca z zespołem prof. dr. hab. inż. Leszka Romańskiego oraz uczestnictwo w roli wykonawcy projektu badawczego finansowanego ze środków NCN pt.: „*Analiza pracy dwuśmigłowej minisiłowni wiatrowej*”. Rozwijając wiedzę dotyczącą przepływów strumienia powietrza byłem odpowiedzialny za realizację kilku zadań badawczych:

- Opracowanie teoretycznych podstaw konstrukcji oraz budowę tunelu aerodynamicznego, w którym możliwe byłoby przeprowadzanie badań nad rzeczywistymi obiektami mini siłowni wiatrowych.
- Analizę charakteru przepływu strumienia powietrza w otwartym tunelu aerodynamicznym - wpływ regulacji pracy wentylatorów na równomierność rozkładu strumienia powietrza w komorze pomiarowej.

Zaobserwowano, że w zakresie nominalnych prędkości strumienia powietrza przesterowanie pracą zespołu wentylatorów pozwoliło poprawić współczynnik równomierności strugi, co przyczyniło się do ustalenia strefy jednorodnego przepływu powietrza na długości komory pomiarowej, w której należało umieścić mini siłownię wiatrową.

- Przeprowadzenie badań efektywności pracy (uzyskiwanej mocy) klasycznych konstrukcji jednośmigłowych oraz dwuśmigłowych mini siłowni wiatrowych o osi poziomej.

Dokonano oceny mocy generowanej przez elektrownię wiatrową wyposażoną zamiennie w trzy rodzaje wirników. Przeprowadzono również badania wpływu kształtu profili łopat na charakter pracy miniturbin wiatrowych. Analiza porównawcza pracy turbiny z różnymi profilami łopat wykazała że najkorzystniejsze wartości mocy uzyskano dla łopat opartych na profilach NACA (średni wzrost mocy w porównaniu do profilu bazowego wynosił 27%). Powyższe wyniki badań zostały zaprezentowane w publikacjach (3.2-2, 3.2-5, 3.3-8, 3.3-10, wg załącznika 3).

Rezultatem uzyskanych wyników badań było opracowanie zgłoszenia, na podstawie którego udzielony został patent na wynalazek pt.: „*Łopata wirnika mini turbiny wiatrowej*”. Przedmiotem wynalazku była łopata wirnika mini turbiny wiatrowej, której kształt oraz zastosowane materiałów umożliwiło zwiększenie sprawności aerodynamicznej (współczynnika mocy) oraz wpływało na zwiększenie uzyskiwanej mocy mini turbiny.

3. (2013–2017) zagadnienia z zakresu agrofizyki produktów roślinnych:

Trzeci chronologicznie obszar moich zainteresowań badawczych, których uwieńczeniem jest omówiony monotematyczny cykl publikacji dotyczy problematyki zagadnień kontaktowych owoców. W ramach utworzonego zespołu oraz współpracy naukowej z dr. hab. inż. Romanem Stopą zaangażowałem się w cykl badań obejmujących analizy rozkładów nacisków powierzchniowych wysokouwodnionych materiałów biologicznych dla różnych

charakterów obciążeń (od quasi-statycznych do udarowych). W ramach dotacji przyznawanych przez uczelnię w latach 2014/15 kierowałem zadaniem badawczym pt.: ”Wpływ obciążeń dynamicznych na wrażliwość owoców na obicia”, których rezultatem była omówiona w cyklu publikacja (3.2-1, wg załącznika 3). Poniżej przedstawiono pozostałe ważniejsze zagadnienia badawcze:

- Pomiary obciążeń układu mięśniowo szkieletowego oraz nacisków powierzchniowych przy pracach związanych z pozyskiwaniem wybranych produktów rolniczych.

Problematykę nacisków powierzchniowych postanowiono wykorzystać w zagadnieniach ergonomicznych (**pozycja 3.3-20**). Głównym celem rozważań było opracowanie metodologii, która pomogłaby określić korzystne warunki pracy dla zbieraczy i plantatorów jabłek przy minimalnym ryzyku związanym z pojawieniem się problemów w układzie mięśniowo-szkieletowym, przy zachowaniu wysokiej jakości owoców do natychmiastowego spożycia. Wykazano, że z punktu widzenia jakości owoców najbardziej korzystny jest ręczny sposób zbioru, który można wspomagać nowoczesnymi technologiami związanymi z ruchem zbieracza przy wykorzystaniu ruchomych platform i ruchomych koszy. Wykorzystanie systemu Tekscan w badaniach właściwości wytrzymałościowych jabłek pozwoliło wyznaczyć dopuszczalne wartości nacisków powierzchniowych podczas zrywania w kontekście bezpieczeństwa i jakości zbioru. Ze względu na długi wielogodzinny wysiłek fizyczny oraz monotony charakter ruchów wykonywanych przez pracownika, praca przy zbiorach jabłek może przyczyniać się do rozwoju chorób układu mięśniowo-szkieletowego. Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie korzystnych warunków pracy dla producentów jabłek przy minimalnym ryzyku związanym z pojawieniem się problemów w układzie mięśniowo-szkieletowym zbieraczy i jednocześnie zachowaniem wysokiej jakości jabłek przeznaczonych do bezpośredniego spożycia.

- Modelowanie procesu ściskania przy pomocy metody elementów skończonych.

Innym poruszonym zagadnieniem było modelowanie procesów zachodzących w materiałach roślinnych poddawanych obciążeniom statycznym (**pozycja 3.2-3, wg załącznika 3**). W pracy przedstawiono budowę modelu obliczeniowego, którego celem było wyznaczenie nacisków powierzchniowych marchwi przy oddziaływaniu elementów obciążających o różnych kształtach, będących odwzorowaniem części procesu technologicznego zbioru, transportu, sortowania i przechowywania korzeni marchwi. W pracy zaprezentowano budowę modelu dyskretnego korzenia marchwi oraz przeprowadzono jego weryfikację w oparciu o rozkład przemieszczeń. W badaniach dokonano porównania map przemieszczeń obiektu rzeczywistego, zarejestrowanego przy pomocy optycznego układu metodą interferometrii plamkowej ESPI z modelem MES opracowanym w przy pomocy programu COSMOS/M. Weryfikacja modeli MES w oparciu o rozkłady przemieszczeń wykazała dobrą zgodność zarówno pod względem jakościowym, jak i w odniesieniu do wartości bezwzględnych. Prawie w całym zakresie obciążenia błąd względny wynikający z porównania eksperymentalnych wartości przemieszczeń u_y punktu przyłożenia obciążenia oraz otrzymanych dla modelu nie przekraczał 20%.

- Ocena odporności owoców na uszkodzenia w warunkach obciążeń udarowych.

Kluczowym obszarem moich zainteresowań były badania dotyczące oceny odporności owoców na uszkodzenia mechaniczne pod wpływem obciążeń udarowych, których wyniki omówiłem w pracach uwzględnionych w monotematycznym cyklu publikacji (**pozycje 3.2-1,**

3.2-4 wg załącznika 3). Powyższe badania kontynuowałem na dalszym etapie pracy naukowej (**pozycja 3.2-6, wg załącznika 3**) koncentrując się na przedstawieniu udoskonalonej metody wyznaczania odporności i progu obicia jabłek poddawanych obciążeniom o charakterze udarowym w rzucie swobodnym na różne podłoża. Realizacja powyższego celu wymagała wyznaczenia i porównania ze sobą dwóch wskaźników odporności na obicia, z których pierwszy obliczono na podstawie pomiaru nacisków powierzchniowych oraz powierzchni kontaktu, natomiast drugi otrzymano wykorzystując nacisk oraz zmierzoną objętość obicia. Pomiary objętości obicia wyznaczone na podstawie analizy obrazu oraz powierzchni kontaktu zarejestrowanej przy pomocy systemu Tekscan wykazały wzajemną zależność w postaci funkcji wykładniczej zmieniającej się w zależności od rodzaju podłoża. Z przeprowadzonych badań wynikało, że w całym zakresie wysokości zrzutu powierzchnia kontaktu w chwili zderzenia była większa niż rzeczywista powierzchnia obicia. W trakcie pomiarów uzyskano zależność funkcyjną pomiędzy powierzchnią kontaktu oraz objętością obić, powtarzalną dla przyjętego rodzaju podłoża o wysokim wskaźniku determinacji. Na tej podstawie zaproponowano metodykę pomiaru obić przy wykorzystaniu możliwej do wyznaczenia z dużą dokładnością powierzchni kontaktu (wskaźnik BRI_c) zamiast pracochłonnego i obarczonego błędami pomiaru objętości obicia (wskaźnik BRI). Wykazano, że powyższa metoda wyznaczenia progu i odporności na obicia dla jabłek może być skutecznym i szybkim narzędziem w ocenie stopnia uszkodzeń.

5.2. Udział w projektach badawczych

Podczas mojej pracy badawczej uczestniczyłem w 4 projektach.

1. Uczestnik programu stypendialnego 2005 – 2006 W RAMACH PROJEKTU PT. „SYSTEM STYPENDIALNY DLA DOKTORANTÓW AKADEMII ROLNICZEJ WE WROCŁAWIU” finansowanego ze Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, Priorytet 2. Wzmocnienie rozwoju zasobów ludzkich w regionach. Działanie 2.6 Regionalne Strategie Innowacyjne i transfer wiedzy. Umowa nr Z/2.02/II/2.6/06/04/U/05/05, zawarta we Wrocławiu w dniu 19 kwietnia 2005 r. Temat projektu: „Wpływ wielokierunkowego strumienia powietrza na efektywność sitowego procesu rozdzielczego”. Projekt rozliczony.
2. Główny wykonawca badawczego promotorskiego w latach 2008 – 2009 finansowanego przez MNiSW - projekt nr N313 287734 umowa zarejestrowana w Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu pod numerem 16/5-R//2008/G pt. „Wpływ wielokierunkowego strumienia powietrza na efektywność procesu separacji w zespołach czyszczących”. Projekt rozliczony.
3. Wykonawca projektu badawczego w latach 2011 – 2014 finansowanego przez NCN w Krakowie - nr 7899/B/P01/2011/40 umowa zarejestrowana w Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu nr 46/5-R/2011/G pt. „Analiza pracy dwuśmigłowej minisiłowni wiatrowej”. - Projekt rozliczony.
4. Kierownik zadania badawczego (Nr PT/359/2014/S.C.) pt.: „Wpływ obciążeń dynamicznych na wrażliwość owoców na obicia”, dotacja uczelni na finansowanie działalności polegającej na prowadzeniu badań naukowych służących rozwojowi młodych naukowców.

5.3. Udzielone patenty międzynarodowe lub krajowe

Udzielone patenty krajowe na wynalazki:

1. PATENT NR 211765 na wynalazek pt.: "Zespół kierowania czyszczącego strumienia powietrza w kombajnie zbożowym" udzielono 28.12.2011.
2. PATENT NR 211764 na wynalazek pt.: "Zespół czyszczenia aerodynamicznego kombajnu zbożowego" udzielono 28.12.2011.
3. PATENT NR 222101 na wynalazek pt.: „Łopata wirnika mini turbiny wiatrowej” udzielono dnia 20.08.2015).

5.4. Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową

– **Nagroda Rektora I stopnia, zespołowa, Wrocław 2009,**

w dziedzinie badań naukowych, a w szczególności za współautorstwo cyklu publikacji związanych z badaniami nad złożonym procesem sitowo-pneumatycznej separacji ziarna w kombajnach pracujących w nachyleniu.

– **Nagroda Rektora III stopnia, zespołowa, Wrocław 2012,**

zespołowa III stopnia w dziedzinie badań naukowych, a w szczególności za współautorstwo w cyklu publikacji związanych z badaniami eksploatacyjnymi narzędzi i maszyn stosowanych w rolnictwie w pielęgnacji terenów zieleni i ochronie środowiska. (14.11.2012)

– **Nagroda Rektora I stopnia, zespołowa Wrocław 2013,**

za osiągnięcia naukowe, a w szczególności za dziewięć patentów związanych z badaniami właściwości cech jakościowych materiałów pochodzenia roślinnego i eksploatacyjnymi kombajnu zbożowego. 13.11.2013

5.5. Wygłaszanie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

Regularnie uczestniczę w tematycznych konferencjach krajowych i międzynarodowych, na których przedstawiam wyniki prowadzonych badań naukowych. Na przestrzeni lat 2005-2017 uczestniczyłem w 24 konferencjach naukowych w tym na 12 po uzyskaniu stopnia doktora.

- 1) Komarnicki P., Bieniek J., Banasiak J.: Ocena charakteru strugi aerodynamicznej w komorze zespołu separatora. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa pt. „Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej”, Polanica Zdrój 16-19 czerwca 2009.
- 2) Bieniek J., Pomiankowski M., Komarnicki P.: Ocena techniczno-eksploatacyjna maszyn i narzędzi uprawowych stosowanych w małych gospodarstwach rolnych. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa pt. „Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej”, Polanica Zdrój 16-19 czerwca 2009.
- 3) Komarnicki P.: Wykorzystanie satelitarne systemu GPS do monitorowania pracy pojazdów i maszyn w rolnictwie. XVIII Konferencja Naukowa pt. „Postęp naukowo-techniczny i organizacyjny w rolnictwie”, Zakopane 14-18 luty 2011.
- 4) Stopa R., Komarnicki P.: Wyznaczanie liczby Poissona korzenia marchwi przy pomocy wideoekstensometru. XVIII Konferencja Naukowa pt. „Postęp naukowo-techniczny i organizacyjny w rolnictwie”, Zakopane 14-18 luty 2011.

- 5) Komarnicki P.: Zastosowanie systemu monitoringu GPS w efektywnym zarządzaniu pracą pojazdów w gospodarstwie rolnym. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Szkoleniowa pt. „Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej”, Polanica Zdrój 27-30 czerwca 2011.
- 6) Falińska K., Semczuk Sz., Komarnicki P., Bieniek J.: Analiza kosztów przechowywania maszyn w wybranych gospodarstwach zbożowej grupy producenckiej. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Szkoleniowa pt. „Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej”, Polanica Zdrój 27-30 czerwca 2011.
- 7) Komarnicki P., Stopa R.: Wyznaczenie właściwości wytrzymałościowych wybranych surowców rolniczych stanowiących dane wyjściowe do programów obliczeniowych MES. XIX Konferencja Naukowa pt. „Postęp naukowo-techniczny i organizacyjny w rolnictwie - Zakopane, 6-10 luty 2012.
- 8) Romański L., Dębowski M., Komarnicki P.: Analiza pracy mini elektrowni wiatrowej. Konferencja Naukowo-Techniczna: Rozwój infrastruktury sanitarnej i energetycznej na terenach wiejskich. 12-14.09.2012 Lublin.
- 9) Komarnicki P., Romański L., Bieniek J., Dębowski M.: Wpływ regulacji pracy wentylatorów na równomierność rozkładu strumienia powietrza w tunelu do badań mini siłowni wiatrowych. XX Jubileuszowe Sympozjum Naukowe z cyklu: „Postęp Naukowo-Techniczny i Organizacyjny w Rolnictwie”. 11.02÷15.02.2013 Zakopane.
- 10) Komarnicki P., Stopa R., Młotek M.: Badania nacisków powierzchniowych jabłek umieszczonych w skrzynkach. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowa pt. „Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej”, Polanica Zdrój 24-27 czerwca 2013.
- 11) Komarnicki P., Stopa R., Młotek M.: Wpływ obciążeń udarowych na podatność brzoskwiń na stłuczenia. XXI Sympozjum Naukowe z cyklu: „Postęp Naukowo-Techniczny i Organizacyjny w Rolnictwie”. 03-07.02.2014 Zakopane.
- 12) Komarnicki P., Stopa R., Młotek M.: Wpływ obciążeń dynamicznych na wrażliwość gruszek na obicia. IV Sympozjum Inżynierii Żywności ; Warszawa, 1-2 lipca 2014.
- 13) Młotek M., Stopa R., Komarnicki P.: Rozkłady nacisków powierzchniowych brzoskwiń i nektarynek w procesie pełzania. IV Sympozjum Inżynierii Żywności ; Warszawa, 1-2 lipca 2014.
- 14) Stopa R., Komarnicki P., Młotek M.: Modelowanie materiału biologicznego przy pomocy MES na przykładzie marchwi. IV Sympozjum Inżynierii Żywności ; Warszawa, 1-2 lipca 2014.
- 15) Młotek M., Stopa R., Komarnicki P.: Rozkłady nacisków powierzchniowych gruszek, przy stałej wartości obciążenia. XXII Szkoła Naukowa z cyklu: „Postęp Naukowo-Techniczny i Organizacyjny w Rolnictwie”. 9.02÷13.02.2015 r. Zakopane.
- 16) Młotek M., Stopa R., Komarnicki P.: Wpływ obciążeń udarowych na wartość i rozkład nacisków powierzchniowych gruszek. XXII Szkoła Naukowa z cyklu: „Postęp Naukowo-Techniczny i Organizacyjny w Rolnictwie”. 9.02÷13.02.2015 r. Zakopane.
- 17) Szyjewicz D., Stopa R., Komarnicki P., Młotek M.: Warstwice i rozkłady nacisków powierzchniowych jabłek przy obciążeniach udarowych. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii Rolniczej; Polanica Zdrój, 16-19 czerwca 2015.
- 18) Komarnicki P., Stopa R., Młotek M., Szyjewicz D.: Wyznaczenie stałej Poissona dla miąższu jabłek w oparciu o bezdotykową metodę pomiaru odkształceń. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii Rolniczej; Polanica Zdrój, 16-19 czerwca 2015.

- 19) Stopa R., Komarnicki P., Młotek M., Szyjewicz D.: Modelowanie procesu zgniotu jabłek przy pomocy MES. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii Rolniczej; Polanica Zdrój, 16-19 czerwca 2015.
- 20) Młotek M., Stopa R., Komarnicki P., Szyjewicz D.: Rozkłady nacisków powierzchniowych przy ręcznym zbiorze jabłek. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii Rolniczej; Polanica Zdrój, 16-19 czerwca 2015.
- 21) Komarnicki P., Stopa R., Szyjewicz D.: Ocena uszkodzeń jabłek w warunkach obciążeń udarowych na różnych rodzajach podłoży. XIV Konferencja Naukowa pt. Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej i dyscyplin współpracujących. Polanica Zdrój 20-23.06.2017 r.
- 22) Stopa R., Komarnicki P., Szyjewicz D.: Wyznaczanie dopuszczalnych nacisków powierzchniowych jabłek na podstawie badań eksperymentalnych i w oparciu o modele dyskretne w warunkach obciążeń udarowych. XIV Konferencja Naukowa pt. Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej i dyscyplin współpracujących. Polanica Zdrój 20-23.06.2017 r.
- 23) Stopa R., Szyjewicz D., Komarnicki P.: Uproszczony sposób modelowania nacisków powierzchniowych jabłek w warunkach obciążeń udarowych przy pomocy MES. XIV Konferencja Naukowa pt. Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej i dyscyplin współpracujących. Polanica Zdrój 20-23.06.2017 r.

5.6. Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

Recenzent artykułów w następujących czasopismach międzynarodowych:

2016 rok – Trends in Food Science & Technology	1 rec.
2016 rok – International Journal of Food Properties	1 rec.
2017 rok – International Journal of Food Engineering	1 rec.
2017 rok – Journal of Food Engineering	1 rec.
2017 rok – Computers and Electronics in Agriculture	1 rec.

Piotr Komarnicki