

**ZESZYTY NAUKOWE
UNIWERSYTETU
PRZYRODNICZEGO
WE WROCŁAWIU**

NR 557

ROZPRAWY CCXLIX

JERZY BOHDZIEWICZ

**MODELING OF DEFORMATION COURSE
OF VEGETABLE'S PARENCHYMA TISSUES
IN QUASI-STATIC CHANGES OF LOAD
CONDITIONS**

INSTITUTE OF AGRICULTURAL ENGINEERING



WROCŁAW 2007

JERZY BOHDZIEWICZ

**MODELOWANIE PRZEBIEGU ODKSZTAŁCENIA
TKANEK PARENCHYMY WARZYW W WARUNKACH
QUASI-STATYCZNYCH ZMIAN OBCIĄŻENIA**

INSTYTUT INŻYNIERII ROLNICZEJ



WROCŁAW 2007

Opiniodawca

prof. dr hab. Józef Horabik

Redaktor merytoryczny

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Białczyk

Opracowanie redakcyjne i korekta

Janina Szydłowska

Łamanie

Halina Sebzda

Projekt okładki

Grażyna Kwiatkowska

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu,
Wrocław 2007

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany
za pomocą urządzeń elektronicznych, nagrywających i innych
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISSN 1897-208X

ISSN 1897-4732

WYDAWNICTWO UNIwersytetu PRZYRODniczego WE WROCLAWIU

Redaktor naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki

ul. Sopocka 23, 50-344 Wrocław, tel./fax 071 328-12-77

e-mail: wyd@ozi.ar.wroc.pl

Nakład: 100 + 16 egz. Ark. druk. 6,5

Druk i oprawa: F.P.H. ELMA

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. WSTĘP.....	9
2. PRZEGLĄD LITERATURY	11
2.1. Determinanty środowiskowe	11
2.2. Determinanty struktury roślinnej	12
2.2.1. Morfologia i fizjologia rośliny	12
2.2.2. Uproszczone modele struktury tkanki parenchymy	14
2.3. Określenie przydatności konsumpcyjnej i technologicznej	15
2.3.1. Wyznaczenie parametrów przydatności konsumpcyjnej	16
2.3.2. Określenie parametrów przydatności technologicznej roślin	17
2.4. Równania konstytutywne modelu ośrodka ciągłego	19
2.4.1. Modele lepkości sprężystości liniowej	20
2.4.2. Modele lepkości sprężystości nieliniowej	22
2.4.3. Charakterystyka właściwości reologicznych tkanek roślinnych	23
2.5. Metody wyznaczania współczynnika sprężystości	24
2.5.1. Wpływ kształtu próbki	27
3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO	28
4. CEL PRACY	30
5. KONCEPCJA MODELU FENOMENOLOGICZNEGO	32
5.1. Algorytm obliczania pozornego współczynnika sprężystości	33
6. MATERIAŁ I METODY	37
6.1. Charakterystyka obiektu badań	37
6.1.1. Wyznaczenie wybranych cech fizycznych materiału	38
6.2. Metodyka badań	39
6.2.1. Test wytrzymałości doraźnej	39
6.2.2. Badania w warunkach cyklicznego obciążenia	41
6.2.3. Badania właściwości reologicznych	41
6.2.4. Analiza błędów pomiarowych	42
7. WYNIKI I DYSKUSJA	43
7.1. Wyniki testu doraźnego	43
7.1.1. Znaczenie rozmiarów próbek	43
7.1.2. Znaczenie ubytku masy próbki	44
7.1.3. Kryterium odkształcenia podczas testu doraźnego	46

7.1.4. Parametryzacja przebiegu zależności naprężenie – odkształcenie	53
7.1.5. Współzależność właściwości mechanicznych tkanek warzyw	58
7.1.6. Znaczenie miejsca i sposobu pobierania próbek tkanek	60
7.2. Wyniki testu obciążenia cyklicznego	62
7.2.1. Porównanie właściwości mechanicznych tkanek warzyw	62
7.2.2. Wpływ obciążenia na zdolność kumulacji energii sprężystej	66
7.2.3. Wpływ prędkości odkształcenia	68
7.3. Wyniki testów reologicznych	71
7.3.1. Test relaksacji naprężeń	71
7.3.2. Wpływ obciążenia wstępnego	75
7.3.3. Test pełzania	78
7.4. Koncepcja nieliniowych modeli reologicznych	83
7.4.1. Walidacja modeli	84
8. PODSUMOWANIE	88
9. WNIOSKI	90
10. PIŚMIENNICTWO	92

Wykaz ważniejszych oznaczeń

F	– siła [N]
F_z	– siła zastępcza [N]
ν	– współczynnik Poissona [-]
d	– średnica walca [m]
l	– wysokość walca [m]
A	– pole przekroju poprzecznego walca [m ²]
V	– objętość [m ³]
ζ	– wskaźnik smukłości [-]
λ	– przemieszczenie [m]
p_{max}	– maksymalny nacisk [N·m ⁻²]
σ	– naprężenie [N·m ⁻²]
σ_{max}	– wytrzymałość doraźna [N·m ⁻²]
ε	– odkształcenie [-]
$d\{\varepsilon\}$	– przyrost odkształcenia całkowitego [-]
$d\{\varepsilon_e\}$	– przyrost odkształcenia sprężystego [-]
$d\{\varepsilon_p\}$	– przyrost odkształcenia plastycznego [-]
$\varepsilon_{(e)}$	– odkształcenie skuteczne [-]
E	– moduł sprężystości podłużnej [N·m ⁻²]
E^0	– zastępczy współczynnik sprężystości [N·m ⁻²]
E_C	– pozorny współczynnik sprężystości [N·m ⁻²]
E_S	– współczynnik sprężystości obliczony metodą siecznej [N·m ⁻²]
E_T	– współczynnik sprężystości obliczony metodą stycznej [N·m ⁻²]
E_d	– umowny współczynnik sprężystości nieliniowej [N·m ⁻²]
G	– moduł sprężystości poprzecznej [N·m ⁻²]
U	– energia odkształcenia sprężystego [J]
$U_{(e)}$	– jednostkowa energia odkształcenia sprężystego [J·m ⁻³]
U_{RS}	– akumulowana energia odkształcenia sprężystego [J]
U_R	– energia całkowita odkształcenia [J]
T^0	– temperatura badanego ciała [K]
θ	– przedział czasowy [s]
t	– czas [s]
W_{el}	– wskaźnik elastyczności materiału [-]
W_p	– wskaźnik przebiegu odkształcenia [-]
η	– współczynnik lepkości [Pa·s]
η_a	– współczynnik lepkości pozornej [Pa·s]
Φ	– uogólniona funkcja relaksacji
Ψ	– uogólniona funkcja pełzania
p_σ	– umowny przelicznik [-]

1. WSTĘP

Zmiany upodobań konsumenckich powodują wzrost zainteresowań produktami rolniczymi, których znaczenie było dotychczas marginalne. Konkurencyjność, mobilność środków dystrybucji oraz postęp w dziedzinie nauk biologicznych umożliwiają przełamanie dotychczasowych stereotypów żywieniowych, także w odniesieniu do warzyw. Pojawiły się nowe odmiany modyfikowane pod względem przydatności spożywczej, zarówno do bezpośredniej konsumpcji, jak i do dalszej obróbki. Wymusiło to zastosowanie nowych technologii w produkcji, przetwarzaniu i konserwowaniu żywności. Także sam materiał roślinny uległ modyfikacji, w konsekwencji pojawiły się zmiany w jego teksturze. Zmianom ulegają właściwości fizyczne i chemiczne, determinujące przebiegi procesów technologicznych. Konieczność standaryzacji surowca oraz nowe technologie wymagają przeprowadzenia badań reakcji materiału roślinnego na oddziaływanie sił zewnętrznych (Bieluga, Bzowska-Bakalarz 1986, Hellebrand 1998, Krzysztofik, Nawara 2003, Rahman 1995, Szcześniak 1977). Istotnym problemem jest niejednakowy przebieg zmian właściwości fizycznych i chemicznych z upływem czasu, wynikający z fazy rozwoju osobniczego oraz zróżnicowania w budowie tkanek w rozlicznych formach anatomicznych warzyw.

Dotychczasowe eksperymenty związane z badaniem właściwości mechanicznych materiałów pochodzenia roślinnego wykorzystują osiągnięcia z zakresu mechaniki ciała stałego (Calzada, Peleg 1978, Gołacki, Stropek 2004, Holt, Schroorl 1982, Kleiber 1995, Neimitz 1998, Szabo 1999). Pojawiają się jednak problemy wynikające z niemożności opisanego na bazie dotychczasowych teorii niektórych zjawisk, na przykład lepkosprężystego płynięcia. Ich rozwiązanie stało się możliwe dopiero po wyodrębnieniu się nowych gałęzi fizyki. Wraz z rozwojem technik badawczych powstał też nowy aparat pojęciowy. Ważną rolę odgrywa reologia jako uogólnienie teorii sprężystości i plastyczności. Jak relacjonował jeden z jej współtwórców Reiner (1960, 1971), stworzona na potrzeby opisu właściwości tworzyw sztucznych w krótkim czasie stała się uniwersalną dziedziną nauki, umożliwiającą wnioskowanie dedukcyjne w stosunku do zjawisk zachodzących w różnych materiałach.

W latach 60. ubiegłego wieku stwierdzono, że tkanki parenchymatyczne warzyw i owoców posiadają cechy charakterystyczne dla ciał lepkosprężystych (Mohsenin i in. 1963, Morrow, Mohsenin 1966). Podczas testu jednoosiowego ściskania obserwowane są zjawiska relaksacji naprężeń przy stałym odkształceniu oraz pełzania w warunkach stałego naprężenia. Podjęto próby ich opisanego za pomocą modeli reologicznych, stanowiących analogię matematyczną do zjawisk zachodzących w materiałach liniowo sprężystych (Bourne 1975, Chen, Fridley 1972, Clark i in. 1971, Mohsenin 1986, Sitkei 1987).

Należy jednak podkreślić, że pomimo imponującego dorobku w zakresie badań właściwości materiałów biologicznych nie stworzono dotychczas spójnej teorii dotyczącej

ich zachowania się pod obciążeniem. Nie opracowano jednoznacznego zapisu równań konstytutywnych. Te problemy występują także w innych dziedzinach fizyki. Zdaniem Tempczyka (1995) determinizm, związany z nieożywionymi ciałami materialnymi nie odnosi się do organizmów żywych, ze względu na ich indywidualizm i niejednakową wrażliwość na bodźce zewnętrzne. Rozwiązaniem tego zagadnienia może być obserwowany postęp w zakresie instrumentarium badawczego a w szczególności wykorzystanie technik komputerowych. Pojawiły się nowe dziedziny nauki, m.in. cybernetyka i dynamika nieliniowa, które znacząco poszerzają zakres możliwości przewidywania zjawisk występujących w materiałach biologicznych.

W literaturze opisującej badania warzyw jedynie właściwości mechaniczne bulw ziemniaka, korzeni marchwi i buraków cukrowych stały się obiektem szerszych analiz i dociekań naukowych. Sporadycznie występują doniesienia dotyczące wyników badań tkanek innych warzyw użytkowych. Ograniczona liczba przeprowadzonych doświadczeń ma niewątpliwie swoje uzasadnienie w marginalnym znaczeniu gospodarczym danej grupy roślin. Nie powinno to jednak umniejszać konieczności rozszerzenia badań w odniesieniu do różnych gatunków warzyw.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

Modelowanie zjawisk zachodzących podczas badań właściwości mechanicznych tkanek wymaga uwzględnienia szeregu czynników, które nie zawsze można opisać w sposób jednoznaczny. Wynika to z nakładania się ich skutków w kolejnych fazach rozwoju rośliny. Ze względu na złożoność i różnorodność procesów biochemicznych zachodzących w żywych tkankach, niezbędne jest pewne uproszczenie, które w zakresie stosowności modelu uwzględnia wybrane cechy oryginału. Wójcicki (1982) określił, że w odniesieniu do nauk empirycznych o znaczeniu rozpatrywanych właściwości decydują założone cele i wystarczy dysponować kilkoma podstawowymi charakterystykami, aby opisać ciało w dostatecznie pełny sposób. Utworzenie modelu obiektu badań wymaga wyizolowania go z otaczającego środowiska, z jednoznacznym określeniem wzajemnych interakcji pomiędzy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi oraz zmiennymi stanu (Pabis 1985).

2.1. Determinanty środowiskowe

Z punktu widzenia rośliny środowisko stanowi zespół zewnętrznych czynników oddziałujących na nią pozytywnie lub negatywnie. Wzajemne powiązania wynikają z kontaktów na styku materii ożywionej i nieożywionej. Są także skutkiem świadomej działalności człowieka (Kołota i in. 1994, Lack, Evans 2003, Nason, Dehaan 1981).

Głównymi determinantami wpływającymi na kondycję rośliny są między innymi:

- zawartość w glebie rozpuszczalnych soli,
- zawartość powietrza i wody w glebie,
- temperatura gleby i powietrza,
- intensywność nasłonecznienia,
- zawartość dwutlenku węgla w powietrzu,
- zabiegi agrotechniczne, w tym użycie środków ochrony roślin oraz stymulatorów wzrostu,
- obecność patogenów.

Biolodzy zgodnie potwierdzają, że nadmiar bądź niedobór niektórych z wymienionych czynników wpływa negatywnie na rozwój rośliny nawet wówczas, gdy pozostałe występują w ilościach optymalnych. Bilans pokarmowy rośliny może ulec zakłóceniom na skutek nieprawidłowo realizowanych zabiegów agrotechnicznych, nadmiaru lub niedoboru makro- i mikroelementów, zanieczyszczeń powietrza. Konsekwencją jest pogorszenie się jakości produktów roślinnych jako następstwo zmian w składzie biochemicznym. Mogą wystąpić zjawiska chorobowe w postaci długotrwałych zakłóceń funkcji fizjologicznych lub infekcje wywołane przez patogeny (Narkiewicz-Jodko 1985).

Cechą charakterystyczną roślin jest niemożność przemieszczenia. W związku z tym wytworzyły cały szereg mechanizmów obronnych i adaptacyjnych jako odpowiedzi na zmiany w otoczeniu. Lack i Evans (2003) zaliczają do nich specjalizację nowo powstających zawiązków tkanek w merystemach oraz wydzielanie fitohormonów, umożliwiających dostosowanie się do aktualnych warunków klimatycznych i glebowych.

Niezmiernie ważnym czynnikiem jest też niekorzystne oddziaływanie na strukturę gleby podczas realizacji zabiegów agrotechnicznych. Pod naciskiem kół jezdnych na wierzchnią warstwę orną ulega zachwianiu skomplikowany system wzajemnych relacji, pomiędzy trzema głównymi fazami ośrodka glebowego a korzeniami roślin (Konstantkiewicz, Pukos 1998). Kompleksowe ujęcie zagadnień wpływu operacji maszynowych oraz ugniatania powierzchni ornej na wzajemne relacje gleby i roślin uprawnych zostało omówione w wielu publikacjach, m.in. Byszewskiego i Hamana (1977).

Studia literaturowe wykazują, że w niewystarczającym stopniu rozpoznano wzajemne interakcje pomiędzy poszczególnymi czynnikami, jakimi środowisko może wpływać na roślinę (Bieluga, Bzowska-Bakalarz 1986, Blahovec 2001b, Hellebrand 1998, Kokkoras i in. 1995, Michalik 1986, Murase i in. 1980a, Sobol 2003). Próba stworzenia uogólnionego modelu dla warunków lokalnych najczęściej kończy się niepowodzeniem. Nie jest możliwe uwzględnienie nieprzewidywalnych fluktuacji czynników o charakterze globalnym, takich jak gradienty zmian temperatury, wilgotności i zanieczyszczeń powietrza.

2.2. Determinanty struktury roślinnej

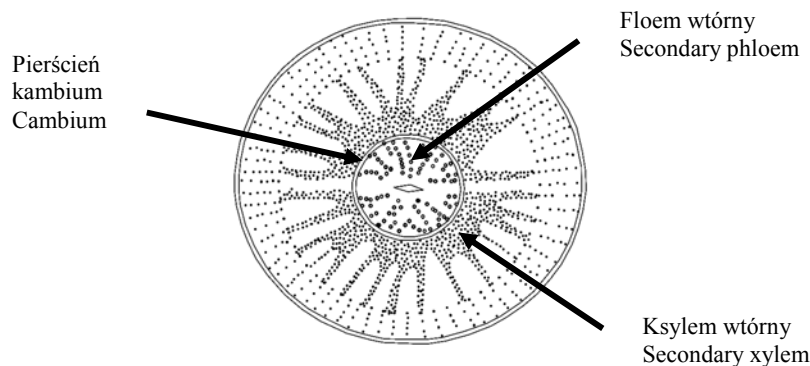
Układ parametrów charakteryzujących strukturę wewnętrzną rośliny nie można traktować jako powtarzalny. Biolodzy podkreślają, że materiał roślinny nie jest jednorodny. Występują różnicowania pomiędzy odmianami a każdy egzemplarz charakteryzuje indywidualna reakcja na zmiany w otoczeniu. Dotyczy to także stopnia dojrzałości, stanu zdrowia, fazy rytmu biologicznego (Esau 1973, Lack, Evans 2003, Nason, Dehaan 1981, Villee 1990).

Przekształcenia biochemiczne i morfologiczne w komórkach roślinnych są determinowane uwarunkowaniami fizykochemicznymi środowiska glebowego. Istotną rolę odgrywają także użyte środki ochrony roślin i substancje wzrostowe. Czynniki te mają wpływ na rozwój rośliny, mogą pojawić się zmiany w budowie anatomicznej komórek (Lack, Evans 2003). W niekorzystnych przypadkach zwiększa się podatność tkanek na uszkodzenia, zmniejsza się odporność na czynniki chorobotwórcze lub szkodniki, występują nieciągłości w strukturze tkankowej (Kołota i in. 1994).

2.2.1. Morfologia i fizjologia rośliny

Większość warzyw stanowią rośliny zielne, których cykl życiowy trwa dwa lata. Do celów konsumpcyjnych wykorzystywane są po nagromadzeniu substancji zapasowych w pierwszym okresie wegetacyjnym. Tkanką charakterystyczną jadalnych części warzyw jest tkanka parenchymatyczna, utworzona z komórek o cienkich ścianach. Pomocniczą rolę spełniają tkanki przewodzące, miękisz ksylemu i miękisz floemu. Ich struktura nie jest jednakowa w obrębie rośliny. W korzeniach warzyw floem i ksylem tworzą układ naprzemianległy wiązek sitowych i naczyniowych, które dzięki działalności kambium

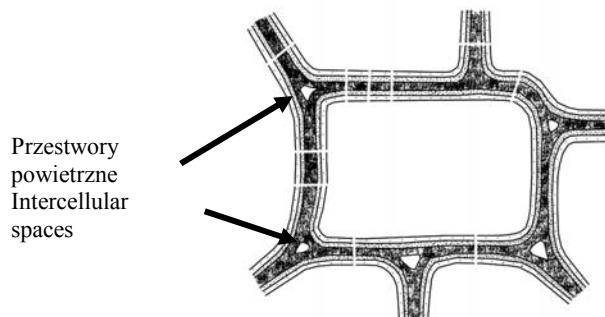
rozrastają się przez odkładanie ksylemu wtórnego do środka korzenia, a floemu wtórnego na zewnątrz (Nason, Dehaan 1981). Przykład takiej struktury przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Przekrój poprzeczny korzenia pietruszki
Fig. 2.1. The cross-section of parsley root

Przyrost wtórny skutkuje zmianą układu z naprzemianległego na naprzeciwległy. Szczególne znaczenie ma układ wiązek floemu i ksylemu, występujący w szyjce korzeniowej i hipokotylu, gdzie następuje stopniowe przestawienie się tkanek z układu korzeniowego na pierścieniowy układ łądgowy (Nason, Dehaan 1981).

Pierwotne ściany komórkowe nie tworzą sztywnej konstrukcji, dostosowują się do stopnia rozwoju komórki, ale jednocześnie spełniają rolę szkieletu podporowego tkanek dzięki równoważeniu ciśnienia turgorowego. Ściany wtórne na skutek wydzielania pewnych substancji stają się sztywne. W typowej tkance mięksiszowej komórki są ze sobą połączone jedynie w punktach kontaktu, a resztę tkanki wypełniają liczne i duże przestwory międzykomórkowe. Przedstawiono to na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Układ ścian komórkowych w otoczeniu pojedynczej komórki
Fig. 2.2. The cell walls system in the environment of a single cell

2.2.2. Uprozczone modele struktury tkanki parenchymy

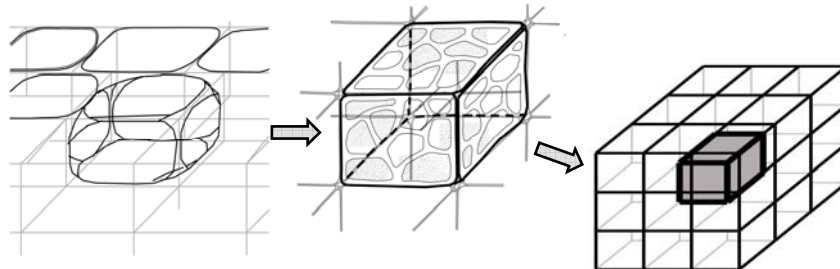
Nie potwierdzają się przypuszczenia o izodiametrycznej budowie komórek miększych tkanek warzyw (Esau 1973). Najnowsze doniesienia wykazują, że w zależności od fazy rozwoju komórki te mają różne kształty i rozmiary. Lack i Evans (2003) podają, że początkowo są one podobne do sześciangu, później kuliste lub cylindryczne, a ich ostateczny kształt jest determinowany przez sąsiadujące komórki. Ta niejednorodność stanowi znaczne utrudnienie w jednoznacznym opisanie przebiegu zjawisk występujących podczas ściskania tkanek np. bulwy ziemniaka (Haman, Konstankiewicz 2000a, Haman i in. 2000b, Konstankiewicz i in. 1996, 2001a, 2001b).

Teoretyczne rozważania Slichtera, związane z rozkładem przestrzennym jednorodnych elementów kulistych, określają porowatość takiej struktury jako dochodzącą do 47% przy ułożeniu sześciennym oraz do 26% przy ułożeniu romboedrycznym (Pazdro 1983). Powyższa uwaga pozwala na odrzucenie hipotezy o izodiametrycznej budowie komórek tkanki parenchymy.

Przestwory powietrzne w bulwie ziemniaka mogą zajmować do 2% objętości. Na ich wielkość wpływają między innymi stopień dojrzałości i warunki składowania bulw (Blahovec 2001b, Weber 1990). Brak jest jednak podobnych informacji dotyczących innych warzyw.

Próby modelowego przedstawienia struktury tkanki parenchymatycznej pozwoliły jedynie na ograniczony opis stanu rzeczywistego (Blahovec 1985a, Konstankiewicz, Pukos 1995). Niedoskonałość sformalizowanego opisu tkwi w uproszczonym potraktowaniu struktury badanego ośrodka. Skład chemiczny, wilgotność i tekstura tkanek warzyw zmieniają się ciągle podczas wzrostu, dojrzewania i także podczas składowania. Obecność biologicznych płynów stanowi dodatkowe ograniczenie możliwości wykorzystania znanych teorii i hipotez sformułowanych dla ciał stałych (Murase i in. 1980a, 1980b).

W dużym uproszczeniu tkankę można przedstawić jako strukturę determinowaną przez wzajemne rozmieszczenie komórek, traktowanych jako cienkościenne zbiorniki wypełnione cieczą pod ciśnieniem. Model struktury tkanki roślinnej pokazano na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Modelowe uproszczenia układu przestrzennego tkanki roślinnej
Fig. 2.3. The model simplifications of plant tissue spatial arrangement

Przykładami takiego przedstawienia struktury mogą być prace prezentujące możliwości wykorzystania do obliczeń metody elementów skończonych, w których modelami komórek były wypełnione cieczą cienkościenne walce (Pitt 1982) lub kule (Blahovec 1985a, Pitt, Davis 1984, Reznicek 1984).

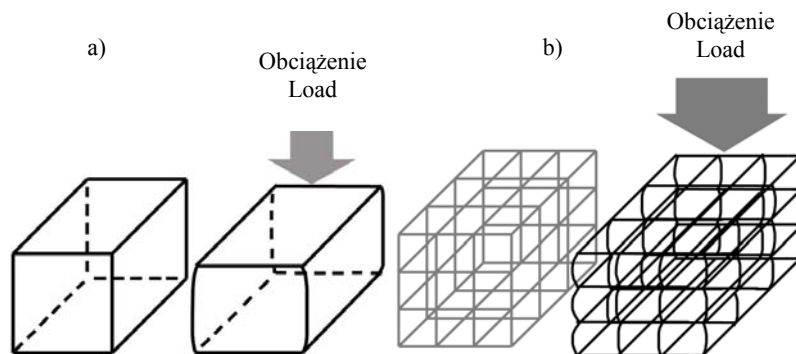
Teoretyczne rozważania w odniesieniu do pojedynczej komórki wykazują, że możliwe byłoby obliczenie naprężenia obwodowego na podstawie znanego równania:

$$\sigma = \frac{p \cdot r}{\delta_r} \quad (2.1)$$

gdzie:

p – ciśnienie płynu, r – promień krzywizny ścianki, δ_r – grubość ścianki komórkowej.

Z uwagi na dużą różnorodność kształtów, rozmiarów i przestrzennego rozmieszczenia komórek nie jest możliwe praktyczne stosowanie tego równania do struktur rzeczywistych. Przyczynami tego są niejednakowe rozkłady naprężeń oraz niejednakowe przebiegi deformacji ścianek bocznych poszczególnych komórek, co wynika z układu struktury tkanki roślinnej. Zagadnienie przedstawiono schematycznie na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Zmiany kształtu pojedynczej komórki (a) oraz układu przestrzennego komórek (b) pod wpływem obciążenia zewnętrznego

Fig. 2.4. The shape changes of a single cell (a) and cells spatial arrangement (b) under the external load

Te jakościowe rozważania prowadzą do wniosku, że o wytrzymałości doraźnej tkanki roślinnej *de facto* decyduje wytrzymałość ścian komórkowych na naprężenia obwodowe.

2.3. Określenie przydatności konsumpcyjnej i technologicznej

Podczas zbioru, transportu i przechowywania warzywa można traktować jako jednostki autonomiczne, natomiast w procesach technologicznych ważną rolę odgrywa ich miąższ. W warunkach przemysłowych badania cech mechanicznych warzyw są prowadzone w celu określenia ich przydatności konsumpcyjnej bądź technologicznej (Blahovec 1994, Blahovec i in. 1983, 1984, Byszewski i in. 1975, Marks, Juliszewski 1980, McRae, Muir 1989, Pollak, Peleg 1980).

2.3.1. Wyznaczenie parametrów przydatności konsumpcyjnej

Z punktu widzenia potencjalnego konsumenta o przydatności danego produktu decydują zarówno walory smakowe i zapachowe, jak i jego tekstura (Bourne 1975). Te czynniki w sposób istotny determinują opłacalność produkcji warzyw oraz długość okresu składowania, wpływają także na przebieg procesu technologicznego w przemyśle spożywczym. Aby określić ewentualną przydatność produktu do spożycia lub jako surowca produkcyjnego konieczne jest poznanie budowy i struktury materiału. W szczególności dotyczy to zmian, jakim podlega w procesie technologicznym (Blahovec 1985b, 2001b, Blahovec i in. 1987, 1990, Brusewitz i in. 1989, Diehl i in. 1979, Herold i in. 1998, Kaifas 1978, Kolowca, Krzysztofik 2003, Mohsenin 1986, Nowacki, Czerko 1993, Peleg 1980, Popko, Hys 1985, Rao, Rizvi 1995).

Już w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych ubiegłego wieku podjęto próby zdefiniowania organoleptycznych wrażeń podczas konsumpcji produktów roślinnych [Blahovec i in. 1975, Bourne 1975, Finney 1969a, 1969b, Jowitt 1974, Kramer, Szcześniak 1973, Mohsenin i in. 1963, Morrow, Mohsenin 1966, Szcześniak 1975]. Pomimo wykorzystania różnych technik pomiarowych podczas testów dały one jedynie przybliżone rozwiązania tego problemu. Bourne (1975) jako przyczynę upatrywał fakt jednoczesnego występowania złożonych procesów, jakim poddawana jest żywność podczas konsumpcji, m.in. mielenia, zgniatania, ściskania, rozciągania. Także niejednorodna struktura materiału roślinnego, jego zachowanie lepkosprężyste oraz zachodzące podczas pomiarów przemiany termodynamiczne, mogą wprowadzać znaczące błędy (Rao, Rizvi 1995).

Stwierdzeniem: „tekstura to elementy strukturalne i sposób ich rejestracji zmysłami fizjologicznymi podczas konsumpcji” Reznicek i Blahovec (1978) pokazują niemożność jej opisanie na podstawie badań tylko jednego czynnika. Do cech będących podstawą kwalifikacji jakościowej produktów spożywczych zaliczane są między innymi: lepkość, mączystość, miękkość, zwięzłość, twardość, jędrność, kruchość, łykowatość, żyłastość, plastyczność itp. Określenie właściwości reologicznych nie jest jednak ściśle zdefiniowane. Pojęcia takie jak: konsystencja, struktura, tekstura mogą być traktowane tożsamo lub alternatywnie, zależnie od organoleptycznego bądź sensorycznego sposobu przeprowadzenia analiz (Pijanowski i in. 1996).

W badaniach tekstury produktów rolniczych wykorzystuje się najczęściej testy polegające na wciskaniu w badany materiał penetratorów o płaskim lub kulistym zakończeniu. Rozważane jest zagadnienie Boussinesq'a dotyczące rozkładu naprężeń na styku walca wciskanego w płaski brzeg półprzestrzeni sprężystej. Na podstawie równania przemieszczenia stempla można obliczyć wartość modułu sprężystości E :

$$E = \frac{F(1 - \nu^2)}{d \cdot \lambda} \quad (2.2)$$

gdzie:

λ – przemieszczenie, F – siła, ν – współczynnik Poissona, d – średnica walca.

Pojawia się jednak problem złożonego stanu naprężenia, gdyż na styku z powierzchnią czołową penetratora występują nie tylko naprężenia normalne, ale także obwodowe naprężenia styczne.

Sitkei (1987) zaproponował, aby dla lepkosprężystej powierzchni, w którą wciskany jest kulisto zakończony penetrator, w obliczeniach chwilowej wartości nacisku p uwzględnić aktualny czas realizacji pomiaru t i wielkość promienia strefy wzajemnego kontaktu:

$$p(r, t) = \frac{4G \cdot \sqrt{[r(t)]^2 - r^2}}{\pi \cdot R(1 - \nu)} \quad (2.3)$$

gdzie:

G – moduł sprężystości poprzecznej, r – promień styku w chwili $t = 0$, $r(t)$ – chwilowy promień styku, R – promień kuli, ν – współczynnik Poissona.

Dotychczas przeprowadzono badania odporności na penetrację tkanek rzodkwi, ziemniaka, marchwi i buraków (Blahovec i in. 1985, Celba 1979, Huyskens-Keil i in. 1998, Mempel i in. 1997, Sager 1988, Wirsing, Horneburg 1994). Jako czynniki decydujące o wytrzymałości tkanek uznano ilość i wielkość komórek, zawartość skrobi i surowego włókna oraz zawartość wody. Wielu badaczy realizowało reologiczne modelowanie lepkosprężystych właściwości bulw ziemniaka (Datta, Morrow 1983, Mohsenin 1986, Morrow, Mohsenin 1966, Peleg 1976, Rumsey, Fridley 1977, Shama, Sherman 1973, Smith 1968). Do wyznaczenia stałych reologicznych wykorzystano quasi-statyczne testy pełzania i relaksacji naprężeń.

Murase i inni (1980a, 1980b) stwierdzili, że użytecznym parametrem opisu mechanicznego stanu może być potencjał wody tkanki roślinnej, bezpośrednio wiążący się z jej własnościami fizycznymi. Wykazali też liniową zależność pomiędzy zmianami potencjału wody oraz pozornym modułem sprężystości tkanki ziemniaka. Analogiczne relacje pomiędzy odpornością na pęknięcie a zmianami potencjału wody obserwowano także w tkankach korzeni marchwi (McGarry 1995). Według Lewickiego (1999) pęknięcie struktur tkankowych korzenia marchwi można zaobserwować już przy naprężeniu rzędu 2 MPa, co w porównaniu z ciśnieniem osmotycznym zbliżonym do tej wartości może mieć decydujące znaczenie. Istotny wpływ potencjału wody na właściwości lepkosprężyste korzenia marchwi wykazali także inni badacze (Gołacki 1991, 1993, 1994, 1996b, Gołacki i in. 2001b, Szot, Gołacki 1985, 1989).

Zdaniem niektórych eksperymentatorów próby wyznaczenia parametrów jakości oraz parametrów tekstury warzyw metodami penetracyjnymi mają ograniczoną wartość poznawczą i jedynie przyczynkowe znaczenie (Bieluga, Gilewicz 1986).

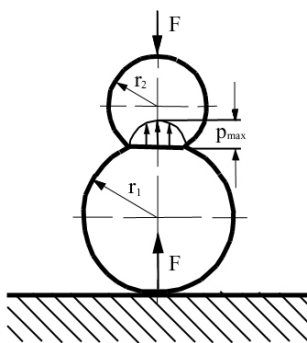
2.3.2. Określenie parametrów przydatności technologicznej roślin

Przydatność technologiczną warzyw określa odporność na uszkodzenia mechaniczne, objawiające się wewnętrznymi i zewnętrznymi naruszeniami ciągłości struktury komórkowej. Kryterium przydatności technologicznej jest podatność lub odporność na wzajemne oddziaływania między rośliną a elementami roboczymi maszyn, z uwzględnieniem intensywności takich kontaktów (Byszewski i in. 1975).

Mohsenin (1986) jako cechy wytrzymałościowe materiałów pochodzenia roślinnego określił: wytrzymałość na ścinanie, ściskanie i rozciąganie, moduł sprężystości, współczynnik Poissona, zdolność odkształceniową, histerezę mechaniczną, relaksację naprężeń,

pełzanie, opór krajania itp. Z punktu widzenia technologii uprawy, np. zbioru i transportu buraków cukrowych jako najważniejsze cechy uznaje się: łamliwość korzeni, udarność, sprężystość, plastyczność, lepkość i twardość (Bieluga 1978, Bieluga, Bzowska-Bakalarz 1980a, 1980b, Byszewski 1978, Paulsen 1978, Skorzyńska, Zdanowicz 1978). Klasyfikacja tych właściwości nie jest jednak jednolita, badacze posługują się różnymi określeniami danej cechy w zależności od przyjętej metodyki badawczej. Ze względu na eksperymentalny charakter badań oraz stosowanych przyrządów pomiarowych uzyskiwanych wyników nie można zweryfikować, bądź mają ograniczoną przydatność do celów praktycznych. Do dziś aktualne pozostaje stwierdzenie: „brak definicji i norm technologicznych uniemożliwia porównanie wyników badań, nawet między dwoma badaczami pracującymi nad tym samym tematem” (Horvath 1980).

Podstawą rozważań teoretycznych, dotyczących wzajemnego oddziaływania pomiędzy warzywami i elementami maszyn jest zagadnienie Hertza. Dotyczy rozkładu naprężeń na styku pomiędzy dwoma idealnie sprężystymi ciałami kulistymi. Przedstawiono to schematycznie na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Zagadnienie naprężeń kontaktowych Hertza
Fig. 2.5. The Hertz problem of contact stresses

Analizowane są zależności naprężenie – odkształcenie, na podstawie których obliczana jest maksymalna wartość nacisku p_{max} :

$$p_{max} = -\frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot F \cdot E^2}{r_z^2 (1-\nu^2)^2}} \quad (2.4)$$

Promień r_z jest promieniem zastępczym na styku kul o promieniach r_1 i r_2

$$r_z = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (2.5)$$

Jako szczególny przypadek rozważany jest także kontakt kulistego obiektu z płaską płytą. Moduł sprężystości E oblicza się z równania:

$$E = \frac{3 \cdot F(1 - \nu^2)}{\sqrt{2} \cdot r_z \cdot \lambda^3} \quad (2.6)$$

W powyższych równaniach oznaczono odpowiednio: λ – przemieszczenie, F – siła, ν – współczynnik Poissona.

Zakres stosowania tych teorii jest jednak ograniczony, co wynika z założenia małych wymiarów powierzchni styku w porównaniu z promieniami krzywizn ciał. Na powierzchni styku powinny występować tylko naprężenia normalne. Materiały kontaktujących się ciał są traktowane jako jednorodne, izotropowe i liniowo sprężyste (Johnson 1985).

Zdaniem Blahovca (2001b) podczas badań warzyw względne odkształcenia nie powinny przekraczać 5%. Decydującą rolę odgrywają zależne od czasu zmiany naprężeń nawet przy stałym obciążeniu, wynikające ze zmian pola powierzchni styku. Istnieje także możliwość pojawienia się trwałych odkształceń lepkoplastycznych. Dodatkowym ograniczeniem są trudności wyznaczenia promienia krzywizny w miejscu styku, wynikające z różnorodności kształtów warzyw.

2.4. Równania konstytutywne modelu ośrodka ciągłego

Zagadnienia wzajemnych relacji układu naprężeń i odkształceń ciał stałych były tematem licznych publikacji naukowych z zakresu mechaniki i wytrzymałości materiałów. Opracowania teoretyczne zakładają jednorodność i izotropię odkształcanych ciał. Zależności między dewiatorami naprężenia i odkształcenia mogą mieć różną postać, zależną od mechanicznych właściwości ciała (Timoshenko, Goodier 1970).

Bąk i Burczyński (2001) określają przyrost odkształceń całkowitych $d\{\varepsilon\}$ jako sumę odkształceń sprężystych i plastycznych:

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon_e\} + d\{\varepsilon_p\} \quad (2.7)$$

gdzie:

$d\{\varepsilon_e\}$ – przyrost odkształceń sprężystych:

$$d\{\varepsilon_e\} = [D]^{-1} \cdot d\{\sigma\} \quad (2.8)$$

$d\{\varepsilon_p\}$ – przyrost odkształceń plastycznych:

$$d\{\varepsilon_p\} = \lambda_p \cdot \frac{\partial f_{pl}}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.9)$$

λ_p – współczynnik określający prędkość odkształceń plastycznych, $[D]^{-1}$ – zapis macierzy sztywności sprężystej, f_{pl} – funkcja plastyczności.

Przyjęte teorie i założenia są weryfikowane na podstawie badań laboratoryjnych. Ze względu na złożony stan naprężenia w materiale pojawiają się rozbieżności w interpretacji wyników, nawet w odniesieniu do metali (Szczeciński 1984). Związki matematyczne opisujące zachowanie się materiałów rzeczywistych są poprawne jedynie dla wybranych warunków brzegowych i początkowych rozpatrywanych zagadnień (Bąk, Burczyński 2001).

W ogólnym przypadku (Fung 1993) równanie konstytutywne można zapisać w postaci:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_R} \frac{\partial x_j}{\partial X_S} \frac{\partial W}{\partial E_{RS}} - p \delta_{ij} \quad (2.10)$$

gdzie:

σ_{ij} – elementy naprężenia; x_i – współrzędne bieżące odkształcenia; X_i – współrzędne stanu początkowego; W – funkcja energii odkształcenia; E_{RS} – elementy odkształcenia; p – ciśnienie hydrostatyczne; δ_{ij} – delta Kroneckera.

Kisiel (1980) przedstawia dwie uogólnione postaci reologicznego równania stanu dla liniowych zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami, określonych operatorami lepkosprężystości lub płynięcia lepkoplastycznego:

$$\sigma_{ik} - \sigma_0 \cdot \delta_{ik} = (\varepsilon_{ik} - \varepsilon_0 \cdot \delta_{ik}) \Psi(\sigma, \dot{\sigma}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, x_i, t, T^0) \quad (2.11)$$

gdzie Ψ jest uogólnioną funkcją relaksacji

$$\varepsilon_{ik} - \varepsilon_0 \cdot \delta_{ik} = (\sigma_{ik} - \sigma_0 \cdot \delta_{ik}) \Phi(\sigma, \dot{\sigma}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, x_i, t, T^0) \quad (2.12)$$

gdzie Φ jest uogólnioną funkcją pełzania.

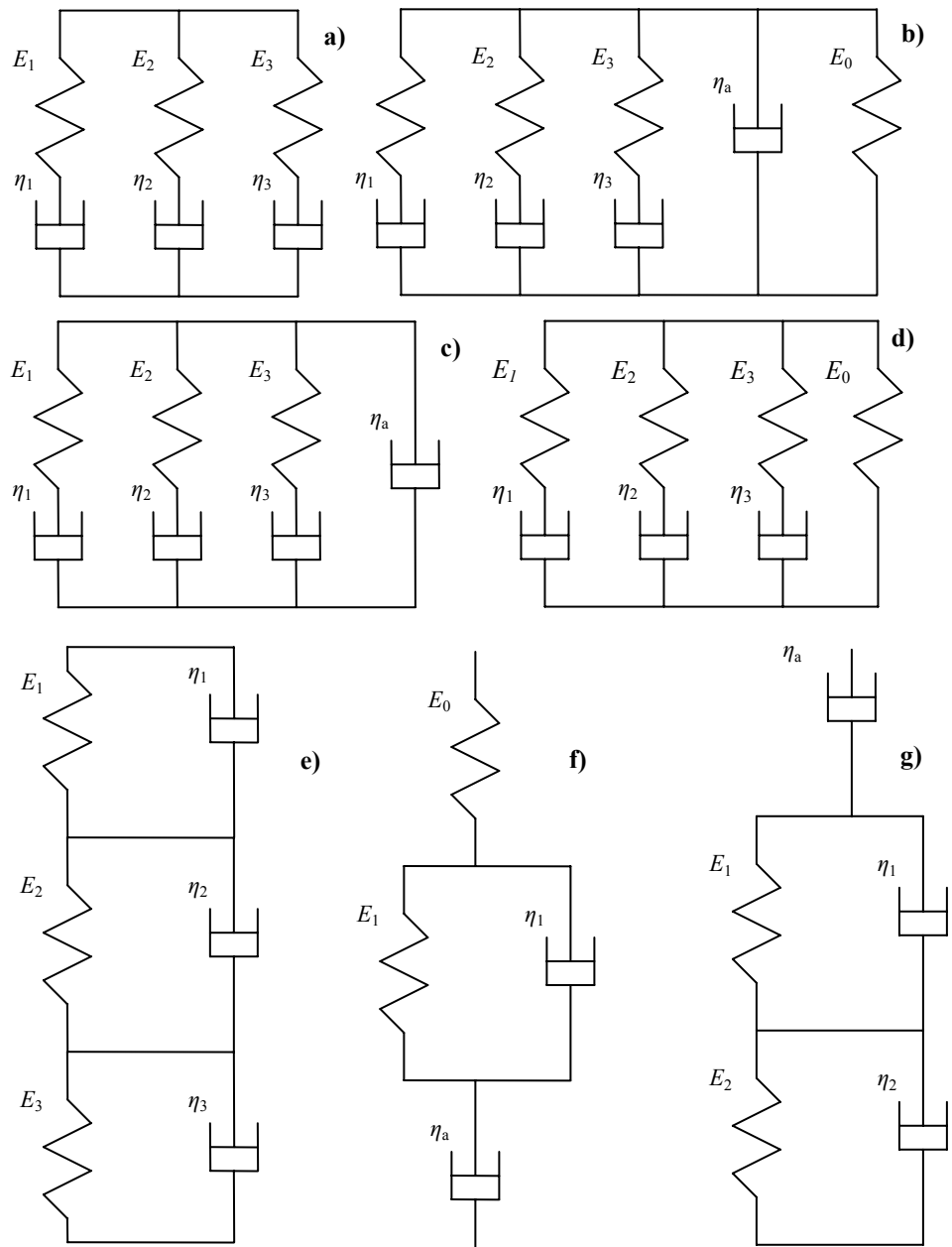
W obu równaniach końcowe wartości naprężenia σ_{ik} oraz odkształcenia ε_{ik} , zależą od wartości początkowych (σ_0 , ε_0), delty Kroneckera δ_{ik} . Uogólnione funkcje Φ i Ψ uwzględniają zależności od miejsca x_i , czasu t , temperatury badanego ciała T^0 .

2.4.1. Modele lepkosprężystości liniowej

Dla odwzorowania cech reologicznych materiałów w aspekcie fenomenologicznym stosuje się kombinacje symboli sprężystości i lepkości, określane jako uogólnione wieloparametrowe modele Maxwella lub Kelvina-Voigta (Chen, Fridley 1972, Clayton, Peleg 1977, Derski, Ziemia 1968, McCullagh, Nedler 1983, Mohsenin 1986, Peleg 1976, 1979, 1984). Zestawienie najczęściej wykorzystywanych układów takich modeli zamieszczono na rysunku 2.6.

Zasadniczym celem wprowadzenia takich modeli jest opracowanie równania różniczkowego do zapisu przebiegu zjawisk funkcjami, traktowanymi jako różniczkowalne (Reiner 1960). Peleg (1976) przedstawił zasadnicze postulaty związane z opracowaniem modeli: powinny opisywać zachowanie się materiału w określonych warunkach badań oraz prognozować jego zachowanie się przy różnych rodzajach obciążeń.

Hooke i Shaffer (1969) podkreślają, że prawa fizyczne są tylko idealizacjami i każde zjawisko fizyczne można idealizować na wiele sposobów. Opisanie rzeczywistości w formie zagadnienia matematycznego jest poprawne, jeśli spełnione zostanie kryterium istnienia, stabilności i jednoznaczności jego rozwiązania. Kryteria te zapewniają determinizm zjawisk, wyrażony zapisem zgodnych wyników podczas powtarzania eksperymentów. Wymóg stabilności rozwiązania zagadnienia jest konieczny z powodu występowania pewnego obszaru błędów wyników eksperymentu oraz stosowanych metod rozwiązywania równań różniczkowych (Kisiel 1980, Szczeciński 1984, Wilczyński 2001).



Rys. 2.6. Uogólnione modele reologiczne: **a)** Maxwella; **b)** Burgersa; **c)** Jeffreysa; **d)** Zenera;
e) Kelvina-Voigta; **f)** Burgersa; **g)** Lethersicha
 Fig. 2.6. Generalized rheological models: **a)** Maxwell; **b)** Burgers; **c)** Jeffreys; **d)** Zener;
e) Kelvin; **f)** Burgers; **g)** Lethersich

Według Wilczyńskiego (2001) dla niewielkich odkształceń (w skali badanego obiektu) ogólny różniczkowy zapis lepkościowości liniowej ma postać:

$$\sum_i a_i \frac{d^i \sigma}{dt^i} = \sum_j b_j \frac{d^j \varepsilon}{dt^j} \quad (2.13)$$

gdzie:

d^i, d^j – pochodne (dla i, j równych 0 lub 1); t – czas; σ – naprężenie; ε – odkształcenie.

Na podstawie zasady superpozycji Boltzmanna równania konstytutywne dla jednoosiowego stanu naprężenia można też przedstawić w zapisie całkowym:

dla relaksacji
$$\sigma(t) = \int_0^t \frac{\partial \varepsilon(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(\theta)} \quad (2.14)$$

dla pełzania
$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{\partial \sigma(\theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{\varepsilon(t)}{\sigma(\theta)} \quad (2.15)$$

gdzie:

σ – naprężenie; ε – odkształcenie; θ – przedział czasowy.

2.4.2. Modele lepkościowości nieliniowej

Już w latach 70. ubiegłego stulecia wykazano ograniczenia przydatności modeli Maxwella i Kelvina-Voigta do opisu właściwości rzeczywistych materiałów (Chen, Fridley 1972, Clark i in. 1971, Findley i in. 1976, Mohsenin, Zaske 1976, Peleg 1979). Nieliniowe właściwości reologiczne, pojawiające się przy większych odkształceniach można opisać kombinacją parametrów liniowej lepkościowości, jednakże nie daje to informacji o zachowaniu się rzeczywistych materiałów (Ferguson, Kembłowski 1995). Zastąpienie zestawu elementów jednym symbolem prowadzi do takiego rozbudowania zapisu matematycznego równań konstytutywnych, że niemożliwa jest poprawna interpretacja fizyczna (Kisiel 1980).

Przykładem może być koncepcja Osińskiego (1986), w której właściwości materiału opisano równoległym połączeniem:

oporu sprężystego
$$S = a\varepsilon + d\varepsilon^3 \quad (2.16)$$

oporu tarcia wewnętrznego
$$T = c \dot{\varepsilon} + e \dot{\varepsilon}^3 \quad (2.17)$$

oporu relaksacji naprężeń
$$R = -(b\dot{\sigma} + f\dot{\sigma}^3) \quad (2.18)$$

gdzie:

a, b, c, d, e, f – współczynniki równań.

Analogiczną postać zapisu (2.16) można znaleźć także w innych publikacjach (Clark i in. 1971, Henry i in. 2000). W eksperymentach z materiałami pochodzenia roślinnego uwzględniano kombinacje modeli lepkościowości liniowej lub zapis równania potęgowego (Blahovec 1996, Fenyvesi i in. 1989, Giessmann, Szot 1982, Kiesewetter, Hellebrand 1982, Lichtensteiger i in. 1988, Nadulski 1997, Sitkei 1994). Występują jednak problemy w interpretacji równań oraz uproszczeń ich zapisu (Gołacki, Stropek 2001a).

2.4.3. Charakterystyka właściwości reologicznych tkanek roślinnych

Doświadczalne wyznaczanie parametrów reologicznych modeli na podstawie analizy krzywych pełzania i relaksacji polega na poszukiwaniu matematycznego zapisu zachowania się materiału rzeczywistego. Do aproksymacji przebiegów rzeczywistych stosowane są metody kolejnych przybliżeń lub system analizy statystycznej z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Na podstawie modeli matematycznych, opisujących przebieg zjawisk podczas realizacji różnych procesów wyznaczane są właściwości reologiczne. Niezależnie od użytej metody dobór modelu zależy od jego przeznaczenia i jest subiektywną decyzją badacza (Rao, Rizvi 1995).

Ważną kwestią jest przebieg odkształcenia przy obciążeniu wstępnym przed rozpoczęciem testów pełzania lub relaksacji naprężeń. Założeniem jest wystąpienie natychmiastowego odkształcenia. Spełnienie tego warunku w przypadku materiału pochodzenia roślinnego wiąże się ze zniszczeniem struktury tkankowej na skutek naprężeń wewnętrznych, co ma istotne znaczenie w przebiegu testów reologicznych (Pitt, Chen 1983, Rao, Rizvi 1995). Mohsenin (1986) stwierdził, że wzrost odkształcenia zmienia warunki obciążenia poszczególnych elementów w złożonych modelach reologicznych.

Niejednorodności morfologiczne w skali makro i mikro powodują, że tkanki roślinne zaliczane są do grupy materiałów porowatych o nieciągłej strukturze. Z makroskopowego punktu widzenia tkankę miąższu idealizuje się jako lepkościowe i zarazem lepkoplastyczne continuum, którego ciągłość zostaje naruszona po przekroczeniu dopuszczalnego naprężenia, określanego jako biologiczna wytrzymałość doraźna (Blahovec 2001a, 2001b, Gates i in. 1986, Mohsenin 1986). Z uwagi na niejednorodność struktury tkanki i złożoność mechanizmów zniszczenia w miejscu uszkodzenia takie uproszczenie może być stosowane jedynie w ograniczonym zakresie. Materiał roślinny charakteryzuje się dużą anizotropią, jego właściwości mechaniczne są przestrzennie ukierunkowane. Odkształcenia są klasyfikowane jako: częściowo odwracalne sprężyste i bioplastyczne, oraz nieodwracalne, plastyczne i destrukcyjne (Bieluga, Gilewicz 1986).

Podczas ściskania tkanek pojawiają się także zjawiska związane z uwolnieniem nieściśliwej cieczy. Według Blahovca (1985a) po początkowym stadium wypierania gazów i wypełniania przestrzeni międzykomórkowych ciecz przemieszcza się, powodując odkształcenia tkanek. Są to zjawiska określane jako efekty filtracji i konsolidacji (Konstankiewicz i in. 1996, 1998, Lippert 1995). Uszkodzenia struktury oraz wypływ cieczy z komórek powodują znaczne utrudnienie w rozgraniczeniu zjawisk o charakterze lepkościowym i plastycznym.

Rozwiązaniem tego zagadnienia mogłoby być wprowadzenie modeli ośrodków wielofazowych uwzględniających konsolidację. Występują jednak znaczne ograniczenia w ich stosowaniu (Konstankiewicz, Pukos 1995, Peterson, Johnson 1979). Przykładem może być zapis równania modelu Terzagiego (Kisiel 1982):

$$3 \frac{K}{\eta_W} \chi \frac{\partial^2 \sigma_W}{\partial x^2} = \frac{\partial \sigma_{(W)}}{\partial t} \quad (2.19)$$

gdzie:

K – współczynnik przepuszczalności, $\eta_{(W)}$ – moduł lepkości, χ – moduł ściśliwości, $\sigma_{(W)}$ – ciśnienie cieczy wewnętrznej, x – przemieszczenie, t – czas.

Brak kompletnej teorii mechaniki materiałów pochodzenia roślinnego wynika z konieczności przeprowadzenia jednoczesnych badań z zakresu biochemii, biofizyki, biomechaniki i fizjologii roślin (Murase i in. 1980a). Haman i inni (1978) postawili hipotezę, że nie można napisać uogólnionego równania konstytutywnego dla ciała scharakteryzowanego sprężystością, lepkością i plastycznością o lokalnych rozkładach statystycznych i różnorodnych złożonych kombinacjach.

W literaturze najczęściej przedstawiane są wyniki przeprowadzonych testów pełzania i relaksacji naprężeń mięszu ziemniaka (Datta, Morrow 1983, Dimitroff 1982, Gao i in. 1989, Giessmann i in. 1981, 1982, Konstankiewicz i in. 1996, Lu, Puri 1991, Mohseni 1986, Pitt 1982, Rohm i in. 1997). Opisywana jest istotna zależność parametrów prostych modeli lepko-sprężystości liniowej od prędkości odkształceń, temperatury, czasu realizacji procesu, wstępnych naprężeń i odkształceń, zawartości wody. Trzy- i czteroelementowe modele wykorzystano do opisu wpływu czasu składowania na zmianę właściwości reologicznych tkanek buraków (Bohdziewicz 2001a, Bzowska-Bakalarz 1989, 1992, 1993, 1995, Chwiej, Kuryłowicz 1972, Nowicki i in. 1976, 1978). Do opisu relaksacji naprężeń w tkance marchwi przyjęto bardziej rozbudowane cztero- i sześcioparametrowe modele, uwzględniające także zawartość wody lub właściwości biofizyczne badanego materiału (Gołacki 1989, 1991, 1993, 1994, Segerlind i in. 1977, Stankiewicz, Gołacki 2003, Szot, Gołacki 1985, 1991a, 1991b).

2.5. Metody wyznaczania współczynnika sprężystości

Określony normami sposób obliczania współczynnika sprężystości jako ilorazu naprężenia i odkształcenia dotyczy ciała liniowo sprężystego. Podstawą wnioskowania o właściwościach mechanicznych materiałów są zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem. Moduł sprężystości liniowej może być przedstawiony w postaci tangensa kąta stycznej do przebiegu zależności $\sigma - \varepsilon$ (Bzowska-Bakalarz 1996b, Sherif i in. 1976). W przypadku obliczania współczynnika sprężystości ciał liniowo sprężystych, odkształcenia względne nie powinny przekraczać 1%. W odniesieniu do porowatych tworzyw sztucznych uwzględniane jest odkształcenie równe 10% (Broniewski i in. 2000, Szczeciński 1984).

Adaptacja takich norm do materiałów o nieliniowym zachowaniu lepko-sprężysto-plastycznym może mieć znaczenie jedynie umowne, o ile możliwe jest zapewnienie powtarzalnych warunków pomiaru. W tym przypadku wprowadza się pojęcie „odkształcenia skutecznego” ε_e , właściwego dla wyężenia przy jednoosiowym rozciąganiu lub ściskaniu (Bąk, Burczyński 2001). W zakresie odkształceń plastycznych można zapisać:

$$\sigma_e = E^o \cdot \varepsilon_e \quad (2.20)$$

gdzie:

σ_e – naprężenie, E^o – zastępczy współczynnik sprężystości zależny od wartości odkształcenia:

$$E^o = \varphi(\varepsilon) \quad (2.21)$$

Zależność ta oznacza utratę charakteru stałej materiałowej.

Dla odkształceń sprężysto-plastycznych można zapisać:

$$E^o = \frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon} = \varphi(\varepsilon) \quad (2.22)$$

Przyjmując hipotetyczną możliwość określenia wyężenia materiału stanem naprężenia przy jednoosiowym ściskaniu, otrzymuje się zależność:

$$E^0 = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} \approx \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.23)$$

Rozważane są także zagadnienia sprężystości nieliniowej (Peleg 1983), w której zależność naprężenie – odkształcenie zapisano w postaci:

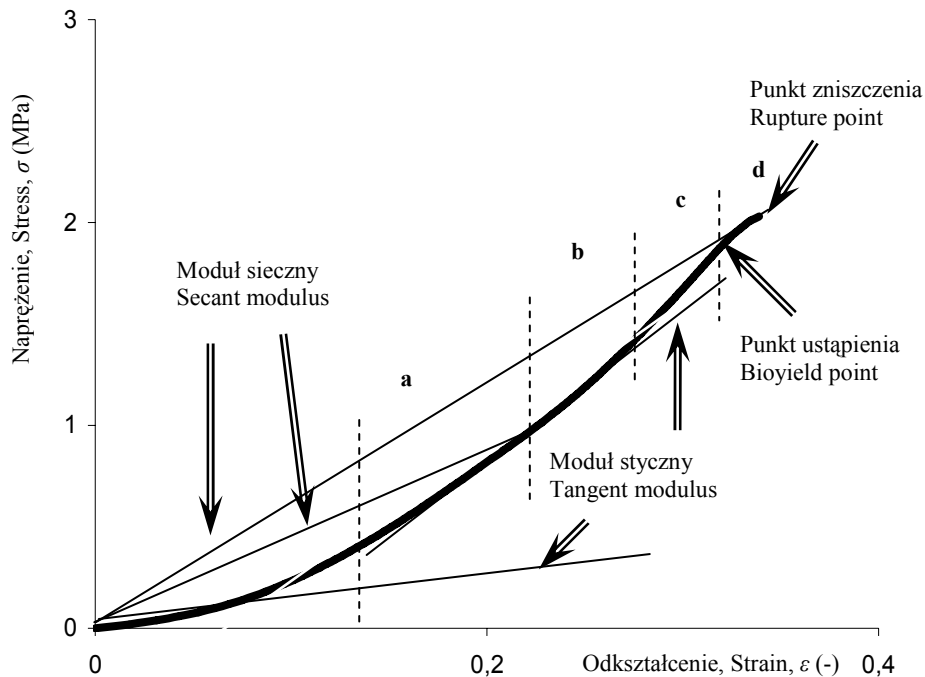
$$\sigma_{(\varepsilon)} = E \cdot \varepsilon^n \quad (2.24)$$

W odniesieniu do tkanki warzyw eksperymetatorzy proponują różne, nie zawsze dające się ze sobą porównać sposoby wyznaczenia modułu sprężystości. Według Sitkei'a (1987) najczęściej współczynnik sprężystości obliczany jest metodą siecznej (secant modulus) lub metodą stycznej (tangent modulus). Oba sposoby przedstawiono na rysunku 2.7.

Na rysunku 2.7 jako charakterystyczne wyróżniono: odcinek nieliniowej sprężystości, odcinek liniowej sprężystości, plastyczne płynięcie oraz strefę nieodwracalnych uszkodzeń. Zaznaczono także: biologiczny punkt ustąpienia (bioyield point) jako analogię granicy plastyczności oraz punkt zniszczenia (rupture point), wynikający z kruchego zachowania się materiału.

Jako kryterium przeprowadzenia obliczeń eksperymetatorzy przyjmują odkształcenie ε w zakresie od 4% do 10% ewentualnie naprężenie odpowiadające wytrzymałości doraźnej σ_{max} lub 50% jej wartości (Mohsenin 1986). Podejmowano też próby wyszczególnienia w przebiegu deformacji próbki charakterystycznych zjawisk lepkosprężystości i plastyczności (Arnold, Mohsenin 1971, Błahovec 2001b).

Błahovec (1989) stwierdził, że współczynnik sprężystości E wybranych produktów rolniczych zawiera się w przedziale od 0,1 MPa do 10 MPa, natomiast wytrzymałość doraźna σ_{max} w zakresie od 0,1 MPa do 3 MPa. Wielu badaczy potwierdziło istotną zależność cech mechanicznych od miejsca i pobrania próbki z bulwy ziemniaka lub korzeni warzyw oraz korelację związaną z wielkością komórek i zawartością wody w badanej strukturze (Bieluga, Bzowska-Bakalarz 1980a, 1980b, 1986, Bohdziewicz 2001a, 2001b, 2001c, 2004, Bzowska-Bakalarz 1998, Celba i in. 1981, Haman i in. 1982, 2000a, Niklas 1988, Konstankiewicz i in. 2001a, Scanlon i in. 1995, 1996). Nie stwierdzono wpływu zmian temperatury oraz kierunku przyłożenia obciążenia (Gao i in. 1989, Kokkoras i in. 1995).



Rys. 2.7. Przykładowe charakterystyczne punkty i przedziały w przebiegu zależności naprężenie – odkształcenie: **a** – sprężystość nieliniowa, **b** – sprężystość liniowa, **c** – płynięcie plastyczne, **d** – zniszczenie

Fig. 2.7. Exemplary characteristic points and intervals in stress – strain dependence course: **a** – nonlinear elasticity, **b** – linear elasticity, **c** – plastic flow, **d** – rupture

Przy empirycznym modelowaniu mechanizmu zjawisk występujących podczas cyklicznych obciążeń stwierdzono, że odkształcenia plastyczne powodują zwiększenie sprężystości materiału określane jako efekt Bauschingera (Bąk, Burczyński 2001). W odniesieniu do materiałów sprężystych linię, wzdłuż której przebiega odciążenie aproksymuje się prostą. Zakłada się, że jest ona równoległa do stycznej do przebiegu zależności $\sigma - \varepsilon$ na początku procesu obciążenia. Sprężystość powrotna w cyklu odciążenia jest traktowana jako miara zdolności ciała do pochłaniania energii sprężystej.

Niewiele opracowań dotyczy badań w zakresie cyklicznych obciążeń tkanek warzyw. Stwierdzono, że w tych warunkach próbki tkanek buraka cukrowego charakteryzują się niewielkim stopniem elastyczności, określonym jako stosunek odkształceń sprężystych do odkształceń trwałych (Bieluga, Bzowska-Bakalarz 1980b). Sitkei (1987) jako przyczynę znacznych nieodwracalnych odkształceń w tkance ziemniaka wymienił: porowatość, mikroskopijne pęknięcia i brak ciągłości w teksturze. Szczególną rolę w powstawaniu odkształceń plastycznych przypisał zawartości wody w materiale.

Brak jest informacji na temat zmian właściwości mechanicznych tkanek innych warzyw, poddanych obciążeniom cyklicznym.

2.5.1. Wpływ kształtu próbki

Znaczący wpływ na wyniki badań mają rozmiary próbki. Wyróżnikiem próbek walcowych może być wskaźnik smukłości ξ :

$$\xi = \frac{l}{d} \quad (2.25)$$

gdzie:

l – długość; d – średnica próbki.

W badaniach właściwości mechanicznych materiałów sprężystych wskaźnik smukłości ma wartość ξ równą 1,5 oraz odpowiednio 2,5 w przypadku tworzyw sztucznych (Broniewski i in. 2000, Szczeciński 1984). W eksperymentach dotyczących tkanek roślinnych wartości ξ były równe 1,5 (Blahovec i in. 1985, Blahovec 1989) lub 0,9 (Abbott i in. 1982, Nowicki i in. 1976, 1978). Celba (1979) testował próbki o średnicy 14,6 mm i czterech różnych wysokościach, uzyskując odpowiednio proporcje 0,66; 0,82; 1,0; 1,33. W tym przypadku rozrzut wyników obliczeń współczynnika sprężystości nie przekraczał 10%. W wielu badaniach korzystano z próbek, których średnica i wysokość miały po 20 mm, zgodnie z zaleceniami norm ASAE (ASAE STANDARD 1996, Bieluga, Bzowska-Bakalarz 1980a, 1980b, Bzowska-Bakalarz 1986, 1996a, 1998, Szot, Gołacki 1985, 1989). Niektóre publikacje nie zawierają informacji o rozmiarach próbek oraz miejscu i sposobie ich pobrania, co utrudnia interpretację przedstawianych wyników badań.

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO

Z blisko 50 gatunków warzyw konsumpcyjnych uprawianych w naszych warunkach klimatycznych około 30 ma znaczenie gospodarcze. Każdego roku rejestruje się wiele nowych odmian zarówno krajowych, jak i zagranicznych. Wprowadzanie nowych odmian zwiększa możliwość selekcji pod względem zawartości określonych składników. W efekcie następuje polepszenie walorów smakowych, przydatności konsumpcyjnej lub technologicznej. Mogą jednak pojawić się niepożądane skutki. Wielu badaczy sygnalizuje pojawianie się morfologicznych nieciągłości struktury tkanek, m.in. na skutek naprężeń wewnętrznych. Brakuje informacji o wynikach badań podatności surowca na znaczne odkształcenia w zakresie quasi-statycznych naprężeń, występujących przy realizacji procesów technologicznych lub w warunkach długotrwałego składowania warzyw.

Normy dotyczące jakości surowca określają kryteria przydatności spożywczej, zalecane warunki przechowywania, klasyfikację wymiarową. Podstawowym problemem przy opracowaniu nowych technologii jest brak jednoznacznie sformułowanej metodyki pozwalającej na porównanie właściwości fizycznych i mechanicznych tkanek warzyw. Nie opracowano jednolitej metodyki badawczej oraz nazewnictwa poszczególnych właściwości mechanicznych. Występują rozbieżności wyników obliczeń współczynnika sprężystości ze względu na ograniczone możliwości adaptacji teorii Hertza i Bousinesq'a w odniesieniu do materiałów biologicznych. Brakuje też odpowiedzi na pytanie, w jakiej mierze dotychczasowe wyniki badań cech mechanicznych bulw ziemniaków, korzeni marchwi i buraka cukrowego odnoszą się do innych warzyw?

Studia literaturowe wykazały, że opracowanie modelu fenomenologicznego tkanki roślinnej jest zagadnieniem rozwiązywalnym tylko w ograniczonym zakresie.

Ogólnie można stwierdzić, że wyznaczenie właściwości mechanicznych tkanek warzyw jest utrudnione z uwagi na wykorzystanie różnych metod pomiarowych oraz niejednoznaczne zdefiniowanie parametrów badanego surowca. Do określenia cech mechanicznych tkanek eksperymentatorom najczęściej wystarcza określenie położenia tylko jednego punktu w całym przebiegu zależności naprężenie – odkształcenie. Takie uproszczenie znacznie zawęży przydatność poznawczą uzyskanych wyników, utrudnia wnioskowanie o przyczynach ewentualnych niezgodności rzeczywistych i teoretycznych przebiegów odkształcenia. Wiele prac badawczych koncentruje się na wyznaczeniu właściwości mechanicznych jedynie na podstawie próby doraźnej lub testu relaksacji naprężeń. W znacznej mierze ogranicza to możliwość porównania z wynikami uzyskanymi z innych testów. Szczególnie ważkim zagadnieniem jest brak opracowań opisujących zachowanie się tkanek w warunkach zmiennej obciążenia oraz oceny możliwości kumulacji energii sprężystej.

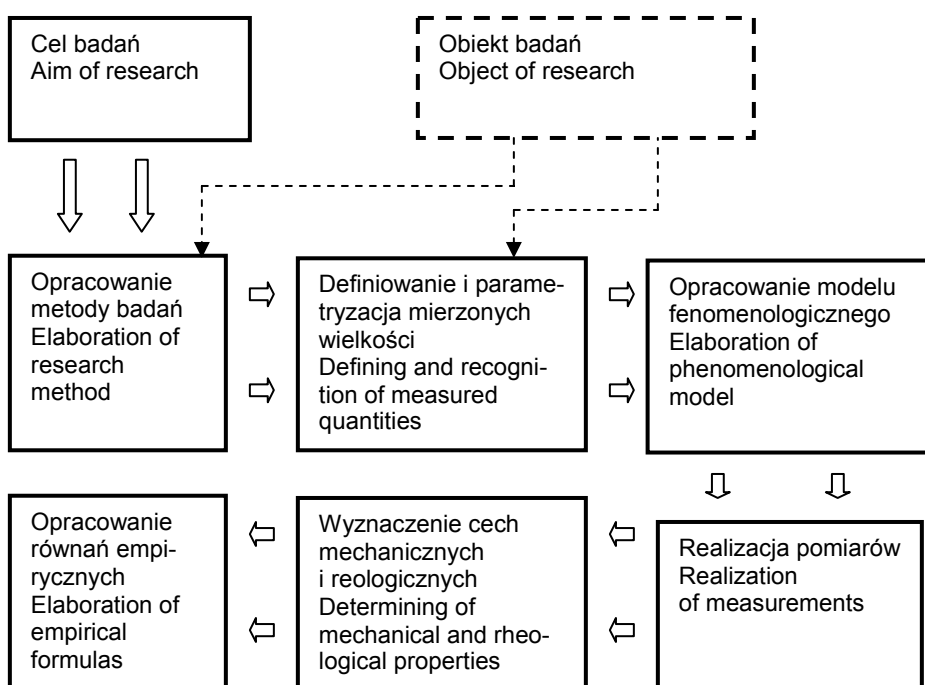
Rozwiązaniem przedstawionych problemów może być opracowanie alternatywnej metody wyznaczania właściwości mechanicznych i reologicznych ścisanych tkanek parenchymy warzyw. Niezbędna jest analiza wzajemnych relacji sił i przemieszczeń w całym zakresie deformacji próbek, także w warunkach obciążenia zmiennego. Wiąże się z tym także obserwacja przebiegu relaksacji naprężeń oraz pełzania. Ważnym zagadnieniem jest możliwość ograniczenia wpływu zakłóceń wynikających z niejednorodności badanego materiału oraz obecności zjawisk towarzyszących jego deformacji.

4. CEL PRACY

Niedoskonałość dotychczas stosowanych metod badawczych wynika z ograniczonych możliwości adaptacji zagadnień teorii ciała idealnie sprężystego w odniesieniu do materiałów biologicznych.

Celem pracy jest próba opracowania modelu fenomenologicznego, opisującego zachowanie się tkanek parenchymy warzyw w warunkach quasi-statycznych zmian odkształceń i naprężeń. Umożliwi to wyznaczenie i porównanie właściwości mechanicznych i reologicznych tkanek wybranych gatunków warzyw. Dodatkowym celem jest sformułowanie empirycznych zależności wyznaczonych cech od warunków realizacji badań. W szczególności dotyczy to rozmiarów próbek, miejsca i sposobu ich pobierania, ubytku cieczy podczas testów.

Poszczególne etapy realizacji celu badań przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Model blokowy koncepcji realizacji pracy
Fig. 4.1. The block model of the work realization idea

Na rysunku 4.1 linią przerywaną przedstawiono uwarunkowania, wynikające z konieczności uwzględnienia specyficznych właściwości fizycznych, charakterystycznych dla materiału biologicznego. Przyjęto założenie, że podstawą wyznaczenia właściwości mechanicznych tkanki parenchymatycznej jest analiza przebiegu zależności naprężenie – odkształcenie w warunkach jednoosiowego ściskania próbek walcowych. Umożliwia to określenie wytrzymałości doraźnej oraz obliczenie współczynnika sprężystości jako miary oporu mechanicznego badanego materiału. Uwzględniono także przeprowadzenie badań w zakresie obciążeń zmiennych, aby wyznaczyć udział zakumulowanej energii sprężystej w ogólnym bilansie nakładów pracy odkształcenia.

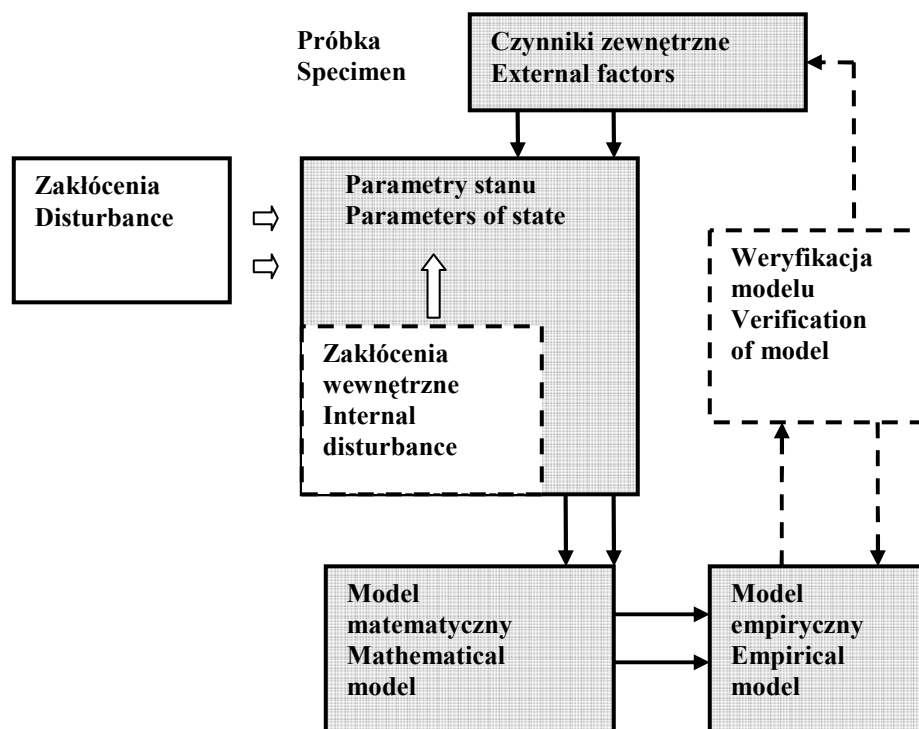
Na podstawie przebiegu próby doraźnej nie jest możliwe przewidywanie zmian właściwości tkanek roślinnych poddanych długotrwałym obciążeniom. Do wyznaczenia cech reologicznych niezbędna jest rejestracja przebiegu plastycznego płynięcia przy stałym obciążeniu oraz przebiegu relaksacji naprężeń przy niezmiennym odkształceniu.

Realizacja próby doraźnej oraz testów reologicznych na próbkach pobranych z jednego egzemplarza rośliny, umożliwia rozpatrzenie ogółu zagadnień dotyczących lepkość-prężystości i plastyczności badanego materiału.

5. KONCEPCJA MODELU FENOMENOLOGICZNEGO

Zagadnienie sił działających na jednostkę pola przekroju poprzecznego jest podstawą wnioskowania o wielkości naprężeń wewnętrznych oraz odkształceń ciał stałych lub innych ośrodków. Analiza przebiegu deformacji próbek materiału umożliwia sprawdzenie przydatności hipotez i zależności podstawowych przedstawionych w postaci modeli fenomenologicznych. Nieścisłość tego opisu jest na ogół konsekwencją pomijania zjawisk towarzyszącym odkształceniom materiałów biologicznych. Występują implikacje w postaci niezgodności z obrazem wyidealizowanego izotropowego ośrodka.

Koncepcję opracowania modelu empirycznego tkanki roślinnej przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy eksperymentalnego opracowania modelu empirycznego tkanki mięszu
Fig. 5.1. The block scheme of the experimental elaboration of the flesh tissue empirical model

W koncepcji przedstawionej na rysunku 5.1 zagadnienia związane z oddziaływaniem środowiska potraktowano jako uogólnione zakłócenia zewnętrzne. Zróżnicowanie warunków genetycznych i przebiegów procesów biochemicznych w poszczególnych egzemplarzach oznaczono jako zakłócenia wewnętrzne. Próbkę pobrana z rośliny charakteryzuje się mierzalnymi właściwościami fizycznymi, określanymi jako parametry jej stanu.

Jako czynniki zewnętrzne modelu próbki przedstawiono oddziaływanie sił o zmiennych parametrach, wynikających z warunków realizacji testów. Śledzenie i rejestracja zmian odkształcenia umożliwiają sformułowanie równania matematycznego. Do weryfikacji przydatności modelu wykorzystano badania w zakresie tzw. wytrzymałości prostej.

Aby ograniczyć liczbę zmiennych przewidziano redukcję obserwowalnych zależności w doświadczeniach. W takim przypadku wpływ nieuwzględnianych zależności może być oceniony probabilistycznie. Redukcja polega na potraktowaniu wpływu różnorodnych czynników jako zakłóceń, których znaczenie może być określone poprzez jednoczesne przeprowadzenie kilku testów na próbkach pobranych z poszczególnych egzemplarzy roślin.

Podstawą tworzenia modeli empirycznych, opisujących zachowanie się tkanek warzyw pod wpływem obciążenia, było przyjęcie następujących założeń:

1. Badany materiał ma cechy ośrodka trójfazowego, który można scharakteryzować rzeczywistą zdolnością kumulacji energii sprężystej w strukturze ścian komórkowych.
2. W zakresie stosowanych obciążeń tkankę roślinną, zawierającą około 90% wody można uznać jako materiał nieściśliwy.

5.1. Algorytm obliczania pozornego współczynnika sprężystości

Przyjęcie założenia, że do ściśnięcia ciała o większym polu przekroju poprzecznego niezbędna jest większa siła nacisku, umożliwia opisanie właściwości mechanicznych materiału na podstawie różnicy nakładów pracy odkształcenia. Pozwala to na obliczenie współczynnika sprężystości, traktowanego jako miara oporu mechanicznego. W przypadku materiałów o sprężystości liniowej współczynnik ten posiada cechy stałej materiałowej, co ma istotne znaczenie przy porównaniu właściwości mechanicznych różnych materiałów.

W układzie ciała liniowo sprężystego energię sprężystą U określa się jako pracę L_z uogólnionych sił Q_i , skutkującą przemieszczeniami uogólnionymi γ_i :

$$L_z = U = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \gamma_i \quad (5.1)$$

Równanie to, zwane równaniem Clapeyrona, jest stosowane do określenia wewnętrznej energii sprężystej (Szczeciński 1984).

Iloraz energii sprężystej U oraz objętości V umożliwia obliczenie jednostkowej energii odkształcenia $U_{(e)}$ przy jednoosiowym ściskaniu:

$$U_{(\varepsilon)} = \frac{U}{V} \quad (5.2)$$

Zgodnie z teorią sprężystości (Timoshenko, Goodier 1970) energia odkształcenia jest sumą energii związanej ze zmianami objętościowymi i energii zmian postaciowych, określającej wytrzymałość materiału:

$$U_{(\varepsilon)} = \frac{(1-2\nu)}{6E}(\sigma^2) + \frac{(1+\nu)}{3E}(\sigma^2) = \frac{\sigma^2}{2E} = 0,5 \cdot E \cdot \varepsilon^2 \quad (5.3)$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona, E – moduł sprężystości.

Na podstawie hipotezy Beltramiego można zapisać:

$$U_{(\varepsilon)} = 0,5 \cdot E_C \cdot \frac{\lambda^2}{l^2} \quad (5.4)$$

gdzie:

E_C – moduł sprężystości, λ – przemieszczenie osiowe, l – długość próbki.

Dla ciała liniowo sprężystego:

$$\sigma = \frac{\partial U_{(\varepsilon)}}{\partial \varepsilon} = \{D\}^{-1} \cdot \varepsilon \quad (5.5)$$

gdzie:

$U_{(\varepsilon)}$ – jednostkowa energia odkształcenia, $\{D\}^{-1}$ – macierz sztywności.

Zgodnie z postulatem Hubera każdy materiał charakteryzuje określona pojemność energetyczna wyrażona energią właściwą odkształcenia, która następnie może być uwalniana przy odciążeniu. Nadmiar energii ulega dyssypacji lub powoduje zniszczenie struktury w przypadku materiałów kruchych.

Umownie można przyjąć, że w odniesieniu do materiału biologicznego praca U_R ściskania próbki w zakresie przemieszczenia λ , jest wyrażona polem pod krzywą siła – przemieszczenie:

$$U_R = \int_0^{\lambda} F_{(\lambda)} \cdot d\lambda \quad (5.6)$$

Powierzchnię tego pola można także przedstawić w postaci prostokąta, którego jednym bokiem jest przemieszczenie λ , a drugim bokiem siła zastępcza F_z , przedstawiono to na rysunku 5.2.

Można zapisać:

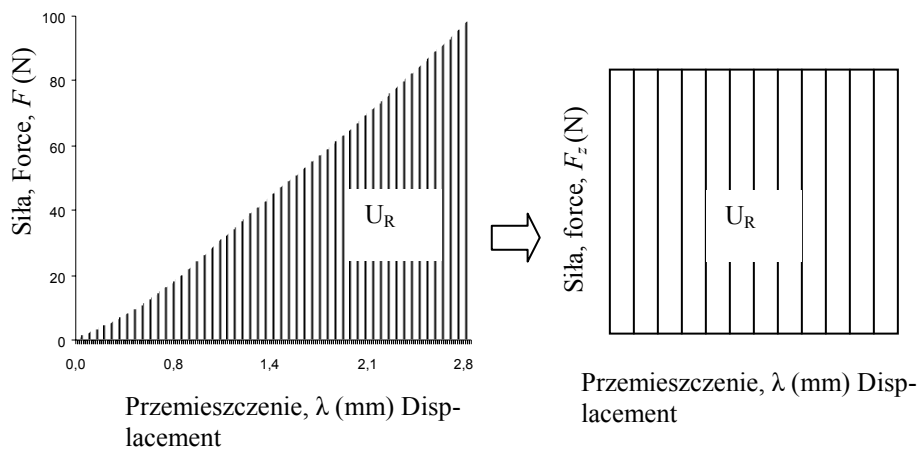
$$U_R = F_z \cdot \lambda \quad (5.7)$$

Odnosząc pracę U_R do objętości próbki V , uzyskuje się równanie:

$$U_{(\varepsilon)R} = \frac{U_R}{V} = \frac{F_z \cdot \lambda}{A \cdot l} \quad (5.8)$$

gdzie:

A – pole przekroju poprzecznego próbki w kształcie walca; l – długość próbki.



Rys. 5.2. Sposób obliczenia chwilowej wartości siły zastępczej F_z
 Fig. 5.2. The calculation of instantaneous value of the supplementary force F_z

Skutki działania sił rzeczywistych $U_{(e)}$ na ciało rzeczywiste przyrównuje się do równoważnej jednostkowej energii $U_{(e)R}$ hipotetycznego ciała liniowo sprężystego. Uwzględniając zależność (5.4) można zapisać:

$$0,5 \cdot E_C \cdot \frac{\lambda^2}{l^2} = \frac{F_z \cdot \lambda}{A \cdot l} \quad (5.9)$$

Na podstawie powyższego równania dla dowolnej wartości przemieszczenia λ można obliczyć chwilową wartość pozornego współczynnika sprężystości $E_C(\lambda)$:

$$E_C(\lambda) = \frac{a \cdot \int_0^\lambda F_{(\lambda)} \cdot d\lambda}{\lambda^2} \quad (5.10)$$

lub

$$E_C(\lambda) = \frac{(F_z \cdot \lambda) \cdot a}{\lambda^2} \quad (5.11)$$

gdzie a – jest współczynnikiem zależnym od średnicy próbki d oraz wskaźnika smukłości ξ

$$a = \frac{2,55 \cdot \xi}{d} \quad (5.12)$$

Po uwzględnieniu powyższej zależności formuła obliczenia pozornego współczynnika sprężystości przyjmuje postać:

$$E_C(\lambda) = \frac{2,55 \cdot \xi \cdot \int_0^\lambda F(\lambda) \cdot d\lambda}{d \cdot \lambda^2} \quad (5.13)$$

W przyjętym modelu wartość pozornego współczynnika sprężystości $E_C(\lambda)$ określa wartość skuteczną oporu mechanicznego stawianego przez materiał. Oznacza to, że obliczenia wartości chwilowej pracy uwzględniają historię przebiegu odkształcenia materiału.

Analogiczną metodę obliczeń można stosować także w odniesieniu do próbek o dowolnym kształcie, np. elipsoidalnym (Bohdziewicz 2006). W tym przypadku formuła obliczania pozornego współczynnika sprężystości miała postać:

$$E_C(\lambda) = \frac{3,8 \cdot \int_0^\lambda F(\lambda) \cdot d\lambda}{d_a \cdot d_b \cdot \lambda} \quad (5.14)$$

gdzie:

d_a ; d_b – rozmiary elipsoidy w kierunku prostopadłym do działającego obciążenia.

6. MATERIAŁ I METODY

6.1. Charakterystyka obiektu badań

Badania cech mechanicznych tkanek wybranych gatunków warzyw realizowano w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Akademii Rolniczej we Wrocławiu w latach 1999–2005.

W latach 1999–2001 badano tkanki pobrane z korzeni buraka ćwikłowego o kształcie kulistym, kulistym spłaszczonym i walcowym. Materiał pochodził z Zakładu Hodowli i Nasiennictwa Roślin Ogrodniczych w Bąkowie (woj. opolskie). Zapewniona była uprawa na glebie o tej samej klasie bonitacyjnej, przy jednakowych zabiegach agrotechnicznych realizowanych w podobnych warunkach pogodowych. Do badań wybrano odmiany o wysokiej wartości technologicznej powszechnie uprawiane na Dolnym Śląsku i Opolszczyźnie:

- Czerwona kula, Nochowski i Chrobry – wyhodowane w Zakładzie „Spójnia” Hodowli i Nasiennictwo Ogrodnicze w Nochowie; korzenie kształtu kulistego,
- Okrągły ciemnoczerwony – wyhodowany w Zakładzie Hodowli i Nasiennictwa Roślin Ogrodniczych w Snowidzy; korzenie kuliste spłaszczone,
- Opolski – wyhodowany w Zakładzie Hodowli i Nasiennictwa Roślin Ogrodniczych w Bąkowie; korzenie o kształcie walcowym.

Buraki uprawiano na glebie drugiej klasy. Przedplonem był jęczmień jary. Zastosowano nawożenie przedsiewne w dawce 70 kg P oraz 180 kg K na 1 ha. Nawożenie azotem wykonano w trzech dawkach: 100 kg N przedsiewnie oraz dwukrotnie pogłównie po 25 kg N na 1 ha. Siew rzędowy, po wschodach stosowano ręczną przerywkę i przecinękę, w uprawie zastosowano ochronę chemiczną. Zbiór korzeni przeprowadzono ręcznie w okresie ich dojrzałości technologicznej.

W latach 2000–2001 materiałem badawczym były korzenie marchwi, pietruszki i selera. W latach 2002–2003 badano warzywa rzepowate, bulwy ziemniaka i korzenie chrzanu, w latach 2004–2005 warzywa kapustne.

Warzywa pochodziły z upraw polowych. Prowadzono je w kontrolowanych warunkach, w prywatnym gospodarstwie rolniczo-ogrodniczym położonym niedaleko Strzelina (woj. dolnośląskie). Warzywa uprawiano na glebie trzeciej klasy. Przedplonem były uprawy zbożowe. Klasyfikowane nasiona wysiewano indywidualnie w skrzynkach umieszczanych w inspektach. Różnorodność sadzono ręcznie do gruntu w odpowiednim rozstawie, zależnie od gatunku rośliny. Nawożenie oraz zabiegi pielęgnacyjne i ochronne były przeprowadzone przy użyciu sprzętu mechanicznego przez wykwalifikowany personel kontrahenta płodów rolnych, zgodnie z jego wymaganiami. Z uwagi na niewielkie opady deszczu w sezonie wegetacyjnym zastosowano nawadnianie przy wykorzystaniu

mobilnej deszczowni. Przeprowadzono zbiór ręczny w fazie dojrzałości technologicznej. Zebrane warzywa poddano selekcji pod względem kształtów i rozmiarów, odrzucono egzemplarze o widocznych uszkodzeniach lub z objawami chorobowymi.

Do badań wybrano:

- korzenie marchwi odmiany Joba (Bejo Zaden) – wyhodowanej w Holandii,
- korzenie pietruszki odmiany Berlińska,
- korzenie selera odmiany Makar,
- korzenie chrzanu odmiany Czeski,
- zgrubienia rzodkwi odmiany Murzynka,
- zgrubienia rzodkiewki odmiany Sopel lodu,
- bulwy ziemniaka odmiany Bryza,
- róże kalafiora odmiany White Top,
- róże brokoła odmiany Sebastian,
- zgrubienia kalarepy odmiany Niebieska masłowa.

6.1.1. Wyznaczenie wybranych cech fizycznych materiału

Materiał do badań pobierano począwszy od drugiego dnia od daty zbioru, lecz w czasie nie dłuższym niż 60 dni. Warzywa przechowywano w przewiewnym pomieszczeniu o temperaturze nieprzekraczającej 8 °C i wilgotności względnej powietrza w zakresie od 80% do 90%. Zapewniło to stosunkowo niewielkie zmiany cech fizycznych materiału.

Z każdego egzemplarza warzyw pobierano w zależności od rodzaju testu od kilku do kilkunastu próbek w kształcie walca. Próbki charakteryzowały się średnią wartością wskaźnika smukłości $1,1 < \zeta < 1,4$. Mierzono średnicę i wysokość każdej próbki. Wyniki pomiarów zapisywano z dokładnością do 0,1 mm. Próbki ważono zarówno przed i po zakończeniu każdego testu. Obliczano gęstość każdej próbki jako iloraz masy i objętości. Oznaczono ją jako gęstość pozorną. Z uwagi na możliwość występowania nieciągłości struktur tkankowych lub błędów popełnianych podczas pozyskiwania próbek jako kryterium przydatności uznano $\pm 2\%$ dopuszczalnej odchyłki wartości średniej gęstości, obliczonej dla poszczególnych egzemplarzy warzyw.

Niewykorzystane fragmenty materiału ważono a następnie umieszczano w suszarce. Do wyznaczenia zawartości suchej substancji materiał wstępnie podgrzewano przez 24 godziny w temperaturze 70 °C oraz przez następne 24 godziny w temperaturze 105 °C.

Mierzono ubytek masy w postaci sumarycznego wypływu cieczy ze ścisanych próbek podczas próby doraźnej oraz podczas testów reologicznych. Ten pomiar w sposób pośredni umożliwia szacunkowe porównanie kondycji badanych tkanek pobranych z egzemplarzy warzyw jednego gatunku. Zestawienie wartości średnich wybranych cech fizycznych zamieszczono w tabeli 6.1.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 6.1 można zauważyć, że mamy do czynienia z materiałami o gęstości pozornej zbliżonej do gęstości wody, co jest zrozumiałe z uwagi na zawartość suchej substancji w granicach od 5% do 30% masy próbki. Zastanawiający jest fakt stosunkowo niewielkich ubytków masy próbki przy naprężeniu odpowiadającym biologicznej wytrzymałości doraźnej σ_{max} , a nawet 50% tej wartości. Świadczy to o tym, że tkankę roślinną o znacznej zawartości cieczy można traktować jako materiał nieściśliwy. Potwierdzenie tych przypuszczeń można znaleźć w wielu

publikacjach (Anazodo, Chikwendu 1983, 1984, Bzowska-Bakalarz 1998, Gołacki 1996a, Rohm i in. 1997, Szot, Gołacki 1991a). Wyznaczony współczynnik Poissona tkanki warzywnej ma wartość zbliżoną do 0,5.

Tabela 6.1
Table 6.1

Wartości średnie wybranych właściwości fizycznych tkanek warzyw
The mean values of selected physical properties of vegetable tissues

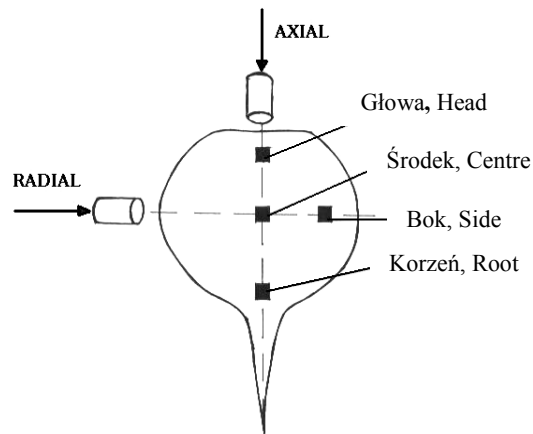
Materiał Material	Gęstość pozorna Apparent density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Zawartość suchej substancji Dry mass	Ubytek masy przy: Decrease of mass at:	
			100% σ_{max}	50% σ_{max}
Burak ćwikłowy Beetroot	1050	15%	9%	4%
Seler Celery	900	12%	6%	3%
Rzodkiew Radish	1040	14%	16%	5%
Rzodkiewka Small radish	1020	5%	10%	7%
Chrzan Horseradish	940	30%	5%	4%
Marchew Carrot	980	11%	12%	8%
Pietruszka Parsley	900	18%	7%	5%
Ziemniak Potato	1100	20%	6%	4%
Kalarepa Kohlrabi	1030	5%	7%	4%
Kalafior Cauliflower	1010	5%	5%	3%
Brokuł Broccoli	1030	10%	4%	3%

6.2. Metodyka badań

6.2.1. Test wytrzymałości doraźnej

Badania wpływu czynników zewnętrznych na strukturę materiału pochodzenia roślinnego wymagają zapewnienia powtarzalności materiału. Duża próbka zawiera nie tylko tkanki parenchymy, ale także tkanki przewodzące lub podporowe o innej strukturze komórkowej. W takim przypadku tzw. „mapowanie” jest możliwe tylko w odniesieniu do warzywa o znacznych rozmiarach, co jednak zawęża możliwości poznawcze. Z uwagi na konieczność pobrania wielu próbek z poszczególnych egzemplarzy warzyw, wycinane próbki miały kształt walca o wysokości w przybliżeniu 8 mm i średnicy 7 mm.

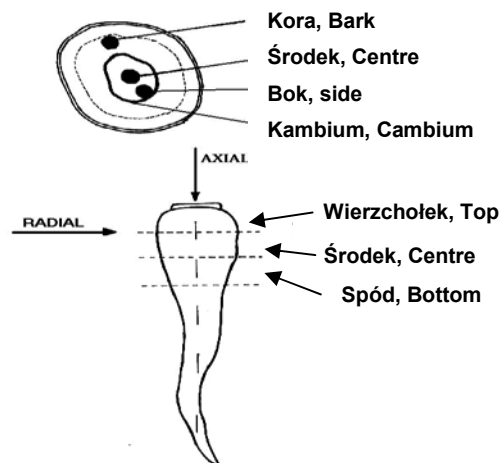
Do określenia wpływu miejsca i sposobu pobierania fragmentów tkanek na zmianę ich właściwości mechanicznych, wycinano po cztery próbki w kierunku osi podłużnej rośliny i w kierunku promieniowym. Miejsca i kierunki wycinania próbek z korzeni o kształcie kulistym pokazano schematycznie na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Schematyczne zaznaczenie miejsc wycinania próbek z warzyw o kształcie kulistym
Fig. 6.1. Schematically marked places of cutting out the samples from ball-shaped vegetables

Do badań wybrano po 5 egzemplarzy z czterech odmian buraka ćwikłowego. Wybrano także po 5 sztuk z każdej z sześciu grup selekcji wymiarowej korzeni buraków odmiany Czerwona kula oraz po 5 sztuk z trzech grup selekcji wymiarowej selera.

Analogicznie pobierano fragmenty tkanek korzeni o kształcie walcowym, w tym marchwi i pietruszki. Miejsca i kierunek wycinania próbek pokazano schematycznie na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Oznaczenia miejsca pobierania próbek z warzyw o kształcie walcowym
Fig. 6.2. The marked places of cutting out the samples from cylindrical-shaped vegetables

Do badań pobrano po dziewięć próbek z każdych 10 egzemplarzy korzeni marchwi i pietruszki, odpowiednio po pięć egzemplarzy dla kierunku osiowego i promieniowego.

Aby porównać właściwości mechaniczne tkanek parenchymy, pobranych z jedenastu gatunków warzyw, próbki miały kształt walca o wysokości około 10,5 mm i średnicy 8 mm. O doborze rozmiarów zdecydowała możliwość pobrania łącznie sześciu próbek z każdego z 25 egzemplarzy danego gatunku roślin. Próbki wycinano w kierunku osiowym, z części środkowej w przekroju poprzecznym rośliny.

Testy doraźne jednoosiowego ściskania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5566. Zastosowano głowicę tensometryczną 2525-806 o zakresie 1 kN. Prędkość przemieszczenia głowicy wynosiła $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Prędkość tę dobrano z uwagi na możliwość obserwacji przebiegu deformacji próbki, aby wykluczyć przypadki związane z naruszeniem ciągłości struktury podczas wycinania próbek. Dodatkowym powodem było zjawisko gwałtownego wypływu cieczy z tkanek ziemniaka i rzodkwi przy prędkościach przekraczających $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Pojawiał się niepożądany efekt znacznej rozbieżności wyników pomiarów wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Maksymalny czas trwania próby doraźnej nie przekraczał 300 sekund. Średni czas trwania jednego pomiaru wynosił 240 sekund.

6.2.2. Badania w warunkach cyklicznego obciążenia

Testy przeprowadzono na próbkach w kształcie walca o wysokości około 8 mm i średnicy 7 mm. Wycinano po dwie próbki z każdego korzenia buraka ćwikłowego, selera, marchwi i pietruszki, z egzemplarzy wykorzystanych wcześniej do próby doraźnej. Pobierano także po jednej próbce z każdego z 25 egzemplarzy jedenastu gatunków warzyw. Próbki miały kształt walca o wysokości około 10,5 mm i średnicy 8 mm. Wycinano je z warzyw, z których wcześniej pobrano trzy próbki do testu doraźnego.

W obu przypadkach przeprowadzono test w postaci trzech pętli obciążenia cyklicznego, przy zadanym naprężeniu odpowiadającym 50% wytrzymałości doraźnej σ_{max} . Wartość naprężenia wyznaczano indywidualnie dla każdego egzemplarza rośliny.

Do wyznaczenia wpływu poziomu obciążenia na zmianę właściwości mechanicznych tkanek wybrano po 5 korzeni buraka ćwikłowego, selera, marchwi i pietruszki. Korzenie miały rozmiary umożliwiające wycięcie z każdego z nich 12 próbek w kształcie walca o wysokości około 8 mm i średnicy 7 mm. Trzy z tych próbek były wykorzystywane do wyznaczenia wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Podczas badań prędkość przemieszczenia głowicy była równa $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Średni czas realizacji pojedynczego testu wynosił 1200 sekund.

6.2.3. Badania właściwości reologicznych

Przeprowadzono testy pełzania i relaksacji naprężeń na próbkach w kształcie walca o wysokości około 10,5 mm i średnicy 8 mm. Wycinano je z 25 egzemplarzy każdego z ośmiu wybranych gatunków warzyw. Z egzemplarzy tych wcześniej pobrano trzy próbki do testu doraźnego i jedną do testu histerezy.

Przed rozpoczęciem każdego testu zadawano wstępne naprężenie odpowiadające 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} , wyznaczonej indywidualnie dla każdego egzemplarza rośliny. Prędkość przemieszczenia głowicy wynosiła $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Łączny czas trwania pojedynczego testu pełzania lub relaksacji naprężeń nie przekraczał 2100 sekund.

Częstość próbkowania wynikała z dokładności odczytu przyrządów pomiarowych. Podczas testu relaksacji naprężeń prowadzono rejestrację wyników z każdą zmianą wartości siły o $2 \cdot 10^{-1}$ N. Analogicznie podczas testu pełzania krok zapisu wynikał z przemieszczenia o $1 \cdot 10^{-5}$ m. W obu testach rejestrowano ponad 200 punktów pomiarowych w czasie 900 sekund.

6.2.4. Analiza błędów pomiarowych

Badania przeprowadzono przy użyciu legalizowanych przyrządów pomiarowych. Wykaz użytej aparatury oraz wyniki przeprowadzonej analizy błędów pomiarowych zamieszczono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2

Table 6.2

Aparatura pomiarowa i zakresy błędów pomiarowych
The measuring devices and the ranges of measurement errors

Mierzona wielkość i przyrząd pomiarowy Measured quantity and measuring instrument	Błąd bezwzględny Absolute error	Maksymalny błąd względny Maximal relative error
Masa próbek – Mass of specimens – waga elektroniczna – laboratory balance	$1 \cdot 10^{-4}$ g	<0,1%
Wymiary próbek – Dimensions of specimens – suwmiarka – slide caliper	$5 \cdot 10^{-5}$ m	<1,0%
Czas – Time – Instron 5566	$1 \cdot 10^{-3}$ s	<0,1%
Siła – Force – Instron 5566	$2 \cdot 10^{-1}$ N	<1,0%
Przemieszczenie – Displacement – Instron 5566	$1 \cdot 10^{-6}$ m	<0,1%

Do sterowania przebiegiem pomiaru oraz ciągłej rejestracji wartości czasu, siły i przemieszczenia wykorzystano program MERLIN. Symulacje komputerowe oraz obliczenia przeprowadzono wykorzystując pakiety statystyczne STATGRAPHICS, STATISTICA oraz program MATHCAD. Zależności statystyczne (Nowak 2002) wyznaczono na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

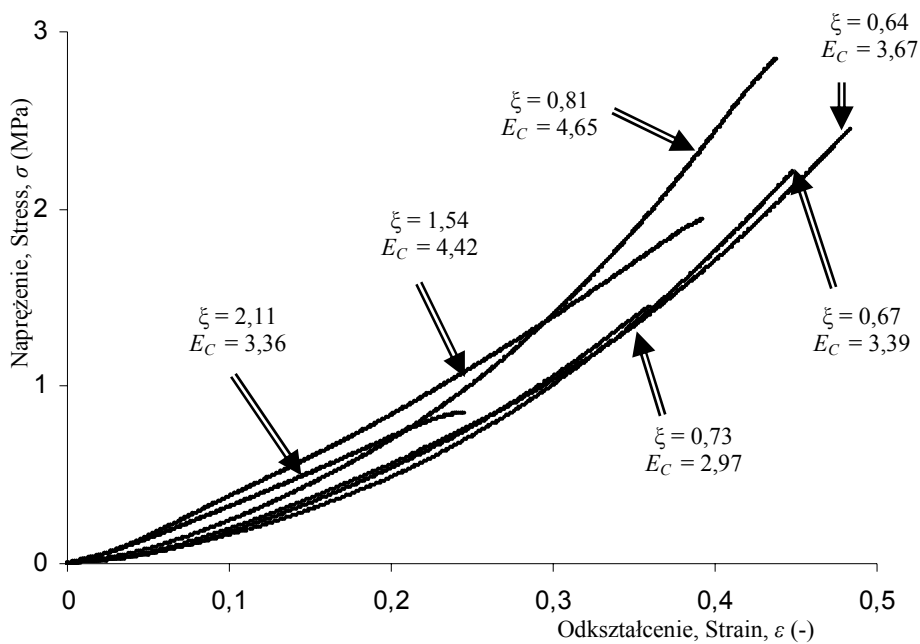
7. WYNIKI I DISKUSJA

7.1. Wyniki testu doraźnego

7.1.1. Znaczenie rozmiarów próbek

Z zapisu równania (5.13) wynika ścisły związek pomiędzy wartością pozornego współczynnika sprężystości E_C i wskaźnikiem smukłości ζ . Analogiczna zależność występuje także w odniesieniu do wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Na rysunku 7.1 pokazano przykładowe przebiegi naprężenie – odkształcenie dla różnych rozmiarów próbek wyciętych z jednego egzemplarza kalafiora.



Rys. 7.1. Przykładowe przebiegi naprężenie – odkształcenie dla różnych wartości wskaźnika smukłości ζ próbek pobranych z jednego egzemplarza kalafiora
Fig. 7.1. Examples of the stress – strain courses for different values of the slenderness ratio ζ of the specimens received from a single cauliflower

Na podstawie rysunku 7.1 można zauważyć, że przebieg odkształcenia próbki o wskaźniku smukłości $\xi > 1$ jest zbliżony do przebiegu liniowego. Jeżeli wysokość próbki jest mniejsza od jej średnicy przebieg zależności $\sigma - \varepsilon$ ma charakter wykładniczy. Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji wskaźnika smukłości ξ , wytrzymałości doraźnej σ_{max} oraz pozornego współczynnika sprężystości E_C zamieszczono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1

Table 7.1

Analiza wariancji dla średnich wartości wskaźnika smukłości ξ , wytrzymałości doraźnej σ_{max} oraz pozornego współczynnika sprężystości E_C , test ściskania próbek tkanek wybranych warzyw

ANOVA results for mean values of the slenderness ratio ξ , the ultimate stresses σ_{max} and the apparent coefficient of elasticity E_C in compression test of the selected vegetables tissues samples

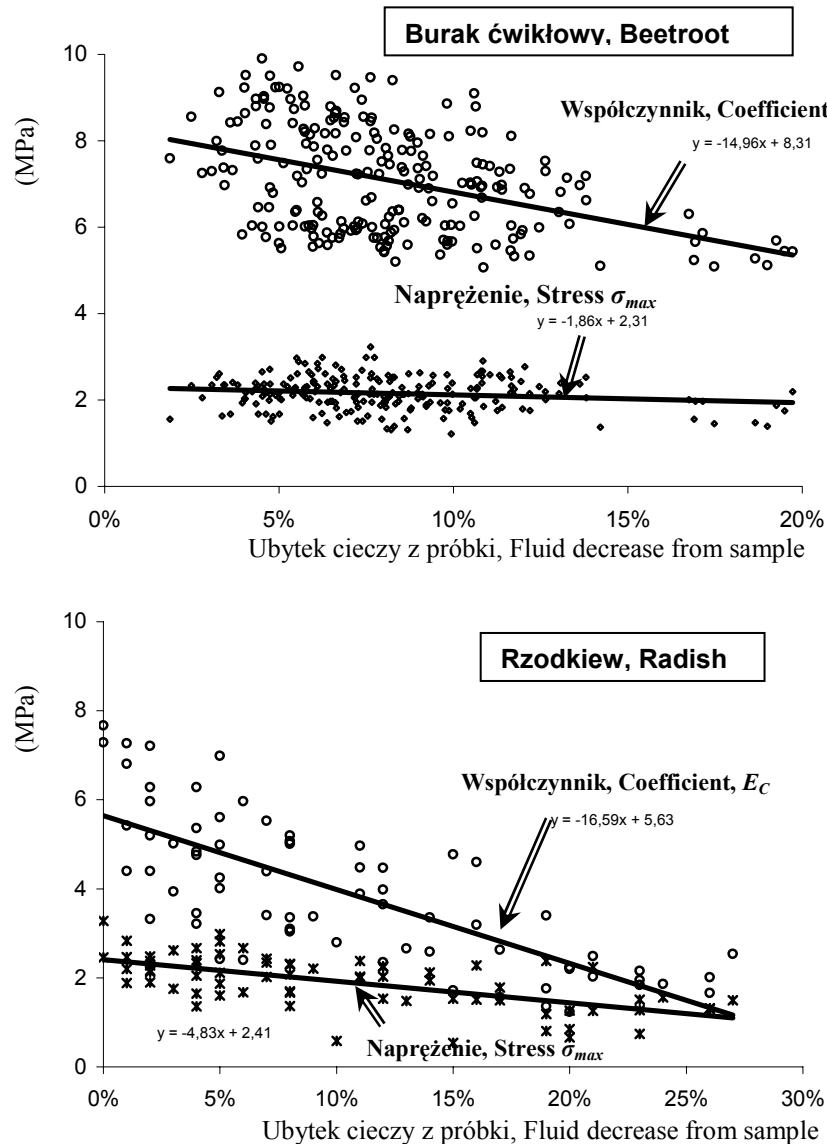
Analiza wariancji dla próbek tkanek wybranych warzyw ANOVA for the selected vegetable's tissues samples				
Wskaźnik smukłości ξ Slenderness ratio ξ	Zmienna zależna Dependent variable σ_{max}		Zmienna zależna Dependent variable E_C	
	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level
	1,0 < ξ < 1,8 Tkanki buraka ćwikłowego Tissues of beetroot	128	0,0000	259
1,0 < ξ < 1,8 Tkanki kalarepy Tissues of kohlrabi	691	0,0000	504	0,0000
0,6 < ξ < 2,2 Tkanki kalafiora Tissues of cauliflower	103	0,0000	93	0,0001
0,6 < ξ < 2,2 Tkanki brokuła Tissues of broccoli	85	0,0001	125	0,0000

Wyniki analizy wariancji przedstawione w tabeli 7.1 potwierdzają zależność wytrzymałości doraźnej σ_{max} od proporcji wymiarowych próbek tkanek warzyw. Analogiczną zależność można zauważyć także w odniesieniu do pozornego współczynnika sprężystości E_C . Dla zapewnienia powtarzalności wyników pomiarów wskaźnik smukłości walcowych próbek tkanek parenchymy warzyw powinien mieć wartość $1,0 < \xi < 1,4$. W przypadku gdy wysokość próbki jest ponad 1,5 razy większa od jej średnicy ($\xi > 1,5$) mogą wystąpić charakterystyczne objawy wybożenia, prowadzące do przekłamania wyników pomiarów.

7.1.2. Znaczenie ubytku masy próbki

Czynniki zewnętrzne, kondycja rośliny lub niewłaściwy sposób pobrania do badań wycinków tkanek mogą skutkować pojawieniem się w nich resztkowych naprężeń wewnętrznych. Może także nastąpić utrata ciągłości struktury na skutek pęknięcia ścian komórkowych,

z czym wiąże się zwiększenie ilości cieczy wypływającej ze ściskanej próbki. Przykładowe zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi a ubytkiem cieczy ze ściskanych próbek tkanek buraka ćwikłowego i rzodkwi pokazano na rysunku 7.2.



Rys. 7.2. Zależności pomiędzy wytrzymałością doraźną σ_{max} oraz pozornym współczynnikiem sprężystości E_C a procentowym ubytkiem cieczy ze ściskanych próbek

Fig. 7.2. The dependences between the ultimate strength σ_{max} and the apparent coefficient of elasticity E_C versus the proportional decrease a fluid from the squeezed samples

Na podstawie rysunku 7.2 można zauważyć występowanie ujemnej korelacji pomiędzy zmniejszeniem masy próbki a wytrzymałością doraźną σ_{max} oraz pozornym współczynnikiem sprężystości E_C . Te empiryczne zależności wykazują możliwość pojawienia się rozbieżności w ocenie wyników badań prowadzonych na wielu egzemplarzach. Biorąc pod uwagę średnie wartości ubytku cieczy z tkanek różnych gatunków warzyw (zestawione w tab. 6.1) uznano maksymalnie 10% utraty masy jako wartość kwalifikującą materiał. Większe ubytki masy mogą świadczyć o tym, że stan tkanki badanej rośliny odbiega od normy. Na rysunku 5.1 jest to oznaczone jako zakłócenie wewnętrzne.

7.1.3. Kryterium odkształcenia podczas testu doraźnego

Niejednakowe właściwości mechaniczne tkanek można obserwować w postaci zróżnicowania przebiegów zależności $\sigma - \varepsilon$. Charakterystyczne przebiegi w zakresie 10% odkształcenia względnego próbek pobranych z jedenastu gatunków warzyw pokazano na rysunku 7.3.

Na rysunku 7.3 wyraźnie zaznacza się różnica przebiegów zależności naprężenie – odkształcenie w tkankach chrzanu i pietruszki. Jest to konsekwencja zmian wzajemnych relacji pomiędzy odkształceniem sprężystym i lepkiem podczas ściskania próbek. Jak można zauważyć na wykresie, zamieszczonym w górnej części tego rysunku, dotyczy to całego przebiegu zależności $\sigma - \varepsilon$.

Większość badaczy arbitralnie rozważa przeprowadzenie badań jedynie w zakresie kilkuprocentowego odkształcenia. Pojawia się pytanie, jakie różnice wystąpią w obliczeniach wartości pozornego modułu sprężystości E_C w całym zakresie odkształcenia?

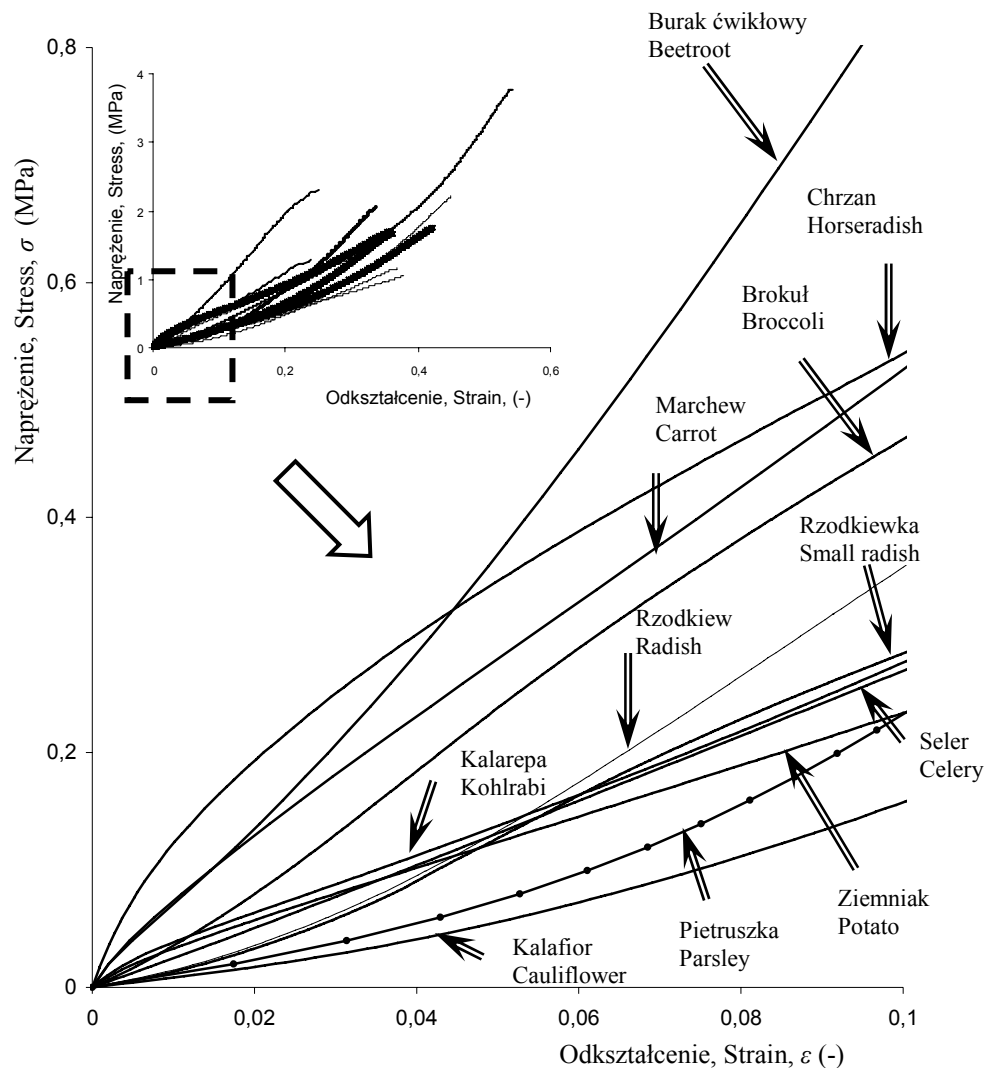
Odpowiedzią może być zestawienie wartości współczynnika E_C dla kilku sekwencji odkształcenia. Przykładowe zestawienie dla próbek tkanek buraka ćwikłowego i pietruszki pokazano na rysunku 7.4.

Z porównania obu wykresów, przedstawionych na rysunku 7.4, można zauważyć niejednakowy przebieg zmian właściwości mechanicznych podczas deformacji tkanek badanych warzyw. Rozpatrując jedynie odkształcenie ε rzędu 4% można by wnioskować o zbliżonych średnich wartościach współczynnika E_C tkanek pietruszki i buraka ćwikłowego. Jednakże przy większych odkształceniach pojawiają się zauważalne rozbieżności. Zaobserwowano zróżnicowanie średnich wartości współczynnika E_C w zależności od odkształcenia w odniesieniu do tkanek pobranych z pojedynczego egzemplarza rośliny.

Sekwencyjne zestawienie średnich wartości współczynnika E_C dla tkanek wyciętych z korzeni czterech gatunków warzyw zamieszczono w tabeli 7.2.

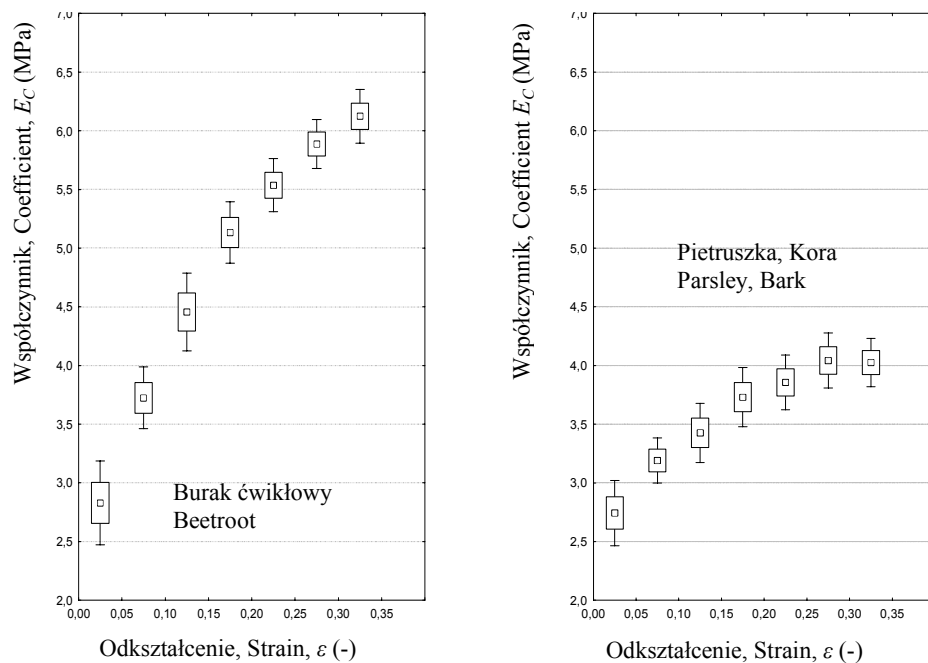
Przedziały ufności obliczono na podstawie rozkładu t -Studenta, poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Z zestawienia zamieszczonego w tabeli 7.2 wynika, że przy narastającym odkształceniu występują największe zmiany wartości współczynnika E_C w tkankach buraka ćwikłowego i selera. Widoczne są różnice zmian średnich wartości tego współczynnika w odniesieniu do poszczególnych odmian buraka ćwikłowego, co może być podstawą ich klasyfikacji. Charakterystyczne są także niejednakowe zmiany wartości współczynnika E_C w tkankach kory i rdzenia korzenia marchwi.



Rys. 7.3. Charakterystyczne przebiegi $\sigma - \epsilon$ w zakresie odkształcenia do 10% podczas ściskania próbek mięszu wybranych warzyw

Fig. 7.3. The characteristically $\sigma - \epsilon$ courses of the strain magnitude up to 10% during tissues samples of selected vegetables compression



Rys. 7.4. Średnie wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C w zależności od odkształcenia ε
 Fig. 7.4. The mean values of the apparent coefficient of elasticity E_C versus the strain ε

Jak można zauważyć przy odkształceniu ε rzędu 30% następuje prawie dwukrotnie zwiększenie wartości współczynnika E_C . Biorąc pod uwagę złożoność procesów konsolidacji zachodzących przede wszystkim w początkowym stadium deformacji tkanki, arbitralne przyjęcie jako kryterium określonej wartości względnego odkształcenia może prowadzić do różnych interpretacji właściwości mechanicznych tkanek na podstawie tych samych pomiarów.

Do opisanego korelacji pomiędzy wartościami średnimi współczynnika E_C oraz odkształceniem ε wykorzystano równania empiryczne zestawione w tabeli 7.3.

Z zapisu równań empirycznych przedstawionych w tabeli 7.3 można wnioskować, że obligatoryjne przyjęcie wartości odkształcenia ε na przykład równego 10%, w pewnej mierze może stanowić kryterium dla porównania właściwości tkanek pobranych z egzemplarzy tego samego gatunku warzyw, ale nie spełnia swojej roli w odniesieniu do kilku gatunków. Inaczej mówiąc zjawiska, występujące przy niewielkich odkształceniach w ograniczonym zakresie odzwierciedlają ogół rzeczywistych zjawisk, występujących w całym przebiegu deformacji.

W związku z powyższym bardziej miarodajnym kryterium wydaje się przyjęcie ustalonej wartości naprężenia, na przykład na poziomie odpowiadającym 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Zależność średnich wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C (MPa) od odkształcenia ε próbek tkanek wybranych warzyw
 The dependence between mean values of the apparent coefficient of elasticity E_C (MPa) and deformation ε of selected vegetable's samples

Materiał Material	Odkształcenie – Strain ε								
	4%	6%	8%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Burak odmiana Czerwona kula Beetroot Czerwona kula variety	2,00 ±0,38	2,43 ±0,44	2,82 ±0,46	3,17 ±0,44	3,85 ±0,34	4,37 ±0,27	4,81 ±0,22	5,14 ±0,19	
Burak odmiana Chrobry Beetroot Chrobry variety	2,19 ±0,31	2,76 ±0,38	3,31 ±0,42	3,78 ±0,43	4,62 ±0,41	5,20 ±0,37	5,68 ±0,35	5,78 ±0,25	
Burak odmiana Nochowski Beetroot Nochowski variety	2,69 ±0,33	3,27 ±0,36	3,80 ±0,36	4,20 ±0,34	4,84 ±0,27	5,24 ±0,25	5,58 ±0,21	5,90 ±0,21	
Burak odmiana Okrągły Cc. Beetroot Okrągły Cc. variety	2,43 ±0,32	3,11 ±0,37	3,67 ±0,37	4,04 ±0,34	4,79 ±0,26	5,24 ±0,25	5,60 ±0,21	5,83 ±0,20	
Burak odmiana Opolski Beetroot Opolski variety	2,83 ±0,36	3,44 ±0,38	4,01 ±0,36	4,45 ±0,33	5,13 ±0,26	5,54 ±0,23	5,86 ±0,21	6,14 ±0,22	
Seler Celery	1,22 ±0,11	1,41 ±0,12	1,58 ±0,13	1,73 ±0,14	2,02 ±0,15	2,25 ±0,16	2,44 ±0,18	2,64 ±0,18	2,75 ±0,19
Marchew kora Carrot bark	3,03 ±0,32	3,3 ±0,32	3,46 ±0,31	3,56 ±0,30	3,67 ±0,30	3,8 ±0,33	4,02 ±0,37	4,11 ±0,39	
Marchew rdzeń Carrot core	2,78 ±0,31	3,42 ±0,31	3,92 ±0,30	4,29 ±0,28	4,88 ±0,26	5,31 ±0,28	5,64 ±0,27		
Pietruszka kora Parsley bark	2,74 ±0,28	3,07 ±0,28	3,30 ±0,27	3,45 ±0,26	3,69 ±0,24	3,86 ±0,23	4,02 ±0,23	4,03 ±0,21	
Pietruszka rdzeń Parsley core	2,40 ±0,27	2,69 ±0,26	2,89 ±0,24	3,03 ±0,23	3,25 ±0,20	3,41 ±0,18	3,60 ±0,18	3,81 ±0,18	4,02 ±0,23

Z zestawień zamieszczonych w tabeli 7.2 oraz w tabeli 7.3 można zauważyć zróżnicowanie właściwości mechanicznych próbek pobranych z tkanek kory i rdzenia w przekroju poprzecznym korzenia marchwi. Nie znajduje to jednak potwierdzenia w eksperymentach przeprowadzonych przez innych badaczy. Przykładowo Haman i in. (1982) wykazali brak istotnych różnic. Do określenia przyczyn tego stanu rzeczy dokonano porównania wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C i współczynnika E_S , obliczonego powszechnie stosowaną metodą siecznej. Zestawienie obliczonych średnich wartości obu współczynników dla tkanek wyciętych z korzeni marchwi i pietruszki pokazano na rysunku 7.5.

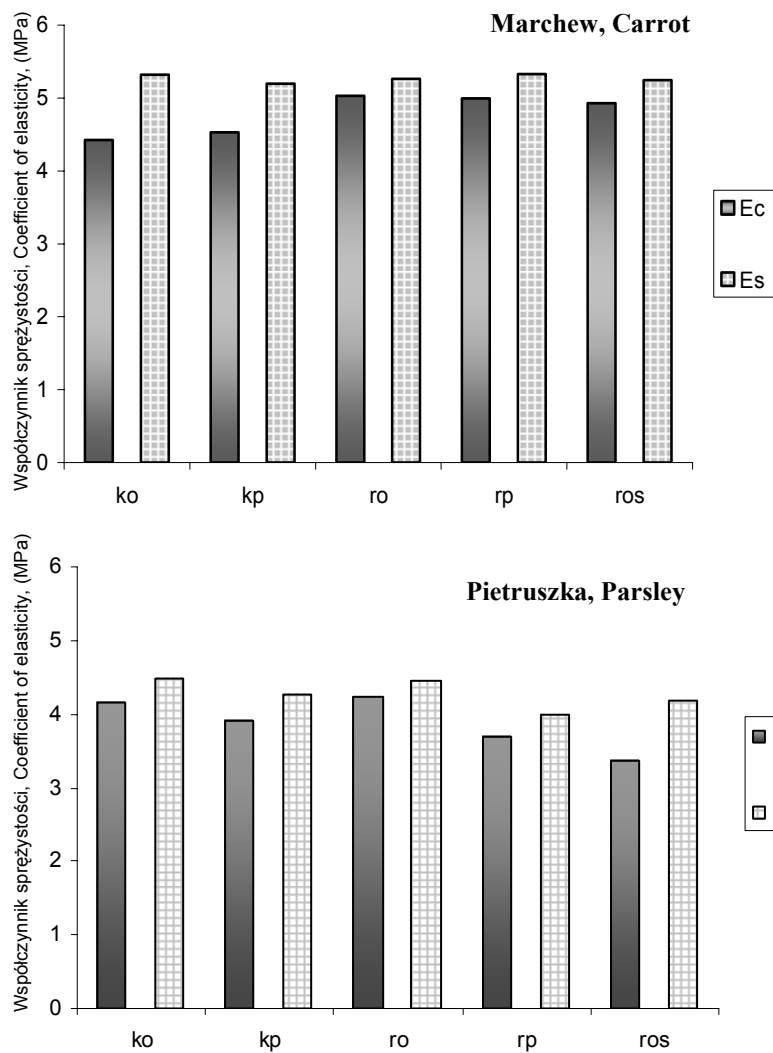
Zestawienie równań empirycznych regresji nieliniowej pomiędzy wartościami średnimi współczynnika E_C oraz odkształceniem ε
 The empirical equations of nonlinear regression between mean values of the coefficient E_C and the deformation ε

Material Materiał	Równanie Equation	R ²
Burak odmiana Czerwona kula Beetroot Red ball variety	$E_C = 1,60 \cdot \ln(\varepsilon) + 6,96$	0,991
Burak odmiana Chrobry Beetroot Chrobry variety	$E_C = 1,89 \cdot \ln(\varepsilon) + 8,18$	0,995
Burak odmiana Nochowski Beetroot Nochowski variety	$E_C = 1,59 \cdot \ln(\varepsilon) + 7,82$	0,999
Burak odmiana Okrągły Cc. Beetroot Okrągły Cc. Variety	$E_C = 1,71 \cdot \ln(\varepsilon) + 7,97$	0,998
Burak odm. Opolski Beetroot Opolski var.	$E_C = 1,68 \cdot \ln(\varepsilon) + 8,22$	0,997
Seler Celery	$E_C = 0,49 \cdot \ln(\varepsilon) + 3,02$	0,994
Marchew kora Carrot bark	$E_C = 0,48 \cdot \ln(\varepsilon) + 4,63$	0,982
Marchew rdzeń Carrot core	$E_C = 1,48 \cdot \ln(\varepsilon) + 7,57$	0,978
Pietruszka kora Parsley bark	$E_C = 0,65 \cdot \ln(\varepsilon) + 4,89$	0,992
Pietruszka rdzeń Parsley core	$E_C = 0,69 \cdot \ln(\varepsilon) + 4,62$	0,986

Na podstawie rysunku 7.5 można zauważyć, że w odniesieniu do tkanek kory i rdzenia marchwi średnie wartości współczynnika E_S są podobne. Przy obliczeniach wartości średnich współczynnika E_C pojawia się zróżnicowanie, wynikające z nieliniowości przebiegów zależności naprężenie – odkształcenie.

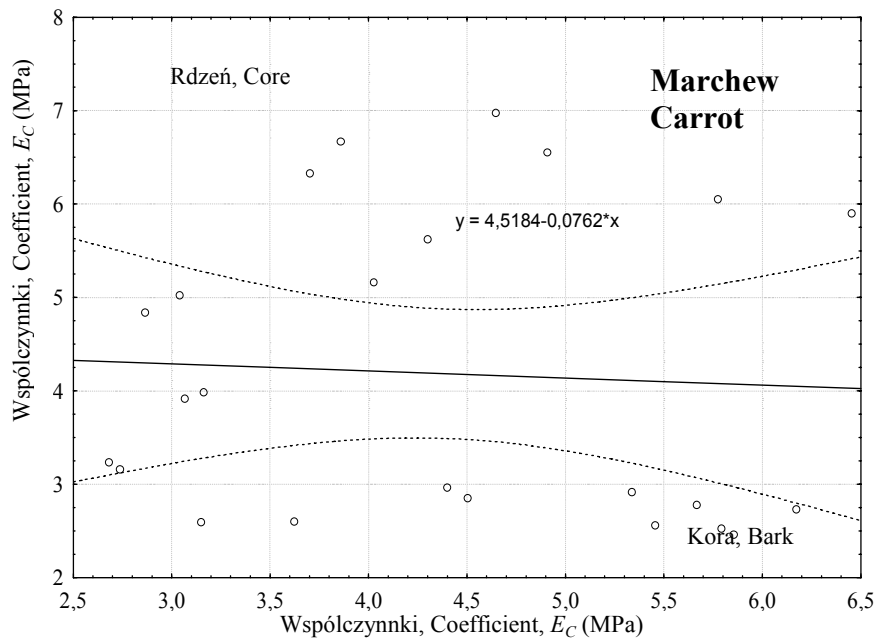
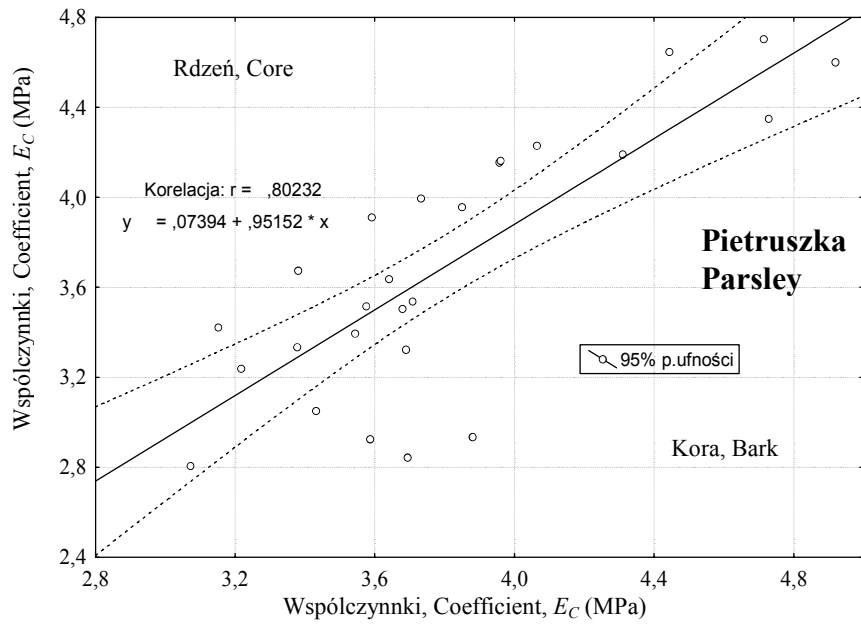
Dla celów porównawczych przeprowadzono analizę korelacji wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C dla próbek kory i rdzenia, pobranych z poszczególnych egzemplarzy marchwi i pietruszki. Diagramy zależności pokazano na rysunku 7.6.

Przedstawione na rysunku 7.6 wyniki korelacji wykazują podobieństwo cech mechanicznych tkanek korzenia pietruszki oraz brak korelacji tych właściwości w tkankach korzenia marchwi. Ich przyczyną może być niejednorodność morfologiczna tkanek.



Rys. 7.5. Porównanie średnich wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C i współczynnika obliczonego metodą siecznej E_S . Miejsca pobierania próbek oznaczono: ko – kora, kierunek osiowy; kp – kora, kierunek promieniowy; ro – rdzeń, kierunek osiowy; rp – rdzeń, kierunek promieniowy; ros – środek rdzenia, kierunek osiowy

Fig. 7.5. The comparison of mean values of the apparent coefficient of elasticity E_C and the secant modulus E_S . Sampling places marked as: ko – bark, axial direction; kp – bark, radial direction; ro – core, axial direction; rp – core, radial direction; ros – centre of core, axial direction



Rys. 7.6. Korelacje współczynników E_C dla próbek tkanek kory i rdzenia
 Fig. 7.6. Correlations of coefficients E_C for the bark and the core tissues samples

7.1.4. Parametryzacja przebiegu zależności naprężenie – odkształcenie

Wnioskowanie o właściwościach mechanicznych tkanek roślinnych na podstawie analizy zależności naprężenie – odkształcenie jest zależne od zastosowanej metody obliczania umownego współczynnika sprężystości. Na rysunku 7.7 przedstawiono przykładowe zależności pomiędzy wytrzymałością doraźną σ_{max} a wynikami obliczeń pozornego współczynnika sprężystości E_C oraz współczynników obliczonych metodą siecznej E_S i stycznej E_T , wyznaczone na podstawie tych samych przebiegów $\sigma - \varepsilon$.

Współczynnik sprężystości jest cechą charakteryzującą badany materiał. Powinien mieć wartość stałą, niezależną od obciążenia. Większa wartość współczynnika korelacji oznacza większy zakres zmian kąta nachylenia zależności $\sigma - \varepsilon$. Widoczne na rysunku 7.7 zmiany wartości średnich współczynników sprężystości można przedstawić w innej postaci (zakresowany obszar na rysunku 7.8). Linia przerywaną oznaczono zależność dla współczynnika sprężystości równego 7 MPa.

Na podstawie zestawienia (rys. 7.8) można stwierdzić, że współczynnik E_C w większym stopniu posiada cechy stałej materiałowej niż pozostałe współczynniki.

Widoczne różnice w zapisie równań regresji (rys. 7.7) świadczą o obecności różnych zjawisk towarzyszących odkształceniom. Bezpośrednia obserwacja przebiegu deformacji próbki walcowej wykazuje, że oprócz zmian wysokości i rozmiarów poprzecznych mogą wystąpić także skręcenia, wybożenia, pęknięcia obwodowe, intensywny wypływ cieczy, itp. Szczególne znaczenie mają zjawiska konsolidacji i filtracji, których skutki w postaci pozornego umocnienia materiału można obserwować podczas cyklicznego obciążania i odciążania próbek.

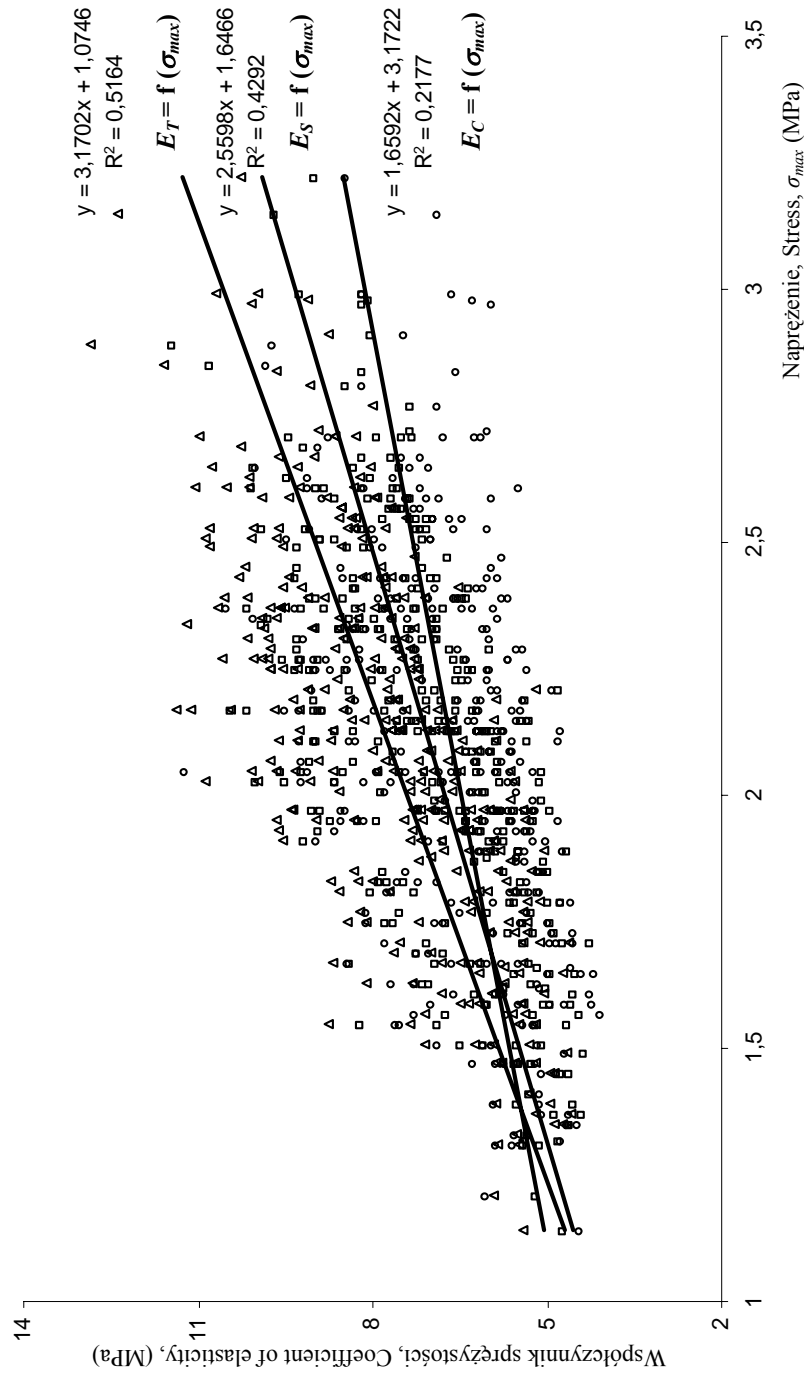
Z założeń przyjętego modelu wynika, że współczynnik E_C jest odwzorowaniem rzeczywistego przebiegu odkształcenia. Jedynie w przypadku prawie liniowego przebiegu zależności $\sigma - \varepsilon$ współczynnik E_C będzie miał wartość porównywalną ze współczynnikiem E_S obliczonym metodą siecznej, czyli $E_C \approx E_S$. Przykładem może być zależność pokazana na rysunku 7.9.

W odniesieniu do większości badanych gatunków warzyw ze zmianą odkształcenia ε zmieniają się proporcje współczynników E_C oraz E_S . Charakterystyczne przykłady takich zależności pokazano na rysunku 7.10. Na rysunku przedstawiono także zależności naprężenie – odkształcenie, na podstawie których przeprowadzono obliczenia wartości obu współczynników.

Aby ułatwić opis charakterystycznych przebiegów zależności $\sigma - \varepsilon$ wprowadzono pojęcie umownego wskaźnika W_p . Wskaźnik ten jest wyznaczany na podstawie zależności:

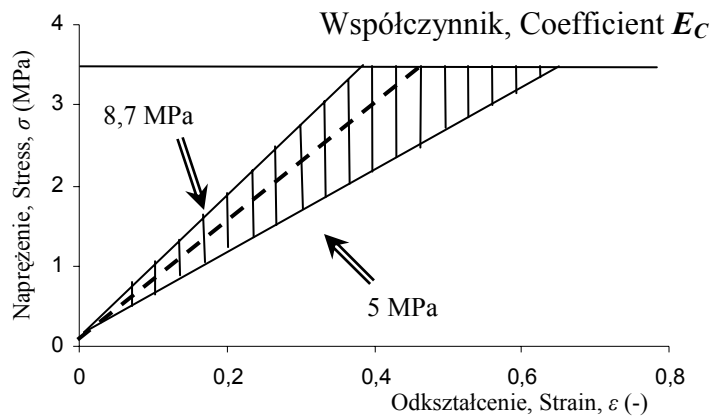
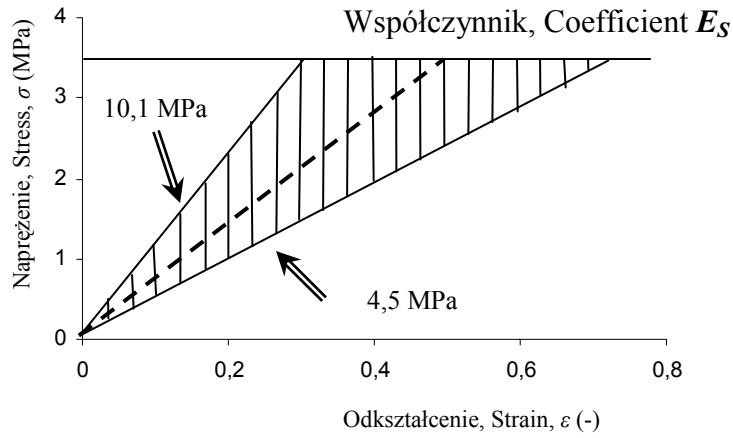
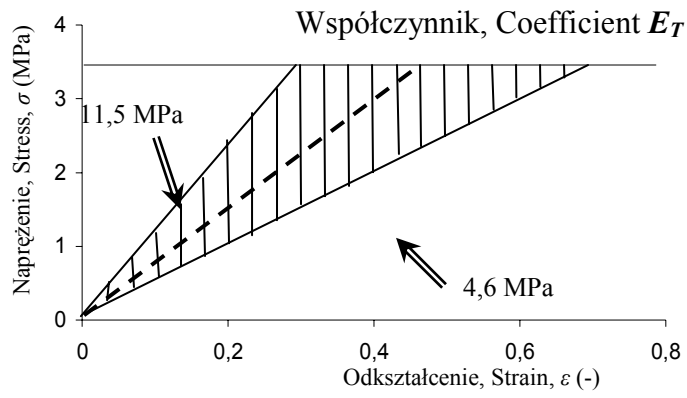
$$W_p = \frac{E_C}{E_S} \quad (7.1)$$

Na podstawie rysunku 7.10 można zauważyć, że wartość wskaźnika W_p mniejsza od jedności dotyczy przypadku, w którym ze wzrostem odkształcenia następuje zwiększenie wartości współczynników E_C oraz E_S . Można to interpretować jako wystąpienie pozornego umocnienia materiału. Jeśli wskaźnik W_p jest większy od jedności wartości współczynników sprężystości sukcesywnie maleją wraz ze wzrostem odkształcenia. Zachowanie takie charakteryzuje materiały podatne na odkształcenia plastyczne.

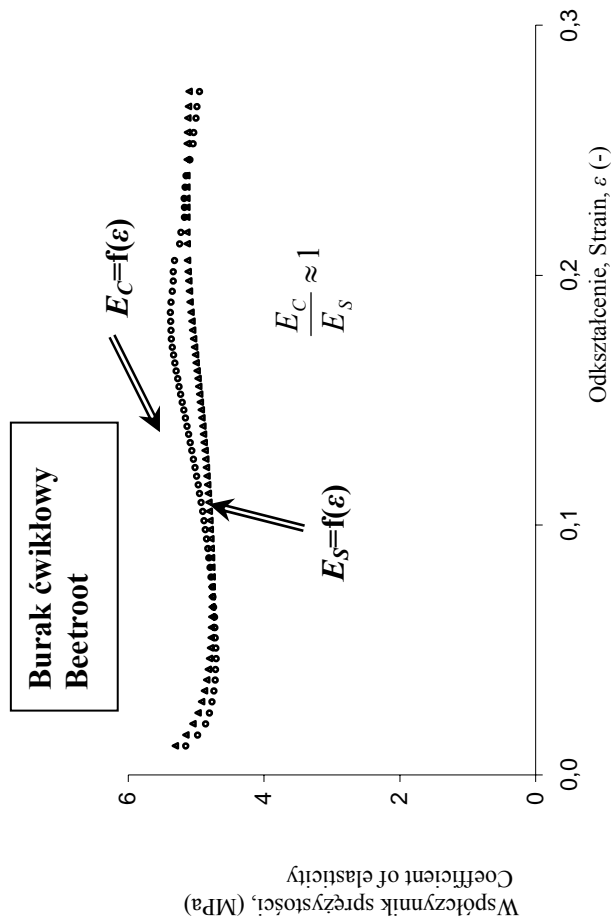


Rys. 7.7. Zależności wartości pozornego współczynnika sprężystości E_C oraz współczynników obliczonych metodą siecznej E_S i stycznej E_T od wytrzymałości doraźnej σ_{max} : test ściskania tkanek buraka ćwikłowego

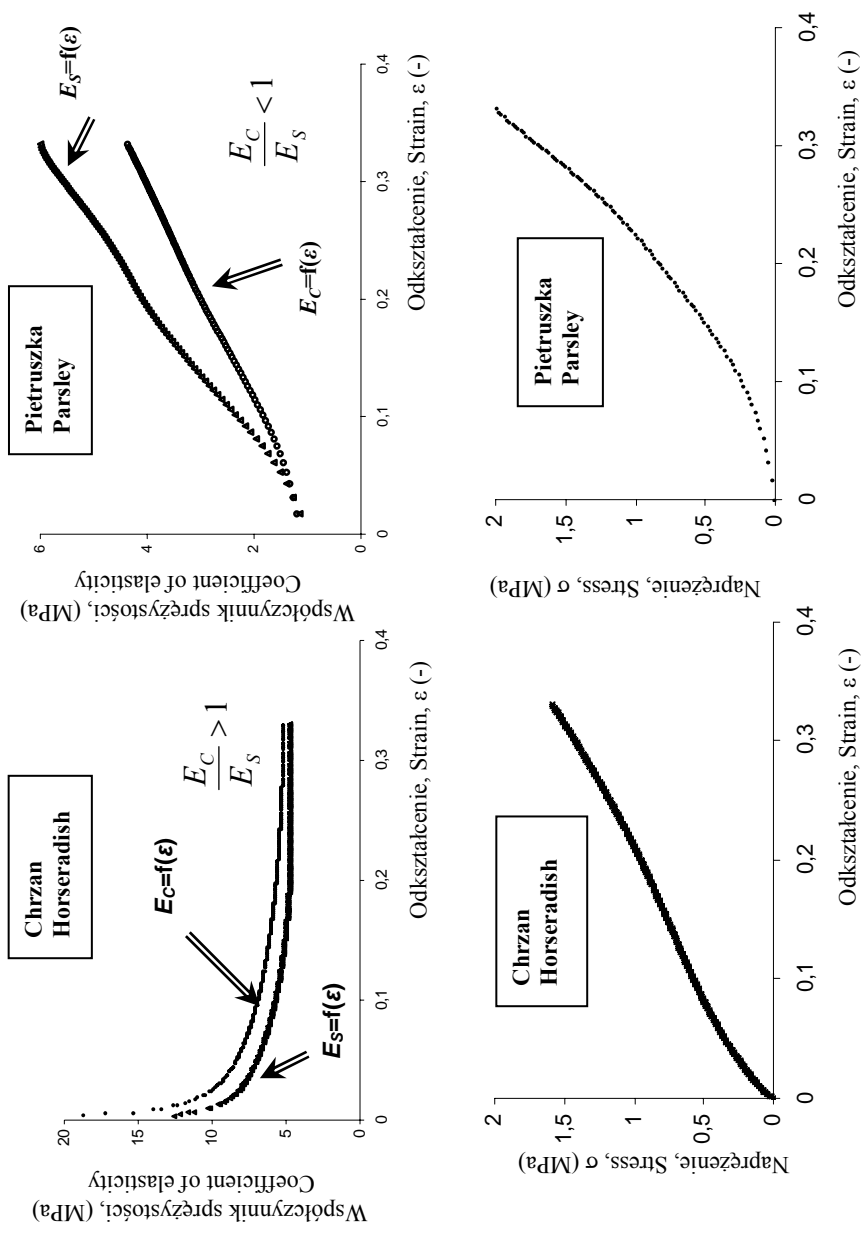
Fig. 7.7. Dependences of values of the apparent coefficient of elasticity E_C , the secant modulus E_S and the tangent modulus E_T on ultimate stress σ_{max} : the compression test of beetroot tissues



Rys. 7.8. Zakres zmian wartości średnich współczynników sprężystości
 Fig. 7.8. The range of mean values changes of coefficients of elasticity



Rys. 7.9. Zależność wartości współczynników sprężystości E_C oraz E_S od odkształcenia ϵ
 Fig. 7.9. Dependence of coefficients of elasticity E_C and E_S on the strain ϵ



Rys. 7.10. Zależność wartości współczynników sprężystości E_C oraz E_S od odkształcenia ϵ
 Fig. 7.10. Dependence of coefficients of elasticity E_C and E_S on the strain ϵ

Dla porównania charakterystycznych przebiegów deformacji tkanek poszczególnych gatunków warzyw w tabeli 7.4 zestawiono średnie wartości wskaźnika W_p .

Tabela 7.4

Table 7.4

Zestawienie średnich wartości współczynników E_C i E_S oraz wskaźnika W_p dla tkanek wybranych gatunków warzyw przy wytrzymałości doraźnej σ_{max}
 Tabled mean values of the coefficients E_C and E_S with the W_p – ratio for tissues of selected origins of vegetables at the ultimate strength σ_{max}

Material Material	Współczynnik Coefficient E_C (MPa)	Współczynnik Coefficient E_S (MPa)	Wskaźnik W_p W_p – ratio
Burak ćwikłowy – Beetroot	7,9	8,1	0,97
Seler – Celery	2,9	3,4	0,86
Rzodkiew – Radish	5,8	6,5	0,88
Rzodkiewka – Small radish	3,7	4,5	0,83
Chrzan – Horseradish	5,2	4,9	1,06
Marchew – Carrot	4,9	5,5	0,89
Pietruszka – Parsley	4,2	4,7	0,89
Ziemiak – Potato	2,7	3,2	0,84
Kalarepa – Kohlrabi	3,4	4,4	0,78
Kalafior – Cauliflower	3,5	4,4	0,79
Brokuł – Broccoli	2,5	3,1	0,78

Jak można zauważyć na podstawie tabeli 7.4 większość badanych gatunków warzyw charakteryzuje narastanie oporu mechanicznego tkanek ze wzrostem ich odkształcenia. Intensywność przebiegu tych zjawisk nie jest jednakowa. Stosunkowo największe zmiany są zauważalne w odniesieniu do tkanek warzyw z rodziny kapustnych.

7.1.5. Współzależność właściwości mechanicznych tkanek warzyw

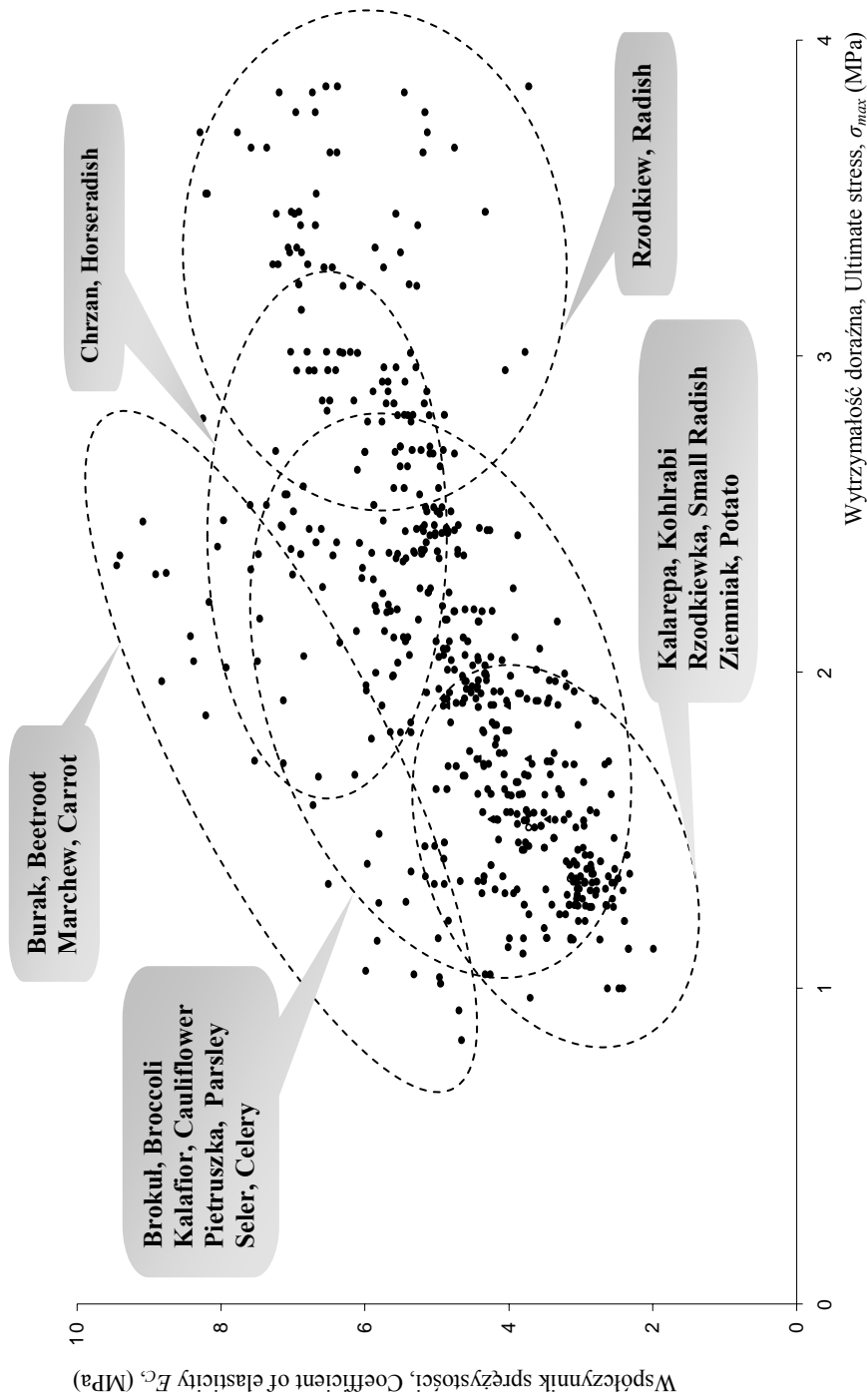
Do wykazania różnic pomiędzy właściwościami mechanicznymi tkanek, pobranych z jedenastu gatunków warzyw na rysunku 7.11 zestawiono wyniki obliczeń pozornego współczynnika sprężystości E_C oraz wytrzymałości doraźnej σ_{max} . Ogólnie można stwierdzić, że w większości przypadków współczynnik E_C mieści się w przedziale od 2 MPa do 5 MPa i nie przekracza 10 MPa. Wartościom tym odpowiada wytrzymałość doraźna σ_{max} zawierająca się w granicach od 1 MPa do 3 MPa, wyjątkowo dochodząca do 4 MPa.

Do przybliżonego opisanie zależności pomiędzy współczynnikiem E_C a wytrzymałością doraźną σ_{max} przyjęto empiryczne równanie prostej. Uwzględniając wszystkie wyniki (rys. 7.11) ogólne równanie regresji można zapisać w postaci:

$$E_C = 1,678 \cdot \sigma_{max} + 1,57 \quad (R^2 = 0,527) \quad (7.2)$$

Dla porównania z wynikami innych badaczy rozważono również zapis w postaci równania potęgowego:

$$\sigma_{max} = 0,98 \cdot E_C^{0,59} \quad (R^2 = 0,638) \quad (7.3)$$



Rys. 7.11. Korelacje pomiędzy poziomym współczynnikiem sprężystości E_c a wytrzymałością doraźną σ_{max}
 Fig. 7.11. Correlations between the apparent coefficient of elasticity E_c and the ultimate stress σ_{max}

Zapis równania (7.3) różni się od podanej przez Blahovca (1989) zależności, zapisanej w postaci $\sigma = 0,2 \cdot E^{0,75}$. W tym przypadku współczynnik sprężystości E wyznaczano metodą stycznej oraz przyjęto kryterium odkształcenia na poziomie 5%.

Zestawienie równań charakterystycznych dla tkanek poszczególnych gatunków warzyw zamieszczono w tabeli 7.5.

Tabela 7.5

Table 7.5

Zestawienie równań regresji pomiędzy pozornym współczynnikiem sprężystości E_C oraz wytrzymałością doraźną σ_{max}

The equations of regressions between the apparent coefficient of elasticity E_C and the ultimate strength σ_{max}

Material – Material	Równania – Equations
Burak ćwikłowy – Beetroot	$E_C = 1,08 \cdot \sigma_{max} + 4,73$
Seler – Celery	$E_C = 1,87 \cdot \sigma_{max} + 0,57$
Rzodkiew – Radish	$E_C = 0,22 \cdot \sigma_{max} + 4,38$
Rzodkiewka – Small radish	$E_C = 1,52 \cdot \sigma_{max} + 1,08$
Chrzan – Horseradish	$E_C = 1,12 \cdot \sigma_{max} + 2,33$
Marchew – Carrot	$E_C = 0,22 \cdot \sigma_{max} + 4,78$
Pietruszka – Parsley	$E_C = 1,51 \cdot \sigma_{max} + 1,36$
Ziemniak – Potato	$E_C = 1,24 \cdot \sigma_{max} + 0,71$
Kalarepa – Kohlrabi	$E_C = 1,15 \cdot \sigma_{max} + 1,35$
Kalafior – Cauliflower	$E_C = 1,28 \cdot \sigma_{max} + 1,12$
Brokuł – Broccoli	$E_C = 1,37 \cdot \sigma_{max} + 1,28$

Jak wcześniej wspomniano współczynnik sprężystości można traktować jako stałą materiałową, jeśli jego wartość będzie niezależna od obciążenia. Z zestawienia zamieszczonego w tabeli 7.5 można zauważyć, że warunek ten będzie spełniony, jeśli na wartość współczynnika E_C decydujący wpływ będzie miał człon stały równania. Z uwagi na stosunkowo niewielki zakres zmian wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} dotyczy to tkanek buraka ćwikłowego, rzodkwi, marchwi i chrzanu. W odniesieniu do innych gatunków warzyw próbki o większej wytrzymałości charakteryzują się także większą wartością współczynnika E_C . Jest to, oczywiście, konsekwencja zmian właściwości mechanicznych materiału w miarę narastania odkształcenia (tab. 7.2).

7.1.6. Znaczenie miejsca i sposobu pobierania próbek tkanek

Na podstawie przeprowadzonych testów wytrzymałości doraźnej określono znaczenie miejsca i sposobu pobierania próbek z korzeni warzyw o kształcie kulistym. Uwzględ-

niano znaczenie odmiany i wielkości badanych egzemplarzy roślin. Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji dla próbek pobranych z korzeni buraka ćwikłowego i selera zamieszczono w tabeli 7.6.

Tabela 7.6

Table 7.6

Zestawienie wyników analizy wieloczynnikowej wariancji dla średnich wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} oraz pozornego współczynnika sprężystości E_C ; test ściskania
ANOVA results for mean values of the ultimate stresses σ_{max} and the apparent coefficient of elasticity E_C in compression test

Analiza wieloczynnikowej wariancji dla próbek pobranych z korzeni pięciu odmian buraka ANOVA for samples cutting out from the roots of five varieties beetroot				
Parametr Parameter	Zmienna – Variable σ_{max}		Zmienna – Variable E_C	
	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level
Kierunek – Direction	0,1	0,745	0,1	0,713
Miejsce – Place	9,6	0,001	15,4	0,000
Odmiana – Variety	11,3	0,000	7,2	0,001
Analiza wieloczynnikowej wariancji dla próbek frakcji wymiarowych korzeni buraka ANOVA for samples cutting out from the roots of six dimension-fractions beetroot				
Parametr Parameter	Zmienna – Variable σ_{max}		Zmienna – Variable E_C	
	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level
Kierunek – Direction	4,7	0,036	1,4	0,243
Miejsce – Place	1,2	0,309	3,9	0,016
Frakcja – Fraction	13,9	0,000	22,9	0,000
Analiza wieloczynnikowej wariancji dla próbek pobranych z korzeni selera odmiany Makar ANOVA for samples cutting out from the roots of celery Makar var.				
Parametr Parameter	Zmienna – Variable σ_{max}		Zmienna – Variable E_C	
	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level
Kierunek – Direction	2,9	0,103	0,2	0,663
Miejsce – Place	19,8	0,000	491,2	0,000
Frakcja – Fraction	95,2	0,000	10,2	0,001
Warstwa – Layer	7,1	0,039	0,6	0,544

Na podstawie analizy statystycznej można odrzucić hipotezę o istotnym znaczeniu orientacji tkanek w stosunku do osi podłużnej rośliny na wyniki próby doraźnej. Zauważalny jest jednak wpływ rozmiarów korzeni i odmiany rośliny. Nie bez znaczenia jest też lokalizacja tkanki w przekroju poprzecznym korzenia.

Analogiczne testy przeprowadzono na próbkach pobieranych z tkanek korzeni o kształcie walcowym. Wyniki wieloczynnikowej analizy wariancji dla próbek pobranych z korzeni marchwi i pietruszki zamieszczono w tabeli 7.7.

Zestawienie wyników analizy wieloczynnikowej wariancji dla średnich wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} oraz pozornego współczynnika sprężystości E_C ; test ściskania ANOVA results for the mean values of the ultimate stresses σ_{max} and the apparent coefficient of elasticity E_C in compression test

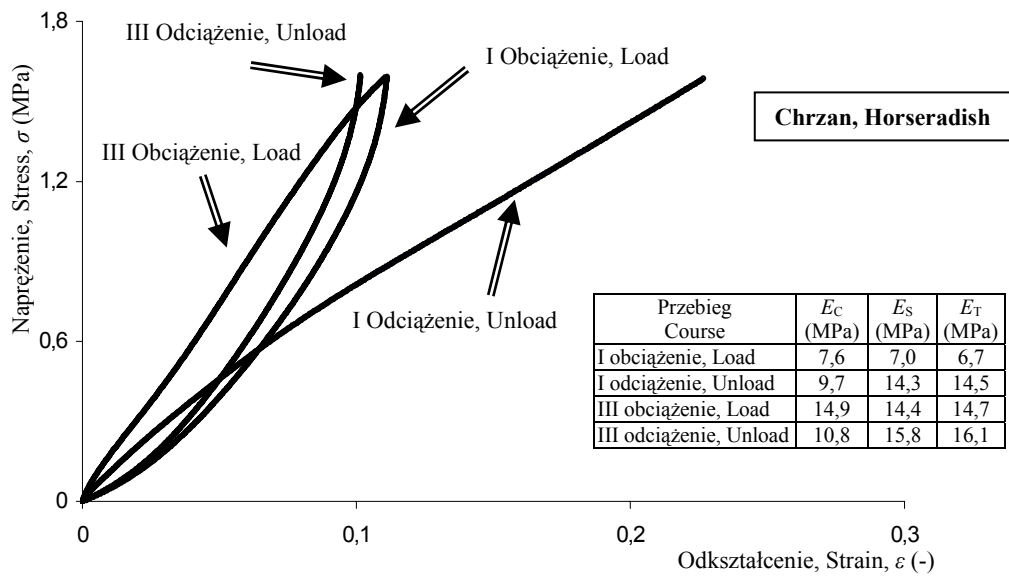
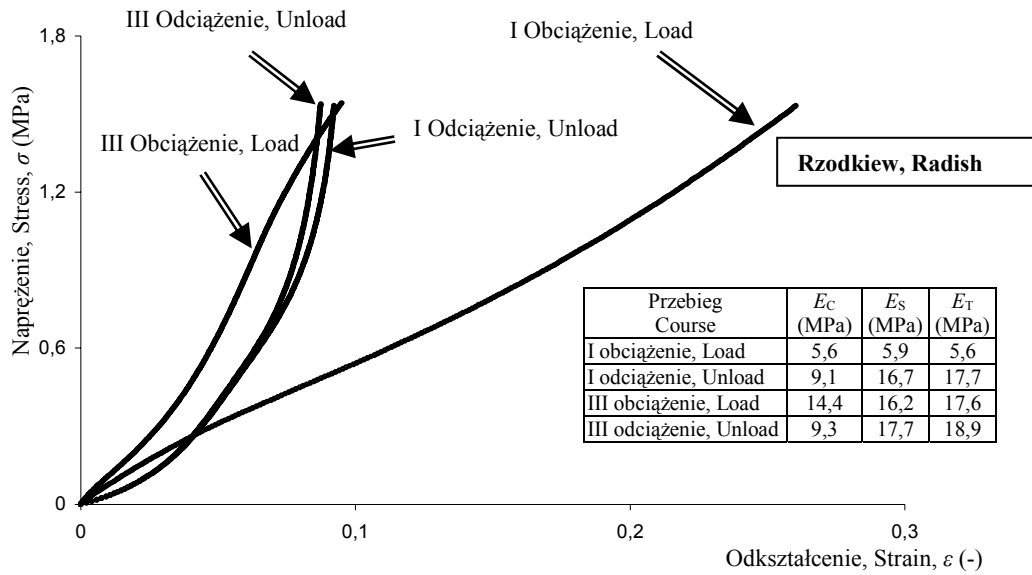
Analiza wariancji dla próbek pobranych z korzeni marchwi odmiany Bejo ANOVA for samples cutting out from the roots of carrot Bejo var.				
Parametr Parameter	Zmienna – Variable σ_{max}		Zmienna – Variable E_C	
	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level
Kierunek – Direction	15,4	0,000	20,8	0,000
Miejsce – Place	31,4	0,000	589,9	0,000
Frakcja – Fraction	1,5	0,239	2,4	0,105
Warstwa – Layer	5,3	0,011	0,2	0,792
Analiza wariancji dla próbek pobranych z korzeni pietruszki odmiany Berlińska ANOVA for samples cutting out from the roots of parsley Berlińska var.				
Parametr Parameter	Zmienna – Variable σ_{max}		Zmienna – Variable E_C	
	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level	wskaźnik F F – ratio	poziom istotności sgn level
Kierunek – Direction	177,9	0,000	89,5	0,000
Miejsce – Place	31,9	0,000	8,1	0,008
Frakcja – Fraction	3,4	0,045	4,2	0,024
Warstwa – Layer	0,4	0,667	0,6	0,549

Z powyższego zestawienia wynika, że należy odrzucić hipotezę o istotnym znaczeniu rozmiarów korzeni i lokalizacji próbek w przekroju podłużnym rośliny na wyniki testu doraźnego. Zauważalne jest znaczenie orientacji tkanki w stosunku do osi podłużnej rośliny oraz lokalizacji w przekroju poprzecznym rośliny. Potwierdza to zróżnicowanie właściwości mechanicznych tkanek kory i rdzenia (rys. 7.5).

7.2. Wyniki testu obciążenia cyklicznego

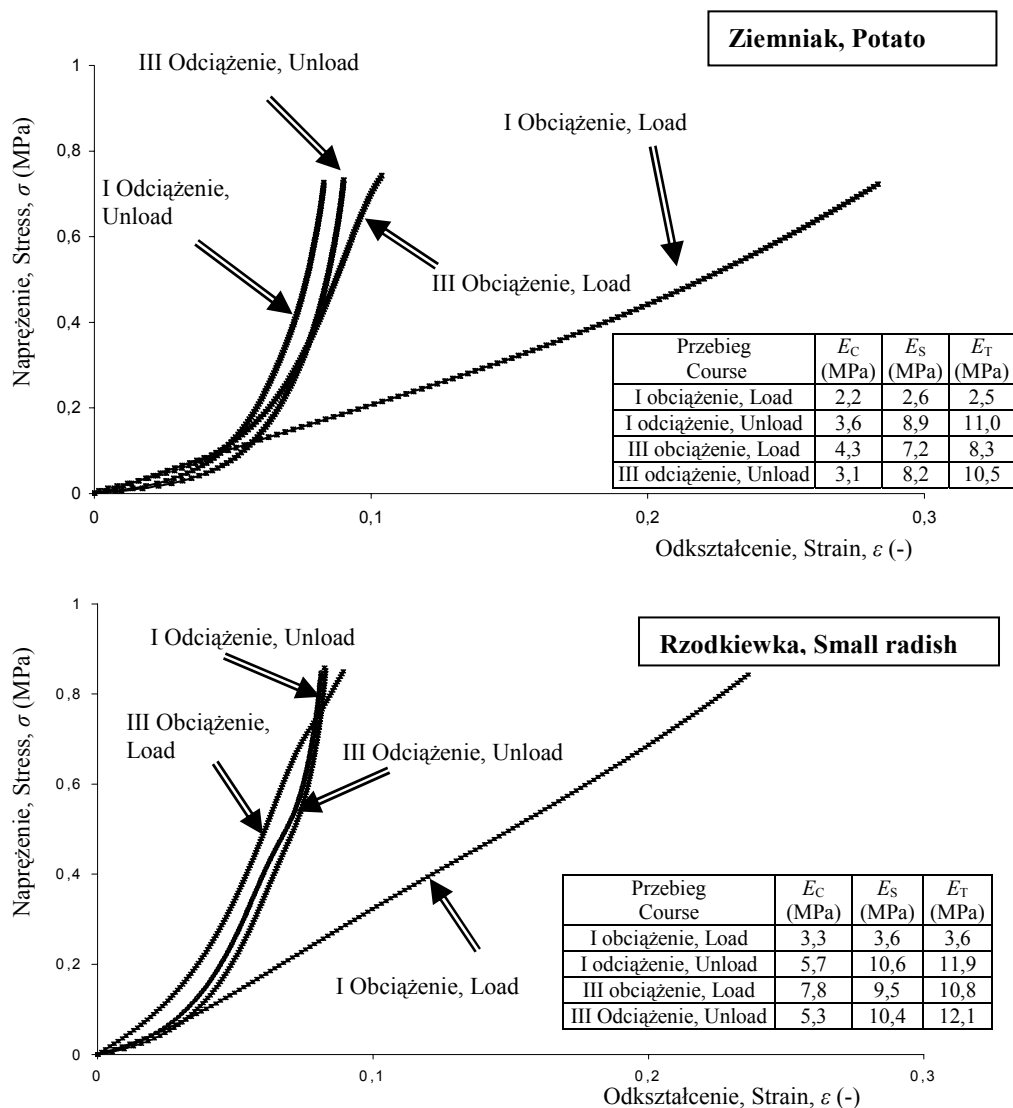
7.2.1. Porównanie właściwości mechanicznych tkanek warzyw

Zróżnicowanie właściwości mechanicznych tkanek, pokazane na rysunku 7.11, przekłada się także na niejednakową zdolność kumulacji energii sprężystej. Przykładowe zestawienie zależności naprężenie – odkształcenie dla materiału pobranego ze zgrubień chrzantu i rzodkwi (wskaźnik $W_p \approx 1$) pokazano na rysunku 7.12. Analogiczne zestawienie dla tkanek ziemniaka i rzodkiewki (wskaźnik $W_p \approx 0,8$), zamieszczono na rysunku 7.13. Na obu rysunkach zamieszczono tabele z wynikami obliczeń wartości współczynnika E_C oraz współczynników obliczonych metodą siecznej E_S i stycznej E_T . Badania realizowano przy zadanym naprężeniu odpowiadającym 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} oraz prędkości przemieszczenia równej $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Rys. 7.12. Przebiegi naprężenie – odkształcenie podczas realizacji pierwszej i trzeciej pętli histerezy tkanek wybranych warzyw

Fig. 7.12. The stress-strain courses during realization of the first and the third hysteresis loops of selected vegetables tissues



Rys. 7.13. Przebiegi naprężenie – odkształcenie podczas realizacji pierwszej i trzeciej pętli histerezy tkanek wybranych warzyw
 Fig. 7.13. The stress-strain courses during realization of the first and the third hysteresis loops of selected vegetables tissues

Na rysunkach 7.12 oraz 7.13 zauważalne jest podobieństwo przebiegu deformacji badanych próbek. W pierwszym cyklu pętli histerezy materiał wykazuje cechy ciała sprężysto-plastycznego. W następnych cyklach można zauważyć pozorne umocnienie materiału, wyrażone różnicą wartości współczynników sprężystości przy obciążeniu i odciążeniu.

Zgodnie z teorią płynięcia plastycznego przyjmuje się, że właściwości sprężyste materiału określa związek pomiędzy naprężeniami i odkształceniami podczas odciążenia (Bąk, Burczyński 2001). Jedynie w przypadku zależności liniowej zakumulowana energia sprężysta jest równa pracy odkształcenia.

Obserwowane przebiegi $\sigma - \varepsilon$ nie są prostoliniowe. Ze względu na sposób przeprowadzenia obliczeń współczynnik E_C umożliwi dokładniejsze określenie wartości rzeczywistego współczynnika sprężystości, w porównaniu z umownie wyznaczanymi współczynnikami E_S i E_T .

W tabeli 7.8 zamieszczono wyniki obliczeń średnich wartości współczynników sprężystości dla tkanek jedenastu gatunków warzyw. Badania prowadzono do momentu pojawienia się naprężenia odpowiadającego 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Tabela 7.8

Table 7.8

Porównanie średnich wartości współczynnika E_C i współczynników obliczonych metodą siecznej

E_S oraz stycznej E_T w warunkach obciążenia cyklicznego

The mean values of the coefficient E_C as compared with the secant modulus E_S and the tangent modulus E_T at a cyclical load

Materiał Material	Pętla histerezy Hysteresis loop	Obciążenie – Load			Odciążenie – Unload		
		E_C (MPa)	E_S (MPa)	E_T (MPa)	E_C (MPa)	E_S (MPa)	E_T (MPa)
Burak ćwikłowy Beetroot	I	5,5	5,7	5,9	6,3	11,7	14,0
	III	7,8	10,7	12,4	6,5	11,9	14,2
Seler Celery	I	3,4	3,6	4,1	3,2	5,2	7,1
	III	4,9	6,0	4,1	3,4	6,6	7,1
Rzodkiew Radish	I	5,4	5,7	5,4	10,1	17,5	19,1
	III	15,4	16,9	18,3	10,4	18,6	20,1
Rzodkiewka Small radish	I	3,0	3,4	3,6	5,2	10,1	11,5
	III	7,1	9,1	10,2	4,8	10,0	11,9
Chrzan Horseradish	I	6,7	6,5	6,6	8,7	13,3	13,8
	III	13,0	13,0	13,5	9,1	14,3	15,0
Marchew kora Carrot bark	I	3,2	3,5	3,4	4,2	7,0	7,0
	III	6,1	6,7	6,6	4,4	7,3	7,4
Marchew rdzeń Carrot core	I	3,8	3,9	3,9	5,7	8,1	8,5
	III	6,3	7,5	7,7	5,7	8,3	8,8
Pietruszka kora Parsley bark	I	3,2	3,6	3,7	3,7	6,6	7,3
	III	6,1	7,3	7,5	3,8	7,1	7,7
Pietruszka rdzeń Parsley core	I	3,2	3,9	4,2	3,6	6,1	6,8
	III	5,1	6,5	6,9	3,7	6,1	7,0
Ziemniak Potato	I	2,3	2,6	2,5	4,2	10,2	12,1
	III	5,9	8,6	9,8	4,3	9,7	11,8
Kalarepa Kohlrabi	I	3,5	4,3	4,9	4,5	7,4	8,1
	III	6,1	7,1	7,4	4,6	7,6	8,2
Kalafior Cauliflower	I	4,2	3,9	3,9	4,1	7,9	8,7
	III	6,0	7,4	8,2	3,9	8,0	8,9
Brokuł Broccoli	I	4,6	4,8	5,1	5,3	9,1	9,7
	III	7,0	8,7	9,4	5,5	9,4	10,1

Z powyższego porównania można zauważyć ograniczoną przydatność metody siecznej i stycznej do obliczeń współczynnika sprężystości. Współczynnik E_C jest miarą wartości skutecznej oporu mechanicznego, współczynniki E_S i E_T określają wartość chwilową. Jest to powodem zróżnicowania wartości obliczonych współczynników sprężystości, które można interpretować jako zmiany właściwości mechanicznych badanej tkanki. Ze względu na zależność współczynnika E_C od pracy odkształcenia w lepszym stopniu odzwierciedla on zmiany cech materiału poddanego obciążeniom cyklicznym.

Z zestawienia pokazanego w tabeli 7.8 wynika, że wyróżniona pogrubioną czcionką wartość współczynnika E_C w fazie nawrotu sprężystego przy odciążeniu może być traktowana jako stała materiałowa.

7.2.2. Wpływ obciążenia na zdolność kumulacji energii sprężystej

Podczas realizacji testu doraźnego stwierdzono zależność pomiędzy wartością współczynnika E_C i wytrzymałością doraźną σ_{max} (tab. 7.5). Przeprowadzono pomiary do wyznaczenia zależności wartości współczynnika E_C od naprężenia σ w kolejnych cyklach pętli histerezy. Zestawienie wyników dla tkanek czterech gatunków warzyw zamieszczono w tabeli 7.9.

W tabeli 7.9 można zauważyć, że zmiany naprężenia mają istotny wpływ na średnie wartości współczynnika E_C w pierwszym cyklu obciążenia. Zależność ta nie jest jednokowa w odniesieniu do tkanek poszczególnych gatunków warzyw (Bohdziewicz 2002b, 2003). Natomiast cechą charakterystyczną w fazie odciążenia są stosunkowo niewielkie zmiany wartości współczynnika E_C , co świadczy o zachowaniu zbliżonych potencjalnych możliwości kumulacji energii sprężystej w całym zakresie odkształcenia. W powyższej tabeli dane te zostały wyróżnione pogrubioną czcionką.

Do parametryzacji zdolności kumulacji energii sprężystej w tkankach miększu warzyw przyjęto wskaźnik elastyczności W_{el} , obliczany na podstawie równania:

$$W_{el} = \frac{U_{RS}}{U_R} \quad (7.4)$$

gdzie:

U_{RS} – akumulowana energia wydatkowana podczas powrotu sprężystego, U_R – energia całkowita odkształcenia przy obciążeniu.

Energia sprężysta jest częścią bilansu energetycznego uwzględniającego energię odkształceń trwałych i sprężystych oraz ogólne straty, związane ze zjawiskiem filtracji, tarcieniem wewnętrznym oraz tarcieniem na styku próbki i przyrządu pomiarowego.

Dla każdego egzemplarza rośliny wyznaczano zależność wskaźnika elastyczności W_{el} od wartości naprężenia w zakresie od 10% do 90% wartości σ_{max} w przebiegu pierwszej i trzeciej pętli histerezy. Przykładowe zestawienie średnich wartości wskaźnika W_{el} dla tkanek buraka ćwikłowego pokazano na rysunku 7.14.

Każdy punkt na przedstawionym diagramie oznacza średnią dla wszystkich powtórzeń. Można zauważyć, że w pierwszej pętli histerezy przy naprężeniu odpowiadającym 10% wartości σ_{max} energia sprężysta stanowi około 50% całkowitych nakładów pracy odkształcenia. W trzeciej pętli energia sprężysta stanowi prawie 70% tych nakładów.

Ze wzrostem naprężenia pojawiają się skutki odkształceń plastycznych, udział energii sprężystej w ogólnym bilansie pracy odkształcenia sukcesywnie maleje.

Zależność tę można opisać równaniem empirycznym:

$$W_{el} = a \cdot p_{\sigma}^b \quad (7.5)$$

gdzie:

a , b – współczynniki równania; p_{σ} – umowny przelicznik o wartości od 0,1 do 0,9.

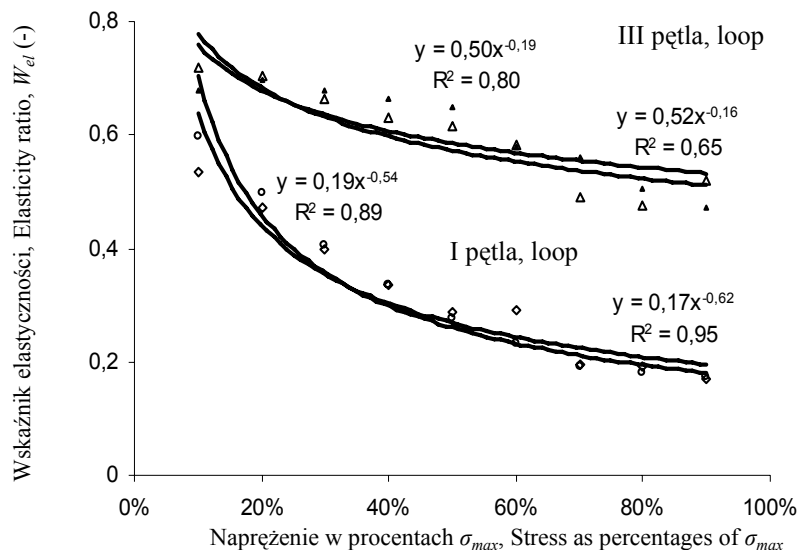
Przelicznik p_{σ} określa stosunek naprężenia do wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Tabela 7.9

Table 7.9

Wartości średnie współczynnika E_C dla różnych wartości naprężenia σ
The mean values of the coefficient E_C for different values of the stress σ

Materiał Material	Naprężenie Stress	Współczynnik – Coefficient, E_C (MPa)			
		I pętla histerezy First hysteresis loop		III pętla histerezy Third hysteresis loop	
		obciążenie load	odciążenie unload	obciążenie load	odciążenie unload
Burak ćwikłowy Beetroot	30% σ_{max}	4,1	5,9	7,9	6,2
	50% σ_{max}	4,7	6,3	8,7	6,5
	70% σ_{max}	5,2	6,7	9,0	6,5
	90% σ_{max}	5,4	6,5	8,9	6,4
Seler Celery	30% σ_{max}	3,1	2,8	4,2	2,9
	50% σ_{max}	3,5	2,9	4,1	2,9
	70% σ_{max}	3,6	2,8	3,6	2,8
	90% σ_{max}	3,6	2,7	3,7	2,6
Marchew kora Carrot bark	30% σ_{max}	3,7	3,4	6,6	3,5
	50% σ_{max}	4,1	3,7	6,5	3,8
	70% σ_{max}	4,3	3,8	5,2	3,9
	90% σ_{max}	4,7	3,9	5,1	3,9
Marchew rdzeń Carrot core	30% σ_{max}	6,7	6,4	8,5	6,2
	50% σ_{max}	7,8	6,2	8,5	6,2
	70% σ_{max}	7,8	6,3	8,0	6,2
	90% σ_{max}	7,8	6,3	9,0	6,2
Pietruszka kora Parsley bark	30% σ_{max}	3,1	3,5	4,2	3,7
	50% σ_{max}	3,2	3,4	4,4	3,9
	70% σ_{max}	3,9	3,6	4,8	3,6
	90% σ_{max}	4,5	3,3	5,3	3,3
Pietruszka rdzeń Parsley core	30% σ_{max}	3,9	3,4	4,0	3,5
	50% σ_{max}	4,0	3,7	4,4	3,6
	70% σ_{max}	4,0	3,6	4,3	3,8
	90% σ_{max}	5,4	3,3	4,4	3,4



Rys. 7.14. Zależność średnich wartości wskaźnika elastyczności W_{el} od naprężenia; próbki tkanek buraka ćwikłowego pobrane w kierunku osiowym i promieniowym
 Fig. 7.14. Dependence of mean values of the elasticity ratio W_{el} on stress; beetroot tissue samples obtained followed axial and radial direction

Zapis równania (7.5) umożliwia określenie zmniejszenia potencjalnych zdolności kumulacji energii sprężystej przy narastającym naprężeniu. Zestawienie równań empirycznych dla tkanek wybranych warzyw zamieszczono w tabeli 7.10.

Zapis równań empirycznych (tab. 7.10) wykazuje podobieństwo właściwości mechanicznych tkanek selera i pietruszki. Charakterystyczne są też niejednakowe formuły równań opisujących zachowanie się tkanek kory i rdzenia marchwi podczas obciążeń cyklicznych. Z powyższego zestawienia wynika, że zdolność kumulacji energii sprężystej wyrażona wskaźnikiem W_{el} może być wyróżnikiem cech mechanicznych tkanek warzyw.

7.2.3. Wpływ prędkości odkształcenia

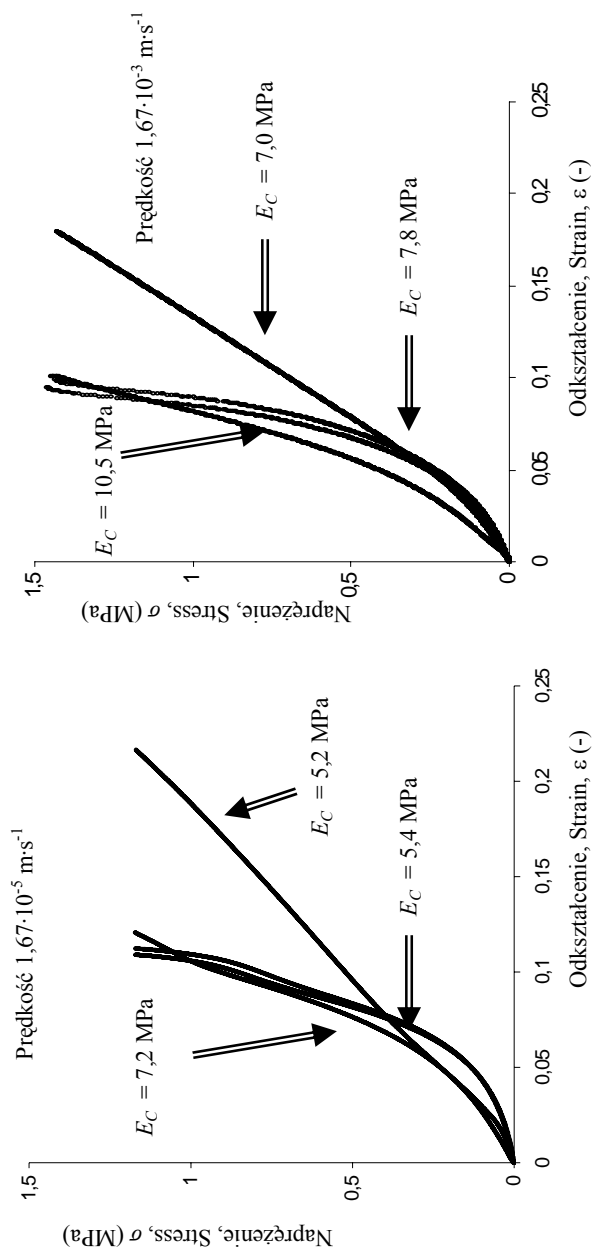
Przykładowe zestawienie zależności naprężenie – odkształcenie przy naprężeniu odpowiadającym 50% wartości σ_{max} dla dwóch prędkości obciążenia i odciążenia tkanki rzodkwi przedstawiono na rysunku 7.15.

Stwierdzono, że wzrost prędkości deformacji próbki skutkuje zwiększeniem wytrzymałości doraźnej σ_{max} . Większa jest też wartość pozornego współczynnika sprężystości E_C . W przeprowadzonych eksperymentach nie stwierdzono zmian wartości wskaźnika elastyczności W_{el} nawet przy zwiększeniu prędkości przemieszczenia głowicy do $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W pierwszej pętli histerezy wskaźnik elastyczności W_{el} był równy 0,28 oraz odpowiednio 0,60 w trzeciej pętli. Analogiczna prawidłowość występowała także w odniesieniu do tkanek pozostałych gatunków warzyw.

Tabela 7.10
Table 7.10

Empiryczne równania zależności pomiędzy wartością średnią wskaźnika elastyczności W_{el} i umownym przelicznikiem p_{σ}
The empirical equations of relations between mean values of the elasticity ratio W_{el} and conventional rate p_{σ}

Material	Cykl Cycle	Równanie Equation
Burak ćwikłowy, kierunek osiowy Beetroot, axial direction	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,17 \cdot p_{\sigma}^{-0,62}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,53 \cdot p_{\sigma}^{-0,16}$
Burak ćwikłowy, kierunek promieniowy Beetroot, radial direction	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,19 \cdot p_{\sigma}^{-0,54}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,5 \cdot p_{\sigma}^{-0,19}$
Seler kora Celery, bark	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,32 \cdot p_{\sigma}^{-0,37}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,47 \cdot p_{\sigma}^{-0,25}$
Seler rdzeń Celery, core	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,32 \cdot p_{\sigma}^{-0,36}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,46 \cdot p_{\sigma}^{-0,32}$
Marchew kora Carrot, bark	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,17 \cdot p_{\sigma}^{-0,65}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,37 \cdot p_{\sigma}^{-0,39}$
Marchew rdzeń Carrot core	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,22 \cdot p_{\sigma}^{-0,65}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,52 \cdot p_{\sigma}^{-0,23}$
Pietruszka kora Parsley, bark	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,32 \cdot p_{\sigma}^{-0,41}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,51 \cdot p_{\sigma}^{-0,24}$
Pietruszka rdzeń Parsley, core	I pętla, Loop	$W_{el} = 0,33 \cdot p_{\sigma}^{-0,38}$
	III pętla, Loop	$W_{el} = 0,53 \cdot p_{\sigma}^{-0,19}$



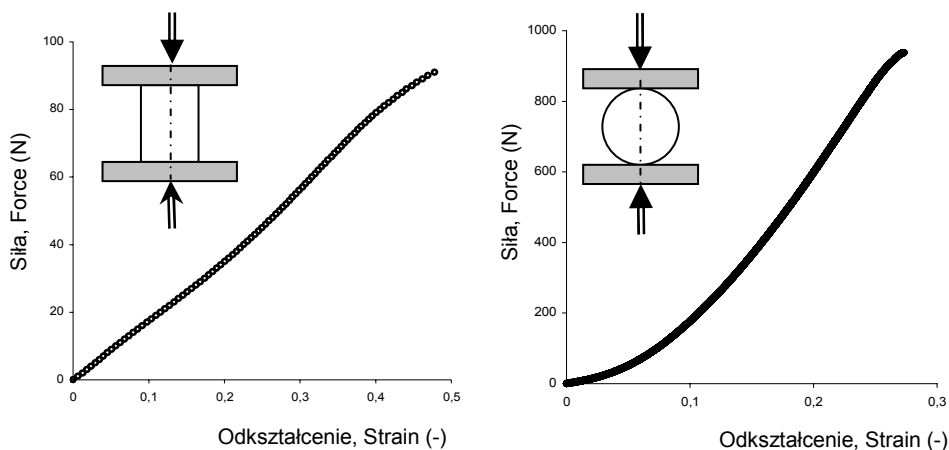
Rys. 7.15. Zależności naprężenie – odkształcenie dla dwóch prędkości odkształcenia przy realizacji pierwszej i trzeciej pętli histerezy tkanek rzodkwi

Fig. 7.15. The stress-strain courses with two speeds of deformation in the first and the third hysteresis loops of radish tissues

7.3. Wyniki testów reologicznych

7.3.1. Test relaksacji naprężeń

Wielu badaczy przyjęło założenie, że do opisanie cech reologicznych tkanki warzyw można wykorzystać modele lepkościowości liniowej. Opracowano je dla odkształceń nieprzekraczających 5% wysokości próbki w kształcie walca. Brak jest informacji, w jakiej mierze odnosi się to do rzeczywistych stanów naprężeń podczas składowania lub przetwarzania warzyw np. o kształcie kulistym? Przykładowe zależności siła – odkształcenie względne dla próbek w kształcie walca i kuli pokazano na rysunku 7.16. W obu przypadkach odkształcenie względne oznacza stosunek przemieszczenia w kierunku działającej siły, odniesionego do wysokości walca lub średnicy kuli.



Rys. 7.16. Zależności siła – odkształcenie w próbkach tkanek buraka ćwikłowego

Fig. 7.16. The force vs. strain diagram for beetroot tissues samples

Odkształcenie rzędu 5% próbki walcowej pojawia się przy obciążeniu równym 9 N. Objawy kruche go zniszczenia badanego materiału pojawiają się przy dziesięciokrotnie większych wartościach siły i odkształcenia. Jeśli te proporcje odnieść do próbki o kształcie kulistym, byłoby to odkształcenie rzędu 3% przy obciążeniu równym 20 N. W odniesieniu do maksymalnej siły na poziomie 950 N jest to znikoma wartość. Dla korzeni buraka ćwikłowego o średnicy 0,05 m i masie 0,07 kg obciążenie to odpowiada składowaniu w warstwie usypowej o wysokości ok. 1 m.

Powyższe przesłanki stały się podstawą podjęcia decyzji o prowadzeniu badań na próbkach walcowych przy wstępnym naprężeniu o wartości odpowiadającej 50% σ_{max} .

Przeprowadzono testy relaksacji naprężeń w tkankach wybranych warzyw. Warianty funkcji aproksymujących przebiegi zanikania naprężeń dobierano przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów. Stwierdzono, że najlepsze dopasowanie do danych doświadczalnych mają krzywe wielomianowe zapisane w postaci:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad \text{dla } n \geq 1 \quad (7.6)$$

Występuje jednak istotny problem interpretacji parametrów takich zależności.

Z uwagi na możliwość wyznaczenia wartości współczynników sprężystości E i lepkości dynamicznej η bardziej przydatna jest regresja z wykorzystaniem funkcji wykładniczej (Bohdziewicz 2001a, 2002a, 2003c, 2003d, 2004, 2005). Umożliwia opisanie cech badanego materiału przez analogię do modeli liniowej lepkosprężystości. Zależność zmian naprężenia w funkcji czasu opisano równaniem uogólnionego modelu Maxwella:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-b_i \cdot t} \quad (7.7)$$

równaniem modelu standardowego (Zenera):

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-b_i \cdot t} + c_i \quad (7.8)$$

zapisem uogólnionego modelu Jeffreysa:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-b_i \cdot t} + d \cdot t \quad (7.9)$$

oraz zapisem modelu Burgersa $\sigma(t) = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot t + d$ (7.10)

gdzie:

$\sigma(t)$ – naprężenie; t – czas; a, b, c, d – współczynniki równania.

Do obliczeń wartości chwilowych współczynników sprężystości E_i wykorzystano prawo Hooke'a. Do obliczeń współczynników lepkości dynamicznych η_i, η_a stosowano uogólnione prawo lepkości Newtona. Obliczona lepkość pozorna η_a jest analogią lepkości rzeczywistej, mimo iż nie posiada fizycznego odpowiednika.

Ze względu na konieczność przeprowadzenia kilku testów na próbkach pobranych z jednego egzemplarza rośliny, czas testu relaksacji naprężeń ograniczono do 1500 sekund. Obserwowano przebieg zależności $\sigma(t)$ stopniowo wydłużając przedziały czasowe θ . Obliczano wartości parametrów modeli dla θ_1 (od 0 do 300 sekund), następnie dla θ_2 (od 0 do 600 sekund) itd. aż do θ_5 (od 0 do 1500 sekund). Śledzenie zmian obliczanych wartości w kolejnych przedziałach czasowych umożliwia porównanie cech lepkosprężystych badanych tkanek. Metoda ta jest analogią tzw. mechanizmu kinematograficznego Bergsona, wykorzystywanego do obserwacji procesów w naukach biologicznych np. przyrostu długości wybranych fragmentów w stosunku do całkowitego przyrostu rośliny (Smith 1968). Pomimo tego że obserwowane zmiany mają charakter skokowy, tworzą akceptowalny w metodologii układ zdarzeń o czasie nieciągłym (Wójcicki 1982).

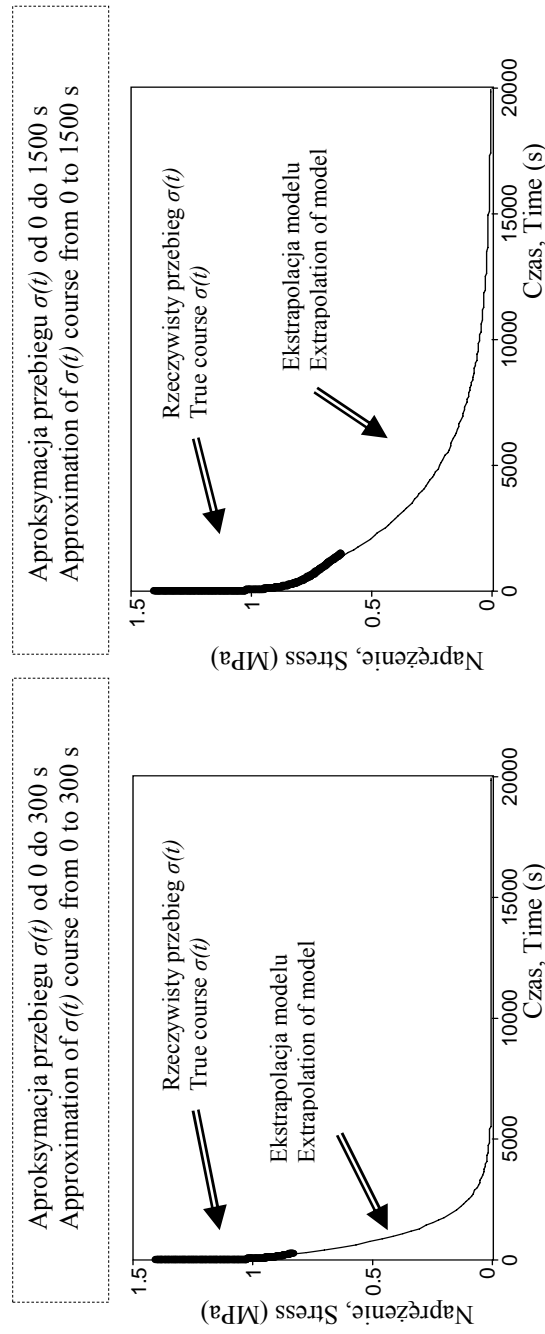
Przykładowe zestawienie wartości parametrów wybranych modeli w poszczególnych przedziałach czasowych zamieszczono w tabeli 7.11.

Na podstawie zestawienia zamieszczonego w tabeli 7.11 można zauważyć zmiany obliczonych wartości współczynników sprężystości E_i oraz współczynników lepkości η_i, η_a w miarę wydłużania czasu obserwacji. Należy podkreślić, że parametry modeli obliczono niezależnie dla każdego przedziału czasowego na podstawie tego samego przebiegu zależności $\sigma(t)$. Przykład aproksymacji dla dwóch przedziałów czasowych pokazano na rysunku 7.17.

Zestawienie parametrów wybranych modeli; test relaksacji naprężeń tkanki mięszu
buraka ćwikłowego

Tabled selected models parameters; the relaxation test of the beetroot flesh tissue

Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Maxwella czteroparametrowy – Four parameters Maxwell model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)		η_1 (MPa·s)	η_2 (GPa·s)		R^2
θ_1 (0–300)	0,8	4,7		11	8		0,993
θ_2 (0–600)	0,9	4,6		17	10		0,994
θ_3 (0–900)	0,9	4,6		22	11		0,995
θ_4 (0–1200)	1,0	4,5		26	12		0,996
θ_5 (0–1500)	1,0	4,5		29	13		0,996
Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Maxwella sześcioparametrowy – Six parameters Maxwell model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	η_1 (MPa·s)	η_2 (MPa·s)	η_3 (GPa·s)	R^2
θ_1 (0–300)	0,4	0,7	4,6	0,9	22	10	0,999
θ_2 (0–600)	0,4	0,7	4,5	1,2	29	11	0,999
θ_3 (0–900)	0,4	0,7	4,5	1,6	36	12	0,999
θ_4 (0–1200)	0,5	0,7	4,4	2,1	44	13	0,999
θ_5 (0–1500)	0,5	0,7	4,4	2,5	50	14	0,999
Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model standardowy pięcioparametrowy – Five parameters Zener model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_0 (MPa)	η_1 (MPa·s)	η_2 (GPa·s)		R^2
θ_1 (0–300)	0,5	1,1	4,0	3	0,1		0,998
θ_2 (0–600)	0,7	1,4	3,4	9	0,5		0,997
θ_3 (0–900)	0,8	1,8	2,9	11	1,1		0,997
θ_4 (0–1200)	0,8	2,2	2,5	14	1,8		0,998
θ_5 (0–1500)	0,9	2,5	2,1	17	2,8		0,998
Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Jeffreysa pięcioparametrowy – Five parameters Jeffreys model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)		η_1 (MPa·s)	η_2 (MPa·s)	η_a (GPa·s)	R^2
θ_1 (0–300)	0,4	0,7		0,9	24	19	0,999
θ_2 (0–600)	0,4	0,7		1,4	34	24	0,999
θ_3 (0–900)	0,5	0,7		2,2	48	28	0,999
θ_4 (0–1200)	0,6	0,7		3,9	75	32	0,999
θ_5 (0–1500)	0,7	0,7		5,8	110	36	0,999



Rys. 7.17. Aproksymacja zależności $\sigma(t)$ modelem Maxwella w dwóch przedziałach czasowych; test relaksacji naprężeń w tkankach buraka ćwikłowego

Fig. 7.17. Approximation of $\sigma(t)$ course by Maxwell model in two time intervals; the relaxation test of the beetroot tissues

Z zapisu równań (7.7) do (7.10) wynika, że suma wartości współczynników sprężystości jest określona przez miejsce zerowe funkcji. Wartości współczynników lepkości determinuje przewidywany limes funkcji z założoną dokładnością obliczeń. Obserwowane zmiany parametrów (tab. 7.11) są konsekwencją przyjętej metody dopasowania krzywych oraz zmiany warunków brzegowych funkcji aproksymujących w wybranym przedziale czasowym. Z matematycznego punktu widzenia zwiększenie ilości elementów w przyjętych modelach zwiększa dokładność ich dopasowania do rzeczywistych krzywych, lecz ztraca się sens fizyczny poszczególnych parametrów.

Rozpatrywane modele dotyczą reologii ciał idealnie sprężystych. Przebieg relaksacji naprężeń w tkankach warzyw jest nieco inny. W wyjaśnieniu tego faktu może być pomocny diagram pokazany na rysunku 7.14. Przy naprężeniu odpowiadającym 50% wytrzymałości doraźnej σ_{max} jedynie około 30% pracy odkształcenia zostaje zakumulowane w postaci potencjalnej energii sprężystości.

Pomimo istotnych ograniczeń w interpretacji fizycznej wartości parametrów modeli, obliczone dla wybranych przedziałów czasowych można wykorzystać do porównywania cech reologicznych tkanek różnych warzyw.

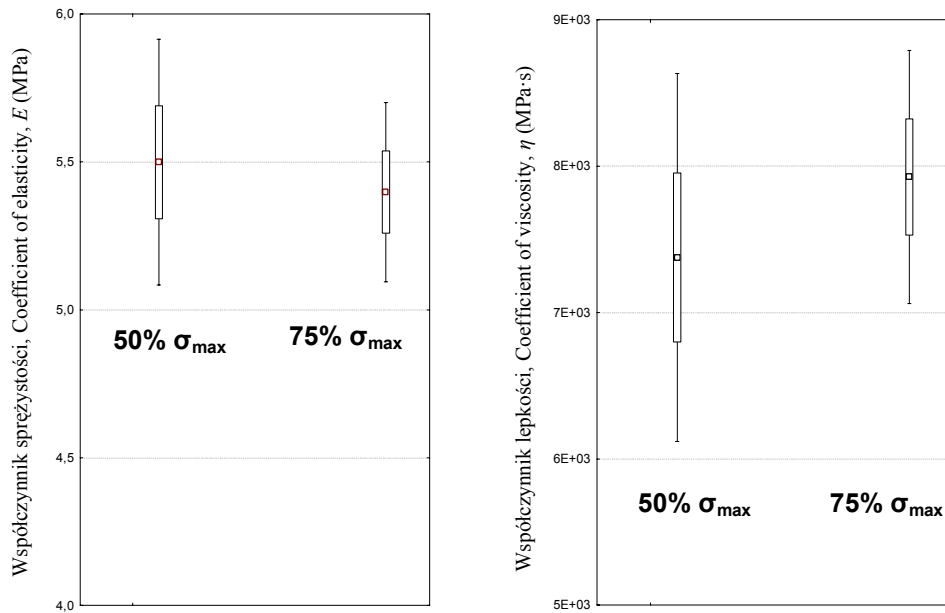
7.3.2. Wpływ obciążenia wstępnego

Do analizy przebiegu relaksacji naprężeń w tkankach w czasie 900 sekund wykorzystano dwuelementowy model Maxwella. Zadawano wstępne naprężenie odpowiadające 50% i 75% wartości σ_{max} wyznaczonej na podstawie testu doraźnego. Przedziały zmienności wartości średniej parametrów modelu dla tkanek buraka ćwikłowego przedstawiono na rysunku 7.18.

Widoczne na rysunku 7.18 szerokie pola zmian wartości współczynników E i η świadczą o niezgodności przebiegu rzeczywistej relaksacji naprężeń z rodziną krzywych modelu Maxwella. Zauważalne jest znaczenie wartości zadanego wstępnego naprężenia. Jego wzrost skutkuje zmniejszeniem rozrzutu wartości obu współczynników, co wynika ze zmniejszenia udziału energii sprężystej w ogólnym bilansie nakładów pracy odkształcenia.

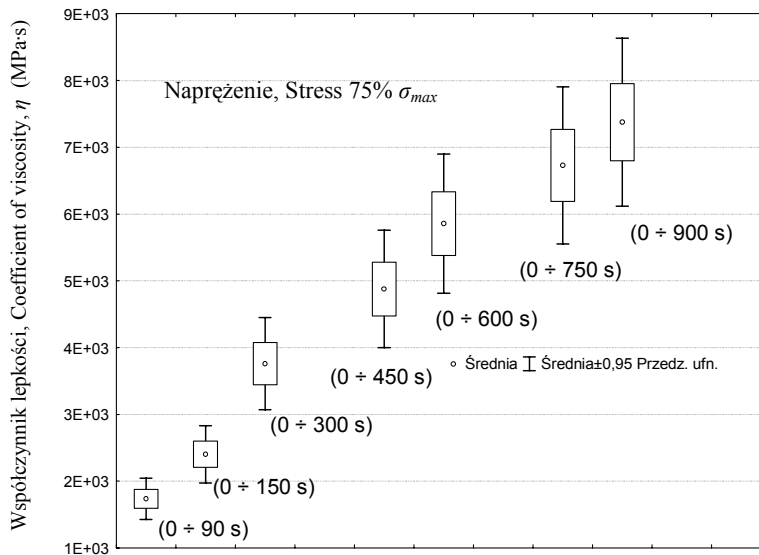
Zróżnicowanie wartości współczynnika lepkości η w różnych przedziałach czasowych pokazano na rysunku 7.19.

Można zauważyć zależność wartości średniej współczynnika η od czasu obserwacji przebiegu relaksacji naprężeń. Nie można porównać wyników obliczeń parametrów modelu w różnych przedziałach czasowych, nawet dla tego samego przebiegu zależności $\sigma(t)$. To zestawienie najlepiej odzwierciedla wątpliwe znaczenie obliczonych współczynników sprężystości i lepkości w przypadku potraktowania ich jako stałe fizyczne. Z zestawienia zamieszczonego w tabeli 7.11 wynika, że dotyczy to wszystkich modeli lepko-sprężystości liniowej. Na rysunku 7.19 widoczne są różnice szerokości przedziałów zmienności wartości współczynnika η . Świadczy to o zróżnicowaniu przebiegów zależności $\sigma(t)$ w tkankach poszczególnych egzemplarzy badanych warzyw.



Rys. 7.18. Wykres ramkowy średnich wartości współczynników E oraz η w zależności od naprężenia; test relaksacji tkanki buraka ćwikłowego w czasie 900 sekund

Fig. 7.18. The frame graph of mean values coefficients E and η as dependent on stress; the relaxation test of beetroot flesh tissue in 900 second time



Rys. 7.19. Wykres ramkowy średnich wartości współczynnika lepkości η w zależności od czasu relaksacji naprężeń tkanki buraka ćwikłowego

Fig. 7.19. The frame graph of mean values of the coefficient of viscosity η as dependent on time of relaxation of beetroot flesh tissue

Powyższe spostrzeżenia prowadzą do wniosku, że do porównania właściwości reologicznych tkanek warzyw na podstawie modelu Maxwella niezbędne jest m.in. ściśle określenie wartości naprężenia oraz czasu trwania testu.

W tabeli 7.12 pokazano zestawienie średnich wartości parametrów modelu Burgersa, obliczonych na podstawie przebiegu relaksacji naprężeń w czasie 900 sekund. Przed rozpoczęciem testu zadano naprężenie równe 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Tabela 7.12

Table 7.12

Średnie wartości parametrów modelu Burgersa; test relaksacji naprężeń w tkankach wybranych warzyw w czasie 900 sekund
The mean values of the Burgers model parameters; the relaxation test of selected vegetables flesh in 900 second time

Materiał Material	E_0 (MPa)	E_1 (MPa)	η_1 (MPa·s)	η_a (GPa·s)
Burak, kierunek osiowy Beetroot, axial direction	3,9	1,0	17	21
Burak kierunek promieniowy Beetroot, radial direction	4,3	1,1	21	25
Seler kora Celery bark	3,7	0,7	7	46
Seler rdzeń Celery core	3,0	0,6	5	42
Rzodkiew Radish	4,5	0,9	9	12
Rzodkiewka Small radish	2,3	1,0	24	12
Chrzan Horseradish	4,9	0,9	21	10
Marchew kora Carrot bark	1,9	1,0	15	41
Marchew rdzeń Carrot core	2,9	1,6	52	36
Pietruszka kora Parsley bark	2,8	0,9	19	21
Pietruszka rdzeń Parsley core	2,6	0,9	27	18
Ziemniak Potato	1,7	0,7	21	11

Parametr E_0 obliczono na podstawie miejsca zerowego funkcji Burgersa. Chwilowe wartości współczynnika sprężystości E_1 i współczynnika lepkości η_1 wynikają ze złożenia funkcji i jej pochodnej, czyli określają intensywność zanikania naprężeń. Parametr η_a określający pozorny współczynnik lepkości został obliczony na podstawie współczynnika kierunkowego stycznej do końcowego odcinka krzywej. Im mniejsze są wartości współczynnika lepkości η_a , tym intensywniejszy jest przebieg rozproszenia energii sprężystej.

Na podstawie tabeli 7.12 można stwierdzić, że tkanki chrzanu i rzodkwi charakteryzują się większym współczynnikiem sprężystości w porównaniu z tkankami pozostałych

warzyw. Jednocześnie stosunkowo szybko następuje w nich zanikanie naprężeń. Naprężenia resztkowe najdłużej utrzymują się w tkankach marchwi i selera. Charakterystyczne jest zróżnicowanie wartości parametrów modelu w przypadku tkanek kory i rdzenia marchwi, potwierdzające obserwacje podczas testu doraźnego i badań w warunkach zmiennego obciążenia.

Tego rodzaju informacje mogą mieć istotne znaczenie podczas planowania lub realizacji różnego rodzaju procesów technologicznych.

7.3.3. Test pełzania

Test pełzania pozwala na opisanie zjawiska plastycznego płynięcia materiału przy utrzymującym się stałym naprężeniu (Bohdziewicz 2003a, 2003b). Badania przeprowadzono na próbkach tkanek pobranych z egzemplarzy warzyw, które wcześniej wykorzystano w testach relaksacji naprężeń. Badano zależne od czasu zmiany odkształcenia przy naprężeniu o wartości równej 50% wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Do opisu przebiegu zmian wartości odkształcenia w funkcji czasu wykorzystano równanie charakterystyczne uogólnionego modelu Kelvina-Voigta:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot (1 - e^{-b_i \cdot t}) \quad (7.11)$$

gdzie:

$\varepsilon(t)$ – odkształcenie względne; t – czas realizacji testu pełzania; a_i , b_i – współczynniki równania.

Rozpatrywano także modyfikację modelu Burgersa:

$$\varepsilon(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + c \cdot t + d \quad (7.12)$$

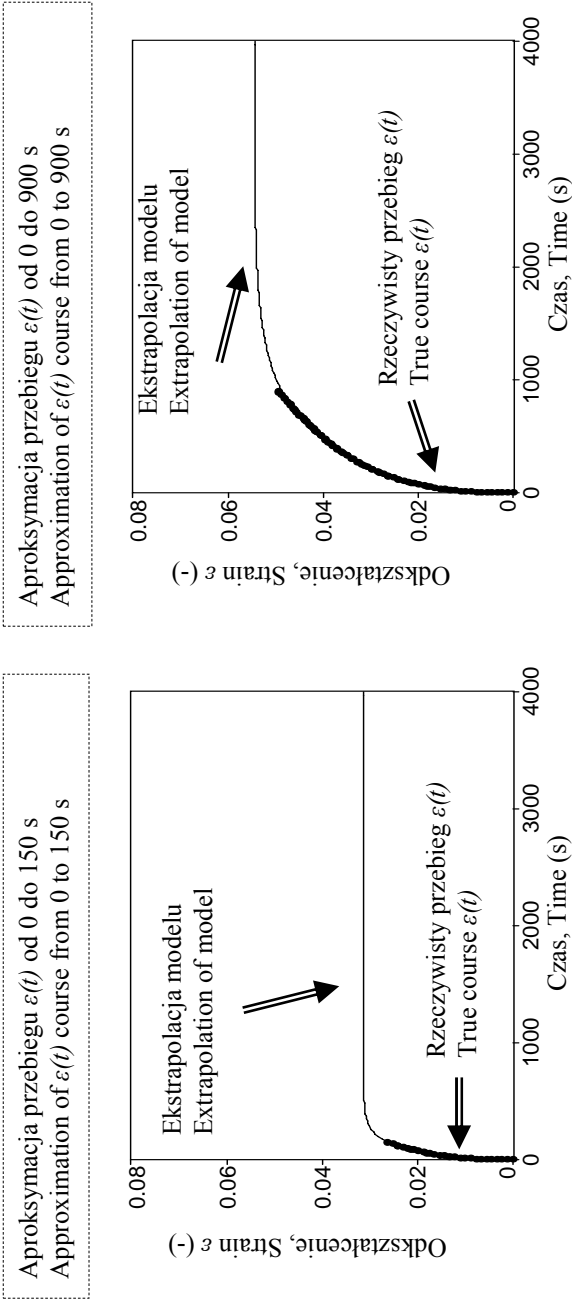
$$\text{w postaci równania Lethersicha} \quad \varepsilon(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + c \cdot t \quad (7.13)$$

gdzie: a , b , c , d – współczynniki równania.

Istotnym problemem jest zapis równań w postaci różnicy, co wymusza konieczność wprowadzenia końcowej wartości współczynnika a dla rozpatrywanego przedziału czasowego. Rozwiązanie tego problemu jest możliwe poprzez znaczne wydłużenie czasu trwania eksperymentu. W tym przypadku uzyskuje się większą dokładność dopasowania krzywych regresji, lecz pojawiają się istotne zakłócenia. Ich przyczyną są zmiany stanu materiału na skutek parowania oraz przemiany biologiczne zachodzące w wyizolowanej tkance roślinnej.

Do obliczeń wartości chwilowych współczynników sprężystości E_i wykorzystano prawo Hooke'a, do obliczeń współczynników lepkości dynamicznych η_i , η_a uogólnione prawo lepkości Newtona. Współczynnik lepkości pozornej η_a jest analogią lepkości rzeczywistej.

Obserwowano przebieg zależności $\varepsilon(t)$ stopniowo wydłużając przedziały czasowe θ . Obliczano wartości parametrów modeli dla θ_1 (od 0 do 150 sekund), następnie dla θ_2 (od 0 do 300 sekund) itd. aż do θ_5 (od 0 do 900 sekund). Podobnie jak podczas testu relaksacji naprężeń obliczenia wartości parametrów modeli wykonano niezależnie dla każdego przedziału czasowego. Przykład aproksymacji dla dwóch przedziałów czasowych pokazano na rysunku 7.20.



Rys. 7.20. Aproksymacja zależności $\varepsilon(t)$ modelem Kelvina-Voigta w dwóch przedziałach czasowych; test pełzania tkank buraka ćwikłowego
 Fig. 7.20. Approximation of $\varepsilon(t)$ course by Kelvin model in two time intervals; the creep test of beetroot tissues

Przykładowe zestawienie wyników obliczeń parametrów wybranych modeli dla pojedynczego przebiegu zależności $\varepsilon(t)$ zamieszczono w tabeli 7.13.

Tabela 7.13

Table 7.13

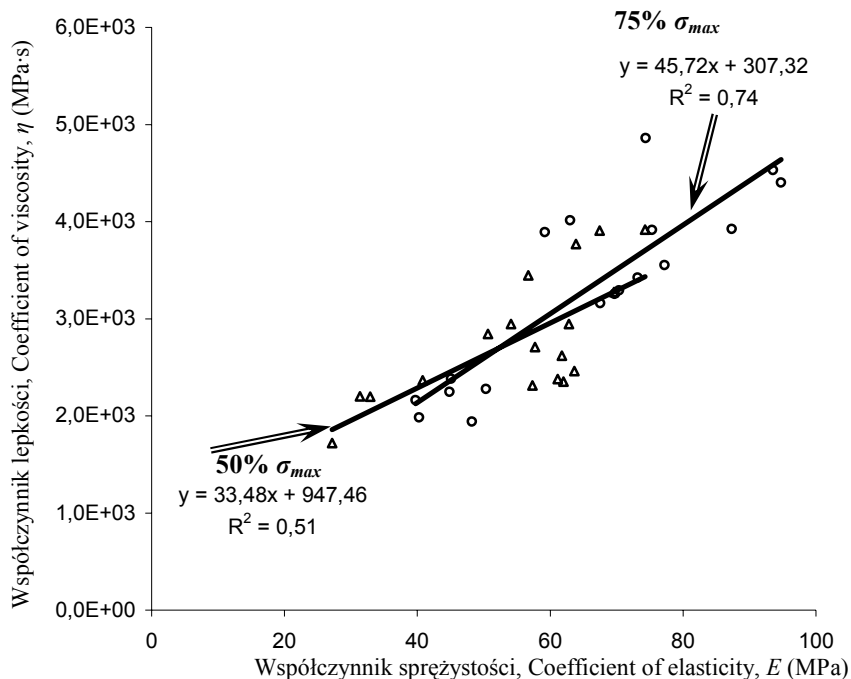
Zestawienie parametrów wybranych modeli w różnych przedziałach czasowych
Tabled selected models parameters in different time intervals

Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Kelvina-Voigta czteroparametrowy Four parameters Kelvin model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)		η_1 (GPa·s)	η_2 (GPa·s)	R^2	
θ_1 (0 ÷ 150)	135	39		1,2	4	0,999	
θ_2 (0 ÷ 300)	108	34		1,2	6	0,999	
θ_3 (0 ÷ 450)	94	32		1,3	7	0,999	
θ_4 (0 ÷ 600)	83	30		1,3	8	0,999	
θ_5 (0 ÷ 900)	68	28		1,5	11	0,998	
Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Kelvina-Voigta sześcioparametrowy Six parameters Kelvin model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	η_1 (GPa·s)	η_2 (GPa·s)	η_3 (GPa·s)	R^2
θ_1 (0 ÷ 150)	499	141	37	2,0	2,1	5	0,999
θ_2 (0 ÷ 300)	222	129	34	1,4	3,6	8	0,999
θ_3 (0 ÷ 450)	166	104	33	1,3	4,7	10	0,999
θ_4 (0 ÷ 600)	141	76	31	1,2	5,2	16	0,999
θ_5 (0 ÷ 900)	127	60	24	1,2	5,5	26	0,999
Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Lethersicha pięcioparametrowy Five parameters Lethersich model						
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	η_1 (GPa·s)	η_2 (GPa·s)	η_a (GPa·s)	R^2	
θ_1 (0 ÷ 150)	191	82	1,3	3,5	15	0,999	
θ_2 (0 ÷ 300)	142	61	1,2	4,6	27	0,999	
θ_3 (0 ÷ 450)	126	53	1,2	5,2	37	0,999	
θ_4 (0 ÷ 600)	119	50	1,2	5,5	42	0,999	
θ_5 (0 ÷ 900)	111	48	1,2	6,0	48	0,999	

Porównując dane w kolejnych przedziałach czasowych (tab. 7.13) można zauważyć, że wydłużenie czasu realizacji testu prowadzi do zmiany parametrów. Przyczyną są zmiany warunków brzegowych rozpatrywanych równań, wynikające z metody dopasowania krzywych. Zmiany parametrów modeli teoretycznie można interpretować jako zmiany właściwości materiałowych, jednakże wynikają jedynie z aproksymacji przebiegu $\varepsilon(t)$.

Dobór modeli wieloelementowych pozwala na dokładniejsze odzwierciedlenie przebiegu zależności $\varepsilon(t)$ poprzez zwiększenie liczby składowych funkcji regresji. Z matematycznego punktu widzenia modele są lepiej dopasowane do przebiegów rzeczywistych, natomiast ograniczona jest ich poprawna interpretacja fizyczna. W określonych warunkach realizacji testu wartości parametrów modeli umożliwiają porównanie właściwości reologicznych tkanek różnych warzyw.

Badano wpływ naprężenia na przebieg procesu pełzania. Przykładowe zestawienie korelacji współczynników E oraz η dla próbek tkanek buraka ćwikłowego pokazano na rysunku 7.21. Zadawano wstępne naprężenie odpowiadające 50% i 75% wartości σ_{max} .



Rys. 7.21. Korelacje wartości współczynników E oraz η ; test pełzania tkanki buraka ćwikłowego w czasie 900 sekund

Fig. 7.21. The correlations between the coefficients E and η values; the creep test of beetroot flesh tissue in 900 second time

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono, że po zmianie wartości naprężenia przebieg zjawiska pełzania w dwóch próbkach tego samego materiału nie będzie jednakowy.

Dla porównania właściwości reologicznych tkanek różnych warzyw, w tabeli 7.14 zestawiono średnie wartości parametrów modelu Lethersicha. Czas obserwacji był równy 900 sekund. Próbki poddano naprężeniu odpowiadającemu 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} , wyznaczonej dla każdego egzemplarza rośliny.

Średnie wartości parametrów modelu Lethersicha; test pelzania tkanek wybranych warzyw
w czasie 900 sekund

The mean values of the Lethersich model parameters; the creep test of the selected vegetable's
flesh in 900 second time

Materiał Material	Parametry modelu Lethersicha Lethersich model parameters		
	E_l (MPa)	η_l (GPa·s)	η_a (GPa·s)
Burak, kierunek osiowy Beetroot, axial direction	46	1,1	16
Burak kierunek promieniowy Beetroot radial direction	47	1,1	15
Burak ćwikłowy – Beetroot 50% σ_{max}	55	2,8	11
Burak ćwikłowy – Beetroot 75% σ_{max}	65	3,4	14
Seler kora – Celery bark	22	0,5	11
Seler rdzeń – Celery core	21	0,4	10
Rzodkiew – Radish	38	2,0	14
Rzodkiewka – Small radish	21	1,3	5
Chrzan – Horseradish	54	2,2	17
Marchew kora – Carrot bark	15	0,8	5
Marchew rdzeń – Carrot core	20	0,9	4
Pietruszka kora – Parsley bark	25	0,8	6
Pietruszka rdzeń – Parsley core	30	1,0	6
Ziemniak – Potato	25	1,2	5

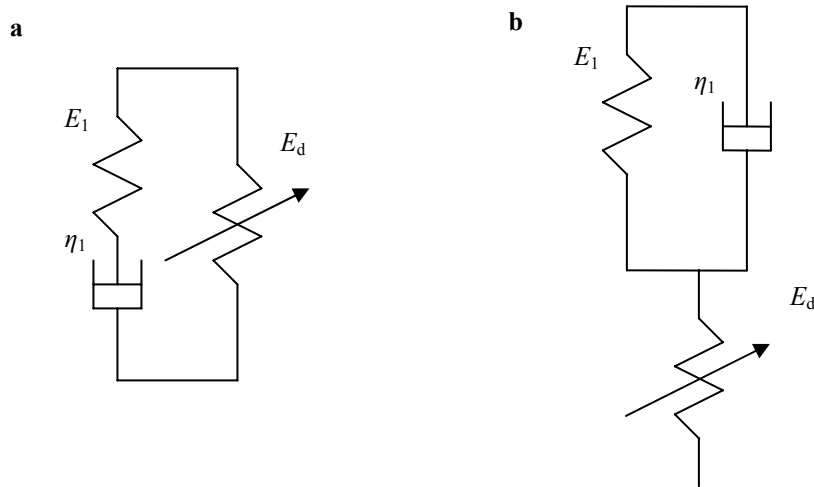
Zapis równania modelu Kelvina-Voigta określa funkcję wykładniczą, której limes jest podstawą obliczenia współczynnika sprężystości E_l , natomiast pochodna tej funkcji umożliwia wyznaczenie wartości współczynnika lepkości η_l . W modelu Lethersicha występuje dodatkowe równanie prostej, której współczynnik kierunkowy określa wartość lepkości pozornej η_a . Im bardziej intensywne płynięcie, tym mniejsze są też wartości obu współczynników lepkości dynamicznej. Z zestawienia parametrów, przedstawionych w tabeli 7.14, można wnioskować o podobnej dynamice obserwowanych zjawisk w tkankach rzodkiewki, marchwi, pietruszki i ziemniaka. Stosunkowo duża jest też intensywność plastycznego płynięcia w tkankach buraka ćwikłowego, rzodkwi i chrzanu. Wiąże się to z większym zadanyim naprężeniem podczas testu.

Parametry modelu Lethersicha można traktować jako wyróżniki umożliwiające porównanie zachowania się tkanek różnych gatunków roślin, przechowywanych przez dłuższy okres czasu.

7.4. Koncepcja nieliniowych modeli reologicznych

Matematyczny zapis równań lepkosprężystości liniowej umożliwia obliczenie parametrów, przedstawianych w postaci współczynnika sprężystości E i współczynnika lepkości η . Jedynie proste równania o dwóch współczynnikach umożliwiają przypisanie im znaczenia wielkości fizycznych, traktowanych jako cechy materiałowe. Ze względu na złożoność obserwowanych zjawisk podczas realizacji testów reologicznych, wartości współczynników zmieniają się zależnie od czasu obserwacji. Wiąże się z tym niejednoznaczna interpretacja fizyczna. Nie jest także możliwe przewidywanie zachowania się materiału w dłuższym wymiarze czasowym.

Aby opisać przebieg zanikania naprężeń lub płynięcia pod stałym obciążeniem przyjęto empiryczne modele z nieliniową sprężystością. Koncepcje takich modeli pokazano schematycznie na rysunku 7.22. Występują tu dwa parametry lepkosprężystości liniowej, którym można przypisać znaczenie cech fizycznych oraz dodatkowy element E_d o nieliniowej zależności od czasu.



Rys. 7.22. Koncepcja modeli reologicznych opisująca przebiegi relaksacji naprężeń (a) oraz pełzania (b) tkanek mięszu warzyw
Fig. 7.22. The rheological models describing functions of stress relaxation (a) and creep (b) of vegetables flesh tissues

Wyróżnikiem każdego materiału jest wytrzymałość na pełzanie, jako największa wartość obciążenia, która nie powoduje zauważalnego wzrostu odkształcenia. Może być pomocna przy wyznaczaniu dopuszczalnej wysokości składowania w warstwie. Innym wyróżnikiem jest granica pełzania, na podstawie której można wyznaczyć dopuszczalne odkształcenie przy stałym obciążeniu. Z uwagi na możliwość inwazji patogenów na skutek wystąpienia mikrouszkodzeń wewnętrznych jest to szczególnie ważne dla tkanek składowanych warzyw. Analogicznie znajomość przebiegu relaksacji naprężeń umożliwia

wyznaczenie czasu niezbędnych przerw w realizacji procesu technologicznego, na przykład przy zagęszczaniu produktów.

Przy doborze równań modelu przeprowadzono aproksymację przebiegów rzeczywistych w czasie od zera do 300 sekund. Następną czynnością była ekstrapolacja wybranych funkcji do 900 sekund. Wyniki porównywano z danymi otrzymanymi z zapisu przeprowadzonych badań. Metoda ta jest stosowana w badaniach fizycznych (Prigogine, Stengers 1990).

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, że najlepsze dopasowanie do przebiegu zależności $\sigma(t)$ ma równanie zapisane w postaci:

$$\sigma(t) = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot [(1 + d \cdot t^e)^{-1}] \quad (7.14)$$

Analogicznie do opisanego przebiegu $\varepsilon(t)$ można stosować formułę:

$$\varepsilon(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + c \cdot [1 - (1 + d \cdot t^e)^{-1}] \quad (7.15)$$

gdzie:

a, b, c, d, e – współczynniki równań, t – czas realizacji eksperymentu.

7.4.1. Walidacja modeli

Do oceny przydatności modeli porównano parametry proponowanych modeli empirycznych oraz dwuelementowych modeli lepkosprężystości liniowej. Wartości parametrów modeli obliczono dla różnych przedziałów czasowych trwania testów: θ_1 (od 0 do 90 sekund), następnie dla θ_2 (od 0 do 150 sekund) itd. aż do θ_6 (od 0 do 900 sekund).

Przebieg relaksacji naprężeń opisano dwuparametrowym modelem Maxwella oraz proponowaną formułą empiryczną (7.14). Przykładowe wyniki obliczeń wartości współczynnika lepkkości η , współczynnika sprężystości E oraz współczynnika sprężystości nieliniowej E_d zamieszczono w tabeli 7.15.

Tabela 7.15

Table 7.15

Zestawienie parametrów modeli w różnych przedziałach czasowych; test relaksacji naprężeń tkanki mięszu buraka ćwikłowego

Tabled models parameters in different intervals of time; the relaxation test of the beetroot flesh specimens

Przedział czasowy Interval of time θ (s)	Model Maxwella Maxwell model		Model empiryczny Empirical model				
	E_1 (MPa)	η_1 (GPa·s)	E_1 (MPa)	η_1 (GPa·s)	E_d (MPa)	parametr parameter d (-)	parametr parameter e (-)
θ_1 (0 ÷ 90)	5,3	2,0	4,4	7	1,3	0,18	0,64
θ_2 (0 ÷ 150)	5,3	2,7	4,0	12	1,7	0,15	0,57
θ_3 (0 ÷ 300)	5,2	4,6	3,9	14	1,7	0,14	0,58
θ_4 (0 ÷ 450)	5,1	5,9	3,9	14	1,7	0,14	0,58
θ_5 (0 ÷ 600)	5,1	6,9	4,0	14	1,7	0,14	0,59
θ_6 (0 ÷ 900)	5,0	8,5	4,0	13	1,6	0,17	0,54

Charakterystyczne dla proponowanego modelu empirycznego są stosunkowo niewielkie zmiany wartości parametrów w zależności od czasu trwania obserwacji (tabela 7.15). Można je uznać jako charakterystyczne dla badanego materiału, wykazujące cechy stałej materiałowej.

W tabeli 7.16 zestawiono średnie wartości parametrów, obliczonych na podstawie proponowanego równania empirycznego (7.14). Badano relaksację naprężeń w próbkach tkanek przy zadanym wstępnym naprężeniu równym 50% wytrzymałości doraźnej σ_{max} . Czas realizacji testu wyniósł 900 sekund.

Tabela 7.16

Table 7.16

Średnie wartości parametrów modelu empirycznego; test relaksacji naprężeń w czasie 900 sekund
The mean values of parameters of the empirical model; the relaxation test in 900 second time

Materiał Material	Odkształ- cenie Strain ε (%)	Parametry modelu empirycznego Empirical model parameters				
		E_l (MPa)	η_l (GPa·s)	E_d (MPa)	parametr parameter d (-)	parametr parameter e (-)
Burak ćwikłowy – Beetroot 50% σ_{max}	18%	4,1	12	2,0	0,13	0,58
Burak ćwikłowy – Beetroot 75% σ_{max}	25%	3,7	15	2,6	0,14	0,56
Rzodkiew – Radish	28%	4,2	25	1,6	0,33	0,57
Rzodkiewka – Small radish	25%	2,0	3	1,5	0,15	0,67
Chrzan – Horseradish	25%	4,8	21	1,8	0,18	0,53
Marchew kora – Carrot bark	22%	1,6	18	1,6	0,18	0,69
Marchew rdzeń – Carrot core	15%	2,5	5	2,4	0,13	0,65
Pietruszka kora – Parsley bark	20%	2,5	5	1,5	0,20	0,57
Pietruszka rdzeń – Parsley core	21%	2,6	5	1,6	0,19	0,57
Ziemniak – Potato	30%	1,2	1	1,3	0,13	0,53

Parametry E_l oraz η_l opisują właściwości materiału, wyznaczone na podstawie przebiegu intensywności zanikania naprężeń bezpośrednio po osiągnięciu założonego poziomu wstępnego naprężenia. Z przebiegiem relaksacji naprężeń w dłuższym wymiarze czasowym wiążą się dane zamieszczone w trzech ostatnich kolumnach tabeli 7.16. Zauważalna jest zależność pomiędzy wartością współczynnika E_l oraz pozostałymi parametrami. Zbliżone wartości parametrów modelu świadczą, że relaksacja naprężeń podobnie przebiega w tkankach rzodkiewki, pietruszki i rdzenia marchwi. Analogiczna zależność występuje w tkankach rzodkwi, chrzanu i buraka ćwikłowego.

Przebieg zjawiska pełzania w warunkach stałego naprężenia opisano równaniem dwuparametrowego modelu oraz przy wykorzystaniu proponowanej formuły empirycznej (7.15). Przykładowe wyniki obliczeń wartości współczynnika lepkości η , współczynnika sprężystości E oraz współczynnika sprężystości nieliniowej E_d zamieszczono w tabeli 7.17.

Tabela 7.17

Table 7.17

Zestawienie parametrów modeli w różnych przedziałach czasowych; test pełzania tkanki miększu buraka ćwikłowego

The statement of the models parameters in different time intervals; the creep test of the beetroot flesh tissue

Przedział czasowy Interval of time Θ (s)	Model Kelvina-Voigta Kelvin model		Model empiryczny Empirical model				
	E_l (MPa)	η_l (GPa·s)	E_l (MPa)	η_l (GPa·s)	E_d (MPa)	parametr parameter d (-)	parametr parameter e (-)
Θ_1 (0 ÷ 90)	41	1,4	40	8	68	0,07	0,97
Θ_2 (0 ÷ 150)	39	1,6	40	8	68	0,07	0,97
Θ_3 (0 ÷ 300)	32	2,0	38	9	61	0,07	0,94
Θ_4 (0 ÷ 450)	28	2,5	38	11	51	0,06	0,89
Θ_5 (0 ÷ 600)	26	2,8	36	13	40	0,05	0,82
Θ_6 (0 ÷ 900)	23	3,3	33	18	27	0,04	0,74

Tabela 7.18

Table 7.18

Średnie wartości parametrów modelu empirycznego; test pełzania tkanek w czasie 900 sekund

The mean values of parameters of the empirical model; the creep test in 900 second time

Materiał Material	Naprężenie Stress σ (MPa)	Parametry modelu empirycznego Empirical model parameters				
		E_l (MPa)	η_l (GPa·s)	E_d (MPa)	parametr parameter d (-)	parametr parameter e (-)
Burak ćwikłowy – Beetroot 50% σ_{max}	1,07	11	38	35	0,05	0,69
Burak ćwikłowy – Beetroot 75% σ_{max}	1,60	26	53	35	0,04	0,72
Rzodkiew – Radish	1,55	46	41	29	0,03	0,85
Rzodkiewka – Small radish	0,87	10	18	16	0,02	0,85
Chrzan – Horseradish	1,58	35	54	39	0,04	0,83
Marchew kora – Carrot bark	0,81	13	12	15	0,05	0,79
Marchew rdzeń – Carrot core	0,70	5	12	14	0,05	0,73
Pietruszka kora – Parsley bark	0,77	6	23	18	0,06	0,75
Pietruszka rdzeń – Parsley core	0,90	6	22	25	0,07	0,73
Ziemiak – Potato	0,75	7	18	18	0,04	0,80

Z tabeli 7.17 wynika, że parametry modelu empirycznego ulegają niewielkim zmianom w czasie nie dłuższym niż 600 sekund. Pomimo tej niedogodności można je uznać za charakterystyczne dla badanego materiału.

W tabeli 7.18 zestawiono średnie wartości parametrów obliczonych na podstawie równania (7.15). Czas realizacji testu pełzania wynosił 900 sekund. Zadawano naprężenie równe 50% wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

Parametry E_I oraz η_I opisują zjawisko płynięcia tkanki w jego początkowej fazie. Przebieg procesu w dłuższym wymiarze czasowym opisują dane, zamieszczone w trzech ostatnich kolumnach tabeli 7.18. Widoczna jest współzależność pomiędzy wartościami współczynnika E_I oraz pozostałymi parametrami. Podobny przebieg plastycznego płynięcia ma miejsce w tkankach ziemniaka, pietruszki, marchwi i rzodkiewki. Dotyczy to również tkanek chrzanu, rzodkwi i buraka ćwikłowego.

8. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono niedostateczne opracowanie zagadnień, dotyczących zachowania się tkanek warzyw pod wpływem obciążenia. Nie zostały jednoznacznie zdefiniowane właściwości reologiczne badanego materiału. Utrudnia to porównanie wyników eksperymentów pomiarowych. Ze względu na specyficzną morfologię występują trudności opisanego stanu tkanek. Badania prowadzące do wyjaśnienia zjawisk zachodzących podczas deformacji struktury tkankowej nie są jeszcze dostatecznie rozwinięte.

Do scharakteryzowania właściwości mechanicznych ciał stałych wykorzystywane są wykresy zależności naprężenie–odkształcenie. Na podstawie obserwacji odkształceń spowodowanych ściskaniem osiowym próbek stwierdzono, że tkanki warzyw zachowują się jak materiał lepkosprężysty i jednocześnie kruchy.

Ciała idealnie sprężyste charakteryzują się liniowym przebiegiem zależności $\sigma = f(\varepsilon)$ zarówno przy obciążeniu, jak i odciążeniu. Stosunek naprężenia do odkształcenia określa się jako moduł Younga. Przy odkształceniach sprężystych o przebiegu nieliniowym wprowadzono pojęcie „zastępczego modułu sprężystości”. Przebieg zależności $\sigma = f(\varepsilon)$ w tkankach warzyw jest podobny jak w ciałach sprężystych. Eksperymenty przeprowadzone w warunkach zmiennego obciążenia wykazują, że występują w nich odkształcenia jednocześnie sprężyste i plastyczne. Stosunek naprężenia do odkształcenia badacze określają jako „moduł odkształcalności sprężysto-plastycznej” lub „moduł zdolności odkształcania się”. W piśmiennictwie występują opracowania jedynie wybranych zagadnień, związanych z wyznaczeniem właściwości reologicznych tkanek parenchymy warzyw w zakresie niewielkich odkształceń i naprężeń. Brak jest kompleksowego ujęcia w zakresie dużych naprężeń, występujących podczas realizacji procesów technologicznych lub składowania.

Zaproponowano koncepcję modelu empirycznego, opisującego zachowanie się tkanek warzyw w warunkach quasi-statycznych zmian naprężenia i odkształcenia. Przeprowadzono analizę statystyczną do wyznaczenia wpływu rozmiarów i odmiany roślin oraz miejsca i sposobu pobierania próbek na wyniki eksperymentów. Ograniczono znaczenie niejednorodności struktury tkanek, wynikającej z uwarunkowań środowiskowych i biochemicznych.

Z uwagi na odstępstwo zależności $\sigma = f(\varepsilon)$ od przebiegu liniowego obliczano rzeczywiste nakłady pracy odkształcenia. Na ich podstawie określono stosunek naprężenia do odkształcenia jako „pozorny współczynnik sprężystości” E_C . Przeprowadzone testy do-
różne i testy histerezy wykazały, że pomimo pewnych ograniczeń współczynnik ten można traktować jako stałą materiałową. Wyznaczono zależności pomiędzy wartością współczynnika E_C oraz wytrzymałością doraźną σ_{max} i odkształceniem ε . Można je przed-

stawić w postaci równań regresji, charakterystycznych dla tkanek wybranych gatunków warzyw.

Na podstawie testów reologicznych dobrano modele reologiczne. Ze względu na trudności dopasowania modeli lepkość sprężystości liniowej do przebiegów rzeczywistych zaproponowano eksperymentalne formuły uwzględniające nieliniowe zmiany sprężystości w funkcji czasu. Zgodnie z powszechnie przyjętymi prawami dotyczącymi sprężystości i lepkiego płynięcia obliczono wartości współczynników sprężystości i lepkości. W zadanych warunkach pomiaru mogą być traktowane jako stałe materiałowe, wykorzystywane do porównania właściwości reologicznych tkanek różnych gatunków warzyw. Niedogodnością w interpretacji wyników są ograniczenia wynikające ze złożonej natury zjawisk, występujących podczas realizacji testów reologicznych i trudności zdefiniowania stanu biochemicznego tkanek warzyw.

Prowadzone testy relaksacji naprężeń i pełzania wykazały podobieństwo właściwości reologicznych tkanek ziemniaka, rzodkiewki, marchwi i pietruszki. Te obserwacje korespondują z wynikami testów doraźnych i histerezy odkształceń. Analogicznie, podobne zachowanie się pod wpływem obciążenia wyróżnia tkanki chrzanu, rzodkwi i buraka ćwikłowego.

9. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników sformułowano wnioski:

1. Przebieg zależności $\sigma = f(\varepsilon)$ w ściskanych tkankach parenchymy warzyw nie pokrywa się z przebiegiem liniowym. Wynika to z niejednakowej intensywności różnych procesów towarzyszących ściskaniu, m.in. konsolidacji i filtracji. Relacje odkształceń i naprężeń można określić wskaźnikiem W_p , wyrażającym stosunek rzeczywistej pracy odkształcenia do nakładów pracy przy zależności liniowej. W odniesieniu do większości badanych gatunków warzyw średnia wartość wskaźnika zawierała się w przedziale $0,78 < W_p < 0,89$. Jedynie tkanki chrzanu i buraka ćwikłowego charakteryzował wskaźnik W_p bliski jedności.

2. Pozorny współczynnik sprężystości E_C , obliczany na podstawie rzeczywistych nakładów jednostkowej pracy odkształcenia, pozwala oszacować wartość skuteczną oporu mechanicznego ściskanych tkanek. Ze względu na stosunkowo niewielki zakres zmian wartości podczas testu doraźnego współczynnik E_C może być traktowany jako stała materiałowa. Tkanki warzyw charakteryzuje współczynnik E_C zawarty w przedziale od 2 MPa do 10 MPa i wytrzymałość doraźna σ_{max} w zakresie od 1 MPa do 4 MPa. Empiryczna zależność pomiędzy współczynnikiem E_C a wytrzymałością doraźną σ_{max} zapisana w postaci $E_C = a \cdot (\sigma_{max}) + b$ może być charakterystycznym wyróżnikiem tkanek różnych gatunków warzyw.

3. Wartości współczynników sprężystości obliczone przy niewielkich odkształceniach ε nie odzwierciedlają rzeczywistych właściwości mechanicznych tkanek warzyw. Ze względu na nieliniowy przebieg zależności $\sigma - \varepsilon$ w ściskanych próbkach bardziej miarodajne są obliczenia przy naprężeniu σ równym 50% wartości wytrzymałości doraźnej σ_{max} .

4. Właściwości sprężyste badanych tkanek można scharakteryzować wartością wskaźnika elastyczności W_{el} , określającego udział zakumulowanej energii sprężystej w ogólnym bilansie nakładów pracy odkształcenia. Przy zmianie wartości naprężenia w zakresie od 10% do 90% wytrzymałości doraźnej σ_{max} następuje blisko trzykrotne zmniejszenie wartości tego wskaźnika. Stwierdzono zachowanie stałej wartości współczynnika E_C przy odciążeniu w kolejnych cyklach testu histerezy. Potwierdza to jego przydatność jako stałej materiałowej.

5. Zjawiska towarzyszące odkształceniom tkanek utrudniają możliwość doboru dwuelementowych modeli lepko-sprężystości liniowej, opisujących przebieg relaksacji naprężeń. Aproksymację rzeczywistych przebiegów $\sigma(t)$ w wybranym przedziale czasowym umożliwiają bardziej skomplikowane równania, utworzone przez modyfikację modelu Maxwella. Pojawiają się jednak trudności poprawnej interpretacji fizycznej wyznaczonych parametrów.

6. Przebieg zjawiska pełzania tkanek pod wpływem stałego naprężenia można opisać równaniem $\varepsilon(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t})$. Taki zapis wyklucza możliwość przeprowadzenia ekstrapolacji w dłuższym wymiarze czasowym. Ogranicza to przydatność modelu do celów praktycznych, na przykład do wyznaczenia wytrzymałości na pełzanie. Rozbudowa równania uogólnionego modelu Kelvina-Voigta skutkuje jedynie dokładniejszym dopasowaniem krzywej regresji do rzeczywistych przebiegów $\varepsilon(t)$ w wybranym przedziale czasowym.

7. Lepsze dopasowanie modeli do przebiegów rzeczywistych umożliwia dodanie do elementów lepkosprężystości liniowej także nieliniowej sprężystości. Zaproponowano opisanie przebiegu relaksacji naprężeń równaniem $\sigma(t) = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot [(1 + d \cdot t^e)^{-1}]$. Analogiczną postać ma formuła $\varepsilon(t) = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) + c \cdot [1 - (1 + d \cdot t^e)^{-1}]$ dotycząca przebiegu zjawiska plastycznego płynięcia. Obie formuły umożliwiają dokładniejsze prognozowanie obserwowanych przebiegów podczas realizacji testów reologicznych. Pomimo niedogodności związanych z jednoznacznością interpretacją wyznaczonych parametrów modeli można je traktować jako stałe materiałowe. Umożliwia to porównanie właściwości reologicznych wybranych gatunków warzyw.

10. PIŚMIENNICTWO

- Abbott J.A., Massie D.R., Watada A.E.: 1982. The use of a computer with an Instron for textural measurement. *Journal of Texture Studies*, nr 13(4), 413–422.
- Anazodo U.G.N., Chikwendu S.C.: 1983. Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials. Small deformation approximation. *Transactions of the ASAE*, nr 26(6), 923–929.
- Arnold P.C., Mohsenin N.N.: 1971. Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. *Transaction of the ASAE*, nr 14(1), 78–84.
- ASAE STANDARD: 1996. ASAE Standards 386.1. Compression test of food materials of convex shape
- Bąk R., Burczyński T.: 2001. Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego. WNT, Warszawa.
- Bieluga B.: 1978. Methods for determining the physico-mechanical properties of agricultural products. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 203, 375–381.
- Bieluga B., Bzowska-Bakalarz M.: 1980a. Badania wybranych właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych. *Roczn. Nauk Rol.*, nr 74-C-4, 63–79.
- Bieluga B., Bzowska-Bakalarz M.: 1980b. Investigations of the mechanical properties of roots of same sugar beet varieties. *Proceedings of the 2nd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Gödöllő*, nr (35), 1–8.
- Bieluga B., Bzowska-Bakalarz M.: 1986. Wpływ odmiany, czasu przechowywania i poziomu nawożenia na uszkodzenia mechaniczne korzeni buraków cukrowych. *Roczn. Nauk Rol.*, nr 76-C-2, 47–66.
- Bieluga B., Gilewicz K.: 1986. Badania histerezy odkształceniowej wybranych odmian jabłek. *Roczn. Nauk Rol.*, nr 76-C-2, 9–24.
- Blahovec J.: 1985a. Jednoduchy model procesu stlacovani a mechanickeho poskozeni duznin. *Zemedelska Technika*, nr 31(6), 349–364.
- Blahovec J.: 1985b. Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to mechanical damage. *Papers of the 3rd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 57–64.
- Blahovec J.: 1989. Strength and elasticity of some plant materials. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 60–66.
- Blahovec J.: 1994. Elastic and strength properties of round agricultural products. *Int. Agrophysics*, nr 8, 543–546.
- Blahovec J.: 1996. Stress relaxation phenomena in vegetable tissue. Experimental results. *Journal of Materials Science*, nr 31, 1729–1734.

- Blahovec J.: 2001a. Improved rate controlled model for stress relaxation in vegetable tissue. *Int. Agrophysic*, nr 15(2), 73–78.
- Blahovec J.: 2001b. Static mechanic and texture of fruits and vegetables. *Research in Agricultural Engineering*, nr 47(4), 144–169.
- Blahovec J., Patočka K., Celba J., Mica B.: 1983. Jednoduché testování mechanických vlastností hlíz brambor. *Zemědělska Technika*, nr 29(2), 81–96.
- Blahovec J., Patočka K., Mica B.: 1984. Mechanické a elektrické vlastnosti kořenu a hlíz v průběhu stlačování. *Zemědělska Technika*, nr 30(6), 335–354.
- Blahovec J., Patočka K., Mica B.: 1985. Mechanické vlastnosti dužnin zeleniny, *Zemědělska Technika*, nr 31(7), 393–410.
- Blahovec J., Reznicek R., Janal R.: 1975. Reologické a texturní vlastnosti některých zemědělských materiálů, VSZ, Praha.
- Blahovec J., Strouhal J., Mica B.: 1987. Nestejnorodnost hlíz brambor vzhledem k jejich pevnosti. *Zemědělska Technika*, nr 33(4), 235–244.
- Blahovec J., Valentova M., Patočka K.: 1990. Mechanické vlastnosti základních částí bramborové hlízy, *Zemědělska Technika*, nr 35(9), 539–552.
- Bohdziewicz J.: 2001a. Właściwości mechaniczne i reologiczne wybranych odmian buraka ćwikłowego. *Acta Agrophysica*, nr 45, 17–29.
- Bohdziewicz J.: 2001b. Właściwości reologiczne związane z morfologią korzenia marchwi, *Inżynieria Rolnicza*, nr 12(32), 51–58.
- Bohdziewicz J.: 2001c. Zmienność cech reologicznych korzenia pietruszki. *Inżynieria Rolnicza*, nr 12(32), 59–64.
- Bohdziewicz J.: 2002a. Porównanie właściwości mechanicznych i reologicznych tkanki korzenia selera. *Inżynieria Rolnicza*, nr 5(38), 205–212.
- Bohdziewicz J.: 2002b. Zmienność cech mechanicznych miąższu buraka ćwikłowego w warunkach cyklicznego obciążenia. *Inżynieria Rolnicza*, nr 5(38), 213–219.
- Bohdziewicz J.: 2003a. Analiza procesu pełzania tkanki miąższu buraka ćwikłowego. Część I. Płynięcie lepkosprężyste. *Acta Agrophysica*, nr 83, 11–20.
- Bohdziewicz J.: 2003b. Analiza procesu pełzania tkanki miąższu buraka ćwikłowego. Część II. Płynięcie lepkie. *Acta Agrophysica*, nr 83, 21–31.
- Bohdziewicz J.: 2003c. Zmienność parametrów charakteryzujących zjawisko relaksacji naprężeń w tkance buraka ćwikłowego. *Acta Agrophysica*, nr 83, 33–43.
- Bohdziewicz J.: 2003d. Wpływ zróżnicowania morfologicznego na zmianę parametrów modeli reologicznych miąższu wybranych warzyw korzeniowych. *Acta Agrophysica*, nr 97 vol. 2(3), 499–507.
- Bohdziewicz J.: 2003e. Histereza odkształceń miąższu wybranych warzyw. *Acta Agrophysica*, nr 98 vol. 2(4), 707–716.
- Bohdziewicz J.: 2004. Właściwości reologiczne miąższu warzyw rzepowatych. *Acta Agrophysica*, nr 112 vol. 4(3), 607–617.
- Bohdziewicz J.: 2005. Próba doboru modelu reologicznego tkanki warzyw rzepowatych na podstawie testu relaksacji naprężeń. *Acta Agrophysica*, nr 117 vol. 5(3), 525–533.
- Bohdziewicz J.: 2006. Wpływ zróżnicowania morfologicznego na właściwości mechaniczne bocznych pędów kapusty brukselskiej. *Inżynieria Rolnicza*, nr 2(77), 165–173.

- Bourne M.C.: 1975. Is rheology enough for food texture measurement?. *Journal of Texture Studies*, nr 6(3), 259–265.
- Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J.: 2000. *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*. WNT, Warszawa.
- Brusewitz G.H., Pitt R.E., Gao Q.: 1989. Effects of storage time and static preloading on the rheology of potato tissue. *Journal of Texture Studies*, nr 20(3), 267–284.
- Byszewski W., Haman J.: 1977. *Gleba–maszyna–roślina*. PWN, Warszawa.
- Byszewski W., Haman J., Ostrowska D., Szot B.: 1975. *Ważniejsze właściwości roślin wiążące się z pracą maszyn rolniczych*. PWN, Warszawa.
- Byszewski W.: 1978. Results of investigations on the determination of the physical properties of sugar beet. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 203, 391–397.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1986. Badania właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych – statyczna próba ściskania. *Roczn. Nauk Rol.*, nr 76-C-2, 33–46.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1989. Comparison of rheological models determining the physical properties of sugar beet roots. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 109–112.
- Bzowska-Bakalarz M., Bochyński W.: 1992. Badania właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych – test pelzania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 402, 163–171.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1993. Model reologiczny tkanki korzenia buraka cukrowego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 408, 283–290.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1995. Relaksacja naprężeń w korzeniach buraków cukrowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 423, 85–92.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1996a. Badania właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych – uwagi metodyczne. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 443, 189–198.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1996b. Conventional coefficient of elasticity for sugar beet roots. *Int. Agrophysic*, nr 12(3), 192–198.
- Bzowska-Bakalarz M.: 1998. Wytrzymałość mechaniczna tkanki korzeni buraka cukrowego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 454, 207–212.
- Calzada J.F., Peleg M.: 1978. Mechanical interpretation of stress-strain relationship in solid food. *Journal of Food Science*, nr 43, 1087–1094.
- Celba J.: 1979. *Mechanicke vlastnosti brambor*. *Zemedelska Technika*, nr 25(1), 17–28.
- Celba J., Havlicek Z., Horka B., Kubsova A.: 1981. *Mechanicke vlastnosti biologickych materialu*. *Zemedelska Technika*, nr 27(1), 1–10.
- Chen P., Fridley R.B.: 1972. An analytical method for determining viscoelastic constants of agricultural materials. *Transaction of ASAE*, nr 15(6), 1103–1106.
- Chikwendu S.C., Anazodo U.G.N.: 1984. Poisson's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials – II. : Large deformation approximation. *Transactions of the ASAE*, nr 27(5), 1563–1572.
- Chwiej P., Kuryłowicz M.: 1972. Niektóre właściwości reologiczne buraków ćwikłowych, *Rocznik Technologii i Chemii Żywności*, nr XII (3-4), 289–294.
- Clark R.L., Fox W.R., Welch G.B.: 1971. Representation of mechanical properties of nonlinear viscoelastic materials by constitutive equations. *Transactions of the ASAE*, nr 14(3), 511–516.

- Clayton J.T., Peleg M.: 1977. Reologiczny model pro pevné potraviny. *Zemědělska Technika*, nr 23(2), 91–100.
- Datta A.K., Morrow C.T.: 1983. Graphical and computational analysis of creep curves. *Transactions of the ASAE*, nr 26(6), 1870–1874.
- Derski W., Ziemia S.: 1968. Analiza modeli reologicznych. PWN, Warszawa.
- Diehl K.C., Hamann D.D., Whitefield J.K.: 1979. Structural failure in selected raw fruits and vegetables. *Journal of Texture Studies*, nr 10(4), 371–384.
- Dimitroff G.: 1982. Spannungsrelaxationsuntersuchungen zum Lagerverhalten von Kartoffeln. *Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR*, nr 208, 193–200.
- Esau K.: 1973. Anatomia roślin. PWRiL, Warszawa.
- Fenyvesi L., Huszar I., Petroczki K.: 1989. Determination of rheological characteristics of agricultural materials by repeated load. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 114–121.
- Ferguson J., Kembłowski Z.: 1995. Reologia stosowana płynów. MARCUS, Łódź.
- Findley W., Lai J., Onaran K.: 1976. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. North-Holland, Amsterdam.
- Finney E.E.: 1969a. To define texture in fruits and vegetable. *Agricultural Engineering*, nr 50, 462–465.
- Finney E.E.: 1969b. Objective measurements for texture in foods. *Journal of Texture Studies*, nr 1(1), 19–37.
- Fung Y.C.: 1993. *Biomechanics*, Springer-Verlag, New York.
- Gao Q., Pitt R.E., Bartisch J.A.: 1989. Elastic-plastic constitutive relations of the cell walls of apple and potato parenchyma. *Journal of Rheology*, nr 33(2), 233–256.
- Gates R.S., Pitt R.E., Ruina A., Cooke J.R.: 1986. Cell wall elastic constitutive laws and stress-strain behavior of plant vegetative tissue. *Biorheology*, nr 23(5), 453–466.
- Giessmann E.J., Grau P.: 1981. Spannungsrelaxationsmessungen an Kartoffeln. *Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR*, nr 188, 225–231.
- Giessmann E.J., Sager D.: 1982. Temperaturabhängigkeit der relaxation bei Kartoffeln. *Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR*, nr 208, 63–69.
- Giessmann E.J., Szot B.: 1982. Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf den wert der relaxationskonstanten. *Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR*, nr 208, 53–61.
- Gołacki K.: 1989. A method of describing elasticity and strictness parameters of cylinder shaped plant material. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 126–131.
- Gołacki K.: 1991. The reaction force of a sample on a constant deformation as a parameter of estimation of a physical condition of carrot roots. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 397, 28–32.
- Gołacki K.: 1993. Influence of deformation speed and water potential on parameters of plant tissue critical resistance. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 399, 77–81.
- Gołacki K.: 1994. Usage of criterion of strain failure in case of roots. *Int. Agrophysics*, nr 8, 497–499.

- Gołacki K.: 1996a. Prędkość i energia w procesie deformacji materiału roślinnego na przykładzie korzeni marchwi. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., nr 425, 61–66.
- Gołacki K.: 1996b. Test relaksacji naprężeń dla korzeni marchwi. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., nr 433, 347–351.
- Gołacki K., Stropek Z.: 2001a. Przegląd modeli reologicznych materiałów roślinnych o dużej zawartości wody. Inżynieria Rolnicza, nr 2, 63–68.
- Gołacki K., Dobrzański B., Rybczyński R.: 2001b. Potencjał wodny w tkankach roślinnych w okresie przechowywania. Acta Agrophysica, nr 45, 69–78.
- Gołacki K., Stropek Z.: 2004. Adekwatność opisu reakcji materiału roślinnego na obciążenia mechaniczne na gruncie liniowej teorii sprężystości. Acta Agrophysica, nr 3(3), 453–463.
- Haman J., Marciniak A., Siarkowski Z.: 1978. Probabilistic aspects of the rheological models. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., nr 203, 161–190.
- Haman J., Szot B., Kęsik T.: 1982. Mechanische eigenschaften der karottenwurzeln. Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, nr 208, 71–80.
- Haman J., Konstankiewicz K.: 2000a. Destruction processes in the cellular medium of a plant theoretical approach. Int. Agrophysic, nr 14(1), 37–42.
- Haman J., Konstankiewicz K., Zdunek A.: 2000b. Influence of water potential on the failure of potato tissue. Int. Agrophysic, nr 14(2), 181–186.
- Hellebrand J.: 1998. Impact of technologies on physical properties of agronomic materials. Int. Agrophysic, nr 12(1), 43–47.
- Henry A.Z., Zhang H., Onks D.O.: 2000. New model for elastic behavior of cellular material. Journal of Agricultural Engineering Research, nr 76, 399–408.
- Herold B., Oberbarnscheidt B., Geyer M.: 1998. Mechanical load and its effect on bulb onions due to harvest and post-harvest handling. Journal of Agricultural Engineering Research, nr 71, 373–383.
- Holt J.E., Schroorl D.: 1982. Mechanics of failure in fruits and vegetables. Journal of Texture Studies, nr 13(1), 83–97.
- Hooke R., Shaffer D.: 1969. Modele matematyczne a rzeczywistość. PWN, Warszawa.
- Horvath M.: 1980. Mechanical and agricultural properties of some agricultural materials. Proceedings of the 2nd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Gödöllő, 31–35.
- Huyskens-Keil S., Schreiner M., Widell S.: 1998. Qualitätssicherung bei Radies. TAS-PO-Gartenbaumagazin, nr 7(2), 40–41.
- Johnson K.L.: 1985. Contact mechanics. University Press, Cambridge.
- Jowitt R.: 1974. The terminology of food texture. Journal of Texture Studies, nr 5(3), 351–367.
- Kaifas F.: 1978. A mechanical model of failure. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., nr 203, 325–330.
- Kiesewetter R., Hellebrand J.: 1982. Untersuchungen mechanischer eigenschaften an radieschen (*Raphanus sativus*) und grunspargel (*Asparagus officinalis*). Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, nr 208, 187–192.
- Kisiel I. (red.): 1982. Mechanika skał i gruntów. Mechanika Techniczna t.VII. PWN, Warszawa.

- Kisiel I.: 1980. Reologiczne równania stanu ośrodków quasiliniowych. PAN, Wrocław.
- Kleiber M. (red.): 1995. Komputerowe metody mechaniki ciał stałych. Mechanika Techniczna t.X. PWN, Warszawa.
- Kokkoras I.F., Gerasopoulos D., Olympios C., Passam H.: 1995. The effect of temperature and water status of carrot tissue on residual strains and stresses. *Acta Horticulturae*, nr 379, 491–498.
- Kołota E., Orłowski M., Osińska M.: 1994. *Warzywnictwo*. wyd. AR, Wrocław.
- Kolowca J., Krzysztofik B.: 2003. Właściwości lepkosprężyste miększu bulw ziemniaka różnej wielkości. *Acta Agrophysica*, nr 2(4), 771–776.
- Konstankiewicz K., Pukos A.: 1995. Inspiracje Hamana w kierunku rozwoju nauk agrofizycznych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 424, 59–63.
- Konstankiewicz K., Pukos A.: 1998. Metodyczne aspekty w badaniach nad nową mechaniką materiałów rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, nr 2(3), 5–20.
- Konstankiewicz K., Pukos A., Zdunek A.: 1996. Teorie odkształceń materiałów biologicznych w świetle relaksacji naprężeń. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 443, 353–363.
- Konstankiewicz K., Pawlak K., Zdunek A.: 2001a. Influence of structural parameters of potato tuber cells on their mechanical properties. *Int. Agrophysic*, nr 15(4), 243–246.
- Konstankiewicz K., Zdunek A.: 2001b. Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue. *Int. Agrophysic*, nr 15(1), 27–30.
- Kramer A., Szcześniak A.S.: 1973. *Texture measurements of foods*. Reidel Publishing ed., Dordrech.
- Krzysztofik B., Nawara P.: 2003. Zmiany właściwości bulw ziemniaka, wynikające z czynników agrotechnicznych. *Acta Agrophysica*, nr 2(4), 777–786.
- Lack A.J., Evans D.E.: 2003. *Biologia roślin*. PWN, Warszawa.
- Lewicki P. (red.): 1999. *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*. WNT, Warszawa.
- Lichtensteiger M.J., Holmes R.G., Hamdy M.Y., Blaisdell J.L.: 1988. Evaluation of Kelvin model coefficients for viscoelastic spheres. *Transaction of the ASAE*, nr 31(1), 288–292.
- Lippert F.: 1995. Methode zur induktion der Rissbildung bei Sprossknollen von Kohlrabi (*Brassica oleracea var. gongylodes* L.). *Gartenbauwissenschaft*, nr 60(4), 187–190.
- Lu R., Puri V.M.: 1991. Characterization of nonlinear creep behavior of two food products. *Journal of Rheology*, nr 35(6), 1209–1233.
- Marks N., Juliszewski T.: 1980. Porównawcze badania wytrzymałościowe wybranych odmian ziemniaka. *Roczn. Nauk Rol.*, nr 74-C-3, 107–121.
- McCullagh P., Nedler J.A.: 1983. *Generalized linear models*. Chapman & Hall ed., New York.
- McGarry A.: 1995. Cellular basis of tissue toughness in carrot (*Daucus carota* L.) storage roots. *Annals-of-Botany*, nr 75(2), 157–163.
- McRae D.C., Muir A.Y.: 1989. Instrumental tests for damage susceptibility of potatoes. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 187–193.

- Mempel H., Herold B., Geyer M.: 1997. Relations between water balance and damage susceptibility of carrots. Abstracts of International Conference on Agrophysics, Lublin.
- Michalik H.: 1986. Wpływ procesów technologicznych i składowania warzyw na zawartość azotanów i azotynów. *Ogrodnictwo*, nr 12, 8–9.
- Mohsenin N.N.: 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon & Breach Science Publ., New York.
- Mohsenin N.N., Cooper H.E., Tukey L.: 1963. Engineering approach to evaluating textural factors in fruit and vegetables. *Transactions of the ASAE*, nr 6(2), 85–88.
- Mohsenin N.N., Zasko J.: 1976. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, nr 21(3), 193–205.
- Morrow C.T., Mohsenin N.N.: 1966. Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials. *Journal of Food Science*, nr 31(5), 688–698.
- Murase H., Merva G.E., DeBaerdmacker J.G., Segerlind L.J.: 1980a. Importance of the water potential concept in studying physical properties of plant materials. *Proceedings of the 2nd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Gödöllő*, nr 35, 55–63.
- Murase H., Merva G.E., Segerlind L.J.: 1980b. Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. *Transactions of the ASAE*, nr 23(4), 794–800.
- Nadulski R.: 1997. Influence of various factors on the stress relaxation in selected materials of vegetable origin. Abstracts of International Conference on Agrophysics, Lublin.
- Narkiewicz-Jodko J.: 1985. *Szkodniki i choroby roślin warzywnych*. PWRiL, Warszawa.
- Nason A., Dehaan R.L.: 1981. *Świat biologii*. PWRiL, Warszawa.
- Neimitz A.: 1998. *Mechanika pękania*. PWN, Warszawa.
- Niklas K.J.: 1988. Dependency of the tensile modulus on transverse dimensions, water potential, and cell number of pith parenchyma. *American Journal of Botany*, nr 75(9), 1286–1292.
- Nowacki W., Czerko Z.: 1993. Changes in resistance to mechanical damage of potato tubers throughout the storing period. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 399, 167–174.
- Nowak R.: 2002. *Statystyka dla fizyków*. PWN, Warszawa.
- Nowicki W., Gąsiorowski H., Banasik P., Kołodziejczyk P.: 1976. Relaxace napeti bulvy cukrove repy pri jednoosem namachani v tlaku. *Zemedelska Technika*, nr 22(10), 591–594.
- Nowicki W., Banasik P., Kołodziejczyk P.: 1978. Creep process of beet roots subject to axial compression. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 203, 403–406.
- Osiński Z.: 1986. *Tłumienie drgań mechanicznych*. PWN, Warszawa.
- Pabis S.: 1985. *Metodologia i metody nauk empirycznych*. PWN, Warszawa.
- Paulsen M.R.: 1978. Failure resistance to compressive loading. *Transactions of ASAE*, nr 21(4), 1210–1216.
- Pazdro Z.: 1983. *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Peleg M.: 1976. Consideration of a general rheological model for the mechanical behavior of viscoelastic solid food materials. *Journal of Texture Studies*, nr 7, 243–255.

- Peleg M.: 1979. Characterization of the stress relaxation curves of solid foods. *Journal of Food Sciences*, nr 44(1), 277–281.
- Peleg M.: 1980. *Food process engineering*. Applied Science Publ. Ltd, London.
- Peleg M.: 1983. A rheological model of non-linear viscoplastic solids. *Journal of Rheology*, nr 27(5), 411–431.
- Peleg M.: 1984. Application of nonlinear phenomenological rheological models to solid food materials. *Journal of Texture Studies*, nr 15, 1–22.
- Peterson M.S., Johnson A.H.: 1979. *Encyclopedia of food science*, AVI ed., Westport Connecticut.
- Pijanowski E., Dłużewski M., Dłużewska A., Jarczyk A.: 1996. *Ogólna technologia żywności*. WNT, Warszawa.
- Pitt R.E.: 1982. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetation tissue. *Transactions of the ASAE*, nr 25(6), 1776–1784.
- Pitt R.E., Chen H.L.: 1983. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. *Transactions of the ASAE*, nr 26(4), 1275–1280.
- Pitt R.E., Davis D.C.: 1984. Finite element analysis of fluid-filled cell response to external loading. *Transactions of the ASAE*, nr 27(6), 1976–1983.
- Pollak N., Peleg M.: 1980. Early indications of failure at large compressive deformations of solid foods. *Journal of Food Science*, nr 45(4), 825–830.
- Popko H., Hys L.: 1985. The study of the resistance of some agricultural food products cutting. *Papers of the 3rd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 683–686.
- Prigogine I., Stengers I.: 1990. *Z chaosu ku porządkowi*. PIW, Warszawa.
- Rahman S.: 1995. *Food properties handbook*. CRC Press, New York.
- Rao M.A., Rizvi S.S.H.: 1995. *Engineering properties of foods*. Marcel Dekter Inc., New York.
- Reiner M.: 1960. *Deformation, strain, and flow*. Lewis ed., London.
- Reiner M.: 1971. *Advanced rheology*, Lewis ed. London.
- Rohm H., Jaros D., DeHaan M.: 1997. A video-based method for determination of average stress-strain relations in uniaxial compression of selected foods. *Journal of Texture Studies*, nr 28(3), 245–255.
- Rumsey T.R., Fridley R.B.: 1977. A method for determining the shear relaxation functions of agricultural materials. *Transactions of ASAE*, nr 20(2), 386–389.
- Reznicek R.: 1984. *Physical properties of agricultural materials*. VSZ, Praha.
- Reznicek R., Blahovec J.: 1978. Navrh definice texturniho profilu ovoce a zeleniny. *Zemedelska Technika*, nr 24(9), 547–552.
- Sager D.: 1988. On the determination of Young's modulus in farm materials. *Sbornik Mechanizacni Fakulty VSZ, Praha*, 209–214.
- Scanlon M.G., Long A.E.: 1995. Fracture strengths of potato tissue under compression and tension at two rates of loading. *Food Research International*, nr 28(4), 397–402.
- Scanlon M.G., Pang C.H., Biliaderis C.G.: 1996. The effect of osmotic adjustment on the mechanical properties of potato parenchyma. *Food Research International*, nr 29(5–6), 481–488.

- Segerlind L.I., Snovar B.A., Heldman D.R.: 1977. Compression and relaxation properties of carrot. *Journal of Texture Studies*, nr 7(4), 451–456.
- Shama F., Sherman P.: 1973. Stress relaxation during force-compression studies on foods with the Instron universal testing machine. *Journal of Texture Studies*, nr 4, 353–362.
- Sherif S.M., Segerlind L.I., Frame I.S.: 1976. An equation for the modulus of elasticity of radially compressed cylinder. *Transaction of ASAE*, nr 19(4), 782–785.
- Sitkei G.: 1987. *Mechanics of agricultural materials*. Akademiai Kiado, Budapest.
- Sitkei G.: 1994. Non-linear rheological method for describing compaction processes. *Int. Agrophysics*, nr 8, 137–142.
- Skorzyńska Z., Zdanowicz A.: 1978. Studies on potato resistance to mechanical damage. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 203, 407–412.
- Smith J. M.: 1968. *Mathematical ideas in biology*, University Press, Cambridge.
- Sobol Z.: 2003. Wpływ wybranych czynników na niektóre właściwości mechaniczne bulw ziemniaka. *Acta Agrophysica*, nr 83, 163–176.
- Stankiewicz A., Gołacki K.: 2003. Metoda wyznaczania ciągłego spektrum relaksacji lepkościowych materiałów roślinnych. *Acta Agrophysica*, nr 2(3), 627–638.
- Szabo A.S.: 1999. Food physic as an important part of food science and applied physic. *Int. Agrophysic*, nr 13(4), 407–409.
- Szczeciński T. (red.): 1984. *Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego*. Mechanika Techniczna t.IX. PWN, Warszawa.
- Szcześniak A.S.: 1975. Theory determination and control of physical properties of food materials. Riedel Publ. Co., Dordrecht.
- Szcześniak A.S.: 1977. Rheological problems in the food industry. *Journal of Texture Studies*, nr 8(3), 119–133.
- Szot B., Gołacki K.: 1985. Estimation of the variability of mechanical properties of carrot roots during storage. *Papers of the 3rd International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 867–872.
- Szot B., Gołacki K.: 1989. The relationship between the elasticity and viscosity and the parameters determining the status of water of carrot roots. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 234–239.
- Szot B., Gołacki K.: 1991a. Determination of the variation in the physical features of carrot roots influencing quantity and quality losses during harvesting and storage. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 389, 205–212.
- Szot B., Gołacki K.: 1991b. The influence of the speed of deformation on the course of stress relaxation in carrot roots. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 397, 69–73.
- Tempczyk M.: 1995. *Świat harmonii i chaosu*. PIW, Warszawa.
- Timoshenko S.P., Goodier J.N.: 1970. *Theory of elasticity*. McGraw-Hill ed., New York.
- Villee C.A.: 1990. *Biologia*. PWRiL, Warszawa.
- Weber J.: 1990. Intercellular spaces enhance potato tuber elasticity. *Potato Research*, nr 33(3), 335–340.
- Wilczyński K.: 2001. *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*. WNT, Warszawa.
- Wirsing F., Horneburg B.: 1994. Die beschadigungsempfindlichkeit von Kartoffelknollen in abhangigkeit vom Genotyp. *Kartoffelbau*, nr 45(5), 198–201.
- Wójcicki R.: 1982. *Wykłady z metodologii nauk*. PWN, Warszawa.

MODELING OF DEFORMATION COURSE OF VEGETABLE'S PARENCHYMA TISSUES IN QUASI-STATIC CHANGES OF LOAD CONDITIONS

S u m m a r y

Considering the deflection of $\sigma = f(\varepsilon)$ curve from the lineal course there was proposed alternative description method of vegetable parenchyma tissue deformations, subjected to quasi- static loads. Work expenditures of real body deformation were compared with equivalent unitary energy of hypothetical lineally elastic body. There was obtained representation of the efficient value of mechanical resistance in the form of the apparent coefficient of elasticity E_C . Realized immediate tests, as well as the hysteresis tests showed that in spite of certain limitations the coefficient E_C could be treated as the materials constant.

There were determined dependences between the coefficient E_C value and efficiency of the ultimate strength σ_{max} and the deformation ε . Those parameters were showed as regression equalizations characteristic for tissues of selected vegetable species. Also there was assessed the ability of resilient energy accumulation in cyclical load conditions. Statistical analysis was done for determination the influence of sizes and plant varieties, as well as places and the method of sample obtaining on the results of experiments.

Usefulness of models constructed basing on generalized rheological Maxwell and Kelvin models were also taken into account. Regarding approximation method of real courses there was observed variability of model's parameters dependent on the test time as the consequence of boundary conditions changes.

There were proposed empirical formulas determining combination of the elastic and viscous elements and the one with the non-linear time dependence. The parameters of models in given measurement conditions can be treated as constants of materials used to compare rheological properties of tissues of selected vegetable species.