

**Modelowanie deformacji
korzenia marchwi
w warunkach obciążeń skupionych
metodą elementów skończonych**

ROMAN STOPA

**Modelowanie deformacji
korzenia marchwi
w warunkach obciążeń skupionych
metodą elementów skończonych**



Opiniodawcy:
prof. dr hab. Józef Horabik
prof. dr hab. Jerzy Weres

Redaktor merytoryczny
prof. dr hab. inż. Zygmunt Owskiak

Opracowanie redakcyjne
dr Ewa Jaworska

Korekta
Janina Szydłowska

Łamanie
Teresa Alicja Chmura

Projekt okładki
Halina Sebzda

Monografie XCIII

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2010

ISSN 1898–1151
ISBN 978–83–60574–97–3

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO WE WROCŁAWIU
Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki
ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel. 71 328–12–77
e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 100 + 16 egz. Ark. wyd. 13,1. Ark. druk. 11,75
Druk i oprawa: EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, Spółka Jawna
ul. Brzeska 4, 87–800 Włocławek

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
1. WSTĘP	9
2. PRZEGLĄD LITERATURY	11
2.1. Budowa korzenia marchwi	13
2.2. Badania właściwości wytrzymałościowych materiałów biologicznych	15
2.2.1. Wyznaczenie modułu sprężystości	18
2.2.2. Wyznaczenie stałej Poissona	20
2.2.3. Wyznaczenie przemieszczeń przekroju poprzecznego	23
2.3. Zagadnienia kontaktowe	24
2.3.1. Naciski powierzchniowe w przypadku płodów rolnych	27
2.4. Modelowanie materiałów biologicznych	30
2.4.1. Metoda elementów skończonych	33
2.4.2. Modelowanie materiałów biologicznych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych	36
2.4.3. Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania zagadnień kontaktowych	37
2.4.4. Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania zagadnień kontaktowych w materiałach biologicznych	38
3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO	42
4. CEL PRACY	47
5. DYSKRETNY MODEL KORZENIA MARCHWI	49
5.1. Założenia tarczowego modelu korzenia marchwi – program Cosmos/M	51
5.1.1. Model geometryczny	51
5.1.2. Model dyskretny	53
5.1.3. Naciski powierzchniowe	54
5.1.4. Przemieszczenia	55
5.2. Założenia przy budowie modelu 3D korzenia marchwi – program Abaqus	57
6. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH	62
6.1. Przedmiot badań eksperymentalnych	63
6.2. Pomiary podstawowych właściwości wytrzymałościowych	64
6.2.1. Wyznaczenie umownego modułu sprężystości	65
6.2.2. Wyznaczenie stałej Poissona	66
6.3. Pomiary nacisków powierzchniowych	67
6.3.1. Rozkłady nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia	67
6.3.2. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku	70

6.4. Pomiar przemieszczeń	73
6.4.1. Wyznaczenie map i rozkładów przemieszczeń u_x , u_y i u_z metodą interferometrii plamkowej (ESPI)	73
6.4.2. Rozkłady przemieszczeń u_x , u_y wyznaczone metodą fotografii plamkowej	75
6.4.3. Rozkłady przemieszczeń u_y w pełnym zakresie odkształceń	76
6.5. Badania mikroskopowe	77
7. WYNIKI BADAŃ	79
7.1. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe kory i rdzenia	79
7.1.1. Umowny moduł sprężystości do naprężenia z przedziału $\sigma_1=0\div 0,8$ MPa w odmianie Karotan	79
7.1.2. Umowny moduł sprężystości dla naprężenia z przedziału $\sigma_2 = 1,0\div 1,9$ MPa w odmianie Karotan	82
7.1.3. Stała Poissona w odmianie Karotan	83
7.1.4. Umowny moduł sprężystości przy naprężeniu z przedziału $\sigma_2 = 1\div 1,9$ MPa w odmianie Major i Merida	85
7.2. Rozkłady nacisków powierzchniowych	86
7.2.1. Obiekty rzeczywiste	86
7.2.2. Model tarczowy MES (COSMOS/M)	99
7.2.3. Model 3D MES (Abaqus)	101
7.3. Mapy i rozkłady przemieszczeń u_x , u_y i u_z	104
7.3.1. Obiekty rzeczywiste	104
7.3.2. Model tarczowy MES (COSMOS/M)	112
7.3.3. Model 3D MES (Abaqus)	115
7.4. Badania mikroskopowe	120
7.5. Wyznaczanie nacisków dopuszczalnych	125
7.5.1. Naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość doraźną	126
7.5.2. Naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość przechowalniczą	128
8. WERYFIKACJA DYSKRETNEGO MODELU KORZENIA MARCHWI	130
8.1. Mapy i rozkłady przemieszczeń w modelu tarczowym MES	133
8.2. Rozkłady przemieszczeń dla modelu 3D MES	142
9. DYSKUSJA NAD WYNIKAMI	144
9.1. Właściwości wytrzymałościowe	144
9.2. Model dyskretny	145
9.3. Naciski powierzchniowe	147
9.3.1. Naciski powierzchniowe jako funkcja obciążenia	148
9.3.2. Naciski powierzchniowe wzdłuż powierzchni styku	151
9.4. Naciski dopuszczalne	157
10. PODSUMOWANIE	159
11. WNIOSKI	163
12. PIŚMIENNICTWO	165

Wykaz ważniejszych oznaczeń

ξ	– smukłość [-]
φ	– średnica próbki [mm]
R_r	– promień rdzenia, średnica zewnętrzna korzenia marchwi [mm]
R_k	– promień korzenia marchwi [mm]
h	– grubość warstwy kambium [mm]
l	– długość próbki [mm]
l_0	– długość styku [mm]
A	– pole powierzchni styku [mm ²]
ν	– współczynnik Poissona [-]
E	– umowny moduł sprężystości [MPa]
E_C	– umowny moduł sprężystości dla próbki ściskanej nieswobodnie [MPa]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	– współrzędne wektora naprężeń w kierunku odpowiednio osi x, y i z [MPa]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	– współrzędne wektora odkształceń w kierunku odpowiednio osi x, y i z [MPa]
u_x, u_y, u_z	– współrzędne wektora przemieszczeń w kierunku odpowiednio osi x, y i z [mm]
p_{sr}	– średni nacisk powierzchniowy [MPa]
F	– obciążenie [N]
$F^? = F/l_0$	– obciążenie przypadające na jednostkę długości styku [N/mm]
p_{max}	– maksymalne naciski powierzchniowe [MPa]
p_{Hmax}	– maksymalne naciski Hertza [MPa]
k	– współczynnik zależny od właściwości materiałowych stykających się elementów [-]

1. WSTĘP

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej postawiło przed naszym rolnictwem wiele nowych zadań. Dotyczy to zarówno rolników, którzy powinni taniej wytwarzać produkty spełniające coraz bardziej restrykcyjne normy jakościowe, jak i przedsiębiorstw obsługujących rolników, zajmujących się między innymi przetwórstwem produktów rolnych czy produkcją maszyn rolniczych. Spełnienie wysokich wymagań dotyczących jakości produktów rolniczych w warunkach ostrej konkurencji na rynkach światowych wymaga opracowywania nowych technologii produkcji. Powstają nowe produkty, których zadaniem jest zaspokajanie rosnących potrzeb społeczeństw, rozwijających się w gwałtownym tempie. Konsumenci nie zadowolają się już tylko prostymi płodami rolnymi, ale wymagają wysokiego przetworzenia i nowych właściwości smakowych, odżywczych, a także modnego estetycznego wyglądu.

Szybko zmieniające się wymagania rynku stawiają poważne zadania przed wszystkimi ogniwami produkcji żywności, począwszy od laboratoriów genetycznych, gdzie opracowywane są nowe odmiany, poprzez uprawę, siew, zbiór i transport, aż do procesów przetwórczych. Na wszystkich etapach prace wspomagane są przez maszyny o różnym stopniu złożoności konstrukcji. Wiąże się to nierozdzielnie z projektowaniem i budową maszyn umożliwiających tworzenie nowych technologii produkcji i przetwórstwa.

Zarówno genetycy, technolodzy żywności, jak i konstruktorzy maszyn rolniczych muszą mieć dostęp do precyzyjnych danych dotyczących własności wytrzymałościowych produktów rolniczych. Dane te powinny dotyczyć samej tkanki roślinnej i całych roślin. Ponadto na każdym etapie procesu przetwórczego konieczna jest nieustanna kontrola wybranych właściwości surowca.

Rozwiązania teoretyczne nie zawsze dają zadowalające rezultaty ze względu na brak wiarygodnych modeli obliczeniowych. Nie ma jednolitej teorii uwzględniającej własności wytrzymałościowe materiału pochodzenia biologicznego. Duża zmienność cech wytrzymałościowych w zależności od gatunku, odmiany, a nawet pojedynczego egzemplarza rośliny utrudnia określenie jej własności i zakłóca analizę zjawisk zachodzących pomiędzy elementami struktury wewnętrznej.

Nieocenione przy wyznaczaniu własności wytrzymałościowych mogą być badania doświadczalne zarówno obiektów rzeczywistych, jak ich modeli. W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój doświadczalnych metod badawczych, w większości przypadków oparty na technologii cyfrowej i komputerowym przetwarzaniu danych. Ta różnorodność, poza oczywistymi zaletami, wprowadziła pewną dezorientację wśród tech-

nologów żywności oraz pracowników ośrodków badawczych dostarczających danych przemysłowi przetwórcemu.

Podczas konferencji Carrot Conference w Perth w Zachodniej Australii [Carrot Conference 2000] przedstawiciele większości krajów europejskich, a także Stanów Zjednoczonych i Australii zgodnie stwierdzili, że w najbliższym czasie czeka nas gwałtowny wzrost spożycia marchwi w różnych postaciach. Marchew w wielu krajach na całym świecie stanowi jeden z podstawowych produktów w kategorii warzyw korzeniowych.

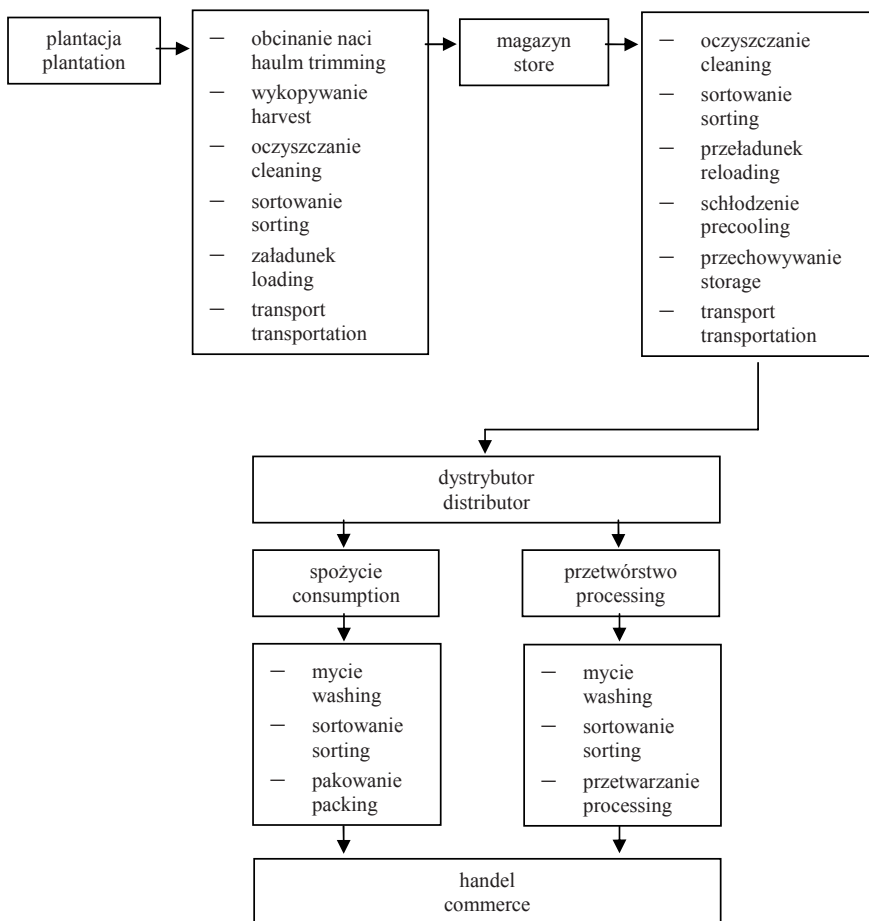
2. PRZEGLĄD LITERATURY

Materiały biologiczne takie jak warzywa i owoce poddane są różnorodnym obciążeniom statycznym i dynamicznym związanym ze zbiorem, przeladunkiem, transportem, sortowaniem i innymi zabiegami niezbędnymi do uzyskania wyrobu finalnego. Większość uszkodzeń powstaje w wyniku uderzeń i działania długotrwałych statycznych obciążeń ściskających.

W literaturze można znaleźć wiele publikacji dotyczących badań eksperymentalnych opisujących rodzaje i zasięg uszkodzeń, dotyczących szczególnie produktów rolniczych łatwo się psujących takich jak jabłka, pomidory czy brzoskwinie [Klein 1987, Schulze i in. 1990, Schulze i in. 1991, Hyde 1997, Thompson 1996, Studman 1996]. Zbudowane zostały modele pozwalające na zdefiniowanie i klasyfikację najczęściej występujących uszkodzeń jabłek w zależności od obciążenia [Holt i in. 1981, Holt i Schoorl 1984, Chen i Sun 1981, Chen i Yazdani 1991, Jones i in. 1991, Garcia i in. 1995 i Roudot i in. 1991]. Rozważania energetyczne często prowadzone są przy założeniu, że energia zaabsorbowana przez materiał składa się z energii odkształcenia sprężystego, energii wywołującej przepływ cieczy przez ściany komórkowe oraz energii zużytej na trwałe zniszczenie tkanek [Gao i in. 1989, Mollo i in. 1998, Murase i Merva 1977]. Przydatne w praktyce są metody szacowania uszkodzeń na podstawie zaabsorbowanej energii [Schoorl i Holt 1980].

Duże znaczenie praktyczne ma poznanie obciążeń krytycznych i to nie tylko dotyczących samego momentu obciążania, ale również z punktu widzenia odporności na zniszczenie w czasie przechowywania [Hung 1993, Shewfelt i in. 1995, Studman 1996, 1999, Pang i in. 1994]. Zdefiniowanie obciążeń krytycznych i przyjęcie odpowiednich kryteriów niezbędnych do ich wyznaczenia było przedmiotem zainteresowania wielu badaczy [Chen i Chen 1984, Gołacki 1993, Haghghi i Seperlind 1988, Umeda i in. 1994]. Przeprowadzone badania nie doprowadziły jednak do sformułowania na tyle ogólnych wniosków, aby można je było zastosować z powodzeniem na dużą skalę.

Kryterium obciążenia krytycznego nie musi być związane w bezpośredni sposób z mechaniczną stroną oddziaływania maszyn na produkt roślinny. Często za wartości krytyczne obciążenia przyjmuje się takie, które powodują rozpoczęcie procesów fermentacyjnych. Przyjęcie takich założeń powoduje konieczność prowadzenia badań biochemicznych zmierzających do wyjaśnienia mechanizmów uwalniania enzymów powodujących procesy fermentacyjne [Garcia i in. 1988, Holt i in. 1997, Pitt 1982, Rodriguez i in. 1990, Vamos-Vigyazo 1981, Wenian i in. 1991]. Wyniki badań mają na celu określenie wartości dopuszczalnych badanych wielkości ze względu na przydatność surowca do celów przechowalniczych i przetwórczych i mogą wzbogacić bazę danych do klasyfikacji marchwi z wykorzystaniem systemu ekspertowego [Sojak i Głowacki 2008].



Rys. 2.1. Droga korzeni marchwi od producenta do produktu finalnego
 Fig. 2.1. The way of the carrot root from the manufacturer to the final product

Osobnym, ważnym zagadnieniem jest modelowanie procesów zachodzących z udziałem materiałów roślinnych. Pod względem metodologicznym nie różni się ono w istotny sposób od modelowania innych obiektów inżynierskich. Podstawową trudność przy budowie poprawnych modeli materiałów pochodzenia biologicznego stwarza zdobycie wiarygodnych informacji i ustalenia zakresu wiedzy o modelowanym obiekcie lub procesie. Informacje takie można uzyskać na podstawie analizy piśmiennictwa naukowego lub na podstawie przeprowadzonych eksperymentów.

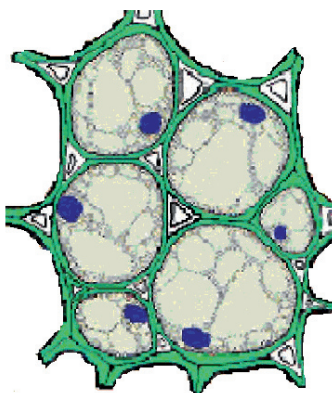
Polska znajduje się w ścisłej czołówce producentów warzyw. W 2008 r. wyprodukowano 4 809 ton warzyw gruntowych, z czego około 20% przypada na produkcję marchwi. Uprawa marchwi zajmuje około 30 tys. ha, co daje jej trzecie miejsce w Polsce

pod względem powierzchni uprawy [Rocznik statystyczny 2008], plon zawiera się w granicach 40 t/ha [Łukasiak 2007]. Marchew jest dostępna przez cały rok [Górski 2007]. Jest chętnie spożywana w postaci nieprzetworzonej, ale również stanowi ona surowiec przemysłowy do produkcji mrożonek, soków przecierowych, soków zagęszczonych oraz suszu.

Uszkodzenia korzeni marchwi powstałe w procesie zbioru i transportu, a także przechowywania są źródłem poważnych strat dla plantatorów. Na każdym etapie produkcji (rys. 2.1) korzeń marchwi jest narażony na wielokrotne oddziaływanie elementów roboczych maszyn rolniczych. Najczęściej mają one kształt powierzchni walcowych o różnych promieniach (sortowanie, oczyszczanie) oraz powierzchni płaskich o różnych szerokościach (wykopywanie, transport, pakowanie).

2.1. Budowa korzenia marchwi

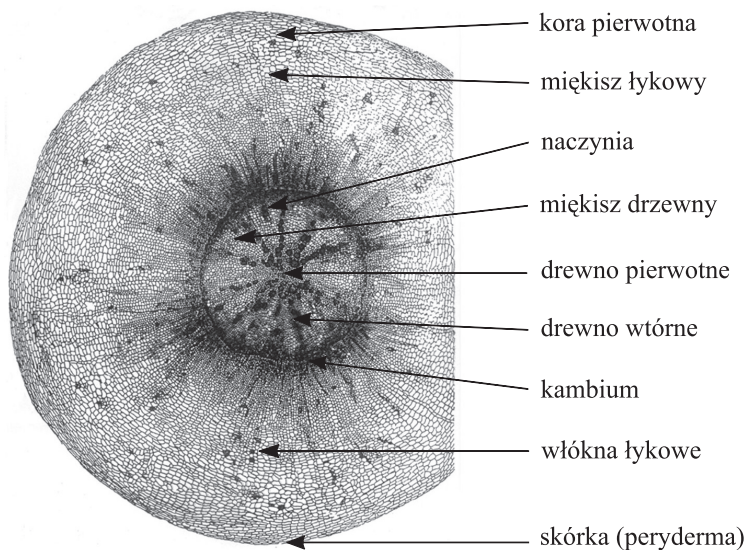
Marchew uprawna (łac. *Daucus crota*) jest rośliną dwuletnią, w pierwszym roku wytwarza liście i korzeń spichrzowy, w drugim liście i pędy kwiatostanowe [Orłowski 1992, Janiszewska i in. 1986, Jasnowska i Radomski 1995]. Najważniejszą częścią marchwi z rolniczego punktu widzenia jest korzeń spichrzowy. Zaczyna się on tworzyć miesiąc po wzejściu rośliny z korzenia palowego. Początkowo korzeń tylko się wydłuża, w późniejszych fazach wegetacji wydłuża się i zwiększa średnicę, aż w końcu tylko zwiększa średnicę. Korzeń marchwi, jak większość warzyw, zbudowany jest głównie z tkanki miękkiszowej – parenchymy (rys. 2.2), a rolę pomocniczą spełniają tkanki przewodzące – miękisz ksylemu i miękisz floemu rozdzielone warstwą kambium [Nason i Dehaan 1981]. Od strony wytrzymałościowej najbardziej interesujące są cechy charakterystyczne dotyczące kształtu i wymiarów komórek. Komórki parenchymy są izodiametryczne (w obrębie określonej tkanki mają jednakowy kształt i wymiary), posiadają cienkie celulozowe ścianki oraz przestwory komórkowe różnej wielkości.



Rys. 2.2. Schemat tkanki podstawowej [www.umw.edu.pl/botanika/]

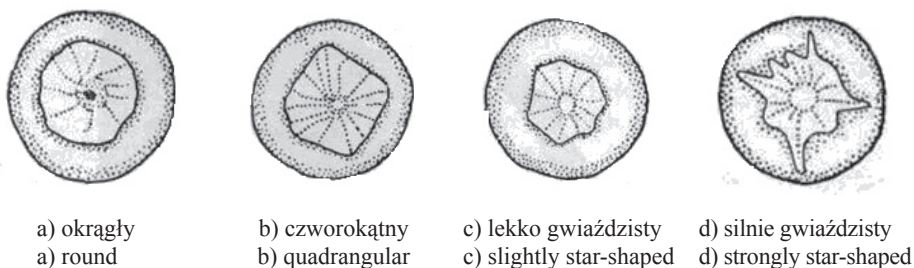
Fig. 2.2. Diagram of the basic tissue

Przekrój poprzeczny korzenia marchwi (rys. 2.3) składa się głównie z warstwy kory pierwotnej, zbudowanej w większości z tkanki miększowej (miększ łykowy) oraz rdzenia o nieco bardziej skomplikowanej budowie. Obie warstwy oddzielone są od siebie cienką powłoką tkanki twórczej (kambium). Warstwa miazgi twórczej leży na granicy pomiędzy rdzeniem i korą, a poznanie jej właściwości może mieć duże znaczenie podczas badań wytrzymałościowych marchwi [Stopa i in. 2008]. Zewnętrzna powierzchnia kory pokryta jest cienką warstwą komórek perydermy pełniących rolę ochronną. Warstwa kory w przekroju poprzecznym jest stosunkowo jednorodna. Komórki parenchymy posiadają zbliżone wymiary i są równomiernie rozmieszczone na całej powierzchni, a jednorodność kory zakłócają jedynie pojawiające się w nieregularny sposób martwe komórki włókna łykowego. Budowa rdzenia nie wykazuje już takiego stopnia jednorodności, chociaż głównym elementem budowy jest tkanka miększowa (miększ drzewny). Wewnątrz rdzenia centralnie rozmieszczone są komórki drewna pierwotnego (protoksylem) oraz promieniowo komórki drewna wtórnego (metaksylem). Oprócz nich w nieregularny sposób w okolicach kambium widoczne są naczynia w postaci martwych komórek tworzących długie, silnie zgrubiałe rurki. Miazga (kambium waskularne) występuje pomiędzy pierwotnym łykiem (protofloem) i pierwotnym drewnem. Jej dzielące się komórki odkładają na zewnątrz komórki łyka wtórnego (metafloem), a do środka, komórki wtórnego drewna, które funkcjonalnie zastępują pierwotne łyko i drewno. W ten sposób roślina przyrasta na grubość.



Rys. 2.3. Przekrój poprzeczny korzenia spichrzowego marchwi [Ochnik 2007]
 Fig. 2.3. Transverse cross section of the storage root of carrot

Odmiany marchwi różnią się również kształtem (rys. 2.4) i wielkością walca osiowego [Kołota i in. 1994, Kołota i Orłowski 1999]. W pracach hodowlanych dąży się do zmniejszania wielkości walca osiowego, gdyż posiada on mniejszą wartość odżywczą w stosunku do kory. Kształt rdzenia, jak wykazały badania elastooptyczne [Stopa i Romański 2006], ma istotne znaczenie przy zachowaniu się modelu korzenia marchwi pod działaniem obciążenia promieniowego i może mieć wpływ na cechy wytrzymałościowe całego korzenia. Koncentracja naprężeń w okolicach warstwy kambium jest największa dla rdzenia czworokątnego w przypadku obciążania w kierunku przekątnej, a najmniejsza w przypadku rdzenia okrągłego.



Rys. 2.4. Kształty walca osiowego w korzeniach marchwi [Kołota i Orłowski 1999]

Fig. 2.4. The shapes of the axial cylinder in the carrot roots

Z punktu widzenia modelowania korzenia marchwi pod kątem badań wytrzymałościowych z uwzględnieniem warstwowej budowy najbardziej interesujące są dane dotyczące właściwości warstwy kory i rdzenia. Pojawiające się w warstwie kory włókna lękowe zwiększają w niewielkim stopniu właściwości wytrzymałościowe tkanki pierwotnej oraz wpływają w dużej mierze na właściwości anizotropowe materiału kory. Zjawisko to nasila się w odniesieniu do warstwy rdzenia ze względu na procentowo większy udział komórek zdrewniałych w stosunku do tkanki miękkiszowej. Istotne jest uwzględnienie roli, jaką w budowie korzenia marchwi odgrywa warstwa kambium. Właściwości wytrzymałościowe tej warstwy są trudne do wyznaczenia ze względu na jej wymiary, ale należy pamiętać, że spełnia ona ważną rolę z wytrzymałościowego punktu widzenia jako łącznik między rdzeniem i warstwą kory.

2.2. Badania właściwości wytrzymałościowych materiałów biologicznych

Badania właściwości wytrzymałościowych warzyw prowadzone były w celu oceny danej odmiany pod kątem bezpośredniej konsumpcji, przetwórstwa lub trwałości przechowalniczej. W ostatnim okresie coraz częściej wyznacza się właściwości wytrzymałościowe jako dane wejściowe do coraz chętniej budowanych różnorodnych modeli warzyw.

Ocena przydatności produktów roślinnych do bezpośredniej konsumpcji nie jest znormalizowana i ma charakter subiektywny. Ocenia się głównie walory smakowe i zapachowe oraz budowę i strukturę materiału. Badania organoleptyczne, zmierzające do określenia przydatności konsumpcyjnej, prowadzone przy wykorzystaniu różnych technik pomiarowych [Blahovec i in. 1975, Bourne 1975, Finney 1969a, 1969b, Jowitt 1974, Kramer i Szcześniak 1973, Mohsenin i in. 1963, Morrow i Mohsenin 1966, Szcześniak 1975] nie doprowadziły do jednoznacznego rozwiązania tego problemu. Strukturę materiału, jako ważny parametr przydatności konsumpcyjnej, określa się zwykle w kontekście zmian zachodzących w procesach technologicznych [Blahovec 1985b, 2001b, Blahovec i in. 1987, 1990, Brusewitz i in. 1989, Diehl i in. 1979, Herold i in. 1998, Kaifas 1978, Kołowca i Krzysztofik 2003, Mohsenin 1986, Nowacki i Czerko 1993, Peleg 1980, Popko i Hys 1985, Rao i Rizvi 1995].

Właściwości materiałów biologicznych wyznacza się w zależności od celu, jakiemu mają służyć. Według Mohsenina [1986] cechami wytrzymałościowymi, jakie należy określić w stosunku do materiałów biologicznych pod kątem odporności na uszkodzenia mechaniczne jest wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i ścinanie, moduł sprężystości i stała Poissona oraz pełzanie, relaksacja naprężeń i histereza odkształceniowa. Wyznaczenie każdej z tych cech stanowi oddzielne zagadnienie zależne od rodzaju rośliny oraz stosowanej metody pomiarowej. Najczęstszymi obiektami badań nad właściwościami wytrzymałościowymi były buraki cukrowe [Bieluga 1978, Bieluga i Bzowska-Bakalarz 1980a, 1980b, Byszewski 1978, Paulsen 1978, Skorzyńska i Zdanowicz 1978] i ziemniaki [Datta i Morrow 1983, Mohsenin 1986, Morrow i Mohsenin 1966, Peleg 1976, Rumsey i Fridley 1977, Shama i Sherman 1973, Smith 1968] oraz jabłka [Abbott 1996, Garcia i in. 1995, Mohsenin 1970].

Badania właściwości wytrzymałościowych korzeni marchwi coraz częściej stają się przedmiotem prac badawczych. Początkowo służyły one do porównania przydatności konsumpcyjnej nowo tworzonych odmian lub do określania trwałości przechowalniczej [Apelant i Hoftun 1974, Baumann 1974, Nikolaev i in. 1980, Phan i in. 1973]. Do wyznaczenia podstawowych właściwości wytrzymałościowych stosowano większość technik znanych z wytrzymałości materiałów. Najczęściej używana jest przez badaczy próba ściskania [Blahovec i in. 1984, Bohdziewicz 2001b, Drake i in. 1971a, 1971b, Gołacki 1994, Horvath i Horvath 1982, Konstaropoulos 1981, Leuchner 1984, Segerlind i in. 1977, Szot i Gołacki 1987, Verlinden i Baerdemacher 1994], chociaż jej stosowanie z teoretycznego punktu widzenia stwarza poważne kłopoty. Wyniki uzyskane w próbie ściskania obarczone są błędami wynikającymi z tarcia, jakie powstaje w strefie styku badanej próbki z elementami urządzenia obciążającego [Dyląg i in. 2003]. Wpływ tarcia można wyeliminować jedynie, pamiętając o zasadzie St. Venanta, poprzez zwiększenie długości próbki, co z kolei jest ograniczone możliwością pojawienia się zjawisk związanych z wyboczeniem. Jednak w zakresie małych odkształceń wyniki uzyskane w próbie ściskania można uznać za wiarygodne. Coraz częściej wykonuje się badania przy obciążeniach ścisających całe korzenie marchwi w kierunku prostopadłym do osi [Gołacki 1996a, 1996b, 1998, Segerlind 1977, Stopa 2002].

Nieco rzadziej stosuje się pozostałe techniki badawcze, spośród których należy wyróżnić testy przy użyciu penetrometra [Bourne 1966, 1982], próby zginania [Kapsalis

i in. 1972, Szot i in. 1987, Bzowska-Bakalarz i Kuczyński 1987], ścinania [Aubert i in. 1979, Szot i Gołacki 1987] i rozciągania [Verlinden i Baerdemacher 1994, Szot i Gołacki 1987]. Należy przy tym zauważyć, że stosowane dotychczas urządzenia pomiarowe nie pozwalały na osiągnięcie wysokiej dokładności wyników, co mogło być przyczyną błędnej ich interpretacji.

Z uwagi na lepkosprężyste właściwości materiałów biologicznych poddane są one badaniom relaksacyjnym, których celem jest wyznaczenie głównych cech reologicznych. Podstawowym zadaniem reologii jest opisanie wzajemnych relacji między naprężeniem i odkształceniem z uwzględnieniem czynnika czasu. W praktyce obserwacji podlega zjawisko relaksacji naprężeń w warunkach stałego odkształcenia oraz pełzania materiału przy zadaniu stałego naprężenia. Istotną rolę w uwzględnieniu czasu w opisie zależności naprężenia od odkształcenia dla materiałów biologicznych jest przyjęcie odpowiedniego modelu reologicznego będącego najczęściej układem równań różniczkowych. W oparciu o przyjęte modele reprezentujące zachowanie się materiału biologicznego w założonych warunkach badań wyznacza się właściwości reologiczne. Mają one ważne znaczenie praktyczne, umożliwiając rozwiązywanie istotnych problemów związanych np. z oceną stopnia odporności na uszkodzenia, określeniem jakości przechowalniczej, porównywaniem odmian czy oceną stopnia dojrzałości. Gołacki [1996a] wykorzystał test relaksacji naprężeń do oceny stopnia uszkodzeń wewnętrznych korzeni marchwi w różnych warunkach obciążeń.

Modele reologiczne nie opisują rzeczywistej struktury materiału biologicznego, a jedynie ukazują odpowiedź konkretnego materiału na zadany impuls z uwzględnieniem czynnika czasu. Wynika to z faktu, że szereg zjawisk zachodzących wewnątrz materiału w poszczególnych fazach obciążenia nie da się w pełni uwzględnić przy budowaniu modelu. W początkowej fazie obciążania po wyparciu gazów i wypełnieniu przestrzeni komórkowych rozpoczyna się proces migracji cieczy powodującej odkształcenia ścian komórkowych [Blahovec 1985]. Powstaje rodzaj umocnienia materiału (zwany efektem filtracji i konsolidacji), będący skutkiem przenoszenia obciążenia przez składniki tkanki roślinnej o wyższej wytrzymałości, jakimi są ściany komórkowe [Konstankiewicz i in. 1996, Konstankiewicz i Pukos 1998, Lippert 1995]. Zniszczenie ścian komórkowych i wpływ cieczy na zewnątrz komórek rozpoczynają proces powstania zjawisk o charakterze nieodwracalnym, powodujących zniszczenie materiału. Sytuację dodatkowo komplikuje przypadkowy rozkład i kolejność zjawisk zachodzących podczas obciążania w obrębie całej tkanki. Stworzenie spójnej i jednolitej teorii mechaniki dla materiałów pochodzenia roślinnego prowadziłoby do budowy układu równań równowagi o wielu zmiennych i złożonej strukturze, uwzględniającego rozwiązanie z zakresu biochemii, biomechaniki, biofizyki itp. [Murase i in 1975, 1980].

Coraz częściej pojawiają się próby budowy modeli reologicznych z uwzględnieniem prędkości odkształcenia, temperatury, wielkości i układu komórek oraz potencjału turgorowego. Znane są publikacje dotyczące budowy modeli liniowych w oparciu o badania miąższu bulw ziemniaka [Datta i Morrow 1983, Dimitroff 1982, Gao i in. 1989, Giesmann i in. 1981, 1982, Konstankiewicz i in. 1996, Lu, Puri 1991, Mohsenin 1986, Pitt 1982, Rohm i in. 1997], a także wieloelementowych modeli opisujących cechy tkanki buraków [Bohdziewicz 2001a, Bzowska-Bakalarz 1989, Bzowska-Bakalarz 1992, Bzow-

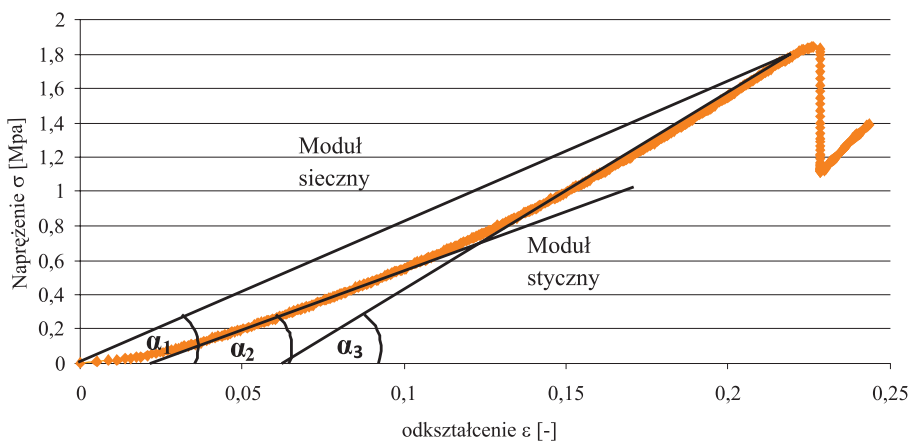
ska-Bakalarz 1993, 1995, Chwiej i Kuryłowicz 1972, Nowicki i in. 1976, Nowicki i in. 1978].

Wyznaczeniem charakterystyk lepkosprężystych korzeni marchwi zajmował się w swoich badaniach Gołacki [Gołacki 1989, 1991, 1993, 1994, Stankiewicz i Gołacki 2003, Szot i Gołacki 1985, 1991a, 1991b]. Aproksymując eksperymentalną krzywą relaksacji naprężeń sumą wyrażeń wykładniczych o liczbie równej przyjętej liczby gałęzi modelu Maxwella, otrzymano układy równań pozwalające na wyznaczenie współczynników modelu [Gołacki 1996b]. Do opisu zachowania się korzenia marchwi w testach quasistatycznych i udarowych zastosowano sześcioparametrowy i czteroparametrowy model Maxwella, a wyznaczone eksperymentalnie parametry tego modelu precyzyjnie opisują stan mechaniczny korzeni marchwi [Gołacki 1998].

2.2.1. Wyznaczenie modułu sprężystości

Moduł sprężystości stanowi jedną z podstawowych stałych materiałowych określonych jako współczynnik proporcjonalności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem w jednoosiowym stanie naprężenia. Moduł sprężystości materiałów pochodzenia biologicznego z konieczności najczęściej wyznacza się w próbie jednoosiowego swobodnego ściskania walcowych próbek, chociaż stosowana jest w uzasadnionych przypadkach metoda polegająca na wykorzystaniu twardościomierza [Kuczyński i Bzowska-Bakalarz 1987, Bzowska-Bakalarz i Kuczyński 1987]. Procedura wyznaczania modułu sprężystości nie jest opisana w postaci norm. Bezpośrednie zastosowanie norm definiujących określenie modułu sprężystości w materiałach konstrukcyjnych nie jest możliwe w stosunku do materiałów biologicznych. Wynika to głównie z braku możliwości przeprowadzenia próby rozciągania w taki sposób, aby otrzymać wiarygodne wyniki.

Wartość modułu sprężystości materiałów pochodzenia biologicznego o dużej zawartości wody wyznacza się najczęściej graficznie na podstawie wykresu naprężenia jako funkcji odkształcenia (rys. 2.5). Ze względu na nieliniowy przebieg funkcji możemy mówić jedynie o wartościach umownych. W literaturze spotyka się na ogół zastosowanie dwóch sposobów wyznaczania modułu sprężystości podłużnej [Sitkei 1986] na podstawie przebiegu odkształcenia w zależności od naprężenia: metoda siecznej i metoda stycznej (rys. 2.5). Wartości modułu sprężystości obliczone w oparciu o metodę siecznej mają charakter czysto umowny i w żadnym punkcie nie odwzorowują rzeczywistych właściwości materiału. Dyskusyjny jest również wybór punktów, przez które należy poprowadzić sieczną. Nieco lepiej właściwości materiałów oddają wartości obliczone na podstawie stycznych do wykresu naprężenia – odkształcenie. W tym przypadku należy jednak precyzyjnie podać przedział naprężeń lub odkształceń, w którym wyznaczany jest moduł sprężystości. Najczęściej przyjmowany jest przedział odkształceń w zakresie od 0,04 do 0,10 [Bohdziewicz 2007] lub jako punkt odniesienia przyjmuje się naprężenia odpowiadające wytrzymałości materiału [Mohsenin 1986]. Niezależnie od przyjętej metody wyznaczania modułu sprężystości liczbowo jest on równy tangensowi kąta α pochylenia prostej na wykresie ściskania. Jak widać na rysunku 2.5 kąt ten zmienia się w istotny sposób w zależności od przyjętego zakresu naprężeń, co wskazuje na niejednoznaczność określonych wartości modułu.



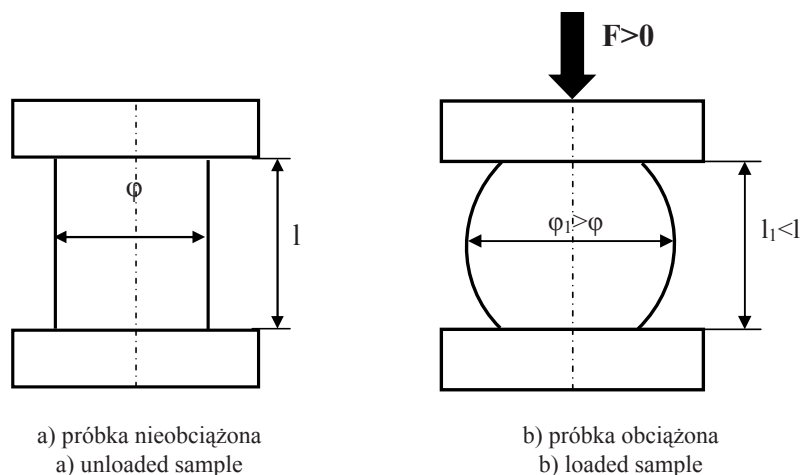
Rys. 2.5. Przykładowy przebieg procesu ściskania osiowego cylindrycznej próbki
 Fig. 2.5. Example of the course of the process of axial compression of a cylinder sample

Według Blahovca [1989] większość modułów sprężystości najważniejszych produktów rolniczych zawiera się w przedziale od 0,1 do 10 MPa. Ich wielkość zależna jest od budowy komórkowej tkanki, a w szczególności od wielkości komórek i sztywności ścian komórkowych. Istotne znaczenie ma również zawartość wody, stopień rozwoju tkanki oraz miejsce pobrania próbki przeznaczonej do badań [Bieluga i Bzowska-Bakalarz 1980a, 1980b, 1986, Bohdziewicz 2001a, 2001b, 2001c, 2004, Bzowska-Bakalarz 1998, Celba i in. 1981, Haman i in. 1982, 2000b, Niklas 1988, Konstankiewicz i in. 2001a, Scalnon i Long 1995, Scalnon i in. 1996, Gao i in. 1989, Kokkoras i in. 1995].

Z punktu widzenia obliczeń wykonywanych w oparciu o metodę elementów skończonych zarówno wartość, jak i sposób obliczania modułu sprężystości nie ma tak dużego znaczenia. Do programu obliczeniowego wprowadza się zamiast konkretnej wartości zależność pomiędzy napężeniem i odkształceniem lub wprowadza się bilinearny model [Rusiński i in. 2000] lepiej opisujący zachowanie się materiału pod wpływem obciążenia.

Niezależnie od sposobu wyznaczania modułu sprężystości doniosłe znaczenie zarówno w uzyskaniu danych do opisu modelu dyskretnego, jak i obliczaniu umownych wartości modułu sprężystości ma dokładność przygotowania próbki i sposób przeprowadzenia próby ściskania. Jednym z najistotniejszych parametrów dotyczących wymiarów próbki cylindrycznej jest prawidłowe dobranie stosunku średnicy do wysokości, zwanej smukłością ($\xi = l/\varphi$). Trzeba przy tym spełnić dwa podstawowe warunki. Pierwszy z nich to zapewnienie takiej długości próbki, aby uniezależnić wyniki pomiarów od zakłóceń w postaci sił tarcia pojawiających się w strefie styku próbki z głowicą obciążającą, a drugi to uniknięcie niebezpieczeństwa związanego z wyboczeniem próbki. Próbka cylindryczna w trakcie próby ściskania zmienia swój kształt na baryłkowaty (rys. 2.6), co w istotny sposób zaburza przyjęte założenia o jednorodnym stanie naprężenia w strefie pomiaru.

Aby tego uniknąć, należy część pomiarową odsunąć od podpór, zgodnie z zasadą St. Venanta przynajmniej o $\Delta l = 1,5 \varphi$, co oznacza, że długość próbki powinna wynosić $l = 3 \varphi$. Z drugiej strony nadmierne zwiększenie długości początkowej próbki może spowodować groźbę pojawienia się wybočenja. W stosunku do materiałów pochodzenia biologicznego istnieje dodatkowa trudność wynikająca z ograniczonych kształtów produktów rolnych. Innym stosunkowo łatwym do uniknięcia niebezpieczeństwem mogącym zakłócić jednorodny stan naprężenia w strefie pomiarowej jest brak zachowania równoległości podstaw próbki cylindrycznej.



Rys. 2.6. Statyczna próba ściskania
Fig. 2.6. Static compression test

W praktyce badacze godzą się na pewien kompromis i stosują wskaźnik smukłości określony stosunkiem wysokości próbki do jej średnicy w zakresie od $\xi = 0,9$ do $1,5$, a więc niższy niż to wynika zasady St. Venanta [Blahovec i in. 1985, Blahovec 1989, Abbott i in. 1982, Nowicki i in. 1976, Nowicki i in. 1978, Bieluga i Bzowska-Bakalarz 1980a, 1980b, Bzowska-Bakalarz 1986, 1996a, 1998, Murase i in. 1980a, Murase i in. 1980b, Szot i Gołacki 1985, 1987, 1989]. Celba [1979] przeprowadził próbę ściskania próbek o czterech różnych smukłościach od $\xi = 0,66$ do $1,33$ i otrzymał wyniki różniące się w granicznych przypadkach o 10%. Mogłoby to oznaczać, że dla materiału biologicznego zasada St. Venanta przyjmuje nieco inną postać niż dla materiałów konstrukcyjnych.

2.2.2. Wyznaczenie stałej Poissona

Rozwój numerycznych metod obliczeniowych opartych na metodzie elementów skończonych, wymaga dostarczenia szczegółowych danych dotyczących właściwości badanych materiałów. Jednym z najważniejszych parametrów jest liczba Poissona.

Wyznaczenie jej bezpośrednio w oparciu o normę ASTM E132-04 (Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature) nie jest możliwe w odniesieniu do materiałów biologicznych. Do chwili obecnej nie jest sprecyzowana jednolita metoda określania stałej Poissona. Najczęściej wykorzystuje się metodę opracowaną przez Hugesa i Segerlinda [1972], polegającą na wyznaczeniu modułów sprężystości przy ścisnaniu swobodnym i nieswobodnym. Punktem wyjścia są ogólne równania równowagi elementu trójwymiarowego w układzie współrzędnych biegunowych [Gabryszewski 2001] (2.1).

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_y)]\end{aligned}\quad (2.1)$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona [-],

E – moduł sprężystości [MPa],

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – naprężenia w kierunku odpowiednio osi x, y i z , [MPa],

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – odkształcenia w kierunku odpowiednio osi x, y i z . [-].

Przy założeniu warunków brzegowych w przypadku ścisnania nieswobodnego walcowej próbki w nieodkształcalnym cylindrze (2.2)

$$\sigma_y = \sigma_r \text{ i } \varepsilon_y = \varepsilon_r = 0 \quad (2.2)$$

otrzymujemy po podstawieniu i uporządkowaniu zależność pomiędzy odkształceniem i naprężeniem w kierunku osi Z (2.3):

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_C} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \times \sigma_z \quad (2.3)$$

gdzie:

E_C – umowny moduł sprężystości próbki ścisnanej nieswobodnie [MPa].

W przypadku ścisnania swobodnego przy jednoosiowym stanie odkształcenia zależność pomiędzy odkształceniem i naprężeniem w kierunku osi Z ma postać wzoru (2.4):

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \times \sigma_z \quad (2.4)$$

Po porównaniu dwóch ostatnich wzorów otrzymano zależność (2.5) pozwalającą na obliczenie stałej Poissona po uprzednim wyznaczeniu stosunku modułu sprężystości przy ścisnaniu swobodnym i nieswobodnym:

$$\frac{E}{E_C} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (2.5)$$

Przedstawiona metoda, oprócz wielu zalet, do których można zaliczyć proste oprzyrządowanie, ma również wady. Najważniejsza z nich, poza nieuwzględnieniem nieliniowej zależności naprężenia i odkształcenia, to trudności techniczne związane z pomiarem modułu sprężystości przy ściskaniu nieswobodnym. Źródłem błędów może być fakt pominięcia w trakcie pomiarów wpływu tarcia pomiędzy cylindrem, badaną próbką i tłokiem na uzyskane wyniki, a także dokładność dopasowania wymiarów poprzecznych próbki i wewnętrznej średnicy cylindra. Ponadto istnieje konieczność stosowania dwóch próbek – jednej do wyznaczenia modułu sprężystości przy ściskaniu swobodnym, a drugiej przy ściskaniu nieswobodnym, co może być źródłem dodatkowych błędów.

Z literatury znane są inne metody wyznaczania liczby Poissona materiałów biologicznych. Jedną z nich jest metoda oparta na pomiarze średniego modułu sprężystości liniowej i średniego modułu sprężystości objętościowej [Finey i Hall 1967]. Po badaniach przeprowadzonych obiema metodami [Gyasi i in. 1981] okazało się, że liczba Poissona obliczona na podstawie wzorów Huges'a i Segerlinda przyjmuje wartości niższe niż wyznaczona w oparciu o pomiar modułu sprężystości objętościowej. Inną metodę polegającą na pomiarach odkształceń przy zastosowaniu katetometru zaproponował Mohsenin [1970].

Ciekawe badania zmierzające do wyznaczenia stałej Poissona przedstawił Anazodo [Anazodo i Chikwendu, 1983] i Chikwendu [Chikwendu i Anazodo 1984]. Wyznaczyli oni liczbę Poissona na podstawie pomiarów przemieszczenia próbki w postaci walca ściskanego w kierunku promieniowym pomiędzy równoległymi płaskimi płytami. Dokonali przy tym rozróżnienia sposobu wyznaczania liczby Poissona w zależności od wielkości odkształcenia próbek.

Wydaje się, że wyznaczanie stałej Poissona w oparciu o pomiar przemieszczeń stwarza dużą nadzieję na otrzymanie wiarygodnych wyników. Zastosowanie precyzyjnych metod optycznych wykorzystujących światło spójne pozwala na pomiar rozkładów przemieszczeń i naprężeń w sposób bezdotykowy w dowolnym miejscu próbki. Po znalezieniu miejsc, w których występuje jednoosiowy stan naprężenia, można uniezależnić wyniki badań od sposobu podparcia.

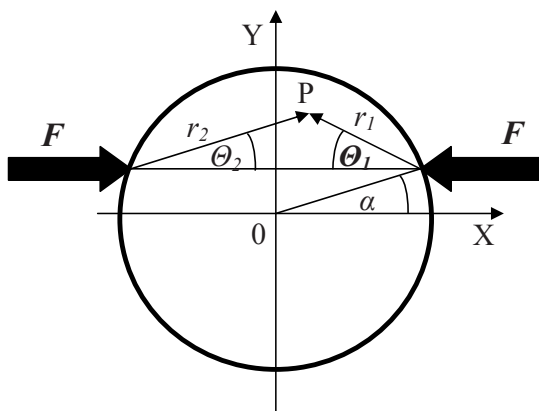
Równocześnie ze sprężystym traktowaniem materiału biologicznego prowadzone były badania zmierzające do uwzględnienia czynnika czasu przy wyznaczaniu wartości liczby Poissona. Okazało się, że wpływ ten nie jest jednoznacznie określony i zależy od rodzaju materiału biologicznego. Dla jabłek wartość stałej Poissona malała wraz z upływem czasu [Chappel i Hamman 1969], a gdy dla ziemniaków rosła [Hammerle i McClure 1971]. Gołacki i Stropek [2000] wyznaczyli lepkosprężysty współczynnik Poissona dla korzeni marchwi na podstawie eksperymentu relaksacji naprężeń. Obliczenia wykonano przy założeniu niezmienności w czasie modułu sprężystości objętościowej. Określono zależność współczynnika Poissona od prędkości i wielkości wstępnej deformacji próbki. Wykonano rachunki symulacyjne wpływu oszacowania wartości modułu sprężystości objętościowej na zmienność w czasie lepkosprężystego współczynnika Poissona. Stan-

kiewicz [2005] przedstawiła schemat identyfikacji zmiennego w czasie współczynnika Poissona na podstawie dyskretnych pomiarów jednoosiowych funkcji pełzania, uzyskanych w podwójnym teście pełzania.

W stosunku do korzeni marchwi wartości współczynnika Poissona wyznaczyli Gołacki i Obroślak [1998] w oparciu o walcowe próbki, wykorzystując metodę Hugesa Segerlinda. Stwierdzili, że wartości średnie współczynnika Poissona korzenia marchwi bezpośrednio po zbiorze zawierały się w przedziale 0,39–0,44 i rosły wraz z upływem czasu przechowywania.

2.2.3. Wyznaczenie przemieszczeń przekroju poprzecznego

Pomiary rozkładów przemieszczeń przekroju poprzecznego warzyw i owoców nie stanowiły zbyt często celu badań naukowych. Wynikało to zarówno z braku uzasadnienia prowadzenia takich badań, jak również z trudności technicznych związanych z niedoskonałą aparaturą pomiarową. Rozwój przybliżonych metod modelowania opartych na wykorzystaniu numerycznych technik obliczeniowych zmusza badaczy do poszukiwania możliwości wiarygodnego weryfikowania otrzymanych wyników modelowych. Szansę taką dają pomiary rozkładu przemieszczeń przekrojów poprzecznych modelowanych warzyw i owoców. Pomiar przemieszczenia delikatnej tkanki mięszu produktów rolniczych nie jest możliwy za pomocą tradycyjnych metod wykorzystujących ekstensometry mechaniczne. Pozwala na to dynamiczny rozwój bezdotykowych optycznych metod pomiaru przemieszczeń najczęściej opartych na wykorzystaniu światła spójnego. Dzięki pomiarom rozkładu przemieszczeń można otrzymać pełną informację o zachowaniu się badanego obiektu w każdym punkcie przekroju w całym zakresie obciążenia.



Rys. 2.7. Tarcza kołowa ściskana wzdłuż cięciwy
Fig. 2.7. Circular disc compressed along the chord

Oprócz wykorzystania rozkładów przemieszczeń do weryfikacji modeli numerycznych można na ich podstawie wyznaczyć podstawowe właściwości wytrzymałościowe obiektów biologicznych. Z większości produktów rolniczych można pobrać próbkę w postaci okrągłej tarczy, zawierającą wszystkie najważniejsze elementy budowy. Przyjmując kołową tarczę ścisną wzdłuż średnicy lub cięciwy (rys. 2.7) jako model przekroju poprzecznego próbki i pomijając różnice właściwości wytrzymałościowych poszczególnych warstw, uzyskane wyniki pomiarów przemieszczeń u_x i u_y mogą posłużyć do wyznaczenia umownego modułu sprężystości i ułamka Poissona. Wynika to z faktu, że wartości przemieszczeń poszczególnych punktów tarczy są funkcją nie tylko parametrów geometrycznych (średnica, współrzędne punktów przyłożenia obciążenia, grubość tarczy), ale także wartości obciążenia i stałych materiałowych (rys. 2.7) [Gabryszewski 2001]:

$$u_x = -\frac{4(1+\nu)F}{\pi Et} \left(\frac{1}{1+\nu} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{4} (\cos 2\Theta_1 - \cos 2\Theta_2) - \frac{1-\nu}{1+\nu} x_1 \frac{\cos \alpha}{2R} \right) \quad (2.6)$$

$$u_y = -\frac{4(1+\nu)F}{\pi Et} \left(\frac{1}{2(1+\nu)} \ln \frac{r_2}{r_1} (\Theta_1 + \Theta_2) - \frac{1}{4} (\sin 2\Theta_1 + \sin 2\Theta_2) - \frac{1-\nu}{1+\nu} x_2 \frac{\cos \alpha}{2R} \right) \quad (2.7)$$

W szczególnym przypadku, gdy tarcza obciążona jest wzdłuż średnicy, a punkt pomiarowy położony jest w miejscu, w którym panuje jednoosiowy stan naprężenia, stałą Poissona możemy wyznaczyć bezpośrednio z definicji, obliczając stosunek przemieszczenia w kierunku obciążenia i w kierunku do niego prostopadłym.

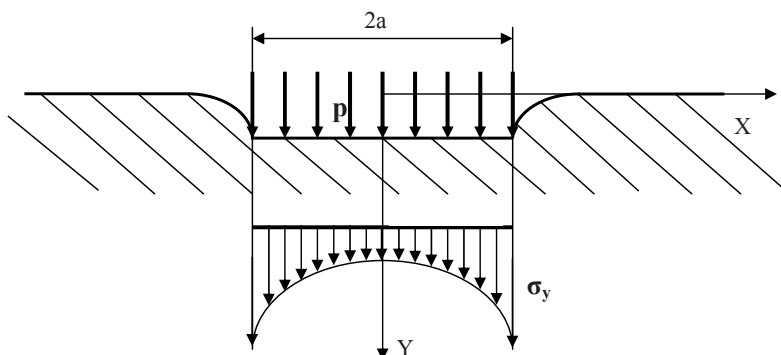
Spośród metod pomiarowych pozwalających na wyznaczenie rozkładów przemieszczeń należy wymienić przede wszystkim metody oparte na wykorzystaniu światła spójnego, takie jak fotografia plamkowa [Cloud 1995], interferometria holograficzna [Gerhard, Busse, 2005a] lub elektroniczna wersja interferometrii plamkowej (ESPI) [Gerhard, Busse 2005b, Jones, Wykes 1983]. Cechą charakterystyczną tych metod jest wysoka czułość, co przy materiałach biologicznych o niskich modułach sprężystości stanowi poważny problem. Duże nadzieje związane są z zastosowaniem do pomiaru przemieszczeń wideokstensometru ME-46 firmy Messphysik, dzięki któremu zarejestrowany obraz jest analizowany w czasie rzeczywistym poprzez sterowany komputerem wideoprocessor. Dołączone oprogramowanie zapewnia ciągły pomiar przemieszczeń podczas testu w dużym zakresie odkształceń.

2.3. Zagadnienia kontaktowe

Ze względu na kształt produktów rolniczych decydujący wpływ na rodzaj i wielkość uszkodzenia mają obciążenia kontaktowe charakteryzujące się działaniem siły skupionej na małą powierzchnię. W przypadku takich obciążeń może się zdarzyć, że nawet niewielka siła spowoduje w materiale o stosunkowo wysokich właściwościach wytrzymałościowych lokalne przekroczenie dopuszczalnych wartości naprężeń i w efekcie

doprowadzi do zniszczenia struktury wewnętrznej materiału [Johnson 1985, Hertz 1882, Timoshenko i Goodier 1970].

Zagadnienie naprężeń kontaktowych odgrywa istotną rolę w wielu gałęziach nauki i techniki. Za punkt wyjścia do analizy naprężeń stykowych należy przyjąć rozwiązanie zagadnienia sprężystej półprzestrzeni obciążonej na brzegu siłą skupioną oraz jego szczególnego przypadku sprowadzającego się do sprężystej półpłaszczyzny obciążonej siłą skupioną (tzw. zagadnienie Flamanda). Ważnym praktycznym uogólnieniem tego przypadku jest trójwymiarowe zagadnienie półprzestrzeni sprężystej, obciążonej na brzegu siłą skupioną, jako problem osiowo symetryczny zwane zagadnieniem Boussinesqa (rys. 2.8) [Gabryszewski 2001].

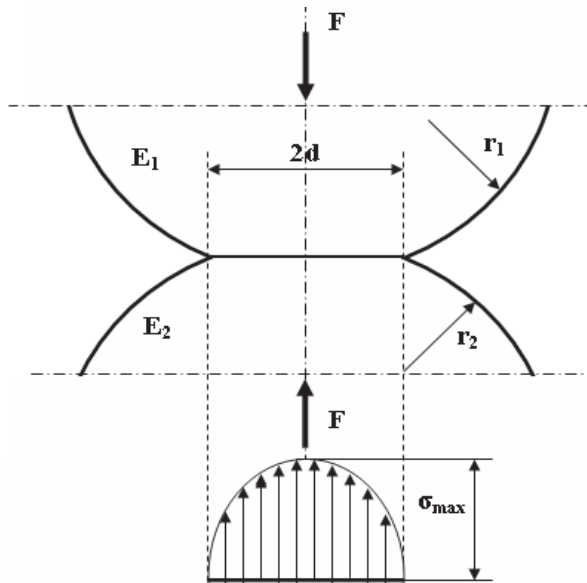


Rys. 2.8. Ilustracja zagadnienia Boussinesqa
Fig. 2.8. Illustration of the Boussinesq problem

Prace Boussinesqa [1885] i Flamanta [1886] nie dawały możliwości określenia wartości naprężeń kontaktowych w okolicach punktu przyłożenia siły skupionej dla obiektów o ograniczonej objętości, jakimi są między innymi produkty rolnicze. Pierwszym, który zaadaptował rozwiązanie teoretyczne przedstawione przez uczonych francuskich do celów praktycznych był niemiecki badacz Hertz [1882]. Rozwiązania przez niego podane do dzisiaj stanowią podstawę do obliczania naprężeń kontaktowych w wielu dziedzinach techniki (rys. 2.9). Wzory Hertza wyprowadzone przy wielu istotnych ograniczeniach obowiązują do momentu, gdy siła obciążająca nie przekroczy wartości, przy których nastąpią odkształcenia plastyczne. Pojawienie się odkształceń plastycznych można wyznaczyć, stosując teorię maksymalnych naprężeń stycznych (kryterium Tresca) mówiącą, że odkształcenia plastyczne pojawiają się w punkcie, w którym maksymalne naprężenia styczne osiągają wartość krytyczną lub teorię energetyczną von Missesa, według której odkształcenie trwałe następuje wtedy, gdy energia odkształcenia osiągnie wartość krytyczną [Adams i Nosonovsky 2000].

Dalszy wzrost obciążenia prowadzi do powiększania się strefy odkształceń trwałych, które ograniczone są powierzchnią elementu obciążającego i otoczone przez sprężystą część materiału. Analityczne rozwiązanie tego problemu otrzymano do zakresu

odkształceń w pełni plastycznych [Ishlinsky 1944]. Zagadnieniami związanymi z naprężeniami kontaktowymi powstałymi w obrębie odkształceń sprężysto-plastycznych i plastycznych zajmowali się również Chang i in. [1987], Tabor [1970] i Matthews [1980].



Rys.2.9. Ilustracja zagadnienia Hertza
Fig. 2.9. Illustration of the Hertz problem

Analiza wpływu tarcia oraz sił stycznych w strefie styku na wartość naprężeń kontaktowych była przedmiotem zainteresowania Cattaneo [1938] i Mindlin [1949]. Wskazali oni właściwości, jakie powinny spełniać stykające się materiały, aby naciski normalne nie przyczyniały się do powstawania przemieszczeń stycznych, a naprężenia styczne nie powodowały zmian przemieszczeń normalnych. Taki przypadek między innymi ma miejsce wtedy, gdy stykające się ciała zbudowane są z materiałów o identycznych właściwościach wytrzymałościowych. Pojawienie się sił stycznych w strefie styku doprowadza do powstania poślizgu pomiędzy stykającymi się ciałami. Szczegóły nacisków kontaktowych z uwzględnieniem poślizgu dla różnych materiałów zostały opisane przez Buflera [1959] i Johnsona [1985]. Badaniem wpływu tarcia suchego na rozkład naprężeń w strefie styku bez uwzględnienia siły stycznej dla elementów w kształcie kuli zajmował się między innymi Goodman [1962].

Kompleksowe rozwiązania uwzględniające wpływ naprężeń stycznych na wartości naprężeń normalnych zostały opracowane przez Mossakowskiego [1963] i Spence'a [1968, 1975]. Ich badania wykazały, że uwzględnienie siły tarcia powoduje wzrost obciążenia niezbędnego do wywołania założonych wartości naprężeń kontaktowych o około 5%. Okazało się, że dla pary stykających się ciał sprężystych o różnych wartościach mo-

dułów Younga naprężenia styczne w porównaniu z naprężeniami normalnymi osiągają wartości pomijalnie małe.

Rozwiązania Hertza nie można również stosować bezpośrednio w przypadku, gdy geometrię stykających się ciał nie da się opisać za pomocą promieni krzywizny. Przedmiotem badań Stuermanna i Shtaermana [1939] był przypadek kontaktu, w którym profil stykających się ciał nie mógł być dobrze opisany przez wielomian drugiego stopnia. Zagadnieniem kontaktu tępego stożka o kątę wierzchołkowym wynoszącym 90° z płaską powierzchnią w zakresie odkształceń sprężystych zajmowali się również Love [1939] i Sneddon [1948]. Rozwiązania dla dwuwymiarowego styku tępego klina z elastyczną półpłaszczyzną zostały przedstawione przez Johnsona [1998].

Rozpatrując naciski powierzchniowe w skali nanometrycznej, należy zwrócić szczególną uwagę na siły adhezji pojawiające się w bezpośrednim sąsiedztwie styku. Bradley [1932] opracował model pozwalający na obliczenie sił adhezji w sztywnych kulach, a nieco później zostały zaproponowane dwa różne modele do kontaktu kul elastycznych.

Na podstawie przytoczonej literatury można stwierdzić, że zagadnienie naprężeń kontaktowych jest jednym z bardziej skomplikowanych problemów teorii sprężystości. W stosunku do materiałów biologicznych takie zagadnienia jak wpływ siły tarcia w strefie styku, nieregularny kształt stykających się ciał lub siły adhezji na rozkład nacisków powierzchniowych są praktycznie pomijane.

2.3.1. Naciski powierzchniowe w przypadku płodów rolnych

Zagadnienia kontaktowe w odniesieniu do warzyw, w tym również korzeni marchwi nie były dotąd przedmiotem szczególnego zainteresowania ze strony badaczy. W badaniach skupiano się głównie na pomiarach własności tkanki roślinnej, pomijając charakterystyczny kształt korzeni. Uwzględnienie kulistego kształtu warzyw w obliczeniach wytrzymałościowych polegało na wyznaczeniu umownego modułu sprężystości całego warzywa, stosując zależności wyprowadzone z norm amerykańskich [ASAE 1995] umożliwiające obliczenie modułu sprężystości ciał kulistych lub rozważając nakłady jednostkowej pracy odkształcenia [Bohdziewicz 2008]. Efektem takiego sposobu rozumowania było uzależnienie stałej, jaką jest umowny moduł sprężystości, od kształtu warzywa.

Często do wyznaczenia nacisków powierzchniowych korzystano ze wzorów Hertza, chociaż zostały one wyprowadzone przy założeniach wykluczających zastosowanie ich do obiektów pochodzenia biologicznego. Ograniczenia te dotyczyły głównie braku liniowej zależności odkształcenia jako funkcji obciążenia oraz dużych wartości odkształceń, które mogą prowadzić do pojawienia się sił stycznych, a co za tym idzie tarcia w punkcie styku. Mimo tych ograniczeń badania niektórych autorów wykazały, że zastosowanie teorii sprężystości może w wielu przypadkach prowadzić do budowy godnych zaufania wskaźników opisujących współpracę między najważniejszymi zmiennymi takimi jak nacisk powierzchniowy i czas kontaktu, chociaż błędy w ocenach powierzchni kontaktu mogą sięgać 20% [Siyami i in. 1988]. Rabelo zastosował metodę Hertza do analizy zagadnień kontaktowych w pomarańczy, jednak otrzymane wyniki wskazały

wyraźnie na ograniczenia stosowania tej teorii w odniesieniu do tak złożonych materiałów jak miąższ owoców [Rabelo i in. 2001].

Z punktu widzenia zagadnień kontaktowych w odniesieniu do materiałów pochodzenia biologicznego najlepiej opisane są badania doświadczalne dotyczące zachowania się jablek pod działaniem sił zewnętrznych. Podstawowym problemem przy wyznaczaniu nacisków powierzchniowych jest pomiar pola powierzchni stykających się ciał. Herold [Herold i in. 2001] do pomiarów powierzchni styku zastosował system złożony z czujnika w postaci cienkiej matrycy bazowej o grubości 0,1 mm Tekscan No. 5051 o zakresie pomiarowym nacisków powierzchniowych do 2,4 MPa, opracowany w firmie Tekscan [2000]. System zbudowany był z układu dwóch cienkich i elastycznych folii poliesterowych z naniesionym układem równolegle ułożonych elektrod. Każda z folii posiadała po 40 elektrod rozmieszczonych równolegle w odległości 1,3 mm od siebie. Folie zostały połączone ze sobą w taki sposób, że powstała siatka o wymiarach 1,3x1,3 mm. Pomiędzy foliami umieszczono cienką warstwę półprzewodnika oddzielającą od siebie elektrody. System umożliwiał pomiar pola powierzchni styku poprzez rejestrację położenia punktów styku elektrod z obu folii wywołanych przez nacisk stykających się ciał. Zmierzona w ten sposób powierzchnia stanowiła zbiór kwadratów o wymiarach 1,3x1,3 mm. Dzięki zastosowaniu warstwy półprzewodnika pomiędzy elektrodami system umożliwiał również pomiar siły nacisku w punktach przecięcia się elektrod, ponieważ wzrost siły nacisku powodował zmianę oporności stykających się elektrod. Zastosowanie specjalnego oprogramowania firmy Tekscan umożliwiało gromadzenie danych na dysku komputera z szybkością 10 próbkowań na sekundę.

Słabym punktem systemu Tekscan był pomiar nacisków powierzchniowych poprzez wprowadzenie dodatkowej warstwy pomiędzy stykające się elementy. Jest więc to system inwazyjny, w którym układ pomiarowy wpływa na warunki połączenia stykowego. Okazało się również, że niemożliwe było takie wyskalowanie układu, aby otrzymane wyniki odzwierciedlały rzeczywiste wartości nacisków powierzchniowych. W rezultacie pomiary miały charakter badań jakościowych.

W wyniku pomiarów otrzymano rozkłady nacisków powierzchniowych pomiędzy jabłkiem odmiany Jonca i płaską płytą. Wbrew przewidywaniom maksymalne naciski powierzchniowe nie pojawiały się w okolicach punktu centralnego powierzchni styku, ale na jej krawędzi. Zjawisko to tłumaczono gwałtowną utratą nośności przez zniszczone w początkowej fazie obciążania komórki jabłka. Wniosek ten został zakwestionowany przez Lewisa, który twierdził, że charakterystyczny kształt wykresu jest wynikiem zastosowania dodatkowej warstwy pomiarowej pomiędzy jabłkiem, a głowicą pomiarową urządzenia obciążającego [Lewis i in. 2008]. Można się zgodzić z tym stwierdzeniem, ponieważ siły stykowe pojawiające się podczas obciążania mogły w istotny sposób zaburzyć wyniki pomiarów.

Nieco innego przyrządu używali w swoich pomiarach Rabelo i in. [2001]. Pomiarom podlegała powierzchnia styku pomarańczy ściskanych pomiędzy dwiema równoległymi płytami. Uzyskane wyniki porównywano z pomiarami powierzchni styku otrzymanymi dla modelu mechanicznego pomarańczy w postaci kuli wykonanej z gumy. Urządzenie pomiarowe składało się z przetwornika, interfejsu oraz komputera. Przetwornik zbudowany był z płyty, na której rozmieszczono w dwóch wzajemnie prostopadłych

kierunkach w odległości 0,5 mm od siebie układ mikroprzełączników. Podczas zwiększania się powierzchni styku kolejne mikroprzełączniki łączyły się z interfejsem, tworząc mapę binarną będącą miarą powierzchni styku. Oprócz faktu, że sposób pomiaru miał charakter inwazyjny to słabą stroną układu pomiarowego była niska rozdzielczość, co w istotny sposób wpływało na dokładność pomiaru powierzchni styku.

Interesującą metodę pomiaru powierzchni styku zastosował Lewis przy wyznaczaniu nacisków powierzchniowych dla jabłek ściskanych pomiędzy dwoma płaskimi płytami [Lewis i in. 2008]. Została ona oparta o wykorzystanie fali ultradźwiękowej [Dwyer-Joyce i Drinkwater 1998, Hodgson i in. 2000, Marshall i in. 2004]. Fala ultradźwiękowa, padając na strefie styku dwóch ciał, zostaje częściowo odbita. Współczynnik odbicia, zdefiniowany jako stosunek amplitudy fali padającej i amplitudy fali odbitej, jest proporcjonalny do współczynnika sztywności kontaktu, zakładając sprężysty model połączenia. Badania powierzchni styku typowych połączeń mechanicznych wykazały, że przy niskich wartościach nacisków współczynnik sztywności kontaktu, obliczony na podstawie pomiarów amplitudy fali padającej na obiekt i fali odbitej, jest proporcjonalny do wartości nacisków powierzchniowych [Kendall i Tabor 1971, Drinkwater i in. 1996].

W trakcie pomiarów nacisków powierzchniowych źródło fal ultradźwiękowych o częstotliwości 10 MHz zostało umieszczone w kąpeli wodnej, tak aby fale skupiły się na powierzchni styku jabłka i płyty obciążającej. Fale odbite były rejestrowane za pomocą oscyloskopu cyfrowego i przesłane do komputera, gdzie zostały przetworzone. Urządzenie pomiarowe wykonano z monomeru ze względu na podobną impedancję akustyczną do impedancji jabłka. W wyniku pomiarów otrzymano rozkłady nacisków powierzchniowych jako funkcji siły obciążającej oraz rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych zarejestrowano w centralnym punkcie styku jabłka z urządzeniem obciążającym. Wyniki te różnią się od efektów badań uzyskanych przez Herolda [Herold i in. 2000], które wykazały, że tak się dzieje tylko do pewnej granicznej wartości, po przekroczeniu której następuje gwałtowna utrata nośności przez komórki położone w centralnym punkcie styku, a maksymalne wartości nacisków umieszczone są na jego krawędzi. Sądzi się, że ta graniczna wartość odpowiada punktowi biologicznego zniszczenia materiału (bioyield point). Jednym z ważnych wniosków wyciągniętych na podstawie badań było stwierdzenie, że rzeczywisty obszar stłuczenia jest o około 25% mniejszy niż powierzchnia kontaktu jabłka z elementem obciążającym.

Holt zaobserwował silną korelację między wielkością stłuczenia i zaabsorbowaną energią, zarówno dla obciążenia dynamicznego przy uderzeniu, jak i dla obciążenia quasistatycznego dla jabłek Granny Smith [Holt i Schrod 1977]. Z pracy wynika wniosek, że w tej samej zastosowanej energii, miąższ jabłka łatwiej ulega stłuczeniu przy powolnym wzroście nacisku. Holt postawił hipotezę, że istnieją dwa różne mechanizmy uszkodzenia, zidentyfikowane dla mikrowłókienek celulozowych w ściankach komórek jabłka, odpowiadające obciążeniom dynamicznym i quasistatycznym. Jednym z ważnych wniosków jest stwierdzenie, że proces uszkodzenia jest związany bardziej z tempem przekazywania energii niż z ilością energii. Wydaje się, że analiza MES struktury miąższu jabłka na poziomie komórkowym pozwoliłaby lepiej zrozumieć zjawiska związane z powstawaniem stłuczeń. Badania polegające na budowie modelu 3D komórki tkanki parenchymy jabłek za pomocą metody elementów skończonych przeprowadzili Wu i Pitts [1998].

2.4. Modelowanie materiałów biologicznych

Podstawą budowy prawidłowego modelu jest uzyskanie precyzyjnej informacji o modelowanym obiekcie [Tarnowski i Bartkiewicz 2000]. Dokładność wyznaczenia parametrów wejściowych warunkuje dokładność wyników analizy modelu. Jednym z najważniejszych elementów modelowania jest określenie celu analizy, to znaczy zdefiniowanie parametrów wyjściowych. Każdy obiekt pochodzenia biologicznego zawiera w sobie dużą, praktycznie niemożliwą do opisaną ilość informacji. Skonkretyzowanie celu modelowania pozwala na podział informacji na istotne do realizacji założonego celu oraz na całkowicie nieistotne [Dietrich i in. 1999], co zwykle prowadzi do znacznego uproszczenia modelu. Jest to szczególnie ważne z punktu widzenia kryterium poprawności modelowania, według którego model powinien dostatecznie wiernie odtwarzać badany obiekt rzeczywisty pod wybranym kątem widzenia, a jednocześnie być możliwie prosty i łatwy do badania [Dietrich i in. 1999]. Jedną z podstawowych decyzji, jakie należy podjąć podczas modelowania jest zdefiniowanie układu i wydzielenie go z otoczenia [Pabis 2009]. Zwykle przy tym przyjmuje się założenie o jednostronnym przepływie oddziaływania między modelowanym obiektem i otoczeniem. Nie bez znaczenia, w procesie modelowania, jest określenie zakresu badań oraz przeznaczenie wyników analizy. Można przyjąć ogólną definicję modelu jako dającego się wyobrazić układu, który odzwierciedlając obiekt, jest zdolny do dostarczenia nowych możliwości do sprawdzenia informacji o obiekcie [Sztöff 1971].

W przypadku materiałów biologicznych wyznaczenie parametrów wejściowych modelu natrafia na poważne trudności wynikające z konieczności uwzględnienia wielu czynników mających wpływ na ich wartości. Właściwości materiałów biologicznych zależą od stopnia rozwoju tkanki, będącego wynikiem skomplikowanych procesów biochemicznych zachodzących wewnątrz żywych komórek. Na przebieg tych procesów mają wpływ zarówno cechy osobnicze, jak i oddziaływanie zewnętrzne środowiska. Różne własności środowiska glebowego mogą spowodować zmiany w budowie wewnętrznej, co w efekcie może doprowadzić do zróżnicowania własności wytrzymałościowych tkanki, może ulec zmianie odporność na uszkodzenia mechaniczne lub czynniki chorobotwórcze [Kołota i in. 1994]. W obrębie jednego gatunku, a nawet jednej odmiany, obserwuje się różne reakcje na bodźce zewnętrzne [Lack i Evans 2003, Villee 1990]. Wpływ takich czynników jak zawartość powietrza, wody i soli mineralnych w glebie, temperatura otoczenia, intensywność nasłonecznienia czy rodzaj zabiegów agrotechnicznych na rozwój rośliny jest powszechnie znany [Kołota i in. 1994, Nason i Dehaan 1981].

Warzywa, w tym również marchew, zbudowane są głównie z cienkościennych komórek podstawowych – parenchymy, bardzo wrażliwych na mechaniczne uszkodzenia. Parenchyma jest niezwykle zróżnicowana morfologicznie i funkcjonalnie. W jej komórkach zachodzą podstawowe procesy życiowe rośliny jak: fotosynteza, oddychanie, wydzielanie i gromadzenie materiałów zapasowych w postaci skrobi, białek oraz lipidów. Dzięki swej zdolności do proliferacji komórki parenchymy stanowią źródło nowych komórek niezbędnych do regeneracji i zasklepiania ran. Właściwości mechaniczne tkanek zbudowanych z komórek podstawowych zależą od zewnętrznego obciążenia [Bajema

i in., 1998, Pitt i Chen, 1983, Zdunek 2001] oraz specyficznych własności tkanek jak np. ciśnienie turgoru [Konstankiewicz, Zdunek i in. 2001, Murase i in. 1980, Pitt 1982, Pitt i Chen 1983].

Najmniej znanym, ale ważnym zagadnieniem jest wpływ geometrycznych parametrów komórki na mechaniczne właściwości tkanki. Z punktu widzenia wytrzymałościowego można powiedzieć, że tkanka parenchymy zbudowana jest z komórek wypełnionych płynem. Ściany komórkowe są elastyczne i stosunkowo odporne na nacisk, ale słabo odporne na zginanie. Ciśnienie wewnątrzkomórkowe (turgor) powoduje usztywnienie całości i powstanie biologicznej konstrukcji o określonych własnościach, za które w dużej mierze odpowiada kształt i rodzaj najmniejszego elementu tkanki tzn. komórek. Ze względu na złożoną budowę parenchymy [Tamura i Senda 1992] oraz z uwagi na fakt, że kształt, rozmiary i liczba komórek zależą od fazy ich rozwoju [Lack i Ewans 2003], zarówno w procesie modelowania, jak i podczas badań mikroskopowych konieczne jest przyjęcie założeń uproszczających. Jednak zbyt daleko idące uproszczenia nie pozwalają w pełni na odwzorowanie rzeczywistych właściwości komórek [Blahovec 1985a, Konstankiewicz i Pukos 1995].

Wpływ wielkości komórek na właściwości wytrzymałościowe tkanek roślinnych były przedmiotem analizy przeprowadzonej przez Hamana i Konstankiewicz [Haman i Konstankiewicz 2000]. Wykazali oni, że naprężenia w ścianach komórkowych zależą od ich krzywizny i są tym większe, im większe są komórki przy określonym odkształceniu. Wnioski te zostały doświadczalnie potwierdzone w pracach Konstankiewicza [Konstankiewicz i in. 2001], z których wynika, że wytrzymałość bulwy ziemniaka zbudowanej z małych komórek jest wyższa od wytrzymałości bulwy ziemniaka zbudowanej z dużych komórek. Wielkość i liczba komórek zostały uznane również jako jedne z czynników mających największe znaczenie przy badaniu odporności na penetrację tkanek marchwi, rzodkwi, buraków i ziemniaków [Blahovec i in. 1985, Celba 1979, Huyskens-Keil i in. 1998, Mempel i in. 1997, Sager 1998, Wirsing i Horneburg 1994].

Nadzieje na poprawne odwzorowanie zachowania się materiału biologicznego pod wpływem obciążenia wiąże się z modelowaniem pojedynczych komórek roślinnych. Bardzo rozpowszechnione były modele tkanek budowane z myślą o wykorzystaniu ich do obliczeń metodami MES, składające się ze zbioru jednakowych komórek w postaci regularnych brył, np. walców i kul [Blahovec 1985b, Pitt i Davis 1984b, Reznicek 1984] o cienkich ścianach wypełnionych cieczą pod ciśnieniem. W pracach Pitta i Chena przedstawiono płaski model komórki pozwalający na analizę wpływu ciśnienia wewnętrznego (turgoru) oraz odkształcenia pojedynczej komórki na własności tkanki roślinnej [Pitt 1982, Pitt i Chen 1983]. Dalsze prace pozwoliły na budowę modelu przestrzennego uwzględniającego oddziaływanie międzykomórkowe [Pitt i Davis 1984, Gao i Pitt 1991]. Należy jednak pamiętać, że porowatość struktury zbudowanej z elementów kulistych z geometrycznego punktu widzenia w zależności od sposobu ułożenia waha się w granicach od 26 do 47%, podczas gdy przestwory powietrzne w tkance rzeczywistej, np. bulwy ziemniaka, wynoszą w zależności od stopnia dojrzałości i warunków składowania ok. 2% [Blahovec 2001, Weber 1990]. Mając to na względzie Umeda [Umeda i in. 1997] przedstawił fizyczny model komórki w formie czternastościennej bryły, będącej rozwiązaniem tzw. przypuszczenia Kelvina [Kelvin 1887], w którym mówi się o poszukiwaniu kształtu

brył o jednakowej objętości wypełniających całkowicie trójwymiarową przestrzeń przy zachowaniu minimalizacji powierzchni. Siły działające na ten model zostały wyznaczone metodami doświadczalnymi i przeanalizowane metodą elementów skończonych.

Poza właściwościami tkanki roślinnej duże znaczenie w poprawności modelowania ma uwzględnienie budowy oraz kształtu produktu roślinnego w skali makro. Materiały roślinne mają zwykle budowę warstwową o zmiennej liczbie warstw w zależności od stopnia ich rozwoju. Poszczególne warstwy różnią się budową tkanek, a co za tym idzie również właściwościami wytrzymałościowymi. Warstwy mogą być od siebie wyraźnie oddzielone (np. kapusta, cebula) lub tworzyć połączenie na poziomie komórek (np. pietruszka, marchew). Wychodząc z założenia izodiametryczności budowy tkanki miękkiszowej w danym stadium rozwoju tkanki, można skonstruować model w oparciu o podział wynikający z warstwowej budowy produktów rolniczych. Pomijając wpływ mikrostruktury na własności całej rośliny, każdej z warstw można przypisać określone wartości parametrów wytrzymałościowych otrzymane w wyniku badań eksperymentalnych. W takich modelach nie są najważniejsze informacje dotyczące budowy komórkowej, ale kształt, wielkość i właściwości poszczególnych warstw. Dodatkowo, charakterystyczny kształt produktów roślinnych stwarza konieczność analizy modelu pod kątem odpowiedzi układu na działanie siły na małą powierzchnię.

Wyniki badań przeprowadzonych w oparciu o modele warstwowe pozwalają nie tylko na uzyskanie informacji o zachowaniu się całego modelu pod wpływem obciążenia, ale na analizę wzajemnych oddziaływań poszczególnych warstw. Do przeprowadzenia tego rodzaju badań bardzo dobrze nadaje się metoda elastooptyczna w świetle przechodzącym. Obrazy izochrom uzyskane w modelu nasienia bobiku wykonanego z żywicy epoksydowej z uwzględnieniem budowy warstwowej oraz praw podobieństwa modelowego poddanego obciążeniom promieniowym i ściskanego w modelu gniotownika walcowego [Romański i Stopa 2002a, Stopa i Romański 2002b] wykazały, że sposób ułożenia modelu ziarna względem kierunku działania siły w istotny sposób wpływa na obraz izochrom zarówno w okrywie, jak i liścieniach.

Badania modeli elastooptycznych dotyczyły dwuwarstwowego, płaskiego modelu przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Badania przeprowadzono w próbie ściskania pomiędzy dwiema płaskimi, równoległymi płytami w monochromatycznym świetle przechodzącym, przy zastosowaniu kołowego polaryskopu elastooptycznego. Do każdego etapu obciążenia wyznaczono charakterystyczny obraz izochrom. Model wykonano z elastomeru poliuretanowego przy zachowaniu praw podobieństwa modelowego [Hossdorf 1975], zwracając szczególną uwagę na poprawne odwzorowanie właściwości wytrzymałościowych w modelu kory i rdzenia. Określono wpływ właściwości wytrzymałościowych [Stopa i Romański 2006], kształtu rdzenia [Stopa i Romański 2007] oraz sił spójności między modelem kory i rdzenia [Stopa i in. 2008] na obrazy izochrom będące odpowiedzią modelu na obciążenie zewnętrzne. Wykorzystanie elastooptycznej metody modelowej do badań właściwości mechanicznych źdźbła pszenicy również zaproponował w swoich pracach Koper i Gowin [1978a, 1978b, 1976].

W badaniach dynamicznych wiele ciekawych informacji dostarczają mechatroniczne modele owoców [Bollen 1991, Garcia i in. 1994, Pang i in. 1994, Sargent i in. 2002], których głównym elementem pomiarowym jest trójosiowy czujnik przyspieszenia.

Modele te znalazły zastosowanie przy projektowaniu linii produkcyjnych do segregacji i pakowania jabłek. Pozwalały wyznaczyć stopień uszkodzenia owoców w warunkach zmieniających się przyspieszeń występujących w procesach produkcyjnych. Słabą stroną tych modeli były zbyt duże uproszczenia dotyczące kształtu i właściwości wytrzymałościowych.

Osobnym zagadnieniem jest modelowanie wzajemnego oddziaływania pomiędzy produktami roślinnymi oraz między produktami roślinnymi i elementami roboczymi maszyn biorących udział w procesach przetwórczych. Celem takiego modelowania jest poznanie zakresu uszkodzeń powstałych w wyniku selekcji, składowania, pakowania lub warstwowego załadunku. Przy warstwowym składowaniu owoców prawdopodobieństwo uszkodzenia zależy w głównym stopniu od warstwy, w której się one znajdują, chociaż sposób dystrybucji obciążenia w poszczególnych warstwach ma charakter przypadkowy. Przeprowadzone badania modelowe pozwalają określić liczbę i wielkość warstw składowanych owoców. Według Studmana [1999] maksymalne obciążenie modeli kulistych w najniższej warstwie jest 3–7 razy większe niż obciążenie średnie.

Zachowanie się modeli elastooptycznych w kontakcie z typowymi elementami roboczymi maszyn pozwoliło określić zasięg i rodzaj oddziaływania na różne kształty elementów obciążających [Stopa i Romański 2006]. Trudnym zagadnieniem jest wykonanie poprawnych modeli wzajemnego oddziaływania produktów biologicznych. Wynika to nie tylko ze specyficznych właściwości tych materiałów, ale również z dynamicznego charakteru oddziaływania [Hammerle i Mohsenin 1966, Mohsenin i in. 1978, Holt i in. 1981, Holt i Schoorl 1984, Chen i in. 1985, Lichtensteiger i in. 1988, Chen i Yazdani 1991, Pang i in. 1992, Hyde i in. 1993, Bajema i Hyde 1998, Ragni i Berardinelli 2001; Van Zeebroeck i in. 2003].

2.4.1. Metoda elementów skończonych

Dynamiczny rozwój przybliżonych metod obliczeniowych coraz częściej skłania badaczy do posługiwania się modelami opartymi na metodzie elementów skończonych. Istota MES polega na tym, że każdą wielkość (np. przemieszczenie) opisaną funkcją ciągłą (pierwotną) w rozpatrywanym obszarze aproksymuje się modelem dyskretnym [Rusiński i in. 2000]. Model ten składa się ze zbioru funkcji ciągłych określonych w skończonej liczbie podobszarów (2.8) zwanych elementami, na które podzielono dany obszar (rys. 2.10):

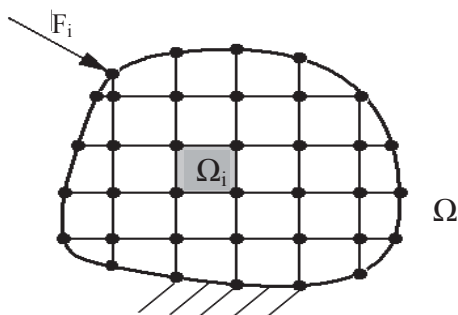
$$\Omega = \sum_{i=1}^n \Omega_i \quad (2.8)$$

Funkcje ciągłe w podobszarach definiuje się na podstawie funkcji pierwotnej w skończonej liczbie punktów położonych wewnątrz obszaru, zwanych węzłami.

Budowa modelu dyskretnego polega na wyróżnieniu w ciągłym modelu badanego obiektu skończonej liczby węzłów i określeniu w nich wielkości fizycznych, których wartości się aproksymuje. Następnie należy podzielić cały obszar na skończoną liczbę elementów połączonych ze sobą w węzłach i aproksymować wielkości fizyczne w każdym elemencie za pomocą funkcji aproksymujących poprzez wielkości węzłowe.

Budowa modelu dyskretnego wymaga wykonania następujących kroków [Rusiński i in. 2000]:

- wyróżnienia skończonej liczby węzłów w ciągłym fragmencie modelu badanego obiektu,
- określenia w węzłach wielkości węzłowych,
- podzielenia obszaru na skończoną liczbę elementów połączonych ze sobą w węzłach,
- aproksymowania wielkości fizycznych w każdym elemencie za pomocą funkcji.



Rys. 2.10. Obszar ciągły z podziałem na podobszary [Rusiński i in. 2000]

Fig. 2.10. Continuous area with its division onto sub-areas

Funkcja opisująca wielkości fizyczne może być aproksymowana wielomianem, którego stopień zależy od kształtu i rodzaju zastosowanego elementu. Jego współczynniki są jednoznacznie określone w węzłach poprzez wartości poszukiwanej funkcji. W celu wyznaczenia współczynników wielomianów aproksymujących, należy utworzyć, a następnie rozwiązać układ równań algebraicznych, w którym niewiadomymi będą wartości węzłowe. Układ ten tworzy się, konstruując funkcjonał, który odpowiada bilansowi energii w badanym obszarze. Minimum tego funkcjonału określa poszukiwane wartości węzłowe, co w efekcie umożliwia lokalne wyznaczenie współczynników układu równań w każdym elemencie, a następnie zsumowanie ich w globalnej macierzy.

W uproszczeniu każdy program wykorzystujący metodę elementów skończonych musi realizować następujący algorytm:

- określenie geometrii zagadnienia i struktury materiałowej,
- podzielenie obszaru na elementy skończone jednorodnie materiałowo,
- sformułowanie i rozwiązanie układu równań.

Warunkiem uzyskania założonej dokładności obliczeń jest przyjęcie takiego kształtu poszukiwanej funkcji, który wystarczająco dokładnie odwzorowuje wielkości rzeczywiste. Spełnienie tego warunku oraz przyjęcie odpowiednio gęstego podziału obszaru na elementy zbliża uzyskane wyniki do rzeczywistych wartości tych wielkości. Podział ten nie musi być równomierny. Tam gdzie mamy do czynienia z dużymi zmianami wartości,

elementy powinny być mniejsze. Rozumowanie to prowadzi do tak zwanej adaptacyjnej MES. Polega ona na wykonywaniu szeregu analiz przedzielonych zagęszczaniem sieci w tych miejscach, gdzie pole zmienia się gwałtownie. Zagęszczanie sieci polega najczęściej na podziale wygenerowanych uprzednio elementów na mniejsze.

Analizując wyniki obliczeń otrzymane za pomocą metody elementów skończonych, należy pamiętać, że mogą być one obciążone błędami wynikającymi z przybliżonego charakteru metody. Nie ma jednego pewnego sposobu pozwalającego na sprawdzenie prawidłowości obliczeń. Większość błędów wynika z uproszczeń dokonywanych na poszczególnych etapach przygotowywania modelu dyskretnego [Rusiński i in. 2000]. Najczęściej następują: zbytne uproszczenie modelu geometrycznego, niewłaściwe przeprowadzenie dyskretyzacji, zastosowanie zbyt rzadkiej siatki podziału czy niewłaściwa identyfikacja warunków brzegowych.

Błędy popełniane na różnych etapach analizy można według Kleibera [1989] podzielić na następujące grupy:

- błąd kontynualnego modelowania matematycznego – jest to różnica pomiędzy hipotetycznym rozwiązaniem problemu fizycznego otrzymanym w idealnie przeprowadzonym eksperymencie a rozwiązaniem ścisłym w ramach ośrodka ciągłego;
- błąd całkowity – różnica pomiędzy wynikami rozwiązania ścisłego ciągłego modelu, a wynikami modelu dyskretnego;
- błąd zaokrągleń – różnica pomiędzy wynikami modelu dyskretnego a wynikami z obliczeń numerycznych zależnych od rodzaju zastosowanej maszyny cyfrowej;
- błąd rozwiązania – różnica między wynikami rozwiązania ścisłego a wynikami obliczeń numerycznych;
- błąd wynikający z dyskretyzacji – rozbieżność pomiędzy modelem dyskretnym a poprawnym modelem matematycznym.

Istnieją metody zwiększania dokładności obliczeń polegające na budowaniu coraz obszerniejszych modeli dyskretnych o mniejszych elementach lub zastosowanie elementów skończonych wyższego rzędu. Oprócz nich można zastosować metody H i P-elementu niepowiększające zadania numerycznego. Metoda H polega na budowaniu w wybranych miejscach koncentracji submodeli, natomiast metoda P-elementu poprawia dokładność obliczeń poprzez zwiększenie rzędu wielomianu funkcji kształtu na styku elementów [Rusiński i in. 2000].

Pojawienie się nowych materiałów konstrukcyjnych oraz rozszerzenie kierunków badań naukowych na obiekty zbudowane z materiałów o charakterystyce nieliniowej, a także gwałtowny rozwój technik obliczeniowych i komputerów spowodowało, że coraz częściej nie poprzestaje się na prostej analizie liniowej metodą elementów skończonych, ale stosuje się bardziej skomplikowane algorytmy obliczeń uwzględniające nieliniowe związki fizyczne [Szefer 1998]. Rozwiązanie zadania w przypadku materiałów o charakterystyce nieliniowej opiera się na krokowym zwiększaniu parametrów wejściowych, rozwiązywaniu zadań w poszczególnych krokach i sterowaniu charakterystykami materiału w oparciu o uzyskane wyniki cząstkowe. Niezależnie od zastosowanych modeli materiału zadanie polega na sprowadzeniu modeli nieliniowych do skończonej liczby

cząstkowych modeli liniowych i następnie zastosowanie odpowiednich technik interpolacji [Malinin i Rżysko1981].

2.4.2. Modelowanie materiałów biologicznych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych

Materiały pochodzenia biologicznego ze względu na swoje właściwości stwarzają poważne problemy nie tylko podczas prowadzenia prac badawczych, ale również w trakcie rozważań teoretycznych. Zastosowanie metod analitycznych do analizy naprężeń i odkształceń w materiałach biologicznych na razie sprowadza się tylko do pojedynczych przypadków i to w ograniczonym zakresie [Sitkei 1986]. Brak spójnej i jednolitej teorii opisującej zachowanie się materiału biologicznego pod wpływem obciążenia utrudnia budowę modeli teoretycznych pozwalających na obliczanie rzeczywistych i dopuszczalnych wartości nacisków powierzchniowych w odniesieniu do płodów rolnych. Dodatkową przeszkodę stanowi stopień złożoności zagadnień związanych z rozwiązywaniem problemu nacisków powierzchniowych. Mając na względzie powyższe uwagi, można się spodziewać, że ściśle rozwiązanie matematycznego problemu nacisków powierzchniowych wymaga przyjęcia dużej liczby założeń upraszczających i prowadzi do powstania modelu w postaci skomplikowanych formuł matematycznych, trudnych do zastosowania w praktyce.

Coraz większym powodzeniem, z uwagi na zastosowanie praktyczne, cieszą się metody przybliżone umożliwiające tworzenie modeli obliczeniowych niezbędnych do rozwiązywania zagadnień brzegowych mechaniki materiałów biologicznych. Wyróżnia się metody [Rusiński i in. 2000]:

- metoda elementów brzegowych (MEB) – polega na podziale brzegu obszaru na elementy i wprowadzeniu węzłów brzegowych. Podstawą są tu równania całkowe [Mackerle i Brebbia 1988, Buczyński 1998];
- metoda różnic skończonych (MRS) – wymaga wprowadzenia regularnej siatki na całym obszarze oraz przyjęciu operatorów różniczkowych w stosunku do węzłów siatki [Orkisz 1995];
- metoda elementów skończonych (MES) – polega na podziale obszaru na skończoną liczbę elementów oraz przyjęciu dla każdego elementu funkcji kształtu [Turner i in. 1956, Zienkiewicz i Taylor 1991, Zienkiewicz 1972, Argyris 1977].

Wszystkie przedstawione metody prowadzą do powstania układu równań różniczkowych cząstkowych, których jednoznaczne rozwiązanie wymaga wprowadzenia warunków brzegowych oraz początkowych określających stan procesu w chwili początkowej. Mimo podobieństw wśród metod dyskretnych najszersze zastosowanie w praktyce oraz rozważaniach naukowych zyskała metoda elementów skończonych. Jest ona stosowana głównie do obliczeń i analiz wytrzymałościowych konstrukcji nośnych i części maszyn, chociaż możliwe jest jej zastosowanie w innych dziedzinach nauki (np. do rozwiązywania zagadnień ekonomicznych czy przepływu ciepła i masy). Z uwagi na specyfikę materiałów pochodzenia roślinnego modelowanie ich metodą MES jest trudne i stosunkowo

mało poznane. Metody modelowania i technologie badań opracowane dla materiałów konstrukcyjnych nie dadzą się wprost zastosować w przypadku surowców roślinnych. Materiały biologiczne mają budowę anizotropową, na ogół bardzo niskie wartości umownych modułów sprężystości oraz wysokie wartości stałej Poissona. Dodatkowo zadanie komplikuje fakt, że mają na ogół budowę warstwową, a wytrzymałość tych materiałów istotnie zmienia się w zależności od miejsca, z którego pobrana jest próbka. Podkreślić należy to, że własności materiałów biologicznych zmieniają się w miarę upływu czasu [Lack i Evans 2003], a parametry mechaniczne tkanki roślinnej są istotnie uzależnione od potencjału wody [McGarry 1995, Gołacki 1991, 1993, 1994, 1996b]. Materiały zbudowane z żywych komórek cechują się licznymi formami anatomicznymi, co komplikuje związki zachodzące między siłami działającymi na materiał, a jego odkształceniem. Niezależnie od modelowania wytrzymałościowego w stosunku do materiałów roślinnych metoda elementów skończonych umożliwia, między innymi, budowę modelu transportu ciepła i masy w ziarniakach kukurydzy z uwzględnieniem anizotropii i niejednorodności ośrodka przy nieliniowej analizie 3D [Weres 1992, 2005].

2.4.3. Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania zagadnień kontaktowych

Rozwiązywanie zagadnień stykowych polegających na wejściu w kontakt pod wpływem obciążenia dwóch oddzielnych ciał stanowi ważny problem analizy nieliniowej metody elementów skończonych [Mazurkiewicz i Ostachowicz 1983]. Wśród wielu metod rozwiązywania tych problemów można wyróżnić hybrydową, opartą na metodzie przemieszczeń, i sił, zastosowaną w systemie COSMOS/M [Rusiński 1994, COSMOS/M 1993a, 1993b, 1993c, 1993d]. Rozróżniamy kontakty proste i złożone. Kontakt prosty określony jest przez dwa węzły, a odległość między modelowanymi ciałami jest definiowana jako maksymalne przemieszczenie rozpatrywanych węzłów w kierunku kontaktu, czyli linii łączącej te dwa węzły. W analizie kontaktu każdy styk oddziałujących na siebie ciał zastępowany jest parą sił o takiej samej wartości i kierunku, lecz o przeciwnych zwrotach przyłożonych do pary węzłów tworzących styk. Z ogólnym problemem kontaktowym mamy do czynienia wtedy, gdy kierunek sił w strefie styku nie jest określony i gdy zmienia się położenie punktu styku w miarę wzrostu obciążenia. Dokładność rozwiązania ogólnego zagadnienia kontaktowego zależy od rozwiązań przyrostowych w miarę zwiększania obciążenia.

Rozwiązywanie zagadnienia kontaktowego w systemie COSMOS/M przeprowadza się zgodnie z następującą procedurą:

- w ciele czynnym wyróżniony zostaje zbiór punktów, do którego przyporządkowane są jednowęzłowe elementy kontaktowe typu GAP;
- w ciele biernym zdefiniowane zostają elementarne linie lub powierzchnie kontaktowe;
- obszar kontaktu jest ograniczony przez pole zdefiniowane przez jednowęzłowe elementy kontaktowe typu GAP;

- w ciele biernym zgodnie z porządkiem węzłów określone są strony dodatnia i ujemna, gdzie nie powinny wejść jednowęzłowe elementy kontaktowe;
- powierzchnie kontaktowe w ciele biernym danej grupy powinny stanowić nierozłączny obszar.

Znajomość kierunku siły normalnej w strefie styku oraz położenia punktów styku umożliwia stosowanie dwuwęzłowego elementu kontaktowego do rozwiązywania zagadnień kontaktowych. W tym przypadku kierunek elementu kontaktowego reprezentowany przez linię łączącą początkowe położenie dwóch punktów pokrywa się z siłą normalną styku. Dwuwęzłowy element kontaktowy może być definiowany jako przenoszący ściskanie lub rozciąganie. Może być również uwzględniona związana z elementem kontaktowym siła tarcia leżąca na płaszczyźnie kontaktu i to zarówno w analizie statycznej, jak i dynamicznej.

2.4.4. Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania zagadnień kontaktowych w materiałach biologicznych

Jednym z pierwszych zastosowań metody elementów skończonych do budowy modelu dyskretnego dla owoców i warzyw była analiza drgań przenoszonych przez tkanki, z jakich zbudowane są jabłka oraz badania odpowiedzi na impulsy wzbudzenia zmierzające do określenia parametrów zależnych od własności akustycznych jabłek [Lu i Abbott 1996, 1997]. Wyniki pomiarów pozwoliły na określenie zwięzłości tkanki jabłek będącym dobrym kryterium do określenia stopnia ich dojrzałości. Na pierwszym etapie badań określono właściwości wytrzymałościowe poszczególnych części składowych jabłek (skórki, miąższu i rdzenia). Wyznaczono moduł sprężystości i stałą Poissona, ponieważ wpływają one w istotny sposób na częstość drgań własnych materiału. Wykonano również badania porównawcze, przyjmując dla miąższu właściwości izotropowe w zakresie odkształceń sprężystych. Ponieważ wyniki nie dały zadowalających rezultatów, przeprowadzono walidację polegającą na badaniach modelowych symulujących odpowiedź gumowej kuli na zadane obciążenie i porównując otrzymane wielkości z wynikami badań doświadczalnych. Właściwości wytrzymałościowe jabłek zostały zapożyczone bezpośrednio z badań Abbotta i Lu [1996] i Mohsenina [1970]. Wykazały one między innymi, że właściwości wytrzymałościowe zależą w dużym stopniu od przestrzennej orientacji jabłka względem układu działających sił. W związku z tym przy budowie modelu dyskretnego uwzględniono różne wartości naprężeń niszczących miąższu w różnych położeniach jabłka.

Lewis i in. [2008] zbudował model dyskretny jabłka Golden Delicious, wykorzystując skaner laserowy do precyzyjnego odwzorowania geometrii jabłka. W tym celu powierzchnię jabłka pokryto znanym z badań defektoskopii magnetycznej proszkiem o nazwie SKDS2, aby uzyskać powierzchnię odbłaskową niezbędną do prawidłowego wykonania skanu. Ze względu na skomplikowany kształt jabłek do dyskretyzacji modelu zastosowano tetrahedryczny element skończony o czterech węzłach. W efekcie otrzymano model złożony z 17 000 elementów skończonych, co w zupełności wystarczyło

zarówno do prawidłowego zdefiniowania geometrii, jak i do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej. Wzorując się na poprzednich badaniach [Lu i Abbott 1996, 1997] oraz w celu uproszczenia obliczeń do budowy modelu, przyjęto izotropowe właściwości materiału biologicznego. Trudność modelowania polegała również na tym, że według Abbotta i Lu [1996] właściwości różnych części składowych jabłka (skórka, miąższ, rdzeń) są w sposób istotny różne. Abbott i Lu [1996] wykazali również, że w różnych częściach miąższu moduł sprężystości osiąga różne wartości, oraz że zależą one od kierunku przyłożonego obciążenia. Ostatecznie w budowie modelu przyjęto liniowo-sprężysty charakter odkształcenia miąższu jabłek, zdając sobie sprawę, że nie odpowiada to rzeczywistym właściwościom świeżych tkanek. Niestety, nie przeprowadzono analizy wpływu tego uproszczenia na uzyskane wyniki. Model jabłka ściskany był pomiędzy dwiema płaskimi płytami, z których jedna wykonana była z polimetakrylu metylu a druga ze stali. W wyniku badań otrzymano wartości maksymalnych nacisków powierzchniowych nieco większe w stosunku do wyników badań eksperymentalnych oraz nieobserwowany w trakcie badań jabłek ciągły wzrost maksymalnych nacisków w miarę wzrostu obciążenia. Powodowane to było prawdopodobnie przyjęciem przy budowie modelu liniowej zależności naprężenia od odkształcenia oraz pominięciem anizotropii materiału miąższu jabłka.

Dintwa i in. [2008] przeprowadzili badania polegające na pomiarach powierzchni stłuczenia jabłek przy wzajemnym zderzeniu jabłek oraz przy uderzeniu jabłek o nieodkształcalną płytę. Do prac związanych z budową modelu mes jabłka i jego analizą zastosowali moduł programu MSC.Marc®/Mentat® opracowany przez MSC Software Corporation (Santa Ana, California). Podstawową zaletą programu MSC.Marc®/Mentat® była możliwość rozwiązywania dużej liczby problemów dotyczących badań obiektów pochodzenia biologicznego, włączając w to nie tylko nieliniowość materiałową czy geometryczną (duże deformacje albo nawet strukturalne uplastycznienie), ale także nieliniowości graniczne (naprężenia kontaktowe, otwieranie i zamykanie szczelin).

Model geometryczny zbudowano dla połowy jabłka ze względu na symetrię, skrócenie czasu obliczeń oraz z uwagi na fakt, że wiele badań doświadczalnych było prowadzonych właśnie dla połowy jabłka [Van Zeebroeck i in. 2003]. Płaszczyzna podziału przebiegała przez oś symetrii jabłka. Wymiary modelu geometrycznego przyjęto na podstawie pomiarów przekroju przypadkowego egzemplarza kupionego w supermarkecie. W wyniku pomiarów otrzymano następujące dane: średnica jabłka – 80 mm, grubość skórki – 500 μm , mniejszy promień rdzenia – 10 mm, większy promień rdzenia – 28,5 mm oraz wysokość jabłka – 63 mm.

Dyskretne modele jabłek zostały zbudowane przy użyciu Geometry and Mesh Generation modułów pre- i postprocesora programu Mentat. Procedura była złożona z dwóch kroków. W pierwszym kroku wygenerowano siatkę elementów skończonych modelu geometrycznego 2D przekroju poprzecznego jabłka zgodnie z możliwościami programu Mentat. W drugim kroku wygenerowano siatkę elementów skończonych 3D połowy jabłka poprzez obrót wokół osi pionowej krokiem co 10^0 za pomocą procesora EXPAND. Podstawową przyczyną budowy modelu 3D zamiast przestrzennego modelu osiowosymetrycznego był zamiar symulacji uderzenia wahadła w model jabłka. W badaniach eksperymentalnych wahadło uderzało w jabłko w okolicach osi poziomej, co

mogłoby w przypadku modelu osiowosymetrycznego być źródłem błędów. W efekcie modelowania uzyskano bardzo regularny kształt modelu dyskretnego jabłka, który co prawda w oczywisty sposób odbiega od kształtu rzeczywistego, ale w wystarczający sposób oddaje podobieństwo do obiektu rzeczywistego. Do generowania siatki elementów skończonych zastosowano 3570 izoparametrycznych elementów bryłowych o 8 węzłach (MSC. element Marc 7). Naskórek zbudowany był z 666 elementów, rdzeń z 294, a miąższ z 2610 elementów typu Marc7.

W wyniku badań dynamicznych zachowania się modelu MES jabłka otrzymano zależność przemieszczenia od czasu w różnych prędkościach uderzenia i różnych własnościach materiałów modelowych. Zauważono, że przyjęcie właściwości materiałowych będących funkcją czasu nie zmienia w istotny sposób odpowiedzi modelu na zadane obciążenie w stosunku do modeli o własnościach materiałowych niezmiennych w czasie. Ważnym wnioskiem było stwierdzenie, że idealizacja budowy jabłka do jednorodnego modelu nie prowadzi do poważnych błędów modelowych. Zdaniem autorów niezwykle ważne jest poszukiwanie technik eksperymentalnych pozwalających na uzyskanie charakterystyk lepkosprężystych zachowań materiałów biologicznych poddanych działaniu naprężeń relaksacyjnych wyznaczonych dla takich gwałtownych procesów jak zderzenie.

Interesujące podejście do modelowania materiału biologicznego za pomocą metody elementów skończonych zaprezentowali w swojej pracy Wu i Pitts [1998]. Punktem wyjścia było założenie, że właściwości wytrzymałościowe tkanki roślinnej zależą od właściwości i budowy pojedynczych komórek. Badania podstawowe zależności pomiędzy właściwościami makroskopowymi tkanki roślinnej, a właściwościami komórek pozwalają wyjaśnić mechanizm powstawania uszkodzeń lub podać charakterystykę zwięzłości tkanki. Największa trudność tego rodzaju modelowania polega głównie na określeniu właściwości tkanek oraz sprawdzeniu poprawności modelowania [Pitt 1992]. Różnego rodzaju modele pojedynczych komórek były przedmiotem badań wielu badaczy [Nilsson i in. 1958, Akyurt i in. 1972, Cooke i in. 1976, Pitt 1982, Pitt i Chen 1983, McLaughlin i Pitt 1984, Pitt i Davis 1984a, Gates i in. 1986, Gao i Pitt 1991]. Modele te w większości przypadków zbudowane były w postaci brył o regularnych kształtach przenoszących odpowiednią część zewnętrznego obciążenia. W rzeczywistości komórka wegetatywna jest podłużna, o kształcie niesymetrycznym i o różnej krzywiźnie zewnętrznych ścian. Powstaje w związku z tym problem: czy i w jakim stopniu rzeczywisty, niesymetryczny kształt komórek wpływa na zmianę własności tkanki w porównaniu z kształtem wyidealizowanym. Badania polegające na budowie wiarygodnych modeli umożliwiło dopiero rozwinięcie metod numerycznych.

Wu i Pitts [1998] zbudowali model 3D metodą elementów skończonych przy zachowaniu rzeczywistego kształtu komórek miąższu jabłka określonego na podstawie pomiarów mikroskopowych, a następnie przetestowano go. Do budowy modelu geometrycznego jabłka Wu i Pitts zastosowali technikę opracowaną do pomiarów kształtu ziarna pszenicy przez Younce i in. [1991] i udoskonaloną przez Wu [1993]. Polegała ona na wycięciu z miąższu jabłek odmiany Red Delicious kostek o objętości kilku mm³, poddaniu ich obróbce chemicznej i następnie wycięciu z nich, za pomocą mikrogilotyny Reichert Ultracut R ® plasterków o grubości 2 μ w odstępach co 5 μ. Otrzymane

w ten sposób preparaty zostały sfilmowane pod mikroskopem w świetle przechodzącym przy powiększeniu 70-krotnym. Po wyselekcjonowaniu komórek o odpowiednich parametrach, dzięki zastosowaniu modułu CAE programu I-DEAS™ (Integrated Design and Engineering Analysis Software) opracowanego przez Structural Dynamics Research Corporation (SDRC), utworzono powłokowy model geometryczny 3D komórki miąższu jabłka. Model dyskretny powłoki komórki wykonano za pomocą 224 cienkościennych parabolicznych elementów powłokowych. Odpowiedź pojedynczej komórki jabłka na obciążenia ściskające uzyskano przy zastosowaniu nieliniowej analizy programu MARC™ (MARC Analysis Research Corporation). Przyjęto założenie, że ściany komórek wykonane zostaną z jednorodnego, izotropowego materiału o liniowo sprężystej charakterystyce. Na podstawie wcześniejszych badań [Pitt i Davis 1984, Mohsenin 1986] przyjęto stałą Poissona $\nu=0,24$, moduły sprężystości $E_1=26,4$ MPa i $E_2=52,8$ MPa i grubości ścianek $g_1=4$ μm i $g_2=6$ μm .

Otrzymane wyniki zostały porównane z rezultatami badań eksperymentalnych prowadzonych przez innych badaczy. Obliczony wolumetryczny moduł sprężystości do modelu pojedynczej komórki mieścił się w przedziale wartości wyznaczonej doświadczalnie przez Steudle i Wieneke [1985]. Podobne wyniki uzyskano przy porównaniu średniego hydraulicznego współczynnika przewodnictwa uzyskanego przy liniowym wzroście ciśnienia, który mieścił się w granicy tolerancji doświadczalnej wartości wyznaczonej przez Steudle i Wieneke.

3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO

W oparciu o przedstawioną analizę dostępnej literatury można zauważyć, że problem kontaktu owoców i warzyw z elementami maszyn rolniczych w poszczególnych fazach produkcji był przedmiotem nielicznych prac badawczych, mimo że zagadnienie nacisków powierzchniowych, a więc problem działania siły na małą powierzchnię, ma istotne znaczenie niemal we wszystkich dziedzinach produkcji rolniczej. Szczególnie dotyczy to pielęgnacji, zbioru, transportu oraz przechowywania, a nawet przetwórstwa owoców i warzyw. Znaczenie nacisków powierzchniowych wynika głównie z charakterystycznego kształtu plodów rolnych, który najczęściej jest kulisty lub walcowy.

Wielu badaczy prowadzi prace zmierzające do poznania właściwości mechanicznych materiałów roślinnych, nie uwzględniając kształtu i budowy całych produktów rolniczych. Stosowanie znanych z wytrzymałości materiałów teorii dotyczących problemu działania siły na małą powierzchnię, takich jak teoria Hertza, zagadnienie Boussinesqa czy Flamanta w odniesieniu do materiałów pochodzenia biologicznego nie ma uzasadnienia teoretycznego ze względu na założenia, przy których zostały wyprowadzone. Ponadto badania obiektów rzeczywistych nie zawsze dają zadowalające rezultaty z uwagi na brak wiarygodnych modeli obliczeniowych stosowanych przy opracowywaniu wyników pomiarów.

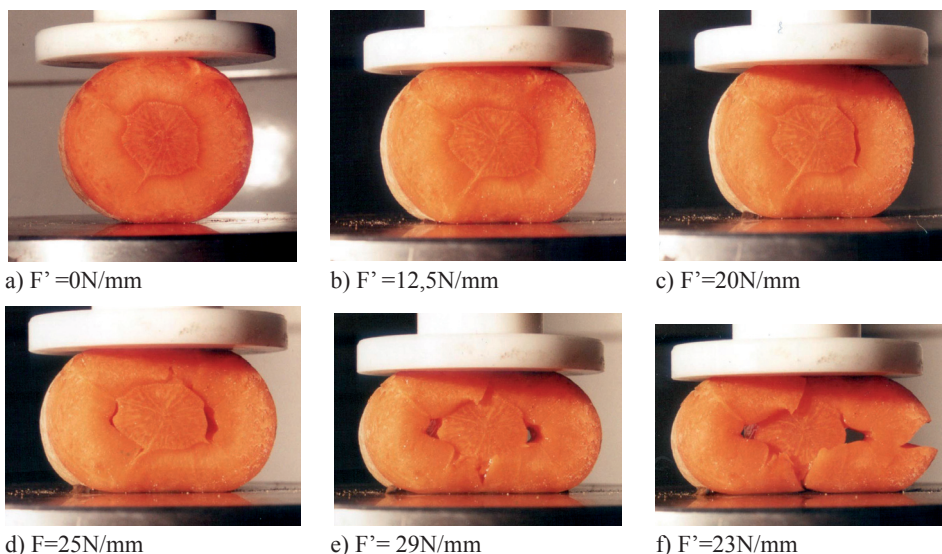
Jednym ze sposobów poznania istoty oddziaływania części roboczych maszyn na strukturę wewnętrzną warzyw, a także efektów wzajemnego oddziaływania elementów ich budowy wewnętrznej, mogą być badania modelowe obiektów rzeczywistych. W większości przypadków budowane są modele matematyczne o różnym stopniu złożoności formuł. W tej grupie szczególnie cenne są modele strukturalne oparte na ogólnych prawach fizyki. W przypadku materiałów pochodzenia biologicznego budowa tego typu modeli jest bardzo trudna.

Duże nadzieje związane są z zastosowaniem metody elementów skończonych do modelowania obiektów pochodzenia roślinnego. Jednak dynamiczny rozwój tej metody, związany z osiągnięciami w zakresie informatyki, nie jest równoznaczny ze wzrostem prac badawczych obejmujących materiały biologiczne. Jedną z przyczyn tak słabego zainteresowania metodami MES są bez wątpienia trudności w fazie weryfikacji otrzymanych wyników. Odpowiedzią na ten problem mogą być pomiary wielkości charakteryzujących badany obiekt na poziomie mikroodkształceń. W przypadku materiałów biologicznych na szczególne zainteresowanie zasługują metody bezdotykowe oparte na wykorzystaniu światła spójnego pozwalające na wyznaczenie przemieszczeń na dużym polu widzenia z dokładnością rzędu mikrometra.

Seria próbnych pomiarów wykonanych przed przystąpieniem do budowy modeli dyskretnych korzenia marchwi pozwoliła na rejestrację obrazów makrostruktury przekro-

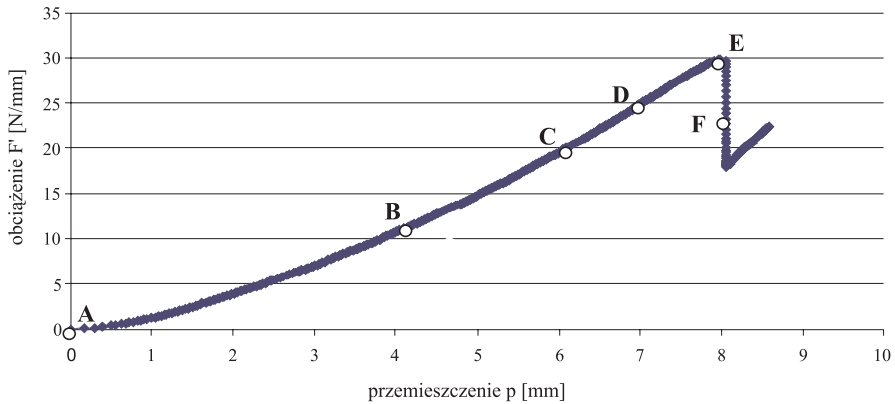
ju poprzecznego korzenia marchwi jako funkcji siły obciążającej oraz identyfikację poszczególnych charakterystycznych faz zgniotu. Pomiary wykonano w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 wyposażonej w głowicę o zakresie do 1 kN. Rejestrację wyników prowadzono w warunkach obciążenia statycznego przy prędkości przesuwu głowicy obciążającej $1,67 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Przy obciążeniu siłą $F' = 12,5$ N/mm (rys. 3.1b, punkt B na rys. 3.2) widoczna jest wyraźna deformacja kształtu warstwy kory, przy braku wyraźnych oznak zniszczenia tkanki i braku deformacji rdzenia. Pojawiają się jednak pierwsze krople wyciśniętego soku, co może świadczyć o lokalnym uszkodzeniu tkanki warstwy kory w miejscu o największym odkształceniu. Po zwiększeniu obciążenia do $F' = 20$ N/mm (rys. 3.1c, punkt C na rys. 3.2) pojawiają się pierwsze oznaki oddzielenia się kory od rdzenia na osi poziomej próbki, wyraźny zgniot części korowej wzdłuż osi pionowej, niewielka deformacja rdzenia. Dalsze zwiększanie obciążenia prowadzi do zniszczenia próbki. Przy obciążeniu $F' = 25$ N/mm (rys. 3.1d, punkt D na rys. 3.2), widoczne jest wyraźne oddzielenie się warstwy kory od rdzenia i rozpoczęcie pęknięcia kory w okolicach osi pionowej. Po przekroczeniu obciążenia $F' = 29$ N/mm (rys. 3.1e, punkt E na rys. 3.2), następuje gwałtowne zniszczenie próbki i spadek obciążenia spowodowany pęknięciem warstwy kory w miejscach maksymalnych naprężeń gnących i ściskających (rys. 3.1f). Można więc zauważyć, że podczas promieniowego ściskania korzenia marchwi występują dwa charakterystyczne punkty. Pierwszy z nich to moment, w którym rozpoczyna się niszczenie struktury wewnętrznej, którego widocznym symptomem jest wydobywanie się kropelek soku. Drugi charakterystyczny punkt to zniszczenie makrostruktury korzenia marchwi.



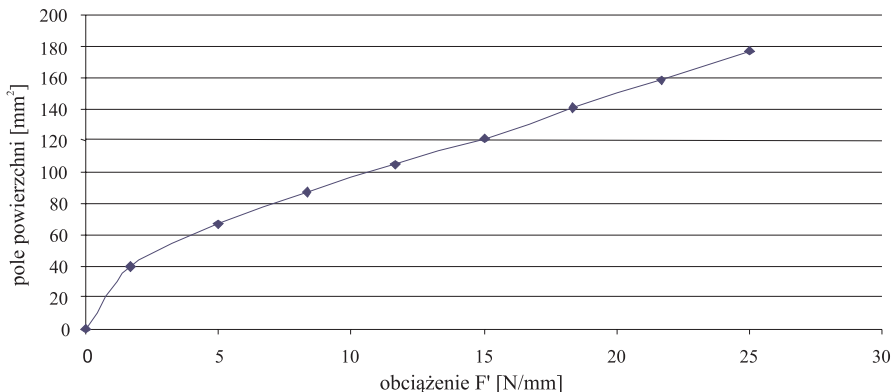
Rys. 3.1. Przebieg procesu promieniowego ściskania marchwi (fazy zgniotu)

Fig. 3.1. Course of the process of compression of a carrot root (phases of compression)

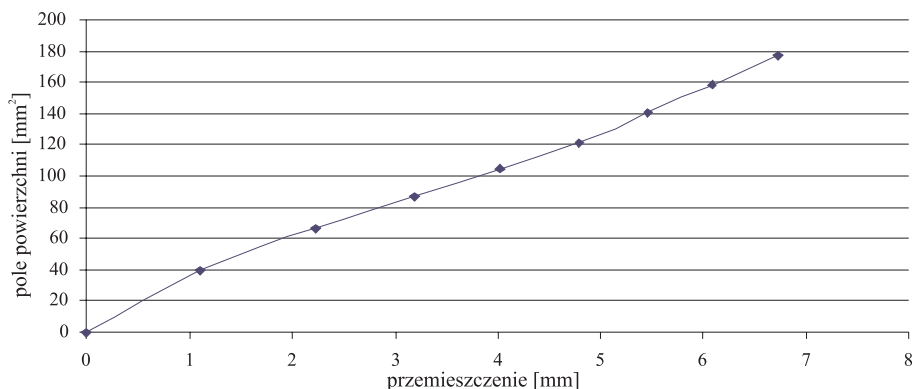


Rys. 3.2. Wykres promieniowego ściskania próbki marchwi z zaznaczonymi punktami kolejnych faz zgniotu
 Fig. 3.2. Graph of the radial compression of a sample of carrot root with the points of the subsequent phases of compression marked thereon

Analiza wyników badań jakościowych pozwoliła na wykonanie wstępnych badań ilościowych polegających na pomiarach pola powierzchni styku korzenia marchwi z elementem roboczym głowicy obciążającej oraz przemieszczenia tego punktu. Jak można się było spodziewać, na wielkość pola powierzchni styku elementu obciążającego z korzeniem marchwi istotne znaczenie miało zarówno obciążenie, jak i odpowiadające mu przemieszczenie punktów przyłożenia obciążenia. Przykładowy przebieg zależności pola powierzchni od obciążenia przedstawiono na rysunku 3.3. W początkowym okresie obciążania widoczny jest szybki wzrost wielkości pola powierzchni, a następnie ma on charakter w przybliżeniu liniowy. Zależność pola powierzchni styku od przemieszczenia punktu styku ma w całym zakresie obciążenia w przybliżeniu liniowy przebieg (rys. 3.4).



Rys. 3.3. Zależność pola powierzchni styku elementu roboczego głowicy obciążającej z powierzchnią boczną korzenia marchwi od obciążenia
 Fig. 3.3. Correlation of the area of the contact point of the loading head operating element with the surface of carrot root as the function of the load



Rys. 3.4. Zależność pola powierzchni styku elementu roboczego głowicy obciążającej z powierzchnią boczną korzenia marchwi od przemieszczenia punktu styku

Fig. 3.4. Correlation of the area of the contact point of the loading head with the surface of carrot root as the function of the displacement of the contact point

Przyjmując definicję średniego nacisku powierzchniowego jako stosunku obciążenia do pola powierzchni styku:

$$p_{sr} = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

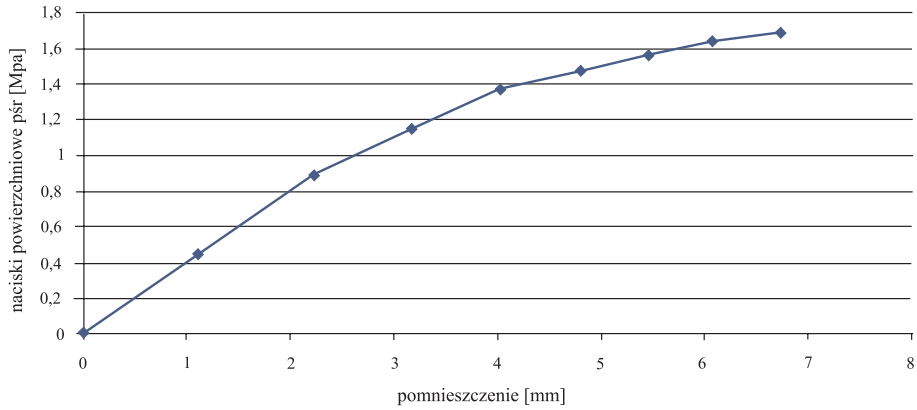
gdzie:

- p_{sr} – średni nacisk powierzchniowy [MPa],
- F – obciążenie [N],
- A – pole powierzchni styku [mm²],

można zbudować wykres przedstawiający zależność średnich nacisków powierzchniowych od odkształcenia przekroju poprzecznego próbki (rys. 3.5). Istnieje wyraźna pośrednia zależność pomiędzy odkształceniem przekroju poprzecznego korzenia marchwi, a naciskami powierzchniowymi. Po początkowo liniowej zależności naciski powierzchniowe asymptotycznie zmierzają do wartości maksymalnych.

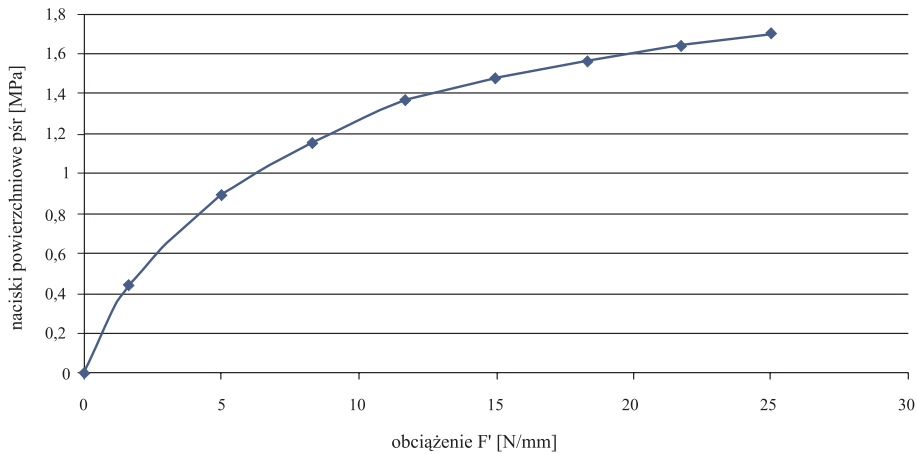
Wygodnie jest analizować naciski powierzchniowe w funkcji siły obciążającej przypadającej na jednostkę długości korzenia marchwi (rys. 3.6).

Brak rozwiązań ścisłych w odniesieniu do zagadnień kontaktowych w materiałach pochodzenia biologicznego uzasadnia sformułowanie problemu badawczego w postaci pytania: w jakim stopniu wyjaśnienie zjawisk zachodzących podczas działania siły skupionej na powierzchnię materiału roślinnego można rozwiązać metodami przybliżonymi, do których należy metoda elementów skończonych?



Rys. 3.5. Zależność nacisków powierzchniowych od odkształcenia przekroju poprzecznego korzenia marchwi

Fig. 3.5. Correlation of surface pressures from the deformation of the transverse cross-section of carrot root



Rys. 3.6. Zależność nacisków powierzchniowych od obciążenia przypadającego na jednostkę długości korzenia marchwi

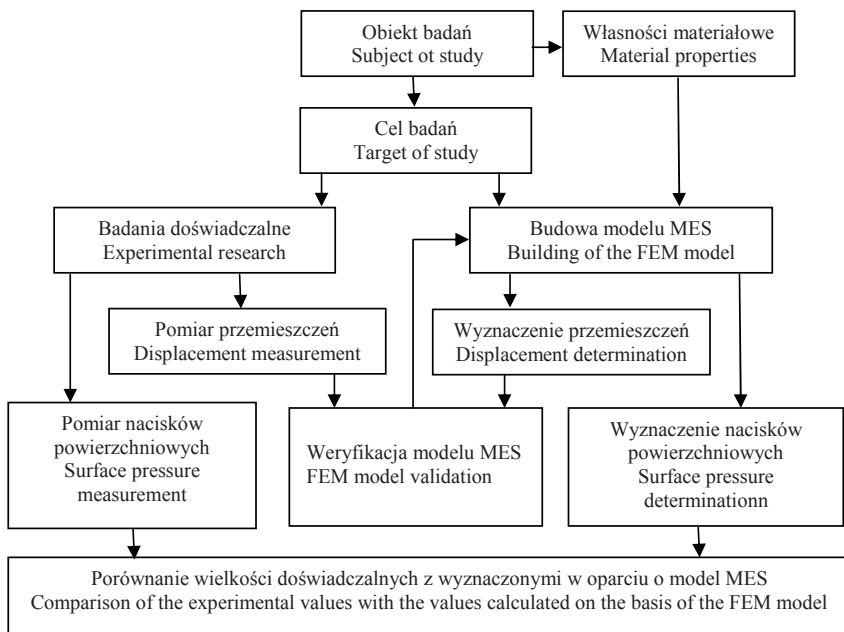
Fig. 3.6. Correlation of surface pressures from the load per a unit of the length of the carrot root

4. CEL PRACY

Celem pracy było rozwiązanie postawionego problemu badawczego poprzez sformułowanie hipotezy wyjaśniającej w postaci modelu dyskretnego MES korzenia marchwi.

Założono konieczność przeprowadzenia walidacji w oparciu o przemieszczenia, wyznaczenia i analizy nacisków powierzchniowych przy quasistatycznym obciążeniu promieniowym, a następnie porównania nacisków powierzchniowych otrzymanych dla modelu z wartościami eksperymentalnymi. Osobnym zagadnieniem było wyznaczenie nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą i zniszczenie doraźne korzenia marchwi.

Poszczególne etapy realizacji pracy przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Schemat blokowy koncepcji realizacji pracy
Fig. 4.1. Block diagram of the conception of realization of the study

Osiągnięcie celu głównego wymagało realizacji celów szczegółowych:

1. Badania eksperymentalne korzenia marchwi:
 - wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych dla poszczególnych warstw korzenia marchwi, kierunków i zakresów obciążania oraz stref pomiarowych;
 - wyznaczenie wartości oraz rozkładu nacisków powierzchniowych w funkcji siły obciążającej oraz wzdłuż styku próbki z elementem obciążającym dla różnych właściwości wytrzymałościowych, średnic i stref pomiarowych korzenia marchwi;
 - wyznaczenie nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechwalniczą i zniszczenie materiału;
 - wyznaczenie map i rozkładów przemieszczeń w przekrojach poprzecznych korzeni marchwi.
2. Modelowanie przy użyciu MES:
 - budowa dyskretnych modeli przekroju korzenia marchwi z uwzględnieniem właściwości tkanki roślinnej oraz złożonej budowy wewnętrznej;
 - wyznaczenie map przemieszczeń i rozkładów przemieszczeń przekroju poprzecznego oraz nacisków powierzchniowych do zbudowanych dyskretnych modeli korzeni marchwi.
3. Przeprowadzenie weryfikacji dyskretnych modeli w oparciu o wyniki o rozkłady przemieszczeń.
4. Porównanie wartości nacisków powierzchniowych wyznaczonych doświadczalnie z danymi otrzymanymi na podstawie badań modelowych.

5. DYSKRETNY MODEL KORZENIA MARCHWI

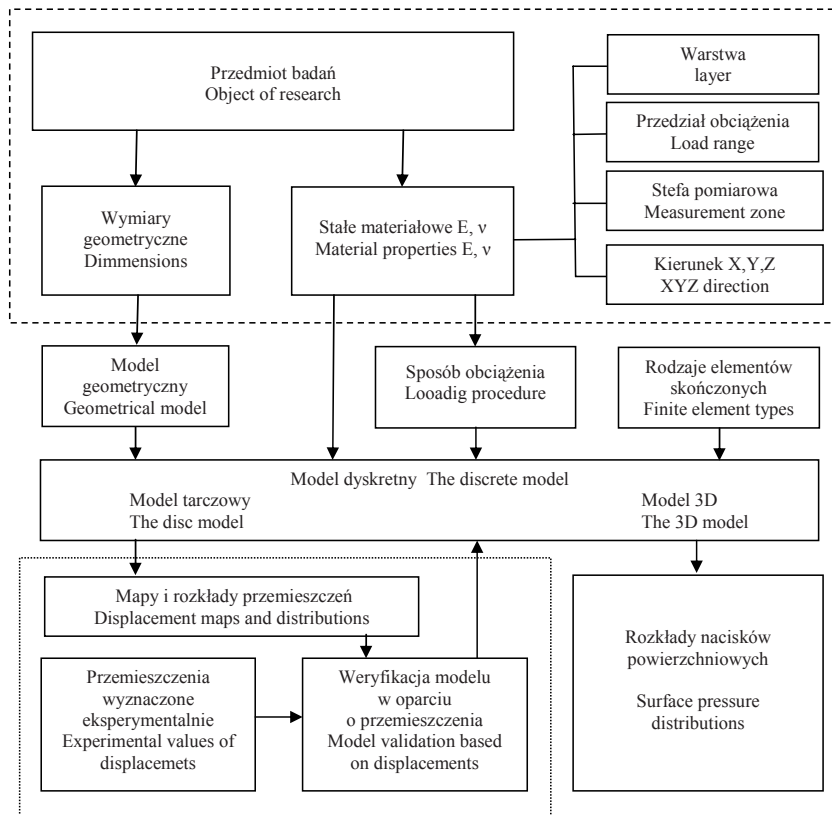
Budowa modelu dyskretnego korzenia marchwi składała się z trzech głównych etapów. W trakcie realizacji pierwszego etapu, na schemacie blokowym (rys. 5.1) – obszar zaznaczony linią przerywaną – przeprowadzono pomiary wymiarów geometrycznych badanych próbek oraz wyznaczono podstawowe właściwości wytrzymałościowe poszczególnych warstw. Drugi etap to budowa modelu dyskretnego z uwzględnieniem sposobu obciążania oraz specyficznych właściwości materiału biologicznego. Końcowym etapem, na schemacie blokowym (rys. 5.1) – obszar zaznaczony linią punktową – była weryfikacja powstałego modelu w oparciu o rozkłady przemieszczeń.

Na podstawie analizy deformacji próbki korzenia marchwi pod wpływem obciążenia (rys. 3.1) zdecydowano się wykonać modele dyskretnie w dwóch przedziałach obciążenia, korzystając z dwóch różnych programów obliczeniowych. Budowa jednego modelu do pełnego zakresu obciążenia była praktycznie niemożliwa ze względu na trudności powstałe przy modelowaniu momentu oddzielenia się warstwy kory od rdzenia. Po wielu próbach udało się zbudować modele, w których nie pojawiał się efekt oddzielania warstwy kory od rdzenia w miarę wzrostu obciążenia oraz modele, w których efekt ten pojawiał się w całym zakresie obciążenia. Zjawisko oddzielania się warstwy kory, jak wynika z wcześniejszych badań autora, w istotny sposób wpływa na wielkość przemieszczenia przekroju poprzecznego [Stopa i in. 2008]. Pominięcie tego zjawiska przy budowie modelu dyskretnego może być przyczyną uzyskania błędnych efektów modelowania.

W rezultacie w zakresie małych odkształceń przekroju poprzecznego korzenia marchwi pojawiających się przy obciążeniu odpowiadającym naciskom powierzchniowym dopuszczalnym ze względu na wytrzymałość biologiczną zbudowano model tarczowy wykonany w oparciu o program COSMOS/M [1993a,b]. W pełnym zakresie obciążenia wykonano model 3D, korzystając z programu obliczeniowego Abaqus [1998], w którym założono możliwość oddzielenia się warstwy kory od rdzenia. Nie bez znaczenia jest fakt, że obliczenia przeprowadzone w oparciu o model tarczowy w programie COSMOS/M w istotny sposób zmniejszają czas niezbędny do przeprowadzenia obliczeń w stosunku do obliczeń wykonanych w programie Abaqus dla modelu 3D.

Na pierwszym etapie budowy modelu dyskretnego (rys. 5.1 – linia przerywana) poza wyznaczeniem właściwości wytrzymałościowych (rozdz. 7.1) dokonano analizy budowy biologicznej korzenia marchwi (rys. 5.2). Celem analizy była identyfikacja charakterystycznych cech korzenia marchwi, niezbędnych do prawidłowej budowy modelu dyskretnego. W pierwszej kolejności utworzono model geometryczny uwzględniający kształt przekroju poprzecznego korzenia. W literaturze [Kołota i in. 1994, Kołota

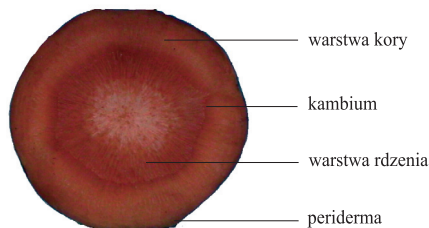
i Orłowski 1999] opisane są trzy podstawowe kształty: okrągły, kwadratowy i gwiaździsty. Zdecydowano się na przyjęcie kształtu okrągłego, ze względu na uproszczenie w procesie budowy modelu geometrycznego oraz z uwagi na konieczność późniejszej weryfikacji w oparciu o wyniki badań obiektów rzeczywistych.



Rys. 5.1. Schemat blokowy budowy modelu MES
 Fig. 5.1. Block diagram of the construction of MES model

Drugą ważną cechą było określenie prawidłowej budowy wewnętrznej przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Pominięto przy tym budowę komórkową, skupiając się na przyjęciu określonej liczby warstw. Po przeprowadzeniu badań wstępnych polegających na budowie modeli o różnej liczbie warstw zdecydowano się na przyjęcie trzech warstw: warstwy kory zbudowanej głównie z miększu łykowego, warstwy rdzenia oraz pierścienia kambium oddzielającej rdzeń od kory [Janiszewska i in. 1986, Jasnowska i in. 1995].

Pominięto warstwę skóry (*peridermum*), głównie ze względu na trudności związane z wyznaczeniem jej własności wytrzymałościowych oraz niewielkie znaczenie w przenoszeniu obciążenia. Przyjęto również założenie, że zarówno kształt, jak i budowa wewnętrzna korzenia marchwi nie ulegają zmianie wzdłuż długości korzenia.



Rys. 5.2. Budowa przekroju poprzecznego korzenia marchwi
Fig. 5.2. Structure of the transverse cross-section of the carrot root

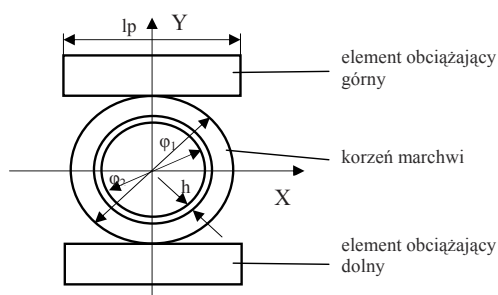
5.1. Założenia tarczowego modelu korzenia marchwi – program Cosmos/M

5.1.1. Model geometryczny

Pierwszym etapem prac związanych z budową modelu dyskretnego korzenia marchwi w oparciu o program COSMOS/M było wykonanie modelu geometrycznego. Zdecydowano się na przyjęcie tarczowego modelu przekroju poprzecznego. Pominięto więc naprężenia działające w kierunku prostopadłym do płaszczyzny przekroju oraz przyjęto założenie, że obciążenie działa w płaszczyźnie przekroju. Na podstawie analizy wymiarów geometrycznych przekrojów poprzecznych korzeni marchwi różnych odmian o kształcie okrągłym przyjęto następujące parametry: średnica rdzenia $\varphi_r = 15$ mm, średnica zewnętrzna korzenia marchwi $\varphi_k = 30$ mm oraz grubość warstwy kambium $h = 1$ mm.

Integralną częścią modelu geometrycznego były modele elementów obciążających, z których element obciążający dolny (podpora) był nieruchomy, a element obciążający górny (stempel) mógł przemieszczać się w kierunku działania siły (rys. 5.3). Elementy te wykonano w postaci prostokątnych tarcz o wymiarach zapewniających z jednej strony odpowiednią sztywność (odkształcenie elementu było pomijalnie małe w porównaniu z odkształceniem korzenia marchwi), a z drugiej strony odpowiednią długość, która była większa od przewidywanej długości styku z korzeniem marchwi (przyjęto $l_p = 30$ mm).

Kolejnym etapem budowy modelu dyskretnego korzenia marchwi było przypisanie poszczególnym fragmentom modelu geometrycznego odpowiednich właściwości wytrzymałościowych. Po analizie wyników badań właściwości wytrzymałościowych korzenia marchwi zdecydowano się na uwzględnienie anizotropii materiału biologicznego oraz przyjęcie bilinearnego modelu właściwości materiału. W związku z tym przy budowie modelu przyjęto parametry przedstawione w tabeli 5.1.



Rys. 5.3. Schemat modelu geometrycznego
 Fig. 5.3. Geometrical disc-type model – the load and the boundary conditions

Tabela 5.1
 Table 5.1

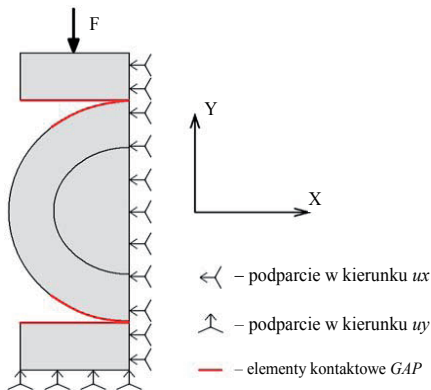
Parametry przyjęte przy budowie modelu MES – Cosmos/M
 Parameters used to the FEM model building – Cosmos/M

Warstwa i kierunek obciążenia Layer and load direction	Przedział obciążenia – Interval of load			
	$\sigma_1 = 0 - 0,8 \text{ MPa}$		$\sigma_2 = 1,0 - 1,9 \text{ MPa}$	
	E [MPa]	ν [-]	E [MPa]	ν [-]
rdzeń * X – core*X	4,76	0,475	10,80	0,473
rdzeń * Y – core *Y	4,62	0,473	10,48	0,482
rdzeń * Z – core*Z	4,88	0,480	12,87	0,468
kora * X – bark*X	4,22	0,474	10,13	0,479
kora * Y – bark *Y	4,04	0,473	9,70	0,474
kora * Z – bark*Z	4,83	0,475	11,94	0,478
kambium * X – kambium*X	4,49	0,475	10,46	0,476
kambium * Y – kambium*Y	4,33	0,475	10,09	0,478
kambium * Z – kambium*Z	4,85	0,477	12,40	0,473

Element obciążający górny i dolny wykonano ze stali o następujących właściwościach: moduł sprężystości $E=2,1E5 \text{ MPa}$ i ułamek Poissona $\nu=0,3$. Model obciążano siłami działającymi na płaszczyźnie modelu w kierunku promieniowym poprzez element obciążający górny. Ze względu na właściwości wytrzymałościowe korzeni marchwi, w budowie modelu należało wziąć pod uwagę występowanie dużych odkształceń, a obliczenia powinny umożliwić przeprowadzenie analizy nieliniowej. Rozwiązanie problemu zagadnienia kontaktowego wymagało uwzględnienia faktu, że w miarę wzrostu obciążenia zwiększa się powierzchnia styku korzenia marchwi z elementem obciążającym.

W rezultacie zbudowano model geometryczny przedstawiony na rysunku 5.4. Z uwagi na symetrię modelu oraz ze względu na skrócenie czasu obliczeń model miał kształt połowy przekroju poprzecznego. Element obciążający dolny został podparty

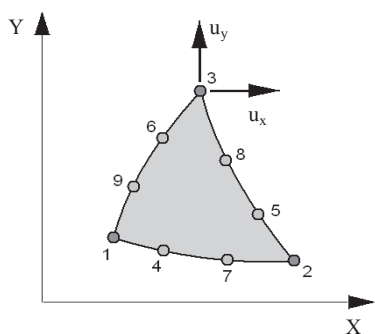
zarówno w kierunku osi X, jak i osi Y. Połowa przekroju poprzecznego oraz element obciążający górny zostały podparte w kierunku osi X, natomiast zostało umożliwione przemieszczanie się tych elementów w kierunku osi Y. Przyjęcie takiego modelu geometrycznego pozwalało na uzyskanie efektu nie oddzielania się warstwy kory od rdzenia.



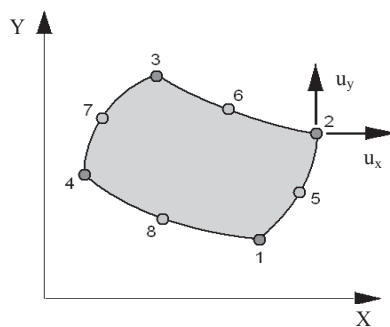
Rys. 5.4. Model geometryczny tarczowy – obciążenie i warunki brzegowe
Fig. 5.4. Geometrical disc-type model – the load and the boundary conditions

5.1.2. Model dyskretny

Do budowy modelu dyskretnego zostały zastosowane płaskie, trójkątne elementy skończone o trzech węzłach o nazwie TRIANG 2D (rys. 5.5a) – warstwa rdzenia oraz płaskie elementy czworokątne o nazwie PLANE 2D (rys. 5.5b) – warstwa kory i kam-bium oraz elementy obciążające. Zagadnienie kontaktowe bez uwzględnienia tarcia pomiędzy stykającymi się elementami zostało rozwiązane poprzez zastosowanie elementów kontaktowych typu GAP [Smolnicki 1999].



a) TRIANG 2D płaski element trójkątny
a) TRIANG 2D Flat triangular element



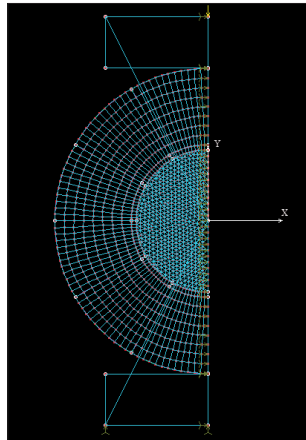
b) PLANE 2D płaski element czworokątny
b) PLANE 2D flat tetragonal element

Rys. 5.5. Zastosowane elementy skończone [Rusiński i in. 2000]

Fig. 5.5. The finite elements applied

W rezultacie zbudowano trójwarstwowy model dyskretny (rys. 5.6) o następujących parametrach: 576 elementów PLANE 2D warstwy kory, 72 elementy PLANE 2D warstwy spajającej, 1098 elementów TRIANG warstwy rdzenia, 1456 węzłów, 2912 stopni swobody.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano trzy grupy wyników: naciski powierzchniowe, przemieszczenie w kierunku osi X i przemieszczenia w kierunku osi Y.

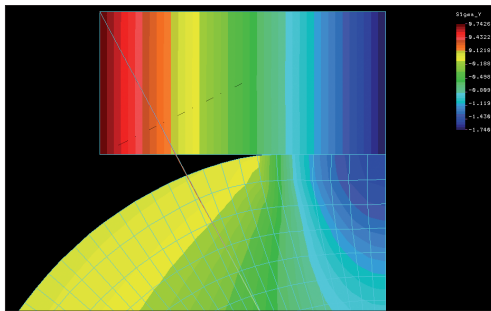


Rys. 5.6. Trójwarstwowy tarczowy model dyskretny korzenia marchwi pod działaniem sił promieniowych

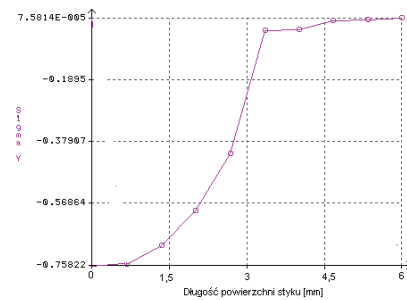
Fig. 5.6. Three-layer discrete disc-type model of the carrot root undergoing the operation of radial forces

5.1.3. Naciski powierzchniowe

Naciski powierzchniowe wyznaczono, korzystając z mapy naprężeń σ_y w kierunku działania siły (rys. 5.7a) otrzymanej po dokonaniu obliczeń przez program COSMOS/M. Rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku (rys. 5.7b) otrzymano, wyznaczając wartości naprężeń σ_y w węzłach położonych wzdłuż linii styku modelu korzenia marchwi z elementem obciążającym górnym przy użyciu funkcji pat-graph. Należy pamiętać, że zarówno wymiary liniowe na osi poziomej wykresu, jak i wartości nacisków na osi pionowej musiały ulec przeskalowaniu ze względu na przyjęcie do obliczeń połowy modelu.



a) mapa naprężeń σ_y
a) map of stresses σ_y

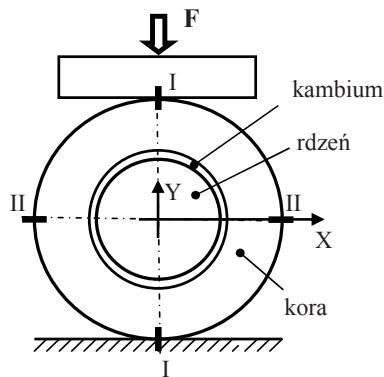


b) rozkład naprężeń σ_y wzdłuż linii styku
b) distribution of σ_y stresses

Rys. 5.7. Wyznaczenie nacisków powierzchniowych za pomocą programu COSMOS/M
Fig. 5.7. Determination of the surface pressures with the help of COSMOS/M software

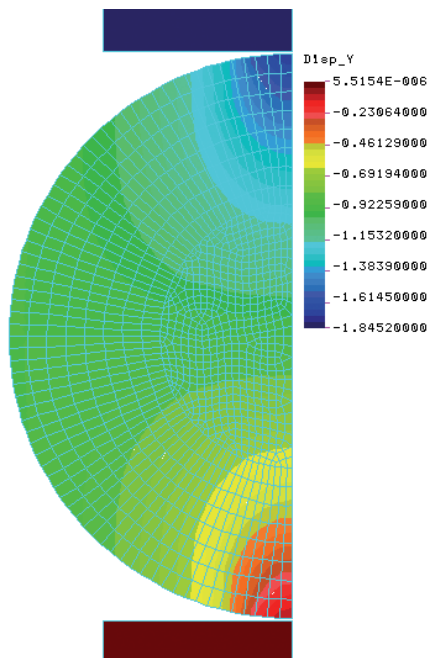
5.1.4. Przemieszczenia

Parametrem, niezbędnym do weryfikacji modelu dyskretnego w oparciu o badania doświadczalne były przemieszczenia przekroju poprzecznego korzenia marchwi. W pierwszej kolejności wyznaczono mapy przemieszczeń u_x i u_y na całej powierzchni modelu przy zadanych warunkach brzegowych. Następnie, korzystając z funkcji pat-graph w programie COSMOS/M, wykonano wykresy przedstawiające rozkłady przemieszczeń w dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojach: I-I oraz II-II (rys. 5.8).

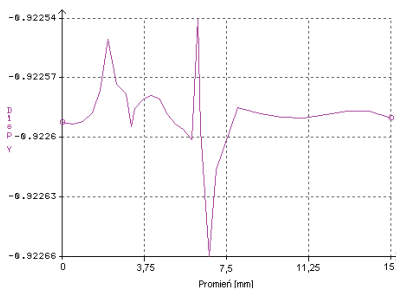


Rys. 5.8. Położenie wybranych przekrojów poprzecznych
Fig. 5.8. Position of the selected cross-sections

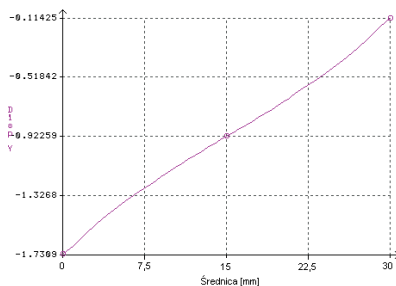
Na rysunku 5.9 przedstawiono przykładową mapę przemieszczeń u_y dla połowy przekroju poprzecznego korzenia marchwi (rys. 5.9a) oraz rozkłady przemieszczeń u_y w przekroju poziomym I-I (rys. 5.9b) oraz przekroju pionowym II-II (rys. 5.9c).



a) mapa przemieszczeń u_y
a) map of displacement u_y



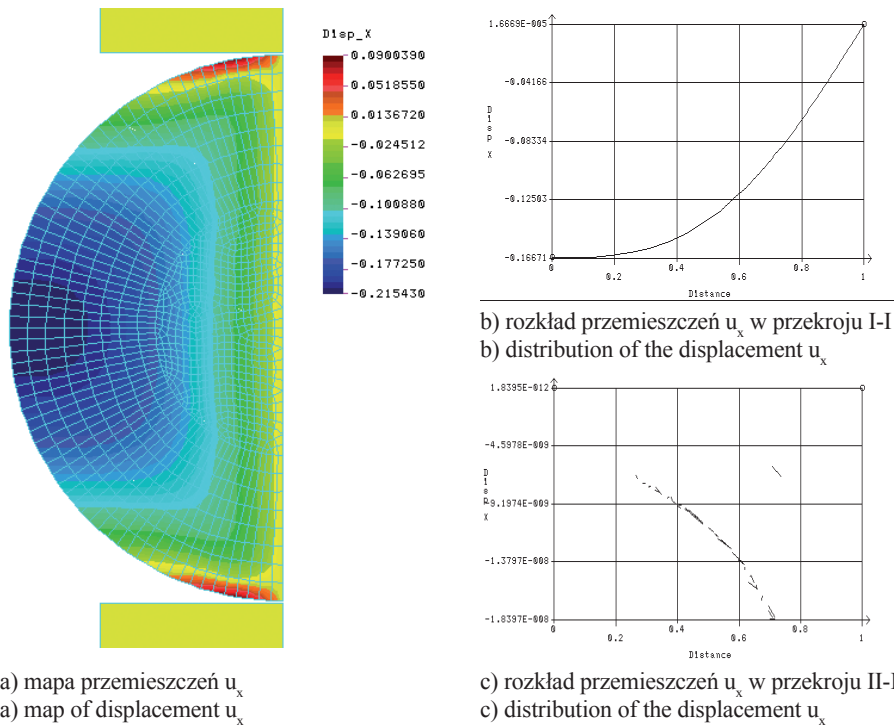
b) rozkład przemieszczeń u_y w przekroju I-I
b) distribution of the displacement u_y



c) rozkład przemieszczeń u_y w przekroju II-II
c) distribution of the displacement u_y

Rys. 5.9. Rozkłady przemieszczeń w kierunku osi pionowej u_y modelu korzenia marchwi
Fig. 5.9. Distribution of displacements in the vertical axis direction u_y for the model of the carrot root

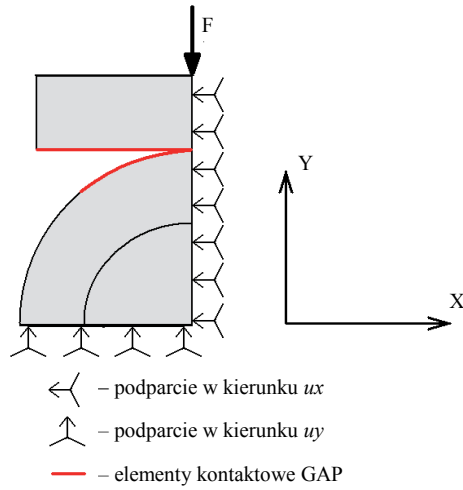
Rysunek 5.10a przedstawia przykładową mapę przemieszczeń u_x uzyskaną dla połowy przekroju poprzecznego korzenia marchwi uzyskaną w programie COSMOS/M, na podstawie której wyznaczono rozkłady w przekroju poziomym I-I (rys 5.10b) oraz w przekroju pionowym II-II (rys. 5.10c).



Rys. 5.10. Rozkłady przemieszczeń u_x w kierunku osi pionowej dla modelu
Fig. 5.10. Distribution of displacements in the vertical axis direction u_x for the model

5.2. Założenia przy budowie modelu 3D korzenia marchwi – program Abaqus

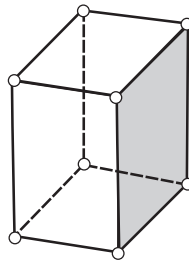
Zastosowanie programu Abaqus [1998] miało na celu wykonanie obliczeń trójwymiarowego modelu dyskretnego korzenia marchwi poddanego ścisnaniu promieniowemu. Odrzucono założenie upraszczające, polegające na przyjęciu naprężenia σ_z w kierunku osi korzenia równego zero. Przyjęto wymiary przekroju poprzecznego takie same jak w przypadku modelu tarczowego: promień przekroju poprzecznego korzenia marchwi $\varphi_r=30$ mm, promień rdzenia $\varphi_k=15$ mm oraz grubość warstwy kambium $h=1$ mm. Długość badanego elementu (wymiar w kierunku osi Z) przyjęto równą $l=7$ mm. Efekt oddzielenia warstwy kory od rdzenia uzyskano poprzez przyjęcie modelu geometrycznego w postaci jednej czwartej przekroju poprzecznego korzenia marchwi podpartego wzdłuż osi poziomej w sposób uniemożliwiający przemieszczenie w kierunku osi Y, a wzdłuż osi pionowej – w kierunku osi X (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Model geometryczny 3D – obciążenie i warunki brzegowe
 Fig. 5.11. 3D-Geometrical model the load and the boundary conditions

Dodatkową korzyścią tak zbudowanego modelu było ograniczenie czasu obliczeń, przy zachowaniu wystarczająco gęstej siatki elementów skończonych.

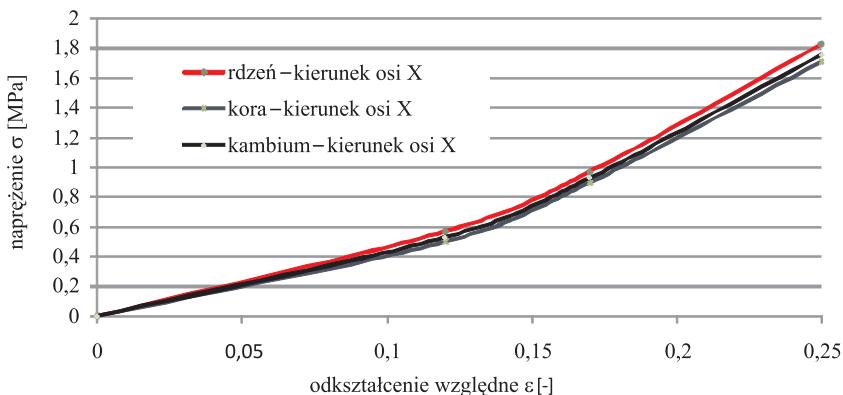
Do budowy modelu dyskretnego zastosowano elementy skończone sześciennie o ośmiu węzłach 3D typu SOLID (rys. 5.12). Użyto ich do modelowania wszystkich trzech warstw, tzn. warstwy kory, rdzenia i kambium. Podobnie element obciążający został zamodelowany przy użyciu elementów skończonych tego typu.



Rys. 5.12. Zastosowane elementy skończone typu SOLID [Rusiński i in. 2000]
 Fig. 5.12. The finite elements of SOLID type applied in the study

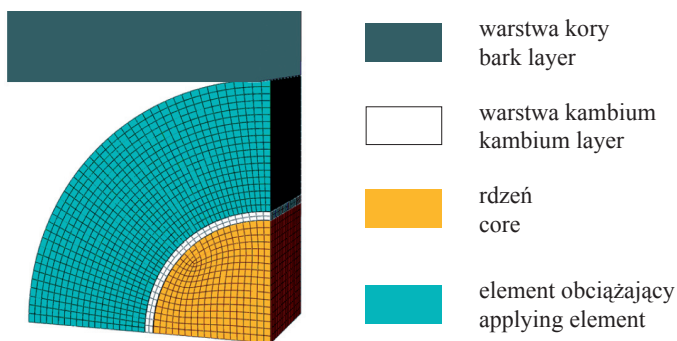
Przy modelowaniu właściwości wytrzymałościowych poszczególnych warstw wykorzystano wyniki badań przedstawione w rozdziale 7.1. Właściwości wytrzymałościowe wprowadzono do programu w postaci wykresu naprężenia jako funkcji odkształcenia (rys. 5.13). Wzięto pod uwagę anizotropię własności materiału korzenia marchwi w trzech kierunkach. Przy określaniu danych dotyczących właściwości wytrzymałości-

wych warstwy kambium posłużono się wielkościami przybliżonymi wyznaczonymi na podstawie własności warstwy kory i rdzenia. Zagadnienie kontaktowe rozwiązano z uwzględnieniem tarcia pomiędzy korzeniem marchwi i elementem obciążającym.



Rys. 5.13. Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla materiału kory
Fig. 5.13. The graph of the dependency stress – strain for material of the bark

W wyniku modelowania przy użyciu programu Abaqus powstał trójwymiarowy dyskretny model korzenia marchwi o następujących parametrach: średnica rdzenia $\phi_r=15$ mm, średnica zewnętrzna korzenia marchwi $\phi_k=30$ mm oraz grubość warstwy kambium $h=0,8$ mm (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Dyskretny, trójwymiarowy model korzenia marchwi oraz elementu obciążającego
Fig. 5.14. The discrete, three-dimensional model of the carrot root and the load applying element

Analizę przeprowadzono w oparciu o model Arrudy-Boyce'a [Boyce i Boyce 2000, Arruda i Arruda 1993] w formie ośmiołańcuchowego modelu polimerowego. Funkcja energii odkształcenia U jest przedstawiona jako rozwinięta w szereg do piątego rzędu funkcja Langevina:

$$U = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \left\{ \frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right\}$$

gdzie:

$$C_1 = \frac{1}{2}, \quad C_2 = \frac{1}{20}, \quad C_3 = \frac{11}{1050}, \quad C_4 = \frac{19}{7000}, \quad C_5 = \frac{519}{673750},$$

μ – moduł ścinania,

D – parametr materiału zależny od temperatury,

I_1 – pierwszy niezmiennik odkształcenia,

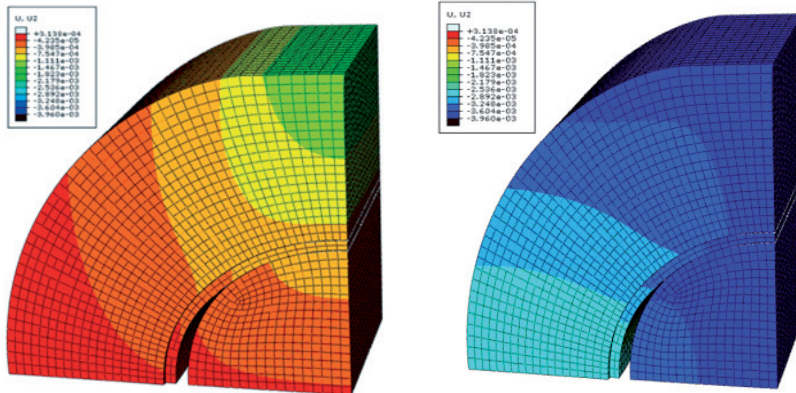
J_{el} – współczynnik elastyczności (dla materiału nieściśliwego $J_{el}=1$),

$\lambda_m = \sqrt{N}$ – ograniczenie odkształcalności łańcucha polimerowego,

N – liczba statystycznych segmentów (każdy o tej samej długości) w łańcuchu, polimerowym pomiędzy trwałymi wiązaniami.

Analiza naprężenia jako funkcji odkształcenia przy zastosowaniu modelu Arrudy-Boyce'a pozwala na uzależnienie makroskopowych odkształceń od mikrostruktury wewnętrznej materiału. Model ten umożliwia za pomocą dwóch parametrów materiałowych (modułu ścinania i ograniczenia odkształcalności łańcucha polimerowego) opis zachowania się materiału w dużym zakresie odkształcenia. Model Arrudy-Boyce'a wykorzystuje logarymiczną miarę deformacji Hencky'ego i ma zastosowanie do odkształceń sięgających 300%.

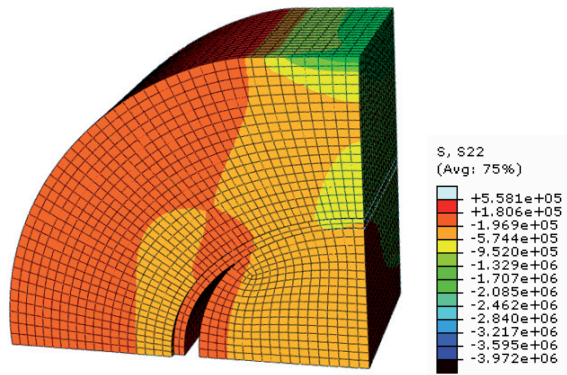
Przeprowadzono analizę dynamiczną, w wyniku której otrzymano trójwymiarowe obrazy naprężeń, odkształceń i przemieszczeń analizowanego modelu korzenia marchwi. Z punktu widzenia weryfikacji modelu najbardziej interesujące okazały się wyniki obejmujące, podobnie jak w przypadku modelu tarczowego, przemieszczenia u_y i u_x (rys. 5.15) oraz naciski powierzchniowe pomiędzy modelem korzenia marchwi i elementem obciążającym (rys. 5.16). Na podstawie otrzymanych obrazów naprężeń i przemieszczeń wyznaczono rozkłady tych wielkości wzdłuż wybranych przekrojów, korzystając z programu EXCEL.



a) przemieszczenia u_y
 a) displacements u_y

b) przemieszczenia u_x
 b) displacements u_x

Rys. 5.15. Mapy przemieszczeń u_x i u_y
 Fig. 5.15. The map of displacement u_x and u_y

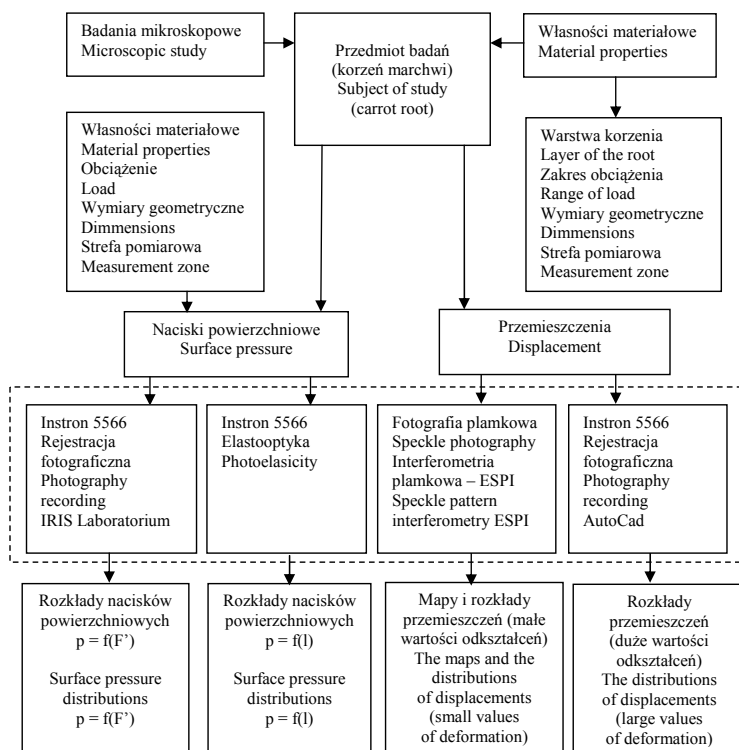


Rys. 5.16. Mapy naprężeń σ_y w kierunku działania obciążenia pozwalające na wyznaczenie nacisków powierzchniowych

Fig. 5.16. Maps of σ_y stresses in the direction of the working load to enable determining of the surface pressures

6. METODYKA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania doświadczalne objęły trzy zasadnicze etapy. Pierwszy z nich to pomiary mające na celu wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych badanych korzeni marchwi oraz ustalenie czynników w istotny sposób wpływających na ich wartość. Drugi etap to główne badania zmierzające do wyznaczenia wartości nacisków powierzchniowych w funkcji parametrów mających istotny statystycznie wpływ na ich wartość. Trzeci etap to pomiary przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi, których celem było dostarczenie danych do wstępnej weryfikacji modelu dyskretnego korzenia marchwi. Schemat blokowy badań doświadczalnych przedstawiony jest na rysunku 6.1. Linia przerywaną zaznaczony jest fragment schematu dotyczący metodyki badań.



Rys. 6.1. Schemat blokowy badań doświadczalnych
Fig. 6.1. Block diagram of the experimental investigation

6.1. Przedmiot badań eksperymentalnych

Podstawowym przedmiotem badań była marchew odmiany Karotan. Materiał do badań został zakupiony od hodowcy z okolic Strzelina w województwie dolnośląskim. Karotan jest odmianą marchwi późnej, zbieranej pod koniec października, nadającej się do przechowywania i przetwórstwa. Długość korzenia mieściła się w granicach od 137 do 156 mm, a średnia wartość średnicy wahała się w przedziale od 20 do 40 mm. Zgodnie ze standardami unijnymi dotyczącymi marchwi, wprowadzonymi rozporządzeniem Komisji Europejskiej (WE) Nr 730/1999 z dnia 7 kwietnia 1999 r. wraz ze zmianami w rozporządzeniu (WE) Nr 46/2003 średnice korzeni ze zbioru głównego powinny się mieścić w przedziale od 20 do 45 mm.

Podstawowym celem badań było wyznaczenie nacisków powierzchniowych w zależności od wymiarów geometrycznych i właściwości wytrzymałościowych korzeni marchwi. Biorąc to pod uwagę, za uzupełniający przedmiot badań przyjęto korzenie marchwi odmiany Major i Merida różniące się w istotny sposób od odmiany Karotan zarówno wymiarami, jak i właściwościami wytrzymałościowymi. Korzenie odmiany Major są odmianą w typie nantejskim, średnio późną, o dużym wigorze o długości od 160 do 180 mm i średnicy dochodzącej do 50 mm. Korzenie o mocnej budowie, dobrze wybarwione wewnątrz i zewnątrz, bardzo dobre do przetwórstwa i przechowywania. Korzenie odmiany Merida to średnio wczesna, plenna odmiana w typie nantejskim. Korzenie długie, cylindryczne, wyrównane, o gładkiej skórce, o długości w granicach 124 do 144 mm i średnicy nieprzekraczającej 40 mm. Mogą być przeznaczone do bezpośredniego spożycia, jak i do przetwórstwa i przechowywania.

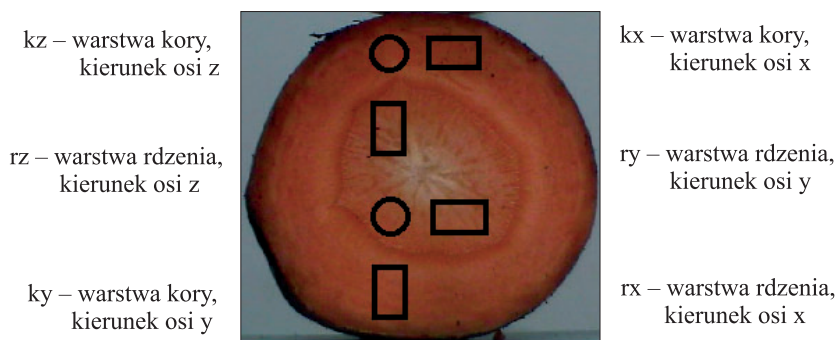
Korzenie badanej odmiany każdorazowo starannie selekcionowano i wybierano egzemplarze zdrowe, nierozwidłone, o regularnych kształtach oraz o podobnym przekroju i wielkości dla każdej z odmian. Do badań nacisków powierzchniowych wybrano korzenie marchwi pochodzące z każdej z odmian różniące się średnicą. Po analizie materiału przeznaczonego do badań zdecydowano się na wybór trzech średnic: $\varphi_1=23$ mm, $\varphi_2=30$ mm oraz $\varphi_3=40$ mm. Do momentu rozpoczęcia badań i w czasie ich trwania korzenie marchwi przechowywano w warunkach zapewniających małe obniżenie wilgotności w stałej temperaturze wynoszącej około 3°C. Do badań zakupiono 50 kg marchwi każdej z odmian. Zaraz po zakupie została wyznaczona jej wilgotność początkowa metodą suszarkową z uwzględnieniem dwóch faz suszenia: początkowej, polegającej na podsuszeniu w temperaturze 35°C przez jedną dobę i drugiej, polegającej na suszeniu w temperaturze 105°C przez trzy doby. Początkowa wilgotność marchwi wynosiła 92,8%, a podczas badań 89,5%.

Testy wytrzymałościowe wykonywano w Laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu od września 2006 do marca 2007 r. Testy wytrzymałościowe zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566, wyposażonej w głowicę tensometryczną 2522 – 806 o zakresie pomiarowym 1 kN, pozwalającą mierzyć siłę z dokładnością do 1 N, a przesunięcie z dokładnością do 0,05 mm. Urządzenie współpracowało z komputerem IBM PC, którego zadaniem było sterowanie przebiegiem pomiarów oraz rejestracja wyników. Urządzeniem sterował program Merlin, pozwalający na wybranie rodzaju testu oraz zadawanie podstawowych jego parametrów.

6.2. Pomiary podstawowych właściwości wytrzymałościowych

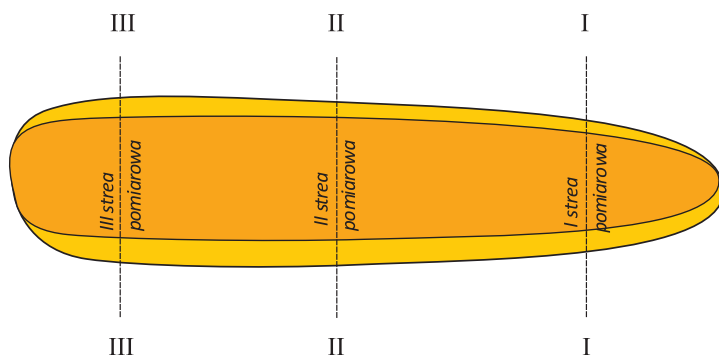
Pomiary podstawowych właściwości wytrzymałościowych badanych korzeni marchwi zostały potraktowane jako badania wstępne, mające na celu dostarczenie wiarygodnych danych niezbędnych do budowy modelu dyskretnego korzenia marchwi oraz identyfikację odmian korzenia marchwi przy wyznaczeniu nacisków powierzchniowych. Ważnym celem badań wstępnych było również zdefiniowanie metodami statystycznymi czynników wpływających w istotny sposób na wielkość właściwości wytrzymałościowych.

Umowny moduł sprężystości wyznaczono w próbie jednoosiowego ściskania swobodnego metodą stycznych [Sitkey 1986], natomiast ułamek Poissona w próbie jednoosiowego ściskania swobodnego i nieswobodnego metodą Hugesa i Segerlinda [1972]. Próbkę do badań stałych materiałowych przygotowano w taki sposób, aby uwzględnić anizotropię materiału i uniknąć zniszczenia jego struktury. Badania przeprowadzono na walcowych próbkach o wymiarach $\phi_d=8$ mm i długości $l_0=7$ mm, a więc przy zachowaniu wskaźnika smukłości $\xi=0,875$ [Abbott i in. 1982, Nowicki i in. 1976, 1978]. Przyjęta długość próbki wynikała bezpośrednio z wymiarów całego korzenia marchwi i ograniczała możliwość zmiany wskaźnika smukłości. Próbkę wycinano bardzo starannie w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (rys. 6.2), w trzech strefach pomiarowych (rys. 6.3).



Rys. 6.2. Miejsca i kierunki pobierania próbek oraz ich oznaczenia
Fig. 6.2. Points and directions of taking samples and their designation

Tak przygotowane próbki umieszczono w przestrzeni pomiarowej maszyny wytrzymałościowej i poddawano ściskaniu. Prędkość deformacji w testach wynosiła $1,67 \times 10^{-5}$ m/s. Badania prowadzono do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości danej materii, po czym badania przerywano i zapisywano wyniki.



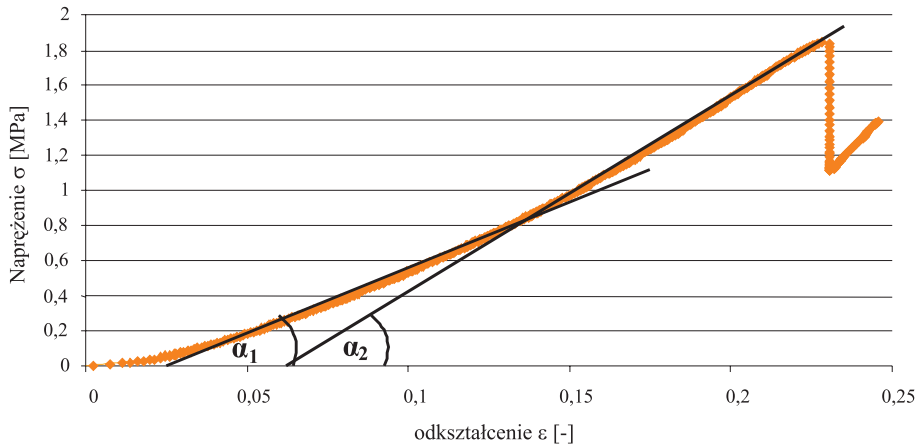
Rys. 6.3. Podział korzenia marchwi na strefy pomiarowe. Strefa I – najbliższej ogonka, strefa II – w połowie korzenia, strefa III – najbliższej naci

Fig. 6.3. The division of the carrot root onto measurement zones. Zone I – the closest to the tip, zone II – half way of the root length, zone III – the nearest to the top leaf

Całkowity błąd wyznaczenia doświadczalnych wartości modułu sprężystości E i stałej Poissona ν zawierał błędy związane z geometrią próbek, z pomiarem siły oraz pomiarem skrócenia badanej próbki. Ze względu na staranne przygotowanie próbek do badań pominięto błąd związany z geometrią próbek, traktując go jako błąd systematyczny. Pomiaru siły dokonano za pomocą głowicy pomiarowej o zakresie 1 kN i błędzie $\Delta F=1$ N, natomiast wyniki pomiaru skrócenia próbki uzyskano, korzystając ze wskazań maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 z błędem $\Delta h=0,05$ mm. Maksymalna wartość całkowitego błędu wyznaczonego metodą różniczki zupełnej wynosiła $\Delta E=0,015$ oraz $\Delta \nu=0,011$.

6.2.1. Wyznaczenie umownego modułu sprężystości

Wartość umownego modułu sprężystości wyznaczono na podstawie wykresu naprężenia jako funkcji odkształcenia otrzymanego na podstawie testu ściskania próbek pobranych z korzenia marchwi. Ze względu na nieliniowy przebieg krzywej na wykresie naprężenie – odkształcenie (rys. 6.4) zdecydowano się obliczyć umowny moduł sprężystości metodą stycznych w dwóch przedziałach naprężeń: w przedziale naprężeń $\sigma_{y1}=0 \div 0,8$ MPa oraz $\sigma_{y2}=1,0 \div 1,8$ MPa. Podział na przedziały naprężeń uzasadniony był późniejszym wykorzystaniem wyników pomiarów jako danych wejściowych do obliczeń metodą elementów skończonych.



Rys. 6.4. Napężenie σ_y w funkcji odkształcenia materiału kory
 Fig. 6.4. The stress σ_y as the function of deformation for the material of the bark

6.2.2. Wyznaczenie stałej Poissona

Współczynnik Poissona wyznaczono metodą opisaną przez Hugesa i Segerlinda [1972], wykorzystaną również między innymi przez Gołackiego i Obroślaka [1977]. Polega ona na określeniu modułów sprężystości próbek ściskanych swobodnie pomiędzy dwiema równoległymi płytami E i próbek ściskanych nieswobodnie E_c , przy założeniu, że odkształcenie próbki w kierunku prostopadłym do kierunku działania siły jest równe zero. Parametry badań oraz miejsce i kierunki pobrania próbek były takie same jak podczas wyznaczania modułu sprężystości. Po wykonaniu badań związanych z próbą ściskania nieswobodnego, wykorzystując wyniki pomiarów ściskania swobodnego uzyskane przy wyznaczaniu umownego modułu sprężystości, obliczono wartości stałej Poissona w oparciu o wzór 2.5.

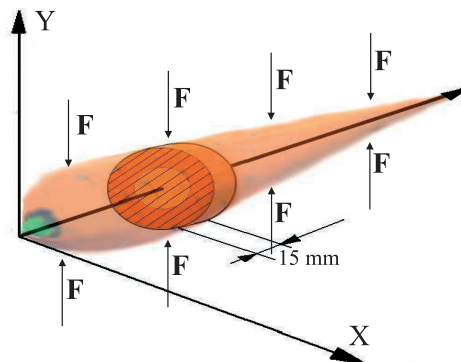
Podobnie jak to miało miejsce przy wyznaczaniu umownego modułu sprężystości pomiary wykonano w sześciu powtórzeniach dla każdej warstwy, każdego kierunku i każdej strefy. Moduły E i E_c określono na podstawie nachylenia prostych przechodzących przez sąsiadujące ze sobą punkty stałe, leżące na krzywych wykresu siła – odkształcenie. Parametry punktów stałych odczytano przy maksymalnej sile niszczącej próbkę.

Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej mającej na celu wyznaczenie wartości średniej, odchylenia standardowego, błędu standardowego oraz 95% przedziału ufności do wartości średniej umownego modułu sprężystości i stałej Poissona w badanych odmianach korzenia marchwi. W odniesieniu do odmiany Karotan przeprowadzono również wieloczynnikową analizę wariancji mającą na celu sprawdzenie wpływu zakresu obciążenia, warstwy korzenia marchwi (rdzeń, kora), strefy pomiarowej (I, II, III) oraz kierunku obciążenia (x, y, z) na wielkość umownego modułu sprężystości oraz stałej

Poissona. Ze względu na dużą pracochłonność badań analizę wariancji ograniczono tylko odmiany Karotan, natomiast do pozostałych odmian wyznaczono wartości średnie mierzonych parametrów.

6.3. Pomiary nacisków powierzchniowych

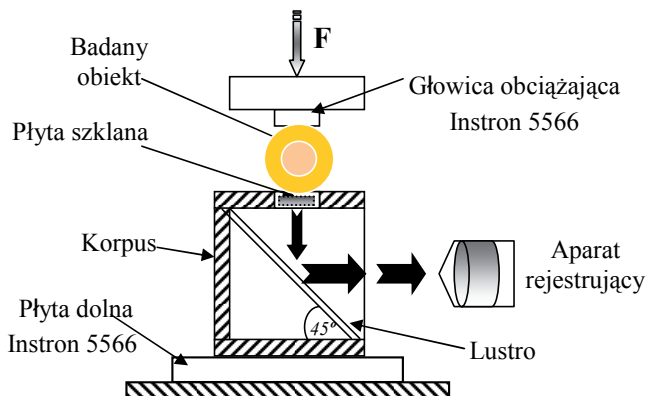
Próbki służące do wyznaczania rozkładów nacisków powierzchniowych miały kształt krążka wyciętego dwiema płaszczyznami prostopadłymi do osi podłużnej korzenia marchwi, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6.5. Odległość między płaszczyznami ustalono na 15 mm, co stanowiło ok. 5% długości całego korzenia marchwi. Przyjęcie takiego wymiaru próbki umożliwiało pominięcie naprężeń działających wzdłuż osi korzenia. Jednocześnie pozwoliło to na spełnienie założeń dotyczących walcowego kształtu próbek oraz braku deplanacji przekroju poprzecznego w trakcie obciążania.



Rys. 6.5. Sposób pobrania próbki do badań
Fig. 6.5. Method of taking a sample for the study

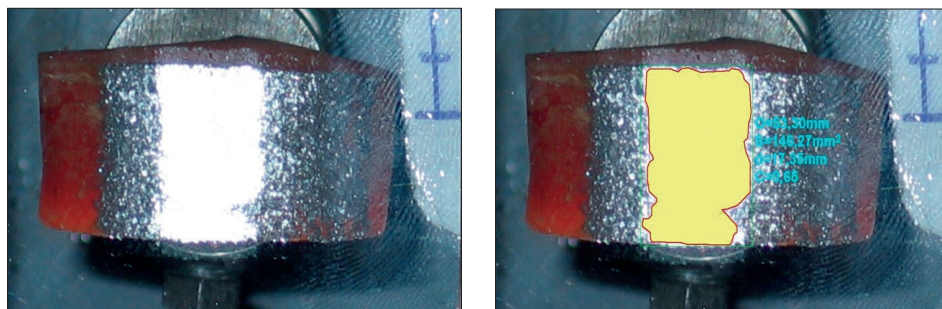
6.3.1. Rozkłady nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia

Pomiary wartości nacisków powierzchniowych na korzeń marchwi w próbie promieniowego ściskania pomiędzy płaskimi płytami jako funkcji siły obciążającej wykonano według metodyki przedstawionej w publikacji autora [Stopa i Romański 2006]. Wszystkie testy zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Instron 5566 wyposażonej w głowicę o zakresie pomiarowym 1 kN, pozwalającą mierzyć siłę z dokładnością do 1 N, a przesunięcie z dokładnością do 0,05 mm. W trakcie pomiarów prędkość przesuwu głowicy wynosiła $1,67 \times 10^{-5}$ m/s. Naciski powierzchniowe na próbki w postaci krążków wyznaczono przy użyciu przyrządu umożliwiającego ciągłą obserwację powierzchni styku (rys. 6.6).



Rys. 6.6. Schemat stanowiska do pomiaru nacisków
 Fig. 6.6. Diagram of the experimental station for the measurement of surface pressures

Wielkość pola powierzchni styku korzenia marchwi z przyrządem pomiarowym, będącą podstawowym parametrem niezbędnym przy obliczaniu nacisków powierzchniowych, obliczono przy zastosowaniu programu IRIS Laboratorium (rys. 6.7).



a) widok powierzchni styku
 a) the view of the surface of contact point
 b) pomiar powierzchni styku
 b) the measurement of area of the contact point

Rys. 6.7. Sposób pomiaru pola powierzchni styku korzenia marchwi za pomocą programu IRIS Laboratorium

Fig. 6.7. Diagram of the method of measurement of the area of contact point on the carrot root using the software IRIS- Laboratory

Wyniki rejestrowano w sposób ciągły przy stałych przyrostach obciążenia. Test przerywano w momencie, gdy na wykresie obciążenie–odkształcenie pojawiał się gwałtowny spadek obciążenia.

Doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych wyznaczono, obliczając w pierwszej kolejności wartości średnie ze wzoru definiującego naciski powierzchniowe (6.1):

$$p_{sr} = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

gdzie:

- p_{sr} – średnie naciski powierzchniowe [MPa],
- F – siła obciążająca [N],
- A – pole powierzchni styku [mm²].

Następnie, przyjmując eliptyczny rozkład nacisków wzdłuż powierzchni styku, wyznaczono wartości nacisków maksymalnych ze wzoru [Dyląg i in. 2003]:

$$p_{max} = \frac{4}{\pi} p_{sr} \quad (6.2)$$

gdzie:

- p_{max} – maksymalne naciski powierzchniowe obliczone w oparciu o rozkład eliptyczny [MPa].

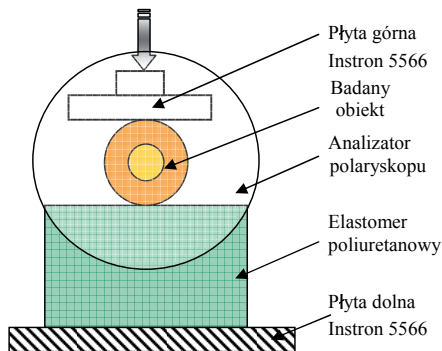
Badania przeprowadzono w pięciu powtórzeniach dla różnych odmian (różnych wielkości umownych modułów sprężystości i stałych Poissona), różnych średnic oraz stref pomiarowych oraz przy różnych wielkościach sił obciążających. Wyniki poddano analizie statystycznej mającej celu wyznaczenie wartości średnich, odchylenia standardowego, błędu standardowego oraz przedziałów ufności dla wartości średniej nacisków powierzchniowych. Oprócz tego analiza statystyczna miała na celu sprawdzenie, czy i w jaki sposób naciski powierzchniowe zależą od odmiany (poziomu modułu sprężystości i stałej Poissona), siły obciążającej, strefy pomiarowej, średnicy próbki.

Na całkowity błąd wyznaczenia doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych składały się błędy związane z geometrią próbek, z pomiarem siły oraz pomiarem pola powierzchni styku próbki z płytą dociskową. Ze względu na staranne przygotowanie próbek do badań przy wykorzystaniu przyrządów pozwalających na wykonanie wszystkich próbek o jednakowych kształtach błąd ten jako systematyczny można pominąć. Pomiar siły dokonano za pomocą głowicy pomiarowej o zakresie 1 kN i błędzie $\Delta F = 1$ N, natomiast pomiar pola powierzchni styku próbki z płytą dociskową przeprowadzono za pomocą programu IRIS Laboratorium z dokładnością $\Delta A = 1$ mm². Graniczna wartość całkowitego błędu wyznaczonego metodą różniczki zupełnej (6.3) wynosiła $\Delta p_{max} = 0,017$.

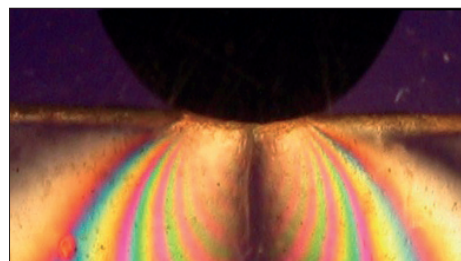
$$\Delta p_{max}(F, A) = \left| \frac{\partial p_{max}}{\partial A} \right| \times |\Delta A| + \left| \frac{\partial p_{max}}{\partial F} \right| \times |\Delta F| \quad (6.3)$$

6.3.2. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku

Rzeczywisty kształt rozkładu nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym wyznaczono za pomocą przyrządu pomiarowego opartego na wykorzystaniu metody elastoptycznej w świetle przechodzącym. Zastosowano metodykę opracowaną przez autora do pomiarów rozkładów nacisków powierzchniowych podczas zgniotu ziarna w modelu gniotownika walcowego [Romański i in. 2003, Stopa i in. 2005]. W tym celu zbudowano stanowisko, którego podstawowymi elementami była maszyna wytrzymałościowa Instron 5566, polaryskop elastoptyczny z polowym źródłem światła oraz płytka pomiarowa wykonana z materiału optycznie czułego wykazującego dwójłomność wymuszoną (rys. 6.8a). W przestrzeni pomiarowej polaryskopu umieszczono płytkę pomiarową wraz z próbką korzenia marchwi w taki sposób, aby ich powierzchnie środkowe leżały w jednej płaszczyźnie. Wymiary płytki spełniały dwa podstawowe warunki: grubość płytki pomiarowej była równa grubości badanej próbki, a pozostałe dwa wymiary były na tyle duże, aby oddziaływanie krawędzi zewnętrznych nie zaburzało obrazu izochrom. Właściwości płytki pomiarowej zostały tak dobrane, aby z jednej strony jej czułość optyczna była wystarczająco duża, aby precyzyjnie wyznaczyć rzędy izochrom, a z drugiej strony właściwości wytrzymałościowe powinny być zbliżone do właściwości korzenia marchwi. Spełnienie tego warunku pozwalało na uniknięcie pojawienia się sił tarcia w strefie styku. Płytkę pomiarową wykonano z elastomeru poliuretanowego, dla którego moduł sprężystości $E_u = 8,7$ MPa, a liczba Poissona $\nu_u = 0,48$. W celu zwiększenia dokładności pomiarów zastosowano metodę kompensacji punktowej [Pindera 1953]. Na podstawie obrazów izochrom wyznaczono rozkłady rzędów izochrom wzdłuż linii styku płytki pomiarowej z badaną próbką.



a) stanowisko pomiarowe
a) the measuring position



b) obraz izochrom w płycie pomiarowej
b) isochroma pattern distribution

Rys. 6.8. Schemat pomiaru rozkładu nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku
Fig. 6.8. Diagram of the way of measurement of the area of actual distribution of surface pressures with the use of the elastoptycal method

Wyniki rejestrowano w sposób ciągły przy stałych przyrostach obciążenia do momentu gwałtownego spadku obciążenia bez wyraźnego wzrostu odkształcenia próbki. Po każdym przyroście obciążenia dokonanywano pomiarów geometrii styku odkształconego korzenia marchwi z płytą pomiarową i obliczono średnią wartość nacisków powierzchniowych przypadającą na jednostkę długości w płaszczyźnie styku, korzystając ze wzoru 6.1. Następnie, zakładając proporcjonalną zależność pomiędzy wartością nacisków powierzchniowych a rzędem izochromy w strefie styku badanej próbki z płytą pomiarową [Pindera 1953], wyznaczono rzeczywisty rozkład nacisków wzdłuż linii styku próbki korzenia marchwi z powierzchnią tarczy [Stopa i in. 2005].

Wzory Hertza

Porównanie wartości doświadczalnych z teoretycznymi przeprowadzono w oparciu o teorię Hertza oraz o wartości średnie (6.1). Maksymalne naprężenia stykowe p_{\max} dla przypadku styku liniowego próbki walcowej o promieniu R z półprzestrzenią o promieniu $R_1 = \infty$ obliczono, korzystając ze wzorów Hertza (6.4) [Dyląg i in. 2003].

$$p_{H\max} = \sqrt{\frac{F'}{R \times k \times \pi}} \quad (6.4)$$

gdzie:

- $p_{H\max}$ – maksymalne naciski teoretyczne [MPa],
- F' – siła docisku przypadająca na jednostkę długości obszaru styku [N/mm],
- R – promień próbki [mm],
- k – współczynnik [-].

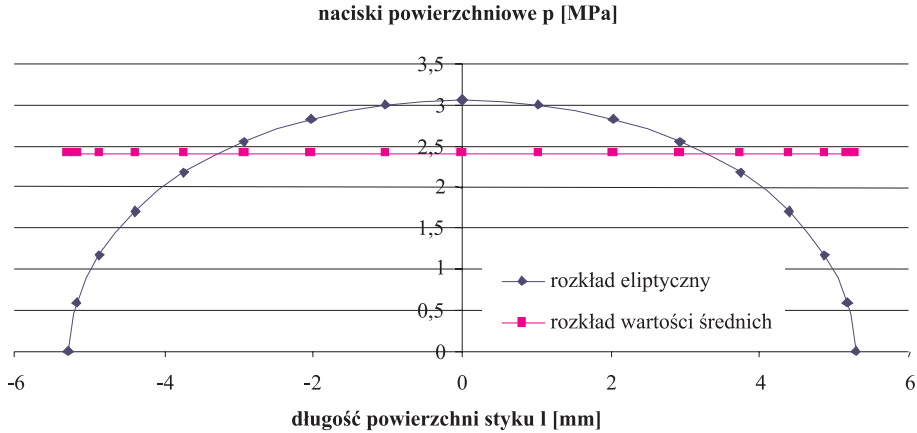
Do każdej z próbek obliczano wartość współczynnika k (6.5) w oparciu o stałe materiałowe stali oraz eksperymentalnie wyznaczone wartości stałej Poissona i umownego modułu sprężystości warstwy kory w kierunku promieniowym:

$$k = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6.5)$$

gdzie:

- ν_1 – współczynnik Poissona dla stali [-],
- ν_2 – współczynnik Poissona warstwy kory [-],
- E_1 – moduł Younga dla stali [MPa],
- E_2 – umowny moduł sprężystości warstwy kory [MPa].

Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku według wzorów Hertza wyznaczono w oparciu o eliptyczny rozkład naprężeń. Wartości nacisków maksymalnych $p_{H\max}$ obliczonych według wzoru 6.4 stanowiły jedną z osi elipsy, natomiast drugą osią była długość powierzchni styku l . Wyznaczono ją, korzystając ze wzoru 6.6 i wychodząc z założenia, że suma nacisków działających w strefie styku, niezależnie od rozkładu, jest stała, a więc pola powierzchni pod wykresami nacisków w rozkładzie eliptycznym i średnim są takie same (rys. 6.9).



Rys. 6.9. Schemat wyznaczania rozkładów eliptycznych nacisków powierzchniowych na podstawie wartości maksymalnych p_{Hmax} według wzorów Hertza

Fig. 6.9. Diagram of the way of determination of pressure of elliptical distribution of surface pressures based on maximum surface pressure p_{Hmax} from Hertz equation

$$l = \frac{4F'}{\pi \times p_{Hmax}} \quad (6.6)$$

gdzie:

- l – długość powierzchni styku [mm],
- p_{Hmax} – maksymalne naciski według wzorów Hertza [MPa],
- F' – siła przypadająca na jednostkę długości styku [N/mm].

Długość powierzchni styku można wyznaczyć również ze wzoru [Dyląg 2003]:

$$l = \sqrt{\frac{4 \times k \times R \times F'}{\pi}} \quad (6.7)$$

gdzie:

- l – długość powierzchni styku [mm],
- R – promień próbki [mm],
- k – współczynnik [-],
- F' – siła przypadająca na jednostkę długości styku [N/mm].

Przy określaniu wartości naprężeń w oparciu o wzory Hertza na całkowity błąd składały się błędy związane z wyznaczaniem współczynników Poissona i modułów sprężystości podłużnej warstwy kory badanych próbek. Były one związane geometrią próbek (Δd , Δh – błędy możliwe do pominięcia ze względu na ich systematyczny charakter), pomiarem siły $\Delta F=1$ N, pomiarem odkształcenia (Δh_1). Maksymalny błąd względny w poszczególnych strefach pomiarowych nie przekraczał 14%.

6.4. Pomiary przemieszczeń

Do pomiarów przemieszczeń zostały wykorzystane trzy metody pomiarowe różniące się zakresem mierzonych wielkości. W zakresie najmniejszych przemieszczeń, rzędu dziesiątych części mikrometra, została zastosowana metoda interferometrii plamkowej w wersji elektronicznej (ESPI) [Gerhard i Busse 2005, Jones i Wykes 1983], pozwalająca na wyznaczenie zarówno map przemieszczeń na całej powierzchni próbki, jak i rozkładów przemieszczeń wzdłuż wybranych przekrojów. Większe przemieszczenia, rzędu dziesiątych części milimetra wyznaczono metodą fotografii plamkowej [Cloud 1995]. W zakresie małych przemieszczeń, ze względu na zastosowaną metodykę badań, nie było możliwe przeprowadzenie analizy statystycznej. Największe wielkości przemieszczeń (rzędu milimetrów) wyznaczono na podstawie pomiarów przemieszczeń charakterystycznych punktów na obrazach zdeformowanych powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Pomiary wykonano w pięciu powtórzeniach, a wyniki poddano analizie statystycznej mającej na celu wyznaczenie wartości średniej, odchylenia standardowego, błędu standardowego oraz 95% przedziału ufności dla wartości średniej przemieszczeń.

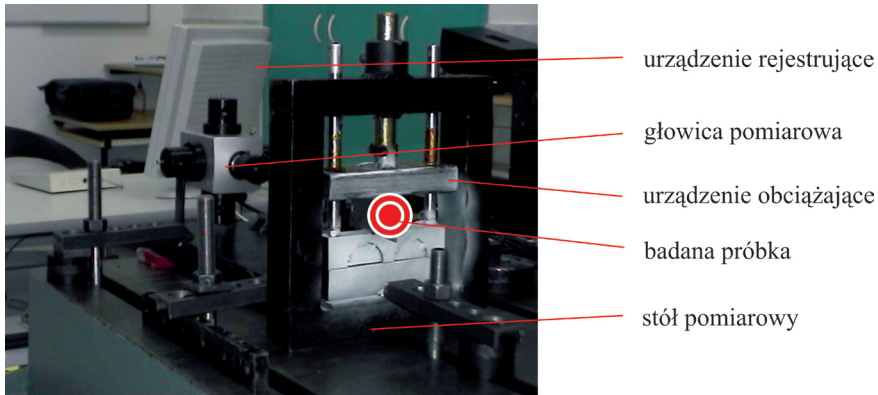
6.4.1. Wyznaczenie map i rozkładów przemieszczeń u_x , u_y i u_z metodą interferometrii plamkowej (ESPI)

Badania zmierzające do wyznaczenia rozkładów przemieszczeń metodą interferometrii plamkowej zostały przeprowadzone w Zakładzie Inżynierii Biomedycznej i Mechaniki Eksperymentalnej Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Politechniki Wrocławskiej.

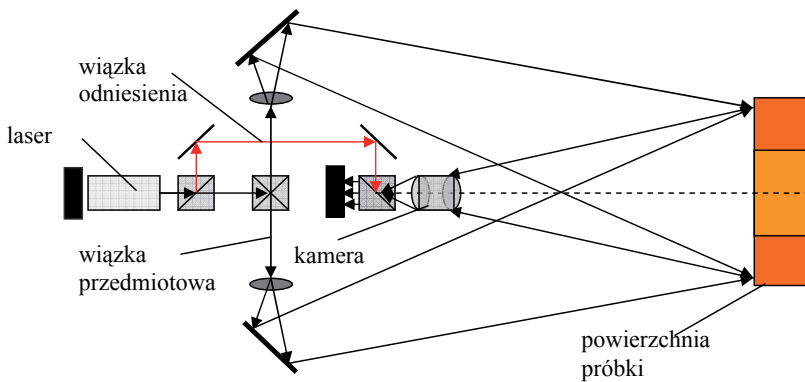
Stanowisko pomiarowe (rys. 6.10) umożliwiło bardzo dokładny, bezkontaktowy pomiar przemieszczeń na całej powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi w trzech kierunkach. Podstawowym elementem układu pomiarowego była głowica pozwalająca na pomiar przemieszczeń metodą interferometrii plamkowej (3D ESPI system). Była ona zbudowana ze źródła światła spójnego (dwie diody laserowe o mocy 50 mW) oraz układu optycznego, za pomocą którego wiązka światła ulega wstępnie rozdzieleniu na wiązkę przedmiotową i wiązkę odniesienia (rys. 6.11) Wiązka przedmiotowa, dzięki układowi pryzmatów, ulegała podziałowi na cztery wzajemnie do siebie prostopadłe, które po odbiciu od powierzchni lusterek kierujących je na badany obiekt i rozproszeniu na powierzchni obiektu trafiały do obiektywu kamery cyfrowej o dużej rozdzielczości. Szczegółowa metodyka pomiarów została przedstawiona w publikacji autora [Stopa i Romański 2003].

Urządzenie obciążające (rys. 6.10) wraz z wysięgnikiem oraz zamontowaną na nim głowicą pomiarową umieszczono na stole służącym do badań holograficznych, będącym jednym z ważnych ogniw w procesie izolacji badanego obiektu przed wpływem zewnętrznych zakłóceń. Próbkę korzenia marchwi obciążono wstępnie ciężarem $F^2=2,5$ N/mm, co stanowiło około 10% obciążenia krytycznego ze względu na wytrzymałość doraźną. Zakładając, że w procesie przechowywania obciążenie jest rozmieszczone

równomiernie wzdłuż całej długości korzenia, można przyjąć, iż ciężar ten odpowiada rzeczywistemu obciążeniu całego korzenia wynoszącemu ok. 400 N. Po ustabilizowaniu się obrazu holograficznego zarejestrowano go i następnie zwiększono obciążenie o wartość $\Delta F = 0,02 \text{ N/mm}$. Z uwagi na przyjętą metodę badawczą była to maksymalna wartość siły, powyżej której przemieszczenia przekraczały zakres pomiarowy systemu ESPI.



Rys. 6.10. Stanowisko do pomiaru przemieszczeń metodą interferometrii plamkowej (ESPI)
 Fig. 6.10. The experimental station for the measurement of displacement using ESPI



Rys. 6.11. Układ optyczny do pomiaru przemieszczeń metodą interferometrii plamkowej (ESPI)
 Fig. 6.11. Optical system of the measurement of displacement using ESPI

Po upływie 30 sekund koniecznych na stabilizację nowego obrazu plamek dokonano ponownej rejestracji. W wyniku interferencji obu obrazów holograficznych otrzymano układ prążków zamieniony następnie na sygnał cyfrowy, który podlegał dalszemu przetworzeniu za pomocą komputera przy zastosowaniu specjalnego oprogramowania. W wyniku elektronicznego przetworzenia optycznego obrazu holograficznego otrzymano

mapy przemieszczeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: w kierunku osi pionowej Y, w kierunku osi poziomej X oraz w kierunku Z prostopadłym do płaszczyzny badanego przekroju.

6.4.2. Rozkłady przemieszczeń u_x , u_y wyznaczone metodą fotografii plamkowej

Pomiar przemieszczeń przy wykorzystaniu fotografii plamkowej został przeprowadzony w Zakładzie Inżynierii Biomedycznej i Mechaniki Eksperymentalnej Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Politechniki Wrocławskiej. Stanowisko do badań (rys. 6.12) składało się ze stołu pomiarowego odizolowanego od zakłóceń zewnętrznych, na którym zbudowany jest układ optyczny. Zawiera on laser helowo-neonowy, którego promień poprzez układ lusterek oraz urządzenie rozszerzające wiązkę skierowany jest na badany obiekt. Obiekt obserwowany był przez aparat fotograficzny umożliwiającą rejestrację obrazu na płycie szklanej powleczonej materiałem światłoczułym o dużej rozdzielczości.

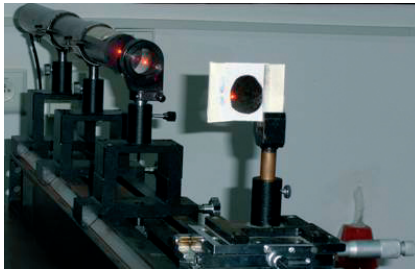


Rys. 6.12. Stanowisko do pomiaru przemieszczeń metodą fotografii plamkowej
Fig. 6.12. Experimental station for the displacement measurement using speckle photography

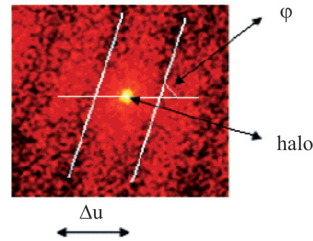
Pomiary polegały na zarejestrowaniu techniką dwuekspozycyjną obrazów plamkowych, odpowiadających stanom przed i po deformacji. Obraz plamkowy powstaje w efekcie interferencji promieni wiązki światła laserowego odbitych od powierzchni obiektu dyfuzyjnego lub przechodzących przez ośrodek transmisyjny o zmiennych wartościach współczynnika załamania światła.

Zarejestrowany za pomocą fotografii obraz plamkowy został poddany analizie punktowej (rys. 6.13a). Na skutek dyfrakcji, w pewnej odległości od plamkogramu, obserwowano rozkład natężenia światła modulowany zgodnie z przebiegiem funkcji Bessela. Powstał charakterystyczny obraz równoległych i równoodległych, jasnych i ciemnych prążków (rys. 6.13b) zawierający informację o kierunku i wartości wektora przemieszczenia w płaszczyźnie xy. Kierunek tego wektora jest prostopadły do kierunku prążków dyfrakcyjnych, a jego wartość jest odwrotnie proporcjonalna do odległości międzyprążkowej. Ze względu na wysoką czułość zastosowanej metody pomiarowej, rozkłady przemieszczeń wyznaczono przy zmianach wartości siły obciążającej wynoszących

$\Delta F'_1=0,1$ N/mm oraz $\Delta F'_2=0,2$ N/mm przy obciążeniu wstępnym $F'=5$ N/mm. Rozkłady przemieszczeń wyznaczono w dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojach, z których jeden pokrywał się z kierunkiem działania siły. Szczegółowy opis zastosowania metody fotografii plamkowej do badań obiektów pochodzenia roślinnego przedstawiono w pracy [Andruszkiewicz, Jankowski, Stopa 2007].



a) układ optyczny do analizy plamkogramu
a) optical system for speckle analysis

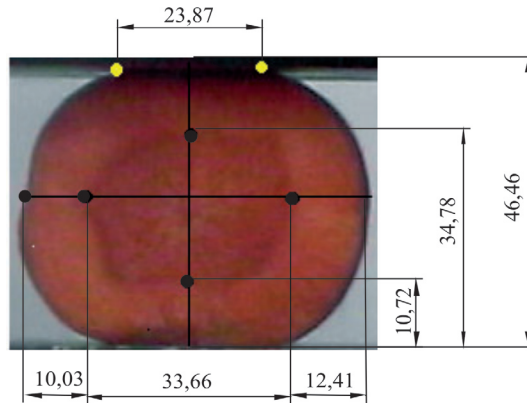


b) przykładowy plamkogram
b) an example of the speckle

Rys. 6.13. Analiza punktowa plamkogramu
Fig. 6.13. Speckle point analysis

6.4.3. Rozkłady przemieszczeń u_y w pełnym zakresie odkształceń

Badania dużych przemieszczeń (rzędu milimetrów) wykonano w laboratorium Instytutu Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu według metody opisanej w publikacji [Stopa, Romański 2006]. Wykorzystano maszynę wytrzymałościową Instron 5566 wyposażoną w głowicę o zakresie obciążenia do 1 kN. Próbkę były ściskane pomiędzy dwiema płaszczyznami z prędkością $1,67 \cdot 10^{-5}$ [m/s]. Zdeformowaną powierzchnię próbek rejestrowano przy użyciu cyfrowego aparatu fotograficznego. Przed przyłożeniem obciążenia na powierzchni przekroju poprzecznego wzdłuż linii pokrywanej się z kierunkiem działania siły zaznaczono punkty styku rdzenia z korą oraz punkt przyłożenia siły i punkt podparcia. Pierwsze zdjęcie wykonywane było bez obciążenia, drugie przy obciążeniu $F'=100$ N, a następne podczas wzrostu siły co $\Delta F=40$ N. Wykonane zdjęcia wprowadzono do pamięci komputera i poddano obróbce w programach: Paint i AutoCAD 2000 (rys. 6.14). Na podstawie otrzymanych wartości wykonano wykresy przemieszczeń w programie Microsoft Excel.



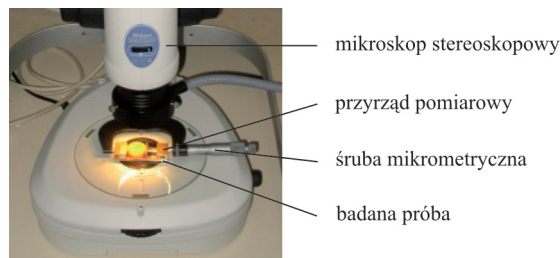
Rys. 6.14. Zwymiarowana próbka marchwi w programie AutoCAD 2000

Fig. 6.14. A sample of carrot root with its dimensions presented in AutoCAD 2000 software

6.5. Badania mikroskopowe

Badania mikroskopowe zostały przeprowadzone na stanowisku do pomiarów i analizy obrazów w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

Stanowisko składało się z mikroskopu stereoskopowego połączonego poprzez komputer z kamerą wideo (rys. 6.15). Oprogramowanie umożliwiało rejestrację i analizę obrazów oraz dokonanie pomiaru parametrów struktury. Całkowity zakres powiększeń mikroskopu, z wyposażeniem dodatkowym, wynosił od 3,8 do 540x. Zastosowano serię obiektywów P-HR PLAN APO o powiększeniach 0,5, 1, 1,6x charakteryzującą się wysokimi własnościami pomiarowymi. W celu uzyskania najlepszej jakości obrazu użyto wbudowaną w głowicę przysłonę irysową.



Rys. 6.15. Układ pomiarowy do badań mikroskopowych

Fig. 6.15. The measuring arrangement for microscopic investigation

Próbkę umieszczono w przyrządzie obciążającym pozwalającym na wymuszenie żądanej wartości przemieszczenia. Pierwsze pomiary komórek marchwi zostały przeprowadzone na próbce nieobciążonej ($\varepsilon_1=0,00$), kolejne zaś były odczytywane podczas odkształcenia próbki wynoszącego odpowiednio $\varepsilon_2=0,07$, $\varepsilon_3=0,13$ oraz $\varepsilon_4=0,20$. Wartość odkształcenia była wymuszana za pomocą śruby mikrometrycznej. Próbka była ściszana promieniowo, tak jak miało to miejsce w przypadku testów związanych z wyznaczaniem wartości nacisków powierzchniowych. Następnie próbka w urządzeniu obciążającym była przenoszona do przestrzeni pomiarowej mikroskopu stereoskopowego zintegrowanego z komputerem oraz kamerą.

Badania przeprowadzane były przy świetle odbitym, stosując powiększenie 30- i 110 krotne. Dzięki współpracy mikroskopu z kamerą oraz komputerem wyposażonym w program IRIS Laboratorium możliwy był pomiar wielkości komórek. W celu wyznaczenia obciążenia odpowiadającego wielkości odkształcenia zadawanego przez śrubę mikrometryczną, posłużono się maszyną wytrzymałościową Instron 5566. Na podstawie skalowania ustalono, że odkształcenia $\varepsilon_1=0,00$, $\varepsilon_2=0,07$, $\varepsilon_3=0,13$ oraz $\varepsilon_4=0,20$ odpowiadają obciążeniu odpowiednio $F_1'=0,0$ N/mm, $F_2'=4,5$ N/mm, $F_3'=11,0$ N/mm i $F_4'=21,0$ N/mm.

7. WYNIKI BADAŃ

7.1. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe kory i rdzenia

Podstawowe właściwości wytrzymałościowe korzeni marchwi wyznaczono zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 6.2 dla dwóch zakresów naprężeń. Przed przystąpieniem do analizy statystycznej danych w oparciu o program Statistica 8 sporządzono ich charakterystykę. Do każdego pomiaru analizie poddano 36 obserwacji, z czego po 18 przypadają na rdzeń i korę oraz po 12 na każdy kierunek. Do całej próby oraz do każdej wartości poszczególnych cech obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe, błąd standardowy oraz 95% przedział ufności dla wartości średniej.

7.1.1. Umowny moduł sprężystości do naprężenia z przedziału $\sigma_1=0\div 0,8$ MPa w odmianie Karotan

W tabeli 7.1 przedstawiono wartość średnią, odchylenie standardowe, błąd standardowy oraz 95% przedział ufności dla wartości średniej umownego modułu sprężystości E [MPa] w odmianie Karotan z przedziału naprężenia $\sigma_1=0\div 0,8$ MPa

Tabela 7.1

Table 7.1

Wyniki analizy statystycznej ($\sigma_1=0\div 0,8$ MPa)
The results of the statistical analysis ($\sigma_1=0\div 0.8$ MPa)

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean Value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
Cała próba – Total test		36	4,55	0,51	0,08	4,38	4,73
warstwa i kierunek obciążenia	rdzeń * X – core*X	6	4,76	0,57	0,23	4,16	5,35
	rdzeń * Y – core*Y	6	4,62	0,59	0,24	4,00	5,24
	rdzeń * Z – core*Z	6	4,88	0,52	0,21	4,32	5,43
Layer and load direction	kora * X – bark*X	6	4,22	0,22	0,09	3,97	4,46
	kora * Y – bark*Y	6	4,04	0,17	0,07	3,85	4,22
	kora * Z – bark*Z	6	4,83	0,31	0,12	4,49	5,16

W celu sprawdzenia wpływu poszczególnych cech na moduł sprężystości posłużono się analizą wariancji czynników głównych. Hipotezę o jednorodności wariancji w poszczególnych grupach każdej cechy poddano testowi Levene'a. Wyniki testów przedstawiono w tabeli 7.2.

Tabela 7.2
Table 7.2

Wyniki testu Levene'a ($\sigma_1=0 - 0.8$ MPa)
The results of the Levene test ($\sigma_1=0 - 0.8$ MPa)

Test Levene'a – Levene's test		
Czynnik – Factor	Wartość testu F – F test value	Wartość p – P value
Warstwa – Layer	2,01	0,16
Kierunek obciążenia Load direction	0,23	0,79

Po wykonaniu testów przyjęto, że założenie o jednorodności wariancji jest spełnione dla obu zmiennych (wartość p w obu zmiennych jest dużo większa od 5%, co wskazuje na brak przesłanek do odrzucenia hipotezy zerowej mówiącej o jednorodnej wariancji w poszczególnych grupach danej zmiennej). Następnie przeprowadzono analizę wariancji wieloczynnikowej, której wyniki i analizę przedstawiono w tabeli 7.3.

Tabela 7.3
Table 7.3

Wyniki analizy wariancji wieloczynnikowej ($\sigma_1=0 - 0.8$ MPa)
The results of the multifactorial analysis ($\sigma_1=0 - 0.8$ MPa)

Czynnik Factor	Stopnie swobody Degrees of freedom	Suma kwadratów Sum square	Średnia kwadratów Quadratic mean	Wartość testu F F test value	Wartość p p value
Warstwa – Layer	1	1,37	1,37	7,09	0,01
Kierunek bciążenia Load Direktion	2	1,73	0,86	4,47	0,02
Resztka – Remainder	32	6,19	0,19		
Całkowita – Integer	35	9,29			

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno warstwa, jak i kierunek wpływają istotnie na wartość modułu sprężystości (w przypadku obu zmiennych wartość p jest dużo mniejsza od 5%, co pozwala odrzucić hipotezę zerową mówiącą o braku wpływu danej cechy na badaną wielkość).

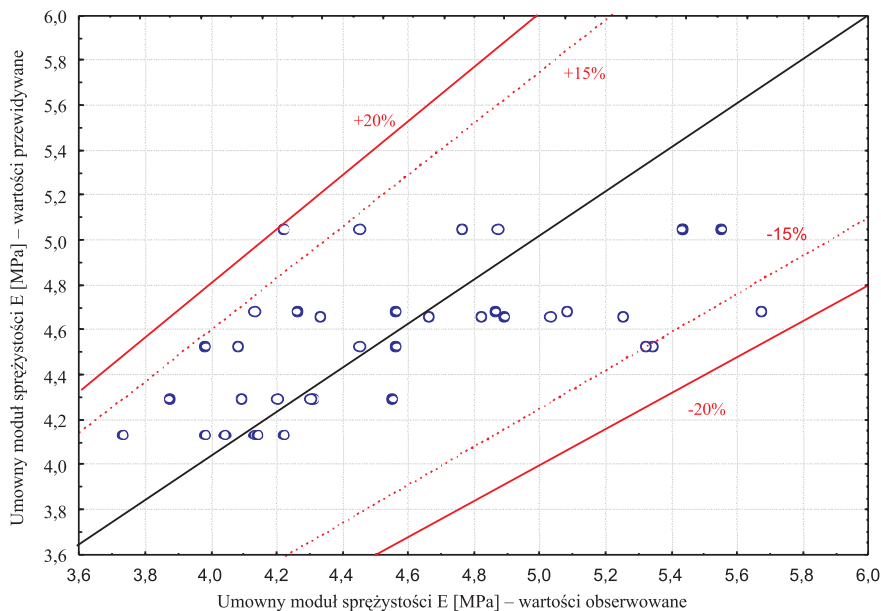
Uzyskane wyniki pozwoliły na przeprowadzenie próby opisu zależności wielkości modułu sprężystości. Otrzymano następujący model z sigma-ograniczeniami:

$$E = 4,559 + 0,195 \times \text{warstwa}(\text{rdzeń/kora}) - 0,069 \times \text{kierunek}(X/Z) - 0,228 \times \text{kierunek}(Y/Z)$$

gdzie:

- warstwa (rdzeń/kora)=1, gdy warstwa = rdzeń lub -1 w przeciwnym wypadku
- kierunek(X/Z) = 1, gdy kierunek = X lub -1 gdy kierunek = Z lub 0 w pozostałym wypadku
- kierunek(Y/Z) = 1, gdy kierunek = Y lub -1 gdy kierunek = Z lub 0 w pozostałym wypadku.

Na wykresie 7.1 przedstawiono rozrzut wartości przewidywanych względem obserwowanych. Na osi odciętej przedstawiono wyniki doświadczalne, a na osi rzędnych wartości obliczone za pomocą zaproponowanego modelu. Z analizy wykresu wynika, że zależność opisująca wartość modułu odkształcenia może być uznana za poprawną, ponieważ maksymalne różnice pomiędzy wartościami obliczeniowymi i uzyskanymi z pomiarów nie przekraczają $\pm 20\%$.



Rys. 7.1. Porównanie umownych modułów sprężystości uzyskanych na drodze doświadczalnej i w oparciu o model statystyczny

Fig. 7.1. The comparison of the values of the conventional modulus of elasticity obtained in the experiments and on the basis of the statistical model

7.1.2. Umowny moduł sprężystości dla naprężenia z przedziału $\sigma_2 = 1,0 \div 1,9$ MPa w odmianie Karotan

W tabeli 7.4 przedstawiono wyniki analizy statystycznej przeprowadzonej dla odmiany Karotan.

Tabela 7.4

Table 7.4

Wyniki analizy statystycznej ($\sigma_2=1,0 - 1,9$ MPa)
The results of the statistical analysis ($\sigma_1=1,0 - 1,9$ MPa)

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean Value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
Cała próba – Total test		36	9,61	1,15	0,19	9,22	10,00
warstwa i kierunek obciążenia	rdzeń * X – core*X	6	10,80	0,59	0,24	10,17	11,42
	rdzeń * Y – core*Y	6	10,48	0,65	0,26	9,80	11,17
	rdzeń * Z – core*Z	6	12,87	0,80	0,32	12,03	13,72
layer and load direction	kora * X – bark*X	6	10,13	0,54	0,22	9,56	10,70
	kora * Y – bark*Y	6	9,70	0,82	0,33	8,84	10,56
	kora * Z – bark*Z	6	11,94	0,61	0,25	11,30	12,59

Podobnie jak w poprzednim przedziale naprężeń w celu sprawdzenia wpływu poszczególnych cech na moduł sprężystości posłużono się analizą wariancji czynników głównych. Hipotezę o jednorodności wariancji w poszczególnych grupach każdej cechy poddano testowi Levene'a. Po wykonaniu testów przyjęto, że założenie o jednorodności wariancji jest spełnione w odniesieniu do obu zmiennych, a po przeprowadzeniu analizy wariancji wieloczynnikowej stwierdzono, że zarówno warstwa, jak i kierunek obciążenia wpływają istotnie na wartość modułu sprężystości.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono próbę opisu zależności wielkości modułu sprężystości za pomocą następującego modelu z sigma-ograniczeniami:

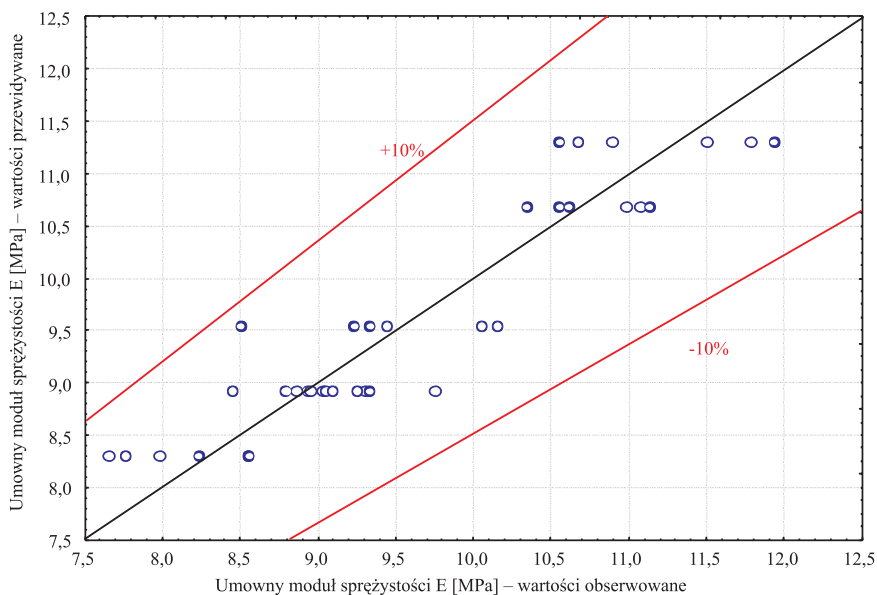
$$E = 9,617 + 0,31 \times \text{warstwa}(\text{rdzeń}/\text{kora}) - 0,381 \times \text{kierunek}(\text{X}/\text{Z}) - 1,002 \times \text{kierunek}(\text{Y}/\text{Z})$$

gdzie:

- warstwa(rdzeń/kora) = 1, gdy warstwa = rdzeń lub -1 w przeciwnym wypadku
- kierunek(X/Z) = 1, gdy kierunek = X lub -1 gdy kierunek = Z lub 0 w pozostałym wypadku
- kierunek(Y/Z) = 1, gdy kierunek = Y lub -1 gdy kierunek = Z lub 0 w pozostałym wypadku

Wszystkie parametry modelu są istotne, a na uwagę zasługuje fakt, że R^2 skorygowane jest równe 0,85.

Na wykresie 7.2 przedstawiono rozrzut wartości przewidywanych względem obserwowanych. Na osi odciętej przedstawiono wyniki doświadczalne, a na osi rzędnych wartości obliczone za pomocą zaproponowanego modelu. Z analizy wykresu wynika, że zależność opisująca wartość modułu odkształcenia może być uznana za poprawną, ponieważ maksymalne różnice pomiędzy wartościami obliczeniowymi i uzyskanymi z pomiarów nie przekraczają $\pm 10\%$.



Rys. 7.2. Porównanie modułów sprężystości uzyskanych na drodze doświadczalnej i w oparciu o model statystyczny

Fig. 7.2. The comparison of the values of the modulus of elasticity obtained in the experiments and on the basis of the statistical model

7.1.3. Stała Poissona w odmianie Karotan

Wyniki analizy statystycznej dotyczące stałej Poissona odmiany Karotan, wyznaczone w przedziale naprężeń $\sigma_1=0\div 0,8$ MPa przedstawiono w tabeli 7.5, a w drugim przedziale naprężeń $\sigma_2=1\div 1,9$ MPa w tabeli 7.6.

Tabela 7.5
Table 7.5

Wyniki analizy statystycznej ($\sigma_1=0\pm 0,8$ MPa)
The results of the statistical analysis ($\sigma_1=0\pm 0.8$ MPa)

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
Cała próba Total test		36	0,475	0,00904	0,001	0,472	0,478
warstwa i kierunek obciążenia	rdzeń * X – core*X	6	0,473	0,005955	0,002	0,467	0,479
	rdzeń * Y – core*Y	6	0,482	0,007127	0,003	0,474	0,489
	rdzeń * Z – core*Z	6	0,468	0,005750	0,002	0,462	0,474
layer and load direction	kora * X – bark*X	6	0,479	0,005913	0,002	0,472	0,485
	kora * Y – bark*Y	6	0,474	0,012078	0,005	0,461	0,487
	kora * Z – bark*Z	6	0,478	0,011472	0,004	0,466	0,490

Tabela 7.6
Table 7.6

Wyniki analizy statystycznej ($\sigma_2=1,0\pm 1,9$ MPa)
The results of the statistical analysis ($\sigma_1=1,0\pm 1,9$ MPa)

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
Cała próba – Total test		36	0,475	0,007	0,001	0,473	0,477
warstwa i kierunek obciążenia	rdzeń * X – core*X	6	0,475	0,006	0,002	0,468	0,482
	rdzeń * Y – core*Y	6	0,473	0,005	0,002	0,467	0,478
	rdzeń * Z – core*Z	6	0,480	0,010	0,004	0,470	0,491
layer and load direction	kora * X – bark*X	6	0,474	0,006	0,002	0,467	0,480
	kora * Y – bark*Y	6	0,473	0,006	0,002	0,466	0,480
	kora * Z – bark*Z	6	0,475	0,006	0,002	0,469	0,482

W celu sprawdzenia wpływu poszczególnych cech na stałą Poissona posłużono się analizą wariancji czynników głównych. Hipotezę o jednorodności wariancji w poszczególnych grupach dla każdej cechy poddano testowi Levene'a. Na podstawie testów przyjęto, że założenie o jednorodności wariancji jest spełnione dla obu zmiennych (wartość p obu zmiennych jest dużo większa od 5%, co wskazuje na brak przesłanek do odrzucenia hipotezy zerowej mówiącej o jednorodnej wariancji w poszczególnych grupach danej zmiennej). Następnie przeprowadzono analizę wariancji wieloczynnikowej.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno warstwa, jak i kierunek obciążenia nie wpływają na wartość stałej Poissona (dla obu zmiennych wartość p jest dużo większa od 5%, co nie pozwala odrzucić hipotezy zerowej mówiącej o braku wpływu danej cechy na badaną wielkość).

7.1.4. Umowny moduł sprężystości przy naprężeniu z przedziału $\sigma_2 = 1 \div 1,9$ MPa w odmianie Major i Merida

Osiągnięcie jednego z celów pracy polegającego na określeniu wpływu właściwości wytrzymałościowych oraz wymiarów geometrycznych korzenia marchwi na wielkość nacisków powierzchniowych wymagało wyznaczenia wartości modułów sprężystości podłużnej dwóch różnych odmian marchwi (tab. 7.7). Z uwagi na przyjętą metodykę określania zależności nacisków powierzchniowych od właściwości wytrzymałościowych moduł sprężystości wyznaczono tylko przy obciążeniu z zakresu $\sigma_2 = 1,0 \div 1,9$ MPa.

Tabela 7.7

Table 7.7

Wyniki analizy statystycznej ($\sigma_2 = 1,0 \div 1,9$ MPa)
The results of the statistical analysis ($\sigma_1 = 1,0 \div 1,9$ MPa)

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
odmiana Merida warstwa i kierunek obciążenia layer and load direction	rdzeń * X – core*X	6	9,45	0,60	0,24	8,81	10,08
	rdzeń * Y – core*Y	6	9,11	0,36	0,14	8,73	9,48
	rdzeń * Z – core*Z	6	11,22	0,59	0,24	10,59	11,84
	kora * X – bark*X	6	9,02	0,31	0,12	8,69	9,34
	kora * Y – bark*Y	6	8,12	0,38	0,15	7,71	8,52
	kora * Z – bark*Z	6	10,78	0,32	0,13	10,44	11,11
odmiana Major warstwa i kierunek obciążenia layer and load direction	rdzeń * X – core*X	6	13,06	0,25	0,10	12,79	13,32
	rdzeń * Y – core*Y	6	12,55	0,72	0,29	11,79	13,31
	rdzeń * Z – core*Z	6	15,38	0,60	0,24	14,74	16,01
	kora * X – bark*X	6	12,13	0,60	0,24	11,49	12,77
	kora * Y – bark*Y	6	11,65	0,55	0,22	11,07	12,23
	kora * Z – bark*Z	6	14,48	0,46	0,18	13,99	14,96

Analiza wyników pomiarów (tab. 7.7) wskazuje, że moduł sprężystości marchwi odmiany Merida zarówno w warstwie kory, jak i w rdzeniu jest niższy średnio o 3 do 4 MPa od modułu sprężystości marchwi odmiany Major, natomiast wartość modułu sprężystości marchwi odmiany Karotan (tab. 7.4) położona jest pomiędzy wartościami wyznaczonymi dla odmian Merida i Major. Takie zestawienie wyników pozwala na wiarygodne określenie wpływu własności wytrzymałościowych korzenia marchwi związanych z określoną odmianą na wartość nacisków powierzchniowych.

7.2. Rozkłady nacisków powierzchniowych

7.2.1. Obiekty rzeczywiste

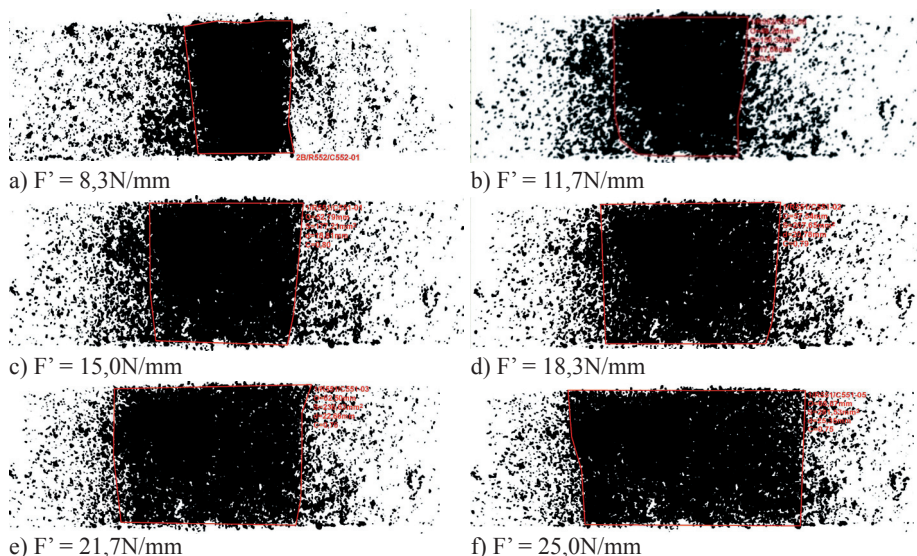
Pomiary nacisków powierzchniowych korzeni marchwi miały na celu z jednej strony wyznaczenie konkretnych wartości dla badanych odmian, a z drugiej strony uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy i w jakim stopniu zależą one od wymiarów i właściwości wytrzymałościowych, miejsca pobrania próbki oraz wielkości siły obciążającej. Badaniom poddano trzy odmiany korzeni marchwi – Karotan, Major i Meridia różniące się w istotny sposób właściwościami wytrzymałościowymi i wymiarami geometrycznymi. W badaniach przyjęto płaski kształt głowicy elementu obciążającego.

Naciski powierzchniowe jako funkcja siły obciążającej

Na rysunku 7.3 przedstawiono przykładowe ślady powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym zmieniające się wraz ze wzrostem obciążenia. Powierzchnia styku przyjmuje kształt zbliżony do czworokąta o wysokości równej długości linii styku próbki z elementem obciążającym l_0 i o szerokości zmieniającej się wraz ze zmianą obciążenia. Dzięki zastosowaniu programu IRIS Laboratorium na podstawie otrzymanych obrazów wyznaczono wartości pola powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym będące podstawą do wyznaczenia średniej wartości nacisków powierzchniowych. Następnie, postępując zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.3.1, wyznaczono maksymalne wartości nacisków powierzchniowych.

Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej mającej na celu sprawdzenie, czy i w jaki sposób wyznaczone naciski powierzchniowe zależą od poziomu umownego modułu sprężystości, siły obciążającej, strefy pomiarowej oraz średnicy korzenia marchwi. Na potrzeby analizy przyjęto założenie, że zmienna strefa pobrania próbki jest zmienną jakościową, przyjmującą trzy poziomy wartości, natomiast siła obciążająca, moduł sprężystości związany z badaną odmianą oraz średnice próbek są zmiennymi ciągłymi. W celu identyfikacji zależności wykorzystano ogólne modele regresji.

Przed przystąpieniem do analizy statystycznej danych sporządzono charakterystykę rozpatrywanych czynników. W sumie analizie poddano 1080 obserwacji, z czego po 360 przypadało na poziomy poszczególnych zmiennych. Do całej próby oraz do każdej wartości poszczególnych cech obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe, błąd standardowy oraz 95% przedział ufności wartości średniej. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.8.



Rys. 7.3. Powierzchnia styku korzenia marchwi z elementem obciążającym dla różnych wielkości obciążenia

Fig. 7.3. The area of the contact point of carrot root with the load applying element for different values of the load

Tabela 7.8 Table 7.8

Wyniki analizy statystycznej nacisków powierzchniowych [MPa]
The results of the statistical analysis for surface pressures

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
Siła na jednostkę długości próbki F' [N/mm] Load per unit length of the sample F' [N/mm]	5,00	135	0,79	0,19	0,01	0,76	0,83
	8,33	135	1,04	0,29	0,02	0,99	1,09
	11,67	135	1,27	0,34	0,02	1,21	1,33
	15,00	135	1,40	0,39	0,03	1,33	1,47
	18,33	135	1,50	0,42	0,03	1,43	1,57
	21,67	135	1,54	0,43	0,03	1,46	1,61
Moduł sprężystości E [MPa] Modulus of elasticity E [MPa]	8,12	105	1,05	0,19	0,02	1,01	1,09
	9,70	105	1,30	0,28	0,03	1,25	1,36
	11,65	105	1,55	0,36	0,04	1,48	1,62
Średnica próbki Φ [mm] Diameter of the sample Φ [mm]	23	315	1,06	0,32	0,02	1,03	1,10
	30	315	1,30	0,35	0,02	1,26	1,34
	40	315	1,55	0,52	0,03	1,49	1,61
Strefa pomiarowa Measuring zone	I	315	1,21	0,42	0,02	1,16	1,25
	II	315	1,31	0,44	0,02	1,26	1,36
	III	315	1,40	0,48	0,03	1,35	1,45

Identyfikację modelu przeprowadzono metodą najlepszego podzbioru dla zmiennej zależnej, wykorzystując skorygowany współczynnik R^2 (tabela 7.9) oraz współczynnik C_p Mallowa (tab. 7.10), będący miarą jakości dopasowania modelu. Do każdego zestawu zmiennych włączonych do modelu obliczono kryteria dopasowania R^2 i C_p Mallowa.

Tabela 7.9

Table 7.9

Wartości skorygowanego współczynnika R^2 badanych modeli statystycznych

The values of corrected coefficient R^2 for the statistical models studied

Nr modelu Number of the model	R^2 skoryg. R^2 corrected	Liczba zmiennych Number of variable	F'	E	Φ	Strefa pomiarowa Measuring zone	Strefa pomiarowa Measuring zone
1	0,86	4	0,56	0,59	0,30	-0,17	0,0062
2	0,83	3	0,56	0,59	0,30		
3	0,77	3	0,56	0,65		-0,17	0,0062
4	0,74	2	0,56	0,65			
5	0,54	3		0,5	0,30	-0,17	0,0062
6	0,52	3	0,56		0,43	-0,17	0,0062
7	0,51	2		0,59	0,30		
8	0,49	2	0,56		0,43		
9	0,46	2		0,65		-0,17	0,0062
10	0,43	1		0,65			

Tabela 7.10

Table 7.10

Wartości współczynnika Mallowa w badanych modelach statystycznych

The values of Mallow's coefficient for the statistical models studied

Nr modelu Number of the model	C_p Mallowa	Liczba zmiennych Number of variable	F'	E	Φ	Strefa pomiarowa Measuring zone	Strefa pomiarowa Measuring zone
1	6,00	4	0,56	0,59	0,30	-0,17	0,0062
2	216,14	3	0,56	0,59	0,30		
3	607,39	3	0,56	0,65		-0,17	0,0062
4	817,54	2	0,56	0,65			
5	2192,20	3		0,59	0,30	-0,17	0,0062
6	2337,43	3	0,56		0,43	-0,17	0,0062
7	2402,35	2		0,59	0,30		
8	2547,57	2	0,5604		0,4304		
9	2793,60	2		0,65		-0,17	0,0062
10	3003,74	1		0,65			

Analizując skorygowany współczynnik R^2 (tab. 7.9) najlepsze dopasowanie wykazują modele 1 i 2 z czterema i trzema zmiennymi. Drugi model wykazuje co prawda nieznacznie słabsze dopasowanie niż model pierwszy, ale wymaga mniej zmiennych (nie musi być brana pod uwagę strefa pomiarowa). Opierając się na analizie współczynnika R^2 , należałoby wybrać model 2 z trzema zmiennymi, jednak wartości współczynnika C_p Mallowa (tab. 7.10) jednoznacznie wskazują na model uwzględniający wszystkie zmienne – wartość C_p dla tego modelu jest istotnie mniejsza od wartości współczynników obliczonych w pozostałych modelach. Ostatecznie zdecydowano się na wybór modelu 1 zawierającego wszystkie zmienne.

Ze względu na zastosowanie w ogólnym modelu liniowym zmiennych towarzyszących (siły obciążającej, modułu sprężystości i średnicy próbki) jako zmiennych ciągłych, sprawdzono hipotezę o jednorodności wariancji i kowariancji. W tym celu posłużono się testem M-Boxa będącym wielowymiarowym testem jednorodności wariancji i kowariancji w przypadku wielu zmiennych zależnych i zmiennych towarzyszących. Jeśli ten test okaże się istotny, oznaczać to będzie, że macierze wariancji i kowariancji w obrębie różnych wartości nacisków powierzchniowych różnią się w sposób istotny.

W tabelach 7.11 i 7.12 przedstawiono wyniki testowania hipotezy o jednorodności wariancji i kowariancji. Do analizowanych danych uzyskano wartość p nieco większą niż 5%, a więc zbliżoną do granicy, przy której należałoby odrzucić hipotezę o jednorodności wariancji i kowariancji. W celu poprawy jednorodności wariancji i kowariancji zdecydowano się na przekształcenie logarytmiczne zmiennej niezależnej ($y = \ln(x)$). Statystyki zmiennej przekształconej przedstawiono w tabeli 7.12. Ze względu na widoczną poprawę wartości testu przyjęto hipotezę o jednorodności wariancji/kowariancji.

Tabela 7.11

Table 7.11

Wyniki testu M-Boxa
The results of the M-Box test

	M Boxa	p
zmienna niezależna nieprzekształcona independent variable unconverted	31,03	0,05
zmienna niezależna przekształcona independent variable converted	12,72	0,89

Następnie przeprowadzono estymację wybranego modelu 1 z czterema zmiennymi, zatem wszystkie analizowane czynniki zostały uwzględnione w modelu. Testy istotności poszczególnych zmiennych przedstawiono w tabeli 7.12. Wartość p dla wszystkich czynników jest mniejsza od 5%, zatem należy odrzucić hipotezę mówiącą o braku wpływu danego czynnika na wielkość nacisków powierzchniowych.

Tabela 7.12
Table. 7.12

Wyniki testu istotności dla poszczególnych zmiennych
The results of the test of significance for individual variables

Czynnik Factor	Stopnie swobody Degrees of freedom	Suma kwadratów Square sum	Średnia kwadratów Quadratic mean	Wartość testu F F test value	Wartość p p value
Wyraz wolny – Free term	1	68,34	68,34	4568,76	0,00
F'	1	42,16	42,16	2818,64	0,00
E	1	38,13	38,13	2549,31	0,00
Φ	1	8,93	8,93	597,44	0,00
Strefa pomiarowa Measuring zone	2	3,57	1,78	119,58	0,00
Resztki – Remainder	939	14,04	0,01		

W tabeli 7.13 przedstawiono oszacowania parametrów modelu przy wykorzystaniu parametryzacji z sigma-ograniczeniami, a więc wartość parametru, błąd standardowy oszacowania parametru, wartość testu-t dotyczącego istotności parametru danego czynnika oraz wartość p dla tego testu. Wszystkie wartości p są mniejsze od 5% (oprócz ostatniego dla strefy II), zatem należy w tych przypadkach odrzucić hipotezę mówiącą o nieistotności danego parametru.

Tabela 7.13
Table 7.13

Oszacowania parametrów modelu przy parametryzacji z sigma-ograniczeniami
Estimation of the model parameters for the parametrisation with sigma-limitations

Czynnik Faktor	Wartość Value	Wartość parametru Parameter value	Błąd standardowy Standard error	Wartość testu t t test value	Wartość p p value
Wyraz wolny – Free term		-2,01	0,029	-67,59	0,00
„F12”		0,03	0,001	53,09	0,00
E		0,12	0,002	50,49	0,00
„Φ 2”		0,01	0,001	24,44	0,00
Strefa – Zone	I	-0,07	0,005	-13,83	0,00
Strefa – Zone	II	0,01	0,005	0,92	0,35

W tabeli 7.14 zamieszczono ocenę modelu (średnia kwadratów reszt jest obliczona dla zmiennej przekształconej). Po odwróceniu przekształcenia średni kwadrat reszt w modelu wyniósł 0,02326.

Tabela 7.14 Table 7.14
Ocena modelu statystycznego – Assessment of the statistical model

R ²	R ² skorygowane R ² corrected	Średnia kwadratów reszt MSE dla zmiennej przekształconej Quadratic mean remainder of MSE for independent variable converted	Średnia kwadratów reszt MSE dla zmiennej nieprzekształconej Quadratic mean remainder of MSE for independent variable unconverted	Wartość testu F F test value	Wartość p p value
0,88	0,87	0,01	0,02	1384,83	0,00

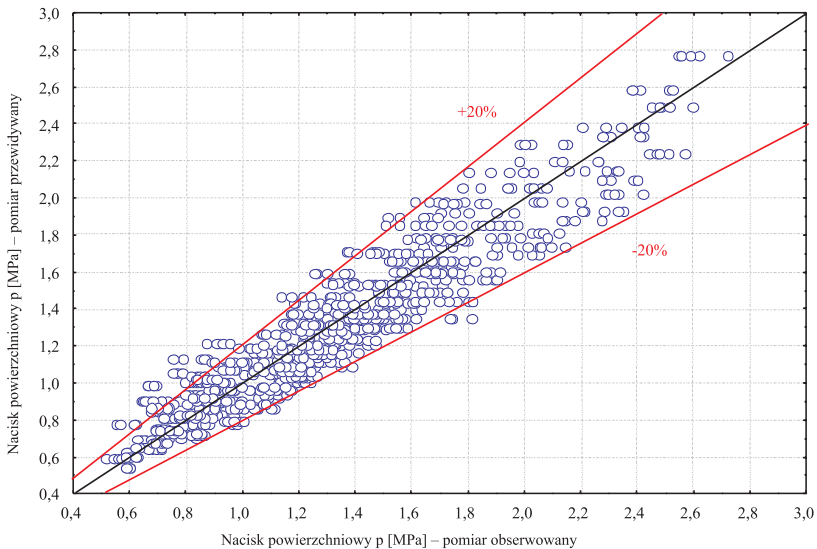
Postać modelu:

$$\text{LN}(\text{nacisk powierzchniowy}) = -2,01 + 0,031 F + 0,124 \times E + 0,014 \times \varphi - 0,077 \times \text{strefa(I/III)} + 0,005 \times \text{strefa(II/III)},$$

gdzie:

strefa(I/III) = 1, gdy strefa = I lub -1 gdy strefa = III lub 0 w pozostałym wypadku,
strefa(II/III) = 1, gdy strefa = II lub -1 gdy strefa = III lub 0 w pozostałym wypadku.

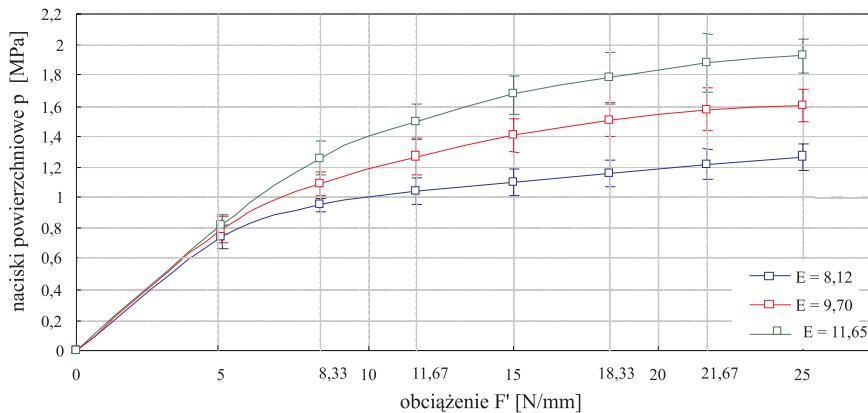
Na wykresie poniżej (rys. 7.4) przedstawiono rozrzut wartości przewidywanych w stosunku do obserwowanych. Na osi odciętej przedstawiono wyniki doświadczalne, a na osi rzędnych wartości obliczone za pomocą zaproponowanego modelu. W dużej mierze maksymalne różnice pomiędzy wartościami obliczeniowymi a uzyskanymi z pomiarów nie przekraczają $\pm 20\%$, co świadczy o dobrym dopasowaniu modelu statystycznego do wartości doświadczalnych.



Rys. 7.4. Porównanie wartości nacisków powierzchniowych uzyskanych na podstawie badań eksperymentalnych w stosunku do wartości przewidywanych

Fig. 7.4. The comparison of the values of surface pressure obtained on the basis of the experimental investigations in relation to the predicted values

Na rysunku 7.5 przedstawiono zależności nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia do trzech wartości modułów sprężystości ($E_1=8,12$ MPa, $E_2=9,70$ MPa i $E_3=11,65$ MPa) odpowiadających różnym odmianom korzeni marchwi. Do porównania nacisków powierzchniowych wykorzystano wartości modułów sprężystości warstwy kory w kierunku obciążenia (osi Y) wyznaczone metodą stycznych w zakresie naprężeń $\sigma_1=1,0-1,9$ MPa (rozdz. 7.1). Wzrost modułu sprężystości od wartości $E_1=8,12$ MPa do $E_2=9,70$ MPa oraz od wartości $E_2=9,70$ MPa do $E_3=11,65$ MPa powoduje wzrost maksymalnych nacisków powierzchniowych o ok. 0,32 MPa. Natomiast wzrost modułu sprężystości od $E_1=8,12$ MPa do $E_3=11,65$ MPa powoduje wzrost nacisków powierzchniowych w zakresie od 1,26 do 1,92 MPa, a więc o około 0,65 MPa. Można stwierdzić, że istnieje wyraźna proporcjonalna zależność pomiędzy wartością modułu sprężystości, a wartością nacisków powierzchniowych. Po względem jakościowym materiał pochodzenia biologicznego zachowuje się zgodnie z zależnościami znanymi z teorii sprężystości [Timoshenko, Goodier 1970].



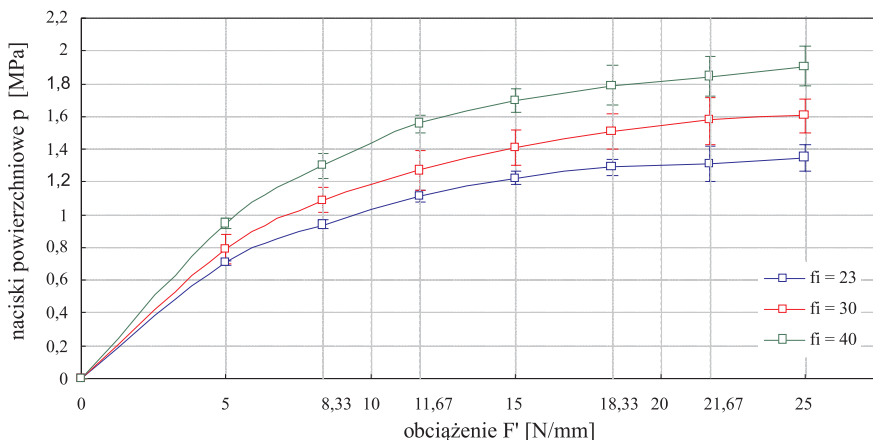
Rys.7.5. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia w różnych modułach sprężystości ($\varphi_1=30$ mm, II strefa pomiarowa)

Fig. 7.5. The average experimental values of surface pressure as the function of the load for different modulus of longitudinal elasticity ($\varphi_1=30$ mm, II measurement zone)

Podobną zależność można zauważyć w odniesieniu do średnicy badanych próbek (rys. 7.6). Wzrost średnicy badanych próbek od $\varphi_1=23$ mm do $\varphi_3=40$ mm w odmianie Karotan spowodował wzrost maksymalnych nacisków powierzchniowych w zakresie od 1,35 do 1,90 MPa, a więc o ponad 33%.

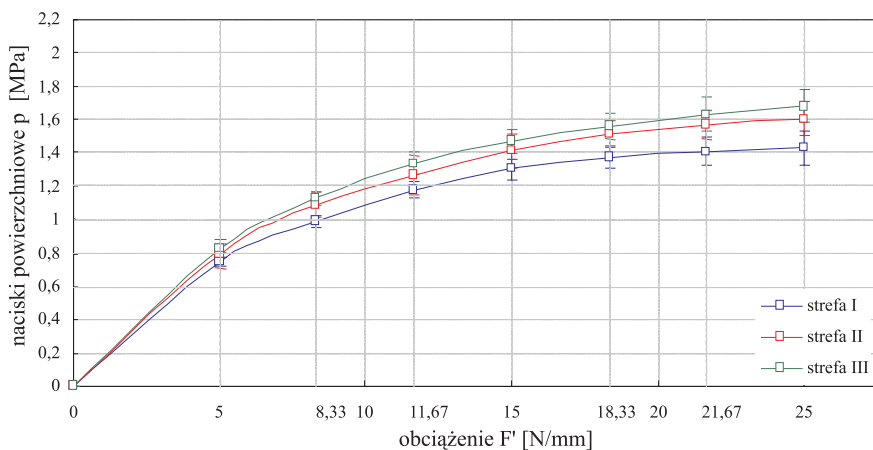
Nieco mniej istotne zmiany nacisków powierzchniowych zachodzą w zależności od strefy pomiarowej, z której została pobrana próbka (rys. 7.7). Największe wartości nacisków wystąpiły w III strefie pomiarowej, a więc w okolicach główki korzenia marchwi (rozdz. 6) i wynosiły przy maksymalnym obciążeniu $F'=25$ N/mm $p=1,7$ MPa. Najmniejsze wartości nacisków zmierzono w I strefie pomiarowej (w okolicach ogonka)

i wynosiły odpowiednio $p=1,47$ MPa. Zmiany nacisków powierzchniowych wzdłuż osi korzenia marchwi nie przekraczały $0,25$ MPa. W każdym przypadku zależność nacisków powierzchniowych od obciążenia miały postać funkcji asymptotycznie zbieżającej do wartości maksymalnych.



Rys. 7.6. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia przy różnych średnicach korzenia ($E_2=9,70$ MPa, II strefa pomiarowa)

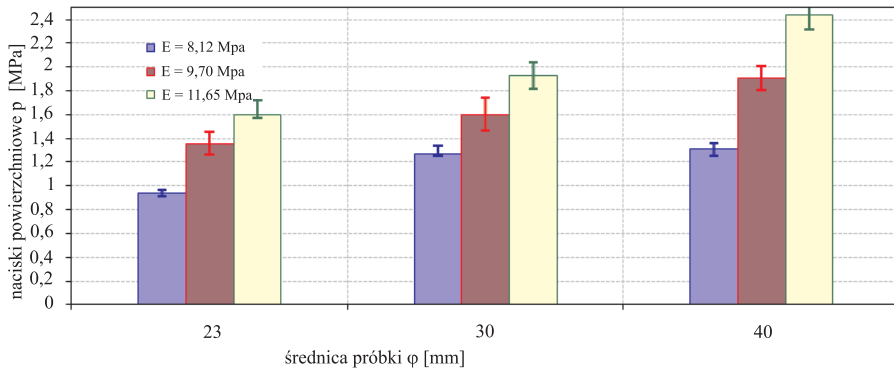
Fig. 7.6. The average experimental values of surface pressure as the function of the load for different diameter of the sample ($E_2=9,70$ MPa, II measurement zone)



Rys. 7.7. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia w różnych strefach pomiarowych ($E_1=9,70$ MPa, $\varphi_1=30$ mm)

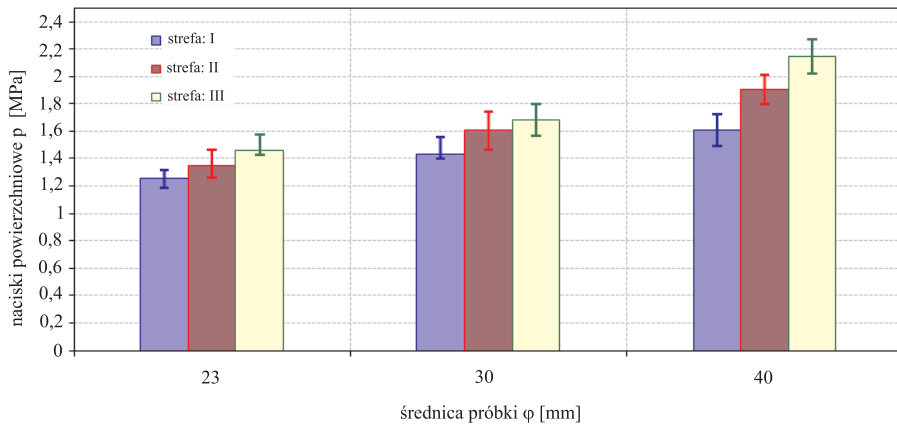
Fig. 7.7. The average experimental values of surface pressure as the function of the load for different modulus measurement zones ($E_1=9,70$ MPa, $\varphi_1=30$ mm)

Dużo interesujących informacji można uzyskać, analizując interakcje pomiędzy badanymi parametrami przy stałej wartości siły obciążającej $F'=25$ N/mm. Wzrost średnicy badanych próbek zarówno dla różnych wartości modułów sprężystości (rys. 7.8), jak i w różnych strefach pomiarowych (rys. 7.9) powodował wzrost nacisków powierzchniowych. Przy tym większe wartości nacisków powierzchniowych notowano przy wyższych wartościach modułów sprężystości oraz w miejscach pobrania próbek bardziej oddalonych od ogonka korzenia marchwi (I strefa pomiarowa).



Rys.7.8. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych przy różnych średnicach próbek ϕ oraz modułów sprężystości E ($F'=25$ N/mm, II strefa pomiarowa)

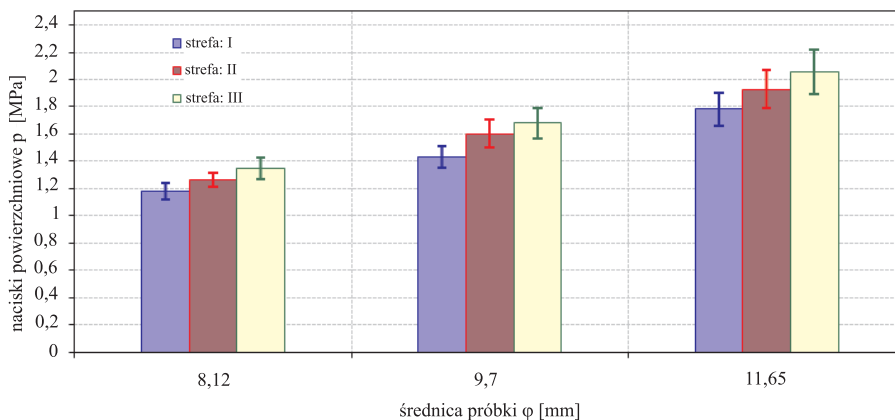
Fig. 7.8. The average experimental values of surface pressure for different diameter of the sample ϕ and modulus of elasticity E ($F'=25$ N/mm, II measurement zone)



Rys. 7.9. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych przy różnych średnicach próbek ϕ oraz stref pomiarowych ($E_2=9,70$ MPa, $F'=25$ N/mm)

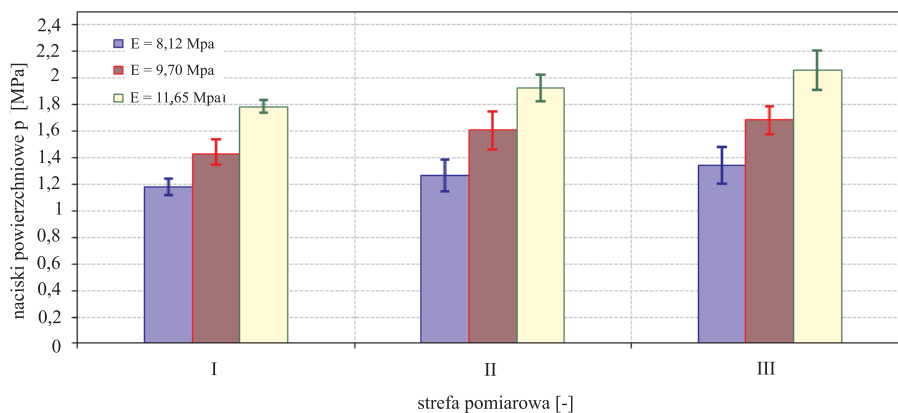
Fig. 7.9. The average experimental values of surface pressure for different diameter of the sample ϕ and measurement zones ($E_2=9,70$ MPa, $F'=25$ N/mm)

Zmiany wartości nacisków powierzchniowych w zależności od modułów sprężystości w różnych strefach pomiarowych przedstawione są na rysunku 7.10. Wzrost modułów sprężystości w zakresie od $E_1=8,12$ MPa dla odmiany Merida do $E_3=11,65$ MPa dla odmiany Major przy jednakowej średnicy $\varphi_2=30$ mm powoduje wzrost nacisków powierzchniowych w granicach od 1,18 do 2,05 MPa. Przy tym zmiany wartości nacisków powierzchniowych w obrębie jednego korzenia marchwi (w trzech strefach pomiarowych) są nieznaczne i mieszczą się w przedziale od 0,18 MPa dla modułu sprężystości $E_1=8,12$ MPa dla odmiany Merida do 0,25 MPa dla modułu sprężystości $E_2=9,70$ MPa (rys. 7.11).



Rys. 7.10. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych różnych modułów sprężystości E oraz stref pomiarowych. ($\varphi_2=30$ mm, $F'=25$ N/mm)

Fig. 7.10. The average experimental values of surface pressure for different modulus of elasticity E and measurement zones ($\varphi=30$ mm, $F'=25$ N/mm)

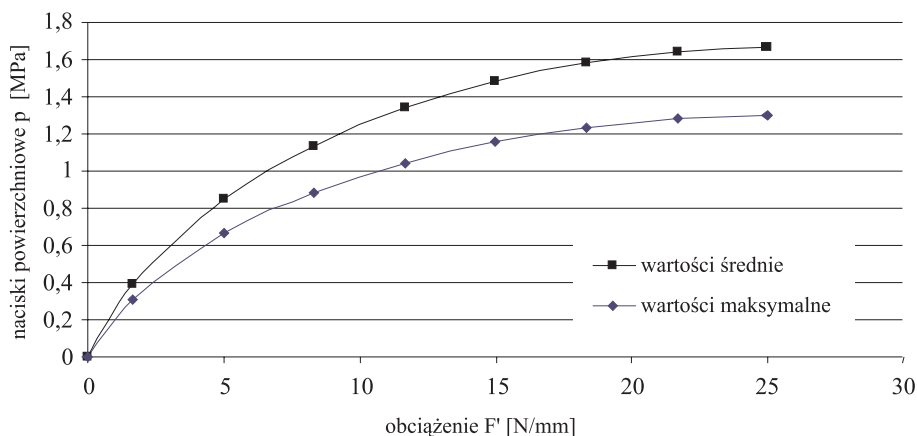


Rys. 7.11. Średnie doświadczalne wartości nacisków powierzchniowych w różnych strefach pomiarowych oraz do różnych modułów sprężystości E ($\varphi=30$ mm, $F'=25$ N/mm)

Fig. 7.11. The average experimental values of surface pressure for different measurement zones and modulus of elasticity E ($\varphi=30$ mm, $F'=25$ N/mm)

Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku

Pomiary rozkładów nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.3.2 przy zastosowaniu przyrządu pomiarowego wykorzystującego metodę elastoptyczną. Otrzymane wyniki pomiarów zostaną przedstawione na przykładzie próbki korzenia marchwi odmiany Karotan o średnicy $\phi_k=30$ mm, własnościach wytrzymałościowych $E=9,7$ MPa, $\nu=0,475$, wyciętej z II strefy pomiarowej. Przebieg zmian średnich i maksymalnych nacisków powierzchniowych jako funkcji narastającego obciążenia badanej odmiany korzenia marchwi przedstawiono na wykresie (rys. 7.12). Z każdego korzenia marchwi wycięto 5 próbek, w których wyznaczono rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku. Następnie korzystając ze specjalnie napisanego programu, uśredniono wyniki, zwracając szczególną uwagę na długość powierzchni styku oraz wartości maksymalne nacisków.

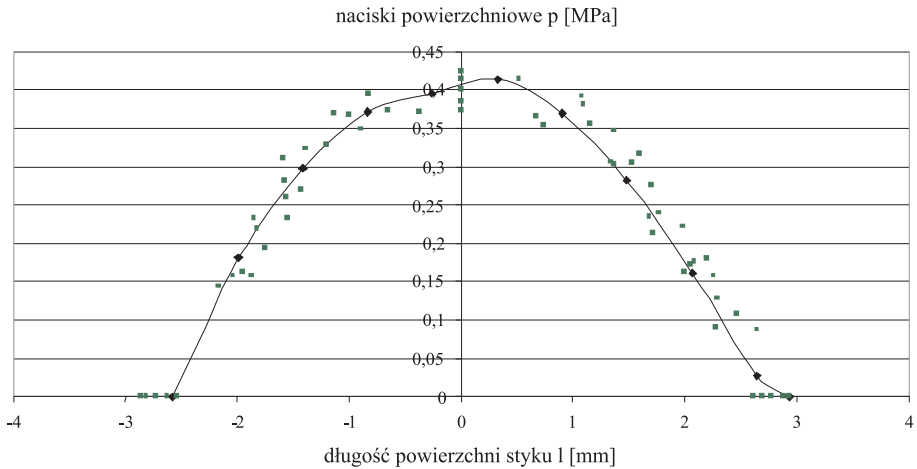


Rys. 7.12. Maksymalne i średnie wartości doświadczalne nacisków powierzchniowych korzenia marchwi jako funkcji obciążenia

Fig. 7.12. The maximum and average experimental values of the surface pressure for the carrot root as the function of the load

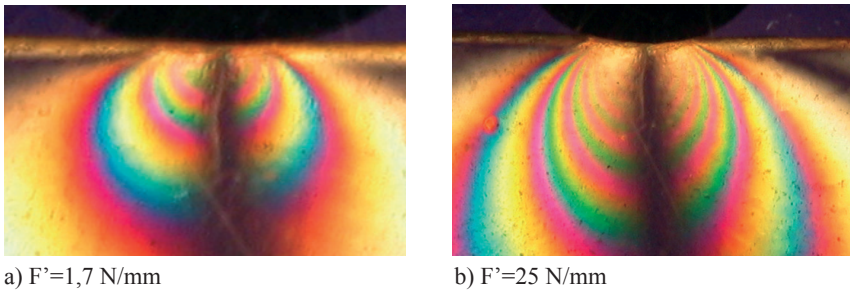
Rysunek 7.13 przedstawia rozkład nacisków powierzchniowych próbki przy niskiej wartości obciążenia $F'=1,7$ N/mm. W tym zakresie obciążeń kształt krzywej przedstawiającej rozkład nacisków wzdłuż powierzchni styku jest zbliżony do rozkładu eliptycznego. Wyraźnie jest zaznaczona wartość maksymalnych nacisków położona w okolicach środka powierzchni styku. Na obrazie elastoptycznym (rys. 7.14a) maksymalny rząd izochromy $m=4$ znajduje się na osi pionowej próbki. Całkowita długość powierzchni styku przy tym obciążeniu wynosi $l=2,1$ mm. Inaczej wygląda rozkład nacisków przy maksymal-

nych wartościach obciążenia (rys. 7.15). Pojawia się wyraźna strefa w przybliżeniu stałej wartości nacisków w okolicach osi pionowej połączenia (plateau). Na obrazie elastoop-tycznym w osi strefy styku widoczny jest obszar o stałej wartości rzędu izochromy $m=11$, natomiast w skrajnych strefach styku pojawia się zagęszczenie izochrom (rys. 7.14b).



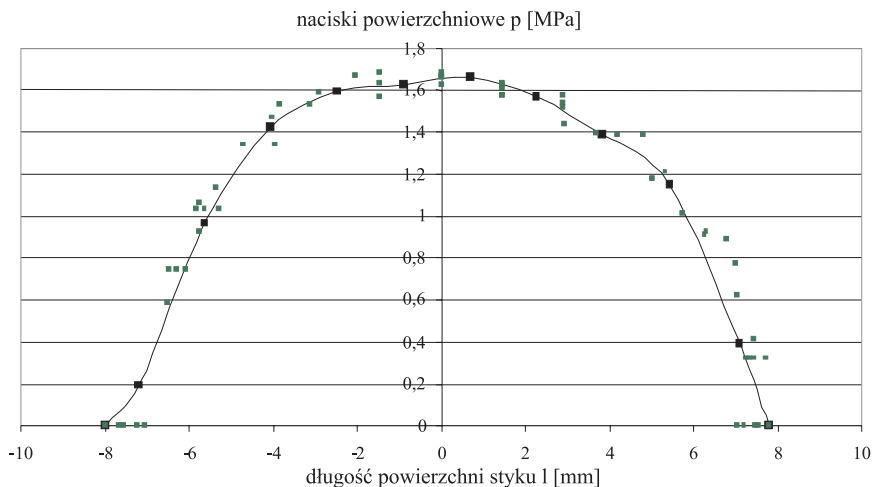
Rys. 7.13. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku elementu roboczego głowicy obciążającej z powierzchnią badanej próbki ($F'=1,7$ N/mm)

Fig. 7.13. The distribution of surface pressures along the surface of the contact point of the loading head operating element with the surface of studied sample ($F'=1,7$ N/mm)



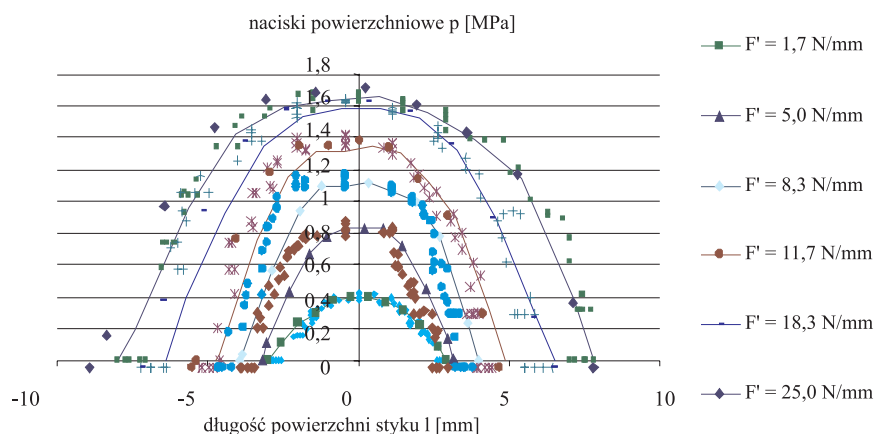
Rys. 7.14. Obrazy izochrom całkowitych w płycie pomiarowej przy wyznaczaniu nacisków powierzchniowych

Fig. 7.14. Pictures of the isochroma pattern in the measuring plate during the determining of surface pressures



Rys. 7.15. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku elementu roboczego głowicy obciążającej z powierzchnią badanej próbki ($F' = 25 \text{ N/mm}$)
 Fig. 7.15. The distribution of surface pressures along the surface of the contact point of the loading head operating element with the surface of studied sample ($F' = 25 \text{ N/mm}$)

Na rysunku 7.16 przedstawiono zbiorcze wykresy rozkładów nacisków powierzchniowych uzyskane w pełnym zakresie obciążenia. Długość powierzchni styku zmienia się w zakresie od 4,2 mm przy obciążeniu $F'_1 = 1,7 \text{ N/mm}$ do 15,2 mm przy obciążeniu $F'_2 = 25 \text{ N/mm}$.



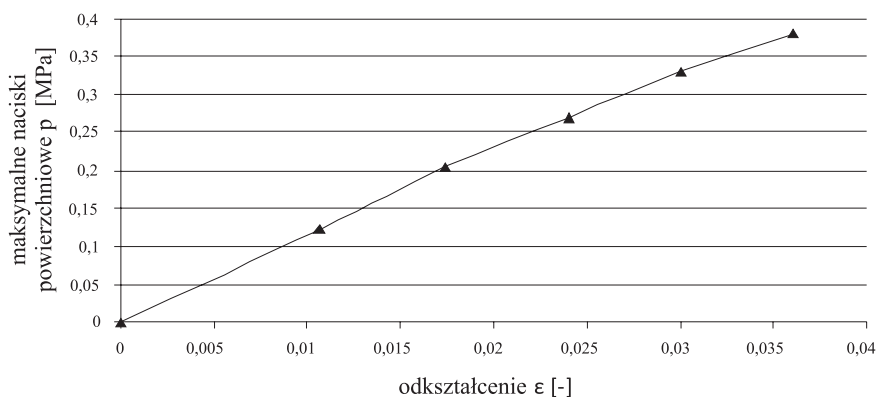
Rys. 7.16. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż linii styku elementu roboczego głowicy obciążającej z badaną próbką przy różnych wartościach siły obciążającej
 Fig. 7.16. The distribution of surface pressures along the surface of the contact point of the loading head operating element with the surface of studied sample for different value of the load

7.2.2. Model tarczowy MES (COSMOS/M)

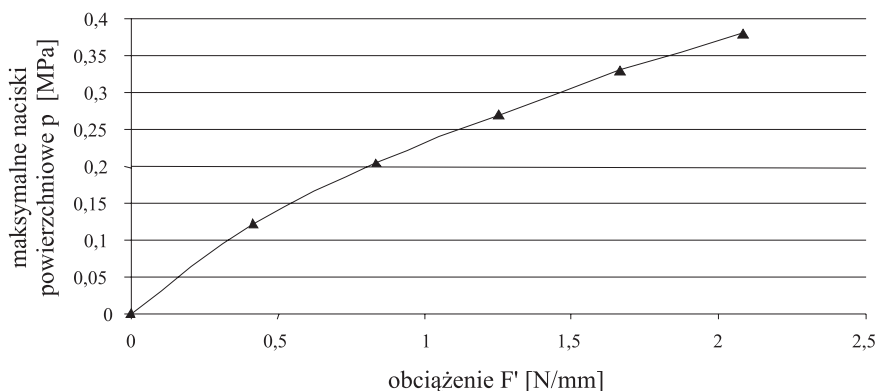
Naciski powierzchniowe w przypadku dyskretnego modelu korzenia marchwi zbudowanego w oparciu o program COSMOS/M wyznaczono dla płaskiego kształtu elementu obciążającego. Wszystkie wyniki uzyskano przy obciążeniu przypadającym na jednostkę długości mieszczącym się w przedziale od $F'=0$ do 2,0 N/mm, a więc w początkowej fazie obciążenia. Taki zakres obciążenia wynika z własności przyjętego modelu dyskretnego i nie stanowi ograniczenia co do ogólnego charakteru wyników.

Na rysunku 7.17 przedstawiono wykres maksymalnych nacisków powierzchniowych w funkcji odkształcenia. W rozpatrywanym zakresie obciążenia zależność nacisków powierzchniowych od odkształcenia ma przebieg zbliżony do liniowego. Największe wartości maksymalnych nacisków powierzchniowych wynoszą $p=0,38$ MPa przy odkształceniu $\varepsilon=0,036$.

Wygodnie jest analizować rozkłady maksymalnych nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia przypadającego na jednostkę długości korzenia marchwi (rys. 7.18).



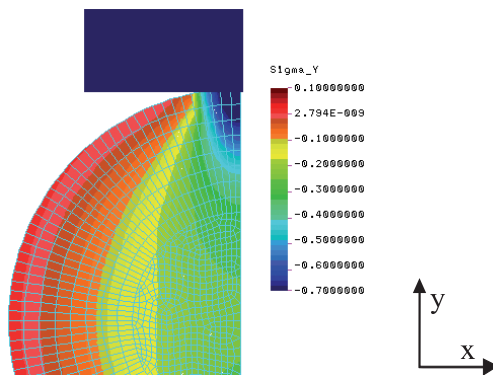
Rys. 7.17. Naciski powierzchniowe jako funkcja odkształcenia – model tarczowy
Fig. 7.17. The surface pressures as the function of strain – the disc model



Rys. 7.18. Naciski powierzchniowe jako funkcja obciążenia F' – model tarczowy
Fig. 7.18. The surface pressures as the function of the load F' – the disc model

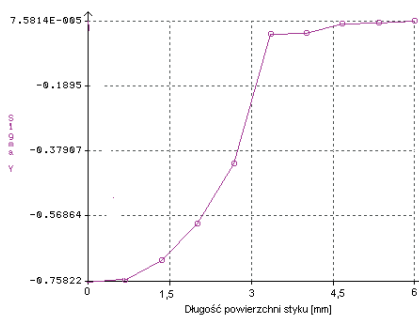
Przy obciążeniu $F' = 2,0 \text{ N/mm}$ wyznaczono mapy naprężeń σ_y w kierunku zgodnym z kierunkiem działania siły. Punkty o stałej wartości naprężenia rozmieszczone są eliptycznie o wartościach maksymalnych położonych w okolicach punktu przyłożenia obciążenia (rys. 7.19).

Maksymalna wartość naprężeń σ_y wynosi $0,38 \text{ MPa}$, a obszar, w którym naprężenia nie przekraczają wartości $0,1 \text{ MPa}$ zajmują jedynie około $0,3$ powierzchni przekroju.



Rys. 7.19. Mapa naprężeń σ_y przy obciążeniu $F' = 2 \text{ N/mm}$ – model tarczowy
 Fig. 7.19. The map of stresses σ_y at the load $F' = 2 \text{ N/mm}$ – the disk model

Na podstawie mapy naprężeń σ_y przedstawionych na rysunku 7.19 wykonano zgodnie z procedurą przedstawioną w rozdziale 5.1.3 rozkład nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku modelu korzenki z elementem obciążającym (rys. 7.20).



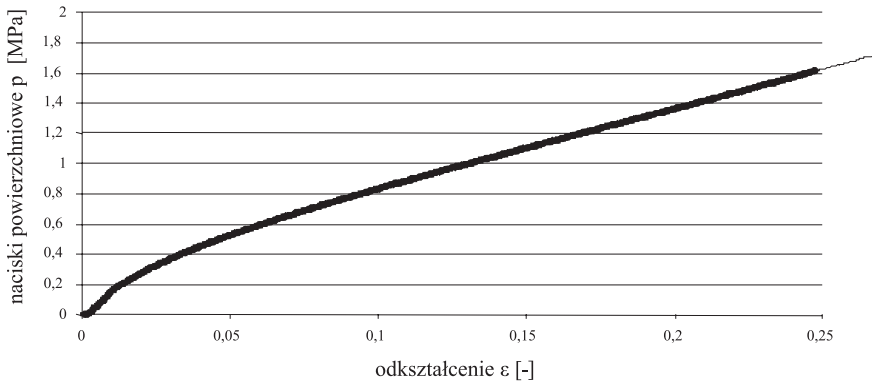
Rys. 7.20. Rozkłady naprężeń σ_y wzdłuż powierzchni styku modelu z elementem obciążającym, przy obciążeniu $F' = 2 \text{ N/mm}$ – model tarczowy

Fig. 7.20. The distribution of stresses σ_y along the surface of the contact point of the loading head element with the model at the load $F' = 1,7 \text{ N/mm}$ – the disk model

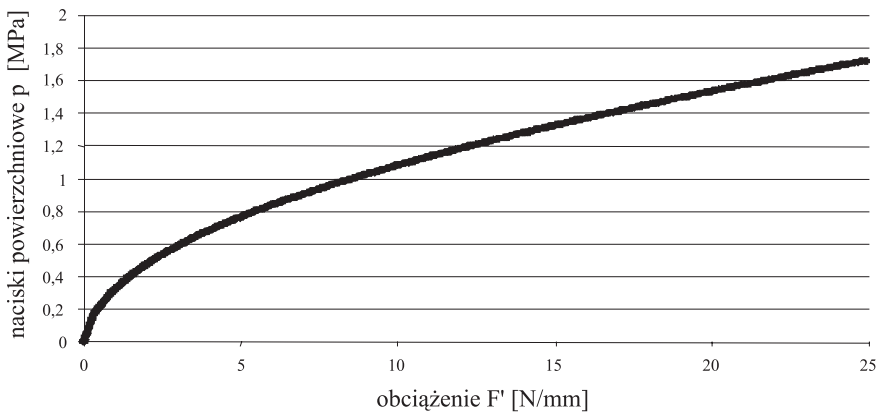
Przy współpracy elementu obciążającego o kształcie powierzchni płaskiej z modelem korzenia marchwi pojawia się rozkład eliptyczny z wyraźnie zaznaczonym odcinkiem styku wynoszącym $\Delta l = 68$ mm.

7.2.3. Model 3D MES (Abaqus)

Korzystając z programu Abaqus, wyznaczono rozkłady nacisków powierzchniowych w trójwymiarowym modelu korzenia marchwi zbudowanego zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 5.2 przy współpracy z płaskim elementem obciążającym. Wyznaczono zależność nacisków powierzchniowych od wielkości odkształcenia przekroju poprzecznego modelu korzenia marchwi (rys. 7.21) oraz zależność nacisków powierzchniowych od obciążenia (rys. 7.22).



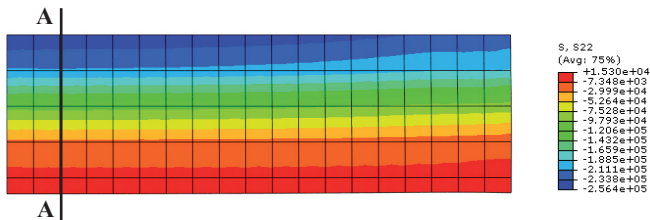
Rys. 7.21. Naciski powierzchniowe p jako funkcja odkształcenia ε – model 3D
Fig. 7.21. The surface pressures as the function of strain – the 3D model



Rys. 7.22. Naciski powierzchniowe p jako funkcja obciążenia F' – model 3D
Fig. 7.22. The surface pressures as the function of the load F' – the 3D model

W całym zakresie obciążenia widoczny jest nieliniowy przebieg rozkładu nacisków powierzchniowych w funkcji obciążenia i odkształcenia. Mimo wprowadzenia danych dotyczących właściwości wytrzymałościowych korzenia marchwi w postaci nieliniowej zależności naprężenia od odkształcenia, rozkład nacisków powierzchniowych nie zbliża się do wartości odkształcenia, przy którym wyznaczane są dopuszczalne wartości nacisków powierzchniowych. W modelu o przyjętych własnościach wytrzymałościowych maksymalne naciski powierzchniowe wynosiły 1,81 MPa przy odkształceniu $\epsilon=0,25$ odpowiadającemu obciążeniu $F'=25$ N/mm.

Dla wybranych wartości odkształcenia uzyskano obrazy naprężeń σ_y w kierunku działania obciążenia, które pozwoliły na wyznaczenie mapy naprężeń σ_y w płaszczyźnie styku modelu korzenia marchwi z elementem obciążającym. Wielkości naprężeń σ_y w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania siły (w płaszczyźnie styku modelu z elementem obciążającym) potraktowano jako wielkości nacisków powierzchniowych. Na rysunku 7.23 przedstawiono przykładową mapę nacisków powierzchniowych uzyskaną przy odkształceniu $\epsilon=0,013$.



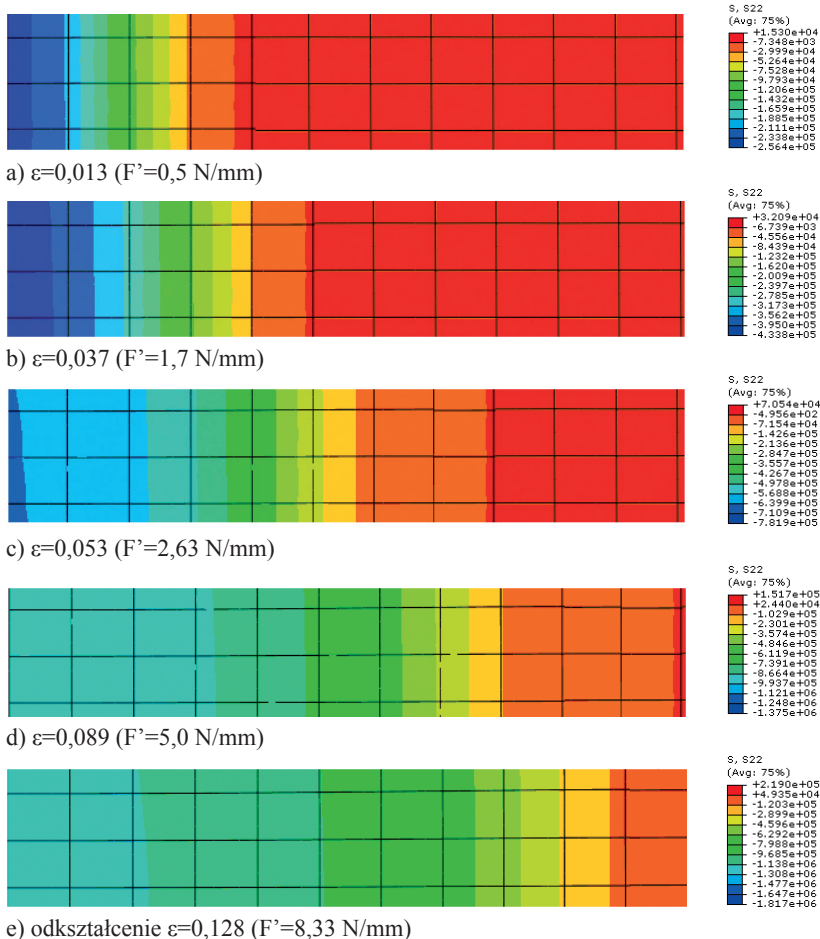
Rys. 7.23. Mapa nacisków na powierzchni styku modelu korzenia marchwi z elementem obciążającym do odkształcenia $\epsilon=0,013$ ($F'=0,5$ N/mm) – model 3D

Fig. 7.23. The map of the surface pressures along the surface of the contact point of the loading head element with the model at the strain $\epsilon=0,013$ ($F'=0,5$ N/mm) – the 3D model

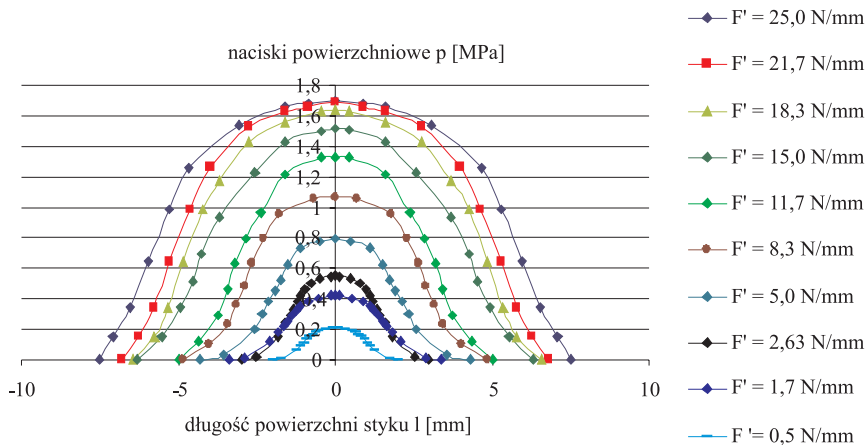
Mapy nacisków powierzchniowych uzyskane przy różnych wielkościach odkształceń przekroju poprzecznego pozwoliły na wyznaczenie rozkładów nacisków powierzchniowych wzdłuż linii styku elementu obciążającego z modelem korzenia marchwi w przekroju A-A prostopadłym do osi korzenia (rys. 7.24).

Rozkłady nacisków powierzchniowych w okolicach powierzchni styku elementu obciążającego z modelem korzenia marchwi mają rozkład eliptyczny o ekstremum leżącym na osi pionowej modelu oraz wartościach równych zero na granicy obszaru styku elementu obciążającego z modelem (rys. 7.25).

Zwiększenie się odkształcenia przekroju poprzecznego powoduje jednoczesny wzrost pola powierzchni styku oraz maksymalnych nacisków powierzchniowych.



Rys. 7.24. Mapy nacisków na powierzchni styku modelu korzenia marchwi z elementem obciążającym w przekroju A-A przy różnych wartościach odkształcenia – model 3D
 Fig. 7.24. The maps of the surface pressures along the surface of the contact point of the loading head element with the model in A-A cross section for different value of the strain – the 3D model



Rys. 7.25. Rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku modelu korzenia marchwi z elementem obciążającym w przekroju A-A przy różnych wielkościach obciążenia przekroju poprzecznego – model 3D

Fig. 7.24. The distributions of the surface pressures along the surface of the contact point of the loading head element with the model in A-A cross section for different load – the 3D model

7.3. Mapy i rozkłady przemieszczeń u_x , u_y i u_z

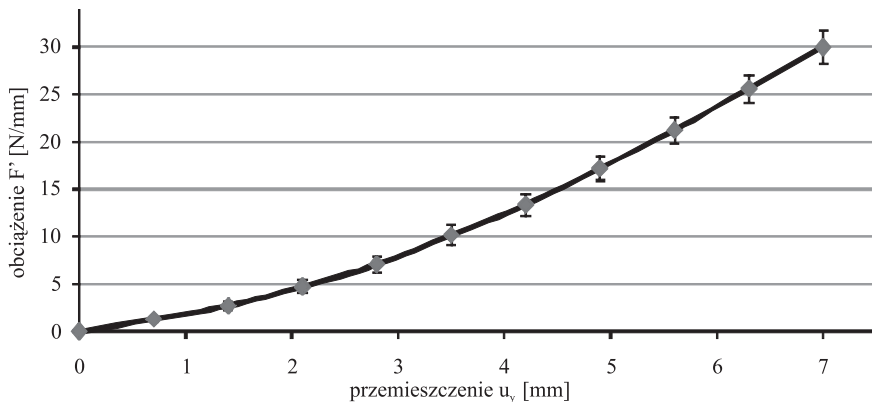
7.3.1. Obiekty rzeczywiste

Badania dotyczące pomiarów przemieszczeń wykonano dla marchwi odmiany Karotan o następujących parametrach: moduł sprężystości $E=9,70$ MPa, stała Poissona $\nu=0,475$, średnica zewnętrzna korzenia marchwi $\varphi_k=30$ mm, średnia rdzenia $\varphi_r=15$ mm. Próbkę wycięto z okolic środka korzenia, a więc z II strefy pomiarowej.

Przemieszczenie jako funkcja obciążenia

Najważniejszym, a jednocześnie stosunkowo łatwym do wyznaczenia parametrem określającym stopień dopasowania modelu MES do obiektu rzeczywistego jest zgodność przebiegu procesu ściskania opisanego przez zależność obciążenia od przemieszczenia górnego elementu obciążającego u_y .

Wykres przemieszczenia u_y od obciążenia F' (rys. 7.26) próbki korzenia marchwi w teście promieniowego ściskania został wykonany zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.4.1.



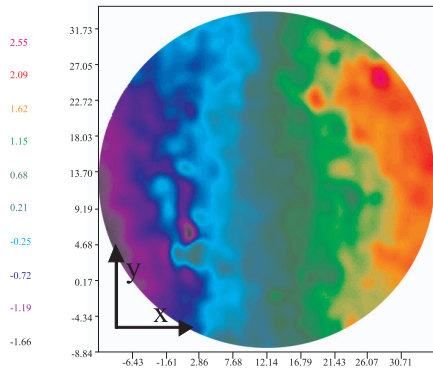
Rys. 7.26. Zależność przemieszczenia u_y od obciążenia F'
 Fig. 7.26. Correlation of the displacement u_y with the load F'

Mapy przemieszczeń i rozkłady przemieszczeń wykonane przy użyciu metody ESPI

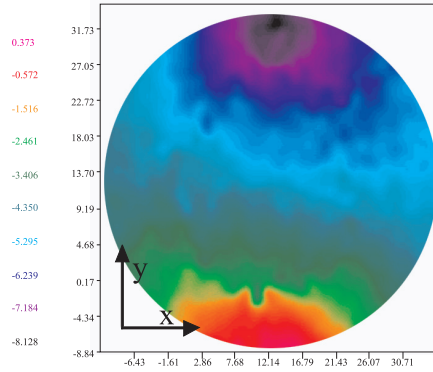
Wyniki przemieszczeń uzyskane za pomocą metody interferometrii plamkowej (rozdz. 6.4.1) nie były poddawane obróbce statystycznej ze względu na specyfikę prowadzenia pomiarów oraz formę uzyskanych wyników. Zastosowany przyrost obciążenia wynoszący $\Delta F' = 0,01$ N/mm stwarzał sytuację, w której uzyskanie powtarzalności wyników było prawie niemożliwe. Ponadto obróbka statystyczna wyników przedstawionych w formie map przemieszczeń była trudna do przeprowadzenia. Częściowe wyniki pomiarów rozkładów przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi zostały przedstawione w publikacji autora [Stopa i Romański 2003].

Na rysunku 7.27 przedstawiono mapy przemieszczeń u_y i u_x przekroju poprzecznego korzenia (rys. 7.27a i b) wykonane przy płaskiej powierzchni styku głowicy wymuszającej z powierzchnią próbki. Przedstawione mapy pozwalają nie tylko na wyznaczenie wartości przemieszczeń w poszczególnych punktach przekroju, ale również na rozkład przemieszczeń przekroju poprzecznego wzdłuż wybranych kierunków (rys. 7.28). Każdej barwie pojawiającej się na powierzchni mapy przemieszczeń odpowiada określona wartość przemieszczenia.

Analizując mapę przemieszczeń w kierunku osi Y, można zauważyć, że punkty o stałych wartościach u_y (rys. 7.27a) rozmieszczone są koncentrycznie wokół punktów podparcia oraz przyłożenia obciążenia. W okolicach osi poziomej próbki występuje strefa przemieszczeń o stałej wartości. Obraz jest symetryczny względem osi pionowej, co świadczy o prawidłowym podparciu próbki oraz zachowaniu założonego kierunku działania siły. Obszary o stałych wartościach przemieszczenia u_x w kierunku prostopadłym do kierunku działania siły (rys. 7.27b) układają się równoległe do osi pionowej próbki. W okolicach osi pionowej przemieszczenia u_x mają wartości zbliżone do zera. Po obu stronach próbki przemieszczenia osiągają wartości maksymalne różniące się jedynie znakiem.



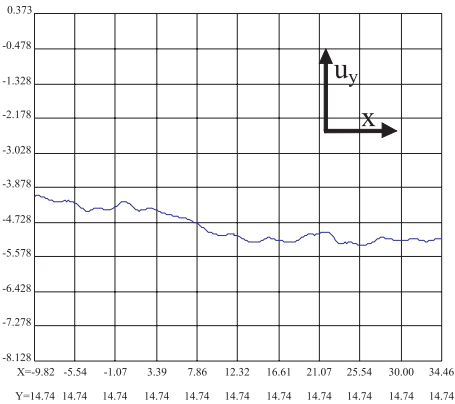
a) przemieszczenia u_y
a) displacements u_y



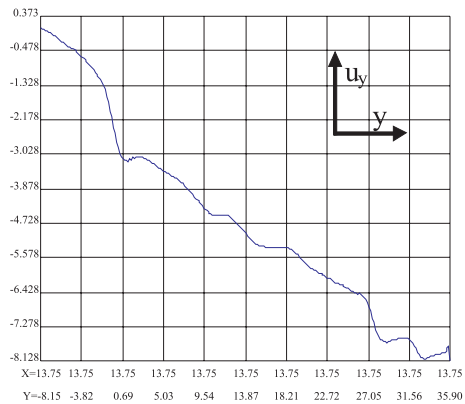
b) przemieszczenia u_x
b) displacements u_x

Rys. 7.27. Mapy przemieszczeń u_y i u_x przekroju poprzecznego korzenia marchwi
Fig. 7.27. The maps of displacements u_y and u_x for the cross section of the carrot root

Spostrzeżenia te są potwierdzone przez rozkłady przemieszczeń wykonane wzdłuż dwóch wzajemnie prostopadłych osi na powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi (rys. 7.28). Maksymalna wartość przemieszczenia u_y wzdłuż osi pokrywającej się z kierunkiem działania siły wynosi ok. 8 μm . Rozkład przemieszczeń u_y w kierunku pionowym w warstwie kory i rdzenia (rys. 7.28a) ma przebieg malejący, a zaburzenia pojawiają się jedynie na granicach warstwy rdzenia i kory oraz w okolicach podpory. Wzdłuż osi poziomej (rys. 7.28b) przemieszczenia u_y mają w przybliżeniu stałą wartość.



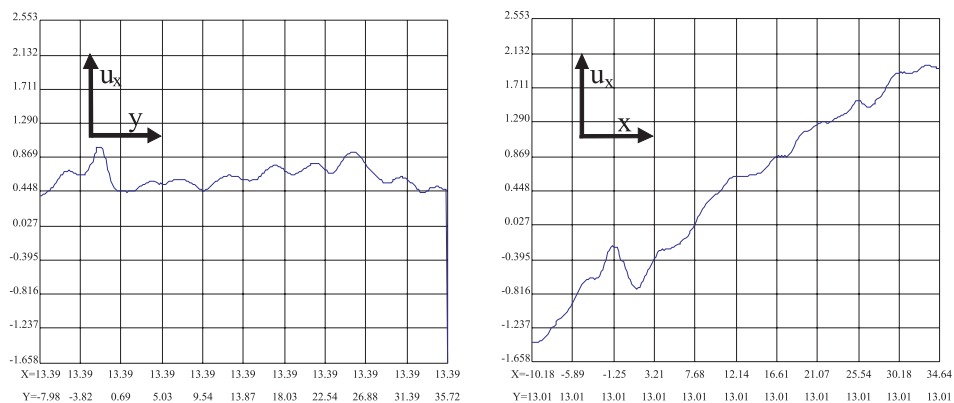
a) rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi X dla współrzędnej $y=15$ mm
a) the distributions of displacements u_y in the X direction for $y=15$ mm



b) rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi Y dla współrzędnej $x=15$ mm
b) the distributions of displacements u_y in the direction Y for $x=15$ mm

Rys. 7.28. Rozkłady przemieszczeń u_x przekroju poprzecznego korzenia marchwi
Fig. 7.28. The distributions of displacements u_y for the cross section of the carrot root

Przemieszczenia u_x w kierunku osi pionowej (rys. 7.29a) mają wartości zbliżone do zera, natomiast wzdłuż osi poziomej (rys. 7.29b) warstwa kory i rdzenia przemieszcza się równomiernie w dwóch wzajemnie przeciwnych kierunkach równoległych do osi poziomej.



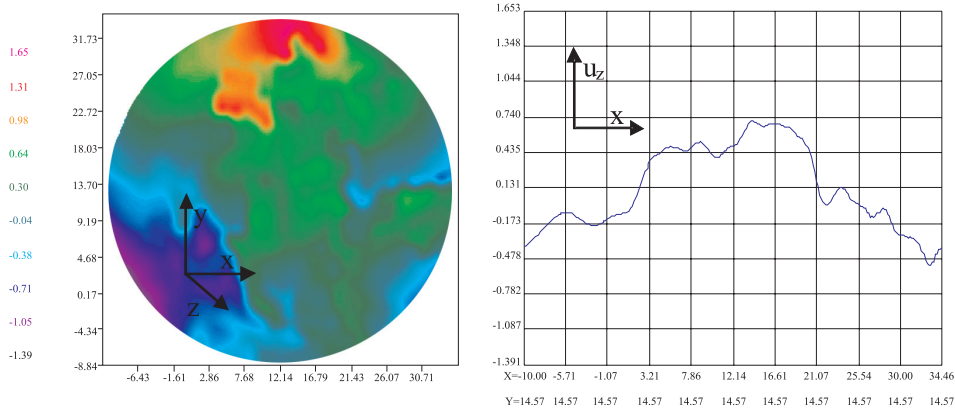
a) rozkład przemieszczeń u_x w kierunku osi Y dla współrzędnej $x=15$ mm
a) the distribution of displacements u_x in the Y direction for the $x=15$ mm

b) rozkład przemieszczeń u_x w kierunku X dla współrzędnej $y=15$ mm
b) the distribution of displacements u_x in the direction X for the $y=15$ mm

Rys. 7.29. Rozkłady przemieszczeń u_x przekroju poprzecznego korzenia marchwi
Fig. 7.29. The distributions of displacements u_x for the cross section of the carrot root

Przemieszczenia u_z w kierunku osi prostopadłej do powierzchni przekroju poprzecznego (rys. 7.30) miały stosunkowo niskie wartości (maksymalne dochodziły do $1,5 \mu\text{m}$, ale na większości powierzchni nie przekraczały $0,6 \mu\text{m}$) i nieregularny rozkład na powierzchni przekroju. Szczególnie dobrze jest to widoczne na przestrzennej mapie przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi Z (rys. 7.31). Obraz przemieszczeń u_z przedstawiony za pomocą mapy i rozkładu przemieszczeń (rys. 7.30) wskazuje na nieco inne zachowanie się warstwy kory i rdzenia pod wpływem obciążenia – wyraźnie widoczne jest zaburzenie rozkładu przemieszczeń na granicy pomiędzy tymi warstwami.

Istotną wskazówką potwierdzającą prawidłowe podparcie i obciążenie próbki jest mapa przemieszczeń u_y i u_x (rys. 7.32) z naniesionymi wektorami przemieszczeń. Przedstawione w postaci strzałek wektory pokazują zarówno wartość, jak i kierunek przemieszczenia uogólnionego. W okolicach osi pionowej próbki wektory przemieszczeń skierowane są równoległe do kierunku działania siły. Można powiedzieć, że na tym obszarze występuje jednorodny stan naprężenia. Na obszarach położonych bliżej krawędzi nieobciążonej zmienia się wypadkowy kierunek przemieszczeń i w warstwie kory, w pobliżu swobodnych krawędzi, wektor przemieszczeń skierowany jest pod kątem 45° w stosunku do osi pionowej.

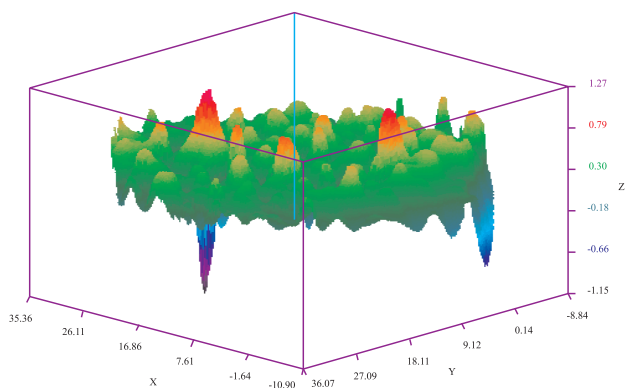


a) mapa przemieszczeń u_z
 a) map of displacements u_z

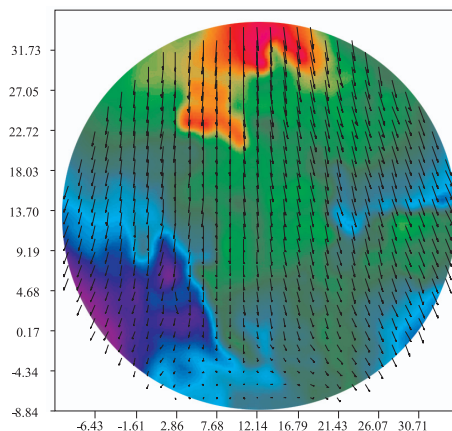
b) rozkład przemieszczeń u_z w kierunku osi X
 dla współrzędnej $y = 15$ mm
 b) the distribution of displacements u_z in the X
 direction for the $y = 15$ mm

Rys. 7.30. Mapa i rozkład przemieszczeń u_z przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi Z

Fig. 7.30. The map and distributions of displacements u_z in the X direction for the cross section of the carrot root



Rys. 7.31. Przestrzenna mapa przemieszczeń u_z przekroju poprzecznego korzenia marchwi
 Fig. 7.31. The 3D map of displacements u_z for the transverse cross section of the carrot root

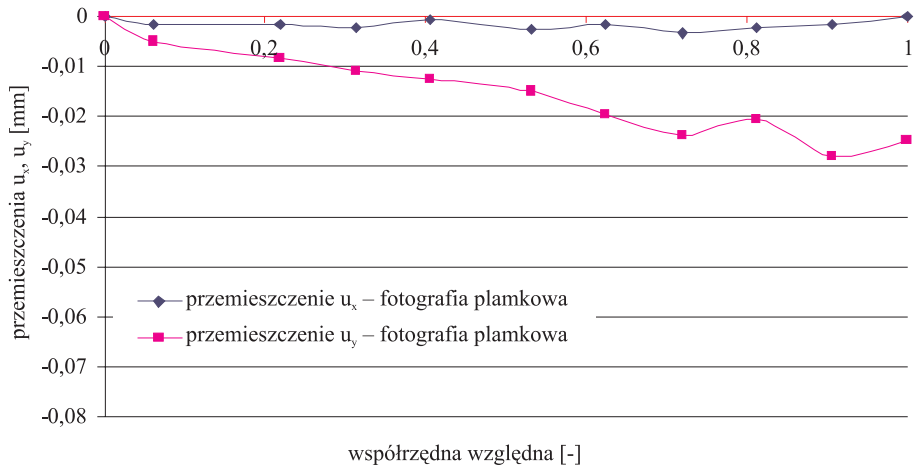


Rys. 7.32. Wektory przemieszczeń u_x i u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi
 Fig. 7.32. The vectors of displacements u_x and u_y for the cross section of the carrot root

Rozkłady przemieszczeń wykonane przy użyciu fotografii plamkowej

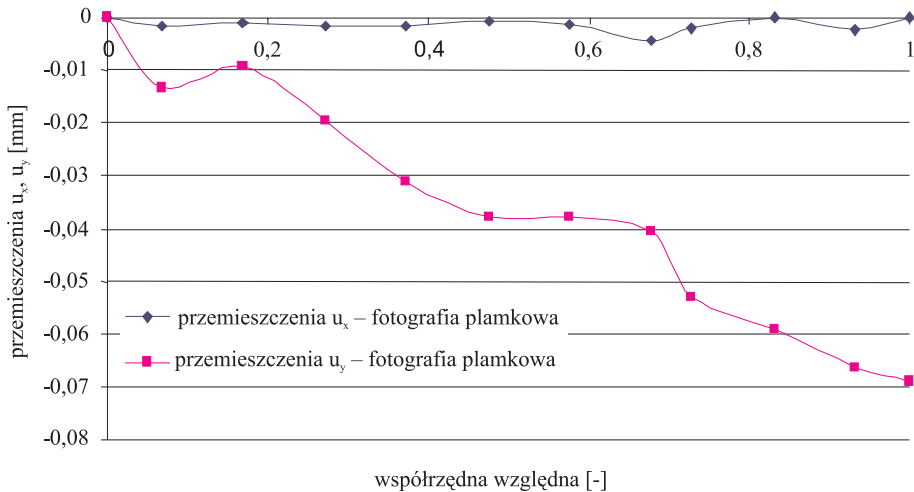
Zastosowanie fotografii plamkowej umożliwia wyznaczenie rozkładów przemieszczeń wzdłuż wybranych kierunków przy maksymalnych przemieszczeniach 0,07 mm, a więc o rząd większych niż w przypadku pomiarów metodą interferometrii plamkowej (rozd. 6.4.2). Pomiary wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdz. 6.4.2 przy przyroście obciążenia wynoszącym $\Delta F'=0,1$ N/mm i $\Delta F'=0,2$ N/mm.

Przy obu wartościach przyrostów obciążenia przebieg zmian przemieszczeń u_x i u_y przekroju poprzecznego korzenia potwierdzał wyniki uzyskane metodą interferometrii plamkowej (ESPI). W przekroju zgodnym z kierunkiem obciążenia przemieszczenia u_x miały wartość zbliżoną do zera, natomiast przemieszczenia u_y wzrastały od zera do wartości maksymalnych, które wynosiły dla $\Delta F'=0,1$ N/mm $u_y=0,029$ mm (rys. 7.33), a dla $\Delta F'=0,2$ N/mm $u_y=0,07$ mm (rys. 7.34).



Rys. 7.33. Rozkłady przemieszczeń u_x i u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi pionowej Y oraz w kierunku osi poziomej X we współrzędnych względnych przy obciążeniu $\Delta F=0,1 \text{ N/mm}$

Fig. 7.33. The distributions of displacements u_x and u_y for the cross section of the carrot root in the direction of the vertical axis Y and in the direction of the horizontal axis X in the relative co-ordinates at the load $\Delta F=0,1 \text{ N/mm}$



Rys. 7.34. Rozkłady przemieszczeń u_x i u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi pionowej Y oraz w kierunku osi poziomej X we współrzędnych względnych przy obciążeniu $F=0,2 \text{ N/mm}$

Fig. 7.34. The distributions of displacements u_x and u_y for the cross section of the carrot root in the direction of the vertical axis Y and in the direction of the horizontal axis X in the relative co-ordinates at the load $\Delta F=0,2 \text{ N/mm}$

Rozkłady przemieszczeń w pełnym zakresie obciążenia

Rozkłady przemieszczeń przy obciążeniu z zakresu $F'=8,3$ N/mm do $F'=25,0$ N/mm wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.4.3 Pomiary powtórzone sześciokrotnie do każdej wartości siły obciążającej, a wyniki poddano analizie statystycznej (tab. 7.15).

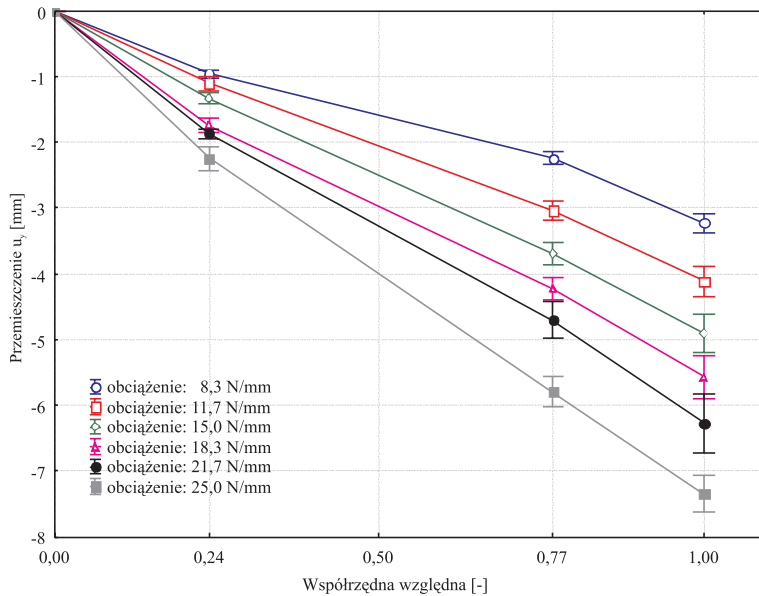
Tabela 7.15

Table 7.15

Wyniki analizy statystycznej dla przemieszczeń u_y [mm]
The results of the statistical analysis for displacements u_y [mm]

Czynnik Factor	Wartość Value	N	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% confidence interval	
Obciążenie F' [N/mm] Load F' [N/mm]	8,3	24	1,60	1,25	0,25	1,07	2,13
	11,7	24	2,06	1,64	0,33	1,37	2,76
	15,0	24	2,48	1,97	0,40	1,64	3,31
	18,3	24	2,88	2,21	0,45	1,95	3,81
	21,7	24	3,21	2,50	0,51	2,15	4,26
	25,0	24	3,84	2,95	0,60	2,59	5,09
Współrzędna względna [-] Relative coordinate [-]	0	36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,25	36	1,54	0,46	0,07	1,38	1,69
	0,75	36	3,95	1,17	0,19	3,55	4,34
	1	36	5,23	1,40	0,23	4,76	5,71

W miarę zwiększania obciążenia rozkład przemieszczeń u_y wzdłuż przekroju poprzecznego korzenia marchwi (rys. 7.35) przyjmuje postać zbliżoną do funkcji liniowej. Maksymalna wartość przemieszczenia u_y uzyskana przy obciążeniu odpowiadającemu wartości maksymalnej $F'=25$ N/mm wyniosła $u_y=7,4$ mm.



Rys. 7.35. Rozkłady przemieszczeń u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi pionowej Y w współrzędnych względnych przy obciążeniu w przedziale od $F'=0$ do 25 N/mm

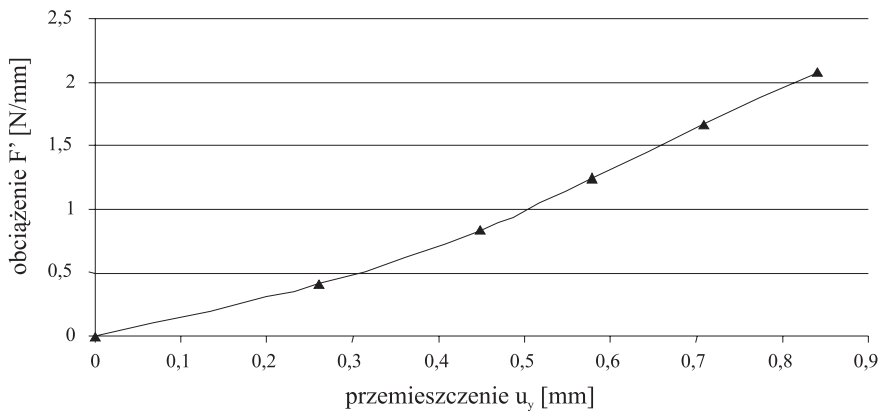
Fig. 7.35. The distributions of displacements u_y for the cross section of the carrot root in the direction of the vertical axis Y in the relative co-ordinates at the interval of loads $F'=0$ do 25 N/mm

7.3.2. Model tarczowy MES (COSMOS/M)

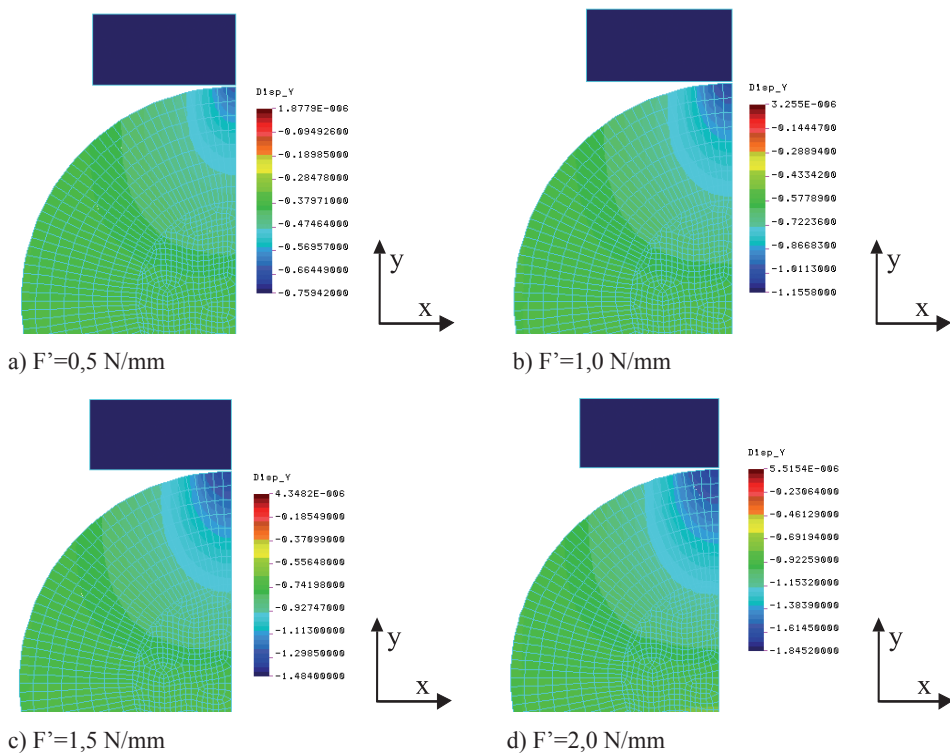
Jednym z podstawowych parametrów wskazujących na jakość dopasowania modelu MES do obiektów rzeczywistych jest zależność przemieszczenia punktu styku elementu obciążającego z modelem korzenia marchwi od obciążenia (rys. 7.36). Kolejnym jest rozkład przemieszczeń przekroju poprzecznego modelu korzenia marchwi, który może stanowić wiarygodny materiał do weryfikacji przyjętego modelu dyskretnego. Poznanie rozkładów przemieszczeń może być przydatne również przy wyznaczaniu wartości naciśków powierzchniowych, których wielkość w istotny sposób zależy od przemieszczenia punktów przekroju poprzecznego korzenia marchwi.

Na rysunku 7.37 przedstawiono mapy przemieszczeń modelu korzenia marchwi przy współpracy z płaskim elementem obciążającym przy różnych wielkościach siły obciążającej.

Punkty o stałej wartości przemieszczeń rozmieszczone są eliptycznie wokół miejsc przyłożenia obciążenia. W miarę wzrostu obciążenia zwiększeniu ulegają wartości przemieszczeń u_y , natomiast nie zmienia się charakter ich rozkładu. Przemieszczenia przekroju poprzecznego u_y wzdłuż osi prostopadłej do kierunku działania siły pokrywającym się z osią poziomą modelu mają wartość stałą.

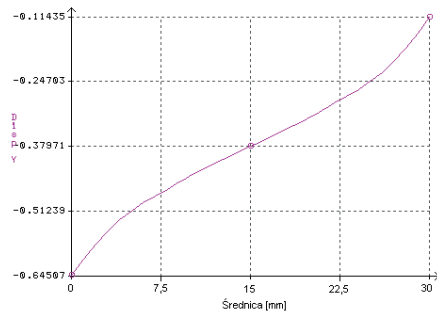


Rys. 7.36. Zależność przemieszczenia u_y od obciążenia F' – model tarczowy
 Fig. 7.36. Correlation of the displacement u_y with the load F' – the disc model

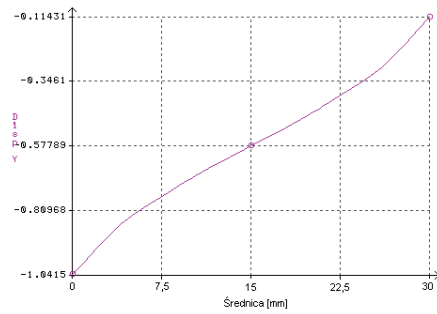


Rys. 7.37. Mapy przemieszczeń u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi – model tarczowy
 Fig. 7.37. The maps of displacements u_y for the cross section of the carrot root – the disc model

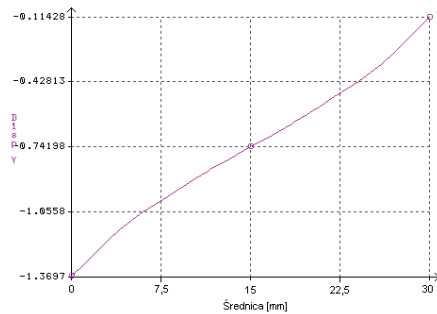
Na podstawie map przemieszczeń u_y przedstawionych na rysunku 7.37 wyznaczono rozkłady przemieszczeń u_y w przekroju pionowym pokrywającym się z kierunkiem działania obciążenia przy założeniu symetrycznego rozkładu przemieszczeń względem osi poziomej (rys. 7.38). Rozkład przemieszczeń u_y ma przebieg nieliniowy, przy czym wzrost obciążenia w zakresie niskich obciążeń powoduje zmniejszenie nieliniowości.



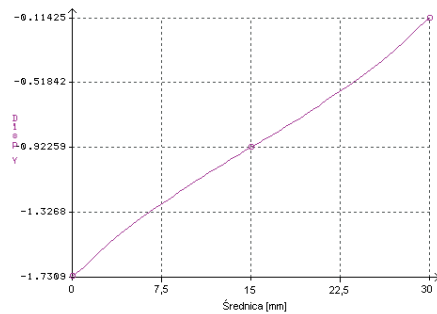
a) obciążenie $F'=0,5 \text{ N/mm}$



b) obciążenie $F'=1,0 \text{ N/mm}$



c) obciążenie $F'=1,5 \text{ N/mm}$



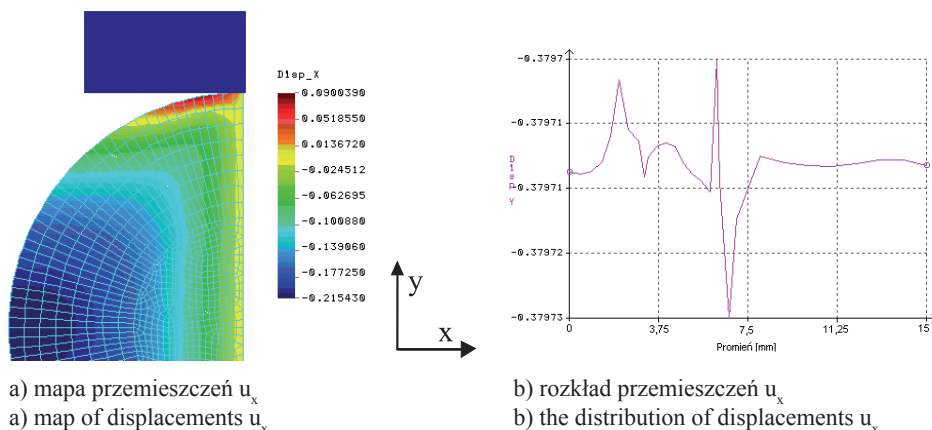
d) obciążenie $F'=2,0 \text{ N/mm}$

Rys. 7.38. Rozkłady przemieszczeń u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku pionowej osi Y – model tarczowy

Fig. 7.38. The distributions of displacements u_y for the cross section of the carrot root in the Y direction – the disc model

Mapę rozkładu przemieszczeń u_x na powierzchni przekroju poprzecznego modelu korzenia marchwi oraz rozkład przemieszczeń u_x wzdłuż przekroju pokrywającego się z kierunkiem obciążenia przedstawiono na rysunku 7.39. W wyniku oddziaływania obciążenia powstaje charakterystyczny kształt warstwic przemieszczeń u_x . W okolicach styku elementu obciążającego modelem korzenia marchwi pojawia się obszar o niskich wartościach przemieszczenia u_x rozłożonych równolegle w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia. W miarę oddalania się od punktu styku rozkład przemieszczeń u_x zmienia kierunek na równoległy do kierunku obciążenia. Wzdłuż osi pionowej przemieszczenia, zgodnie z założonymi warunkami podparcia modelu geometrycznego, są równe

zeru. W strefie styku modelu z elementem obciążającym pojawiają się przemieszczenia u_x o niskich wartościach ze znakiem przeciwnym, co może być związane z oddziaływaniem sił tarcia. Maksymalne wartości przemieszczeń u_x widoczne są na krawędzi nieobciążonej modelu w punkcie przecięcia z osią poziomą.



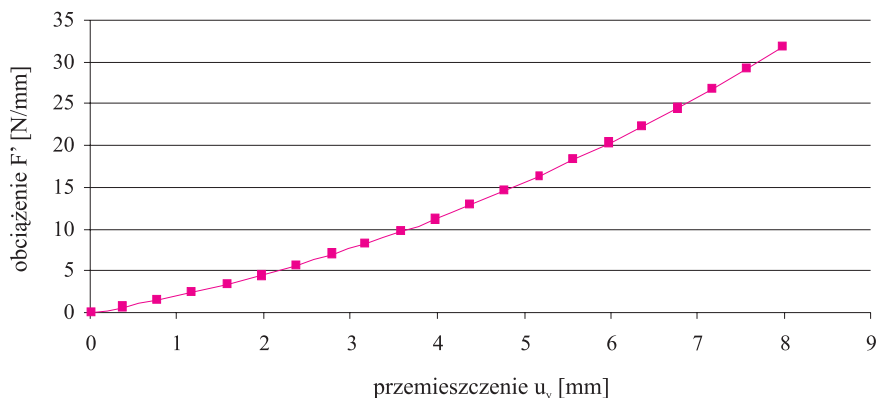
Rys. 7.39. Mapa i rozkład przemieszczeń u_x przekroju poprzecznego korzenia marchwi w kierunku osi X, przy obciążeniu $F'=2,0$ N/mm

Fig. 7.39. The map and distribution of displacements u_x in the X direction for the cross section of the carrot root at the load $F'=2,0$ N/mm

7.3.3. Model 3D MES (Abaqus)

Analizę numeryczną przyjętego modelu korzenia marchwi przeprowadzono poprzez wymuszenie przemieszczenia elementu obciążającego w zakresie od 0 do 4 mm w 400 krokach. W rezultacie uzyskano rzeczywiste maksymalne przemieszczenie elementu obciążającego o 8 mm. Odpowiadało to odkształceniu względnemu $\epsilon=0,26$, co oznaczało, że część wyników znajduje się poza wytrzymałością doraźną korzenia marchwi otrzymaną w trakcie badań obiektów rzeczywistych (rozd. 7.3.1). Analizę wyników badań numerycznych należy więc ograniczyć do wyników mających uzasadnienie fizyczne potwierdzone pomiarami obiektów rzeczywistych.

Z punktu widzenia weryfikacji przyjętego modelu MES, podobnie jak w przypadku modelu tarczowego (rozd. 7.3.2), podstawowe znaczenie miało wyznaczenie zależności pomiędzy obciążeniem modelu korzenia marchwi a przemieszczeniem elementu obciążającego. Obliczenie wartości siły odpowiadającej zadanemu przemieszczeniu elementu obciążającego stanowiło problem wynikający ze sposobu podparcia dolnej powierzchni przekroju w kierunku osi y. Zdecydowano się na wyznaczenie siły obciążającej jako sumy reakcji pionowych w poszczególnych węzłach stanowiących podparcie modelu. Ze względu na dużą ilość danych obliczenia te przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Delphi. W rezultacie uzyskano zależność siły obciążającej od przemieszczenia (rys. 7.38) pozwalającą na przedstawienie wyników badań numerycznych jako funkcji siły obciążającej.



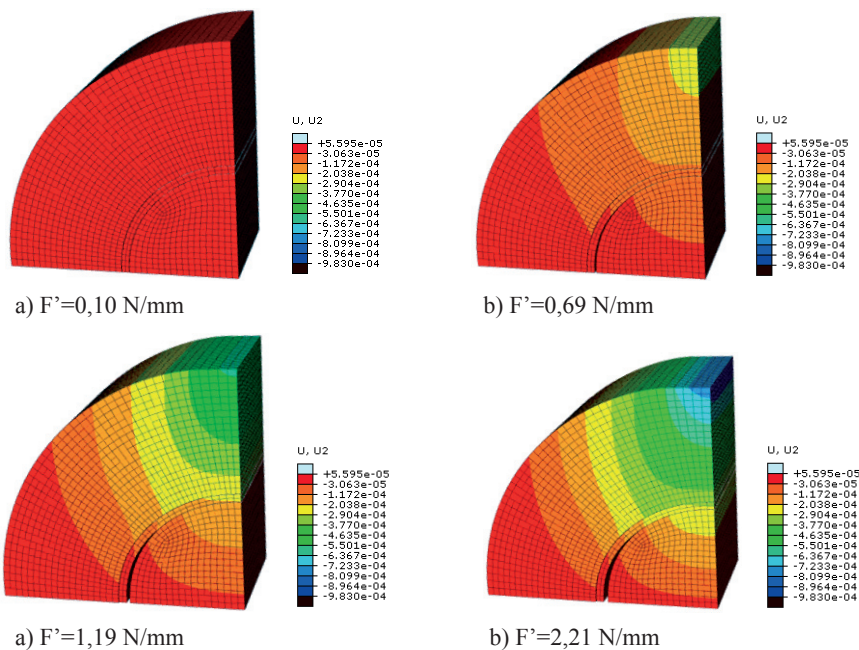
Rys. 7.40. Zależność przemieszczenia u_y od obciążenia F' – model 3D
 Fig. 7.40. Correlation of the displacement u_y with the load F' – the 3D model

Zależność przemieszczenia u_y od obciążenia przypadającego na jednostkę długości modelu korzenia marchwi (rys. 7.40.) ma przebieg nieliniowy, a więc zgodny z charakterem przebiegu, jaki otrzymano dla rzeczywistego korzenia marchwi.

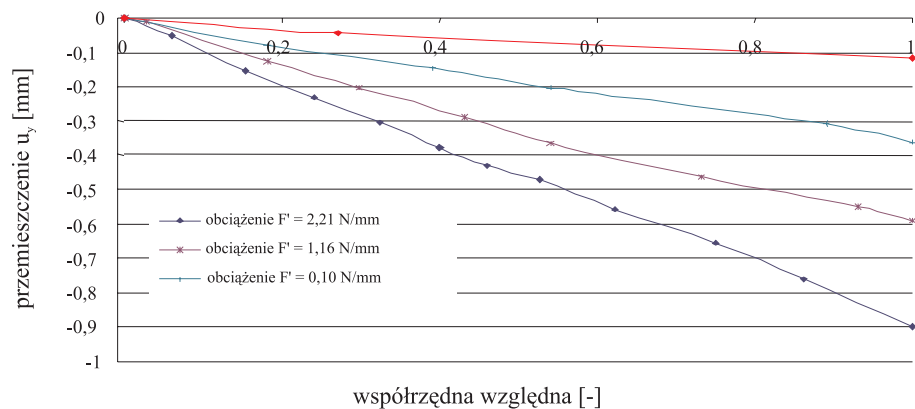
W rezultacie analizy numerycznej otrzymano rozkłady przemieszczeń u_x i u_y przy różnych wartościach siły obciążającej. Z punktu widzenia weryfikacji prawidłowej budowy modelu dyskretnego korzenia marchwi, w kontekście wyznaczania dopuszczalnych nacisków powierzchniowych, najistotniejsze były dwa przedziały obciążenia. Pierwszy z nich dotyczący wyznaczania nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechwalniczą obejmuje zakres niskich wartości obciążenia nieprzekraczających $F'=2,0$ N/mm. Drugi dotyczy nacisków dopuszczalnych ze względu na zniszczenia korzenia i obejmuje zakres od $F'=8,3$ do 25,0 N/mm.

Na rysunku 7.41 przedstawiono warstwie przemieszczeń u_y w pierwszym zakresie obciążenia. W kierunku działania obciążenia przemieszczenia u_y rozkładają się eliptycznie wokół punktu przyłożenia siły. Już od minimalnych wartości obciążenia (rys. 7.41b) pojawia się rozwarstwienie przekroju poprzecznego modelu korzenia marchwi spowodowane przyjętym rozwiązaniem budowy geometrycznej opisanym w rozdziale 5.2. Rozwarstwienie wpływa na pojawienie się nieciągłości w rozkładzie przemieszczeń u_x przekroju poprzecznego modelu korzenia marchwi. W kierunku poziomej osi X przemieszczenia u_y , mimo rozwarstwienia korzenia marchwi mają wartość równą zero w całym przekroju.

Na podstawie map przemieszczeń wykonano rozkłady przemieszczeń u_y w przekroju zgodnym z kierunkiem działania obciążenia przy różnych wielkościach siły obciążającej (rys. 7.42).



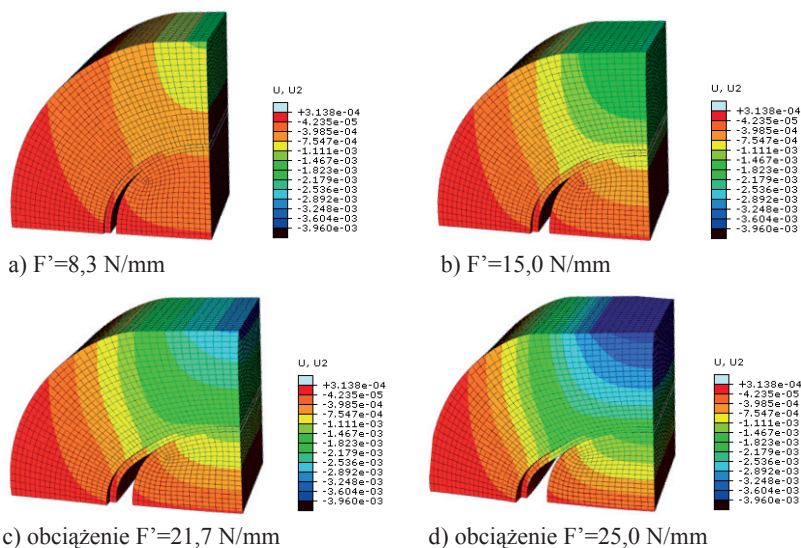
Rys. 7.41. Mapy przemieszczeń u_y dla modelu korzenia marchwi uzyskane przy obciążeniu w przedziale od $F'=0,10$ do $2,21$ N/mm – model 3D
 Fig. 7.41. The maps of displacements u_y for the model of cross section of the carrot root obtain at the load in the interval $F'=0,10$ to $2,21$ N/mm – the 3D model



Rys. 7.42. Rozkłady przemieszczeń u_y modelu przekroju poprzecznego korzenia marchwi we współrzędnych względnych w kierunku osi Y ($F'=0,10 - 2,21$ N/mm) – model 3D
 Fig. 7.42. The distributions of displacements u_y for the model of cross section of the carrot root in the relative co-ordinates ($F'=0,10 - 2,21$ N/mm) – the 3D model

Przedstawienie rozkładów przemieszczenia jako funkcji współrzędnej względnej stanowiącej stosunek współrzędnej bieżącej do średnicy początkowej modelu pozwoliło uniezależnić wyniki badań od zmian wymiarów poprzecznych korzenia marchwi w trakcie weryfikacji modelu z obiektem rzeczywistym. Rozkłady sporządzono dla pełnego przekroju poprzecznego, zakładając, że są one symetryczne względem osi poziomej. Wykresy mają postać ciągłej funkcji rosnącej od zera w miejscu podparcia do wartości maksymalnej w punkcie przyłożenia obciążenia. W przekroju poziomym na wykresie rozkładu przemieszczeń u_x i u_y w miejscu styku warstwy kory, warstwy kambium i rdzenia, pojawia się nieciągłość spowodowana rozwarstwieniem korzenia marchwi.

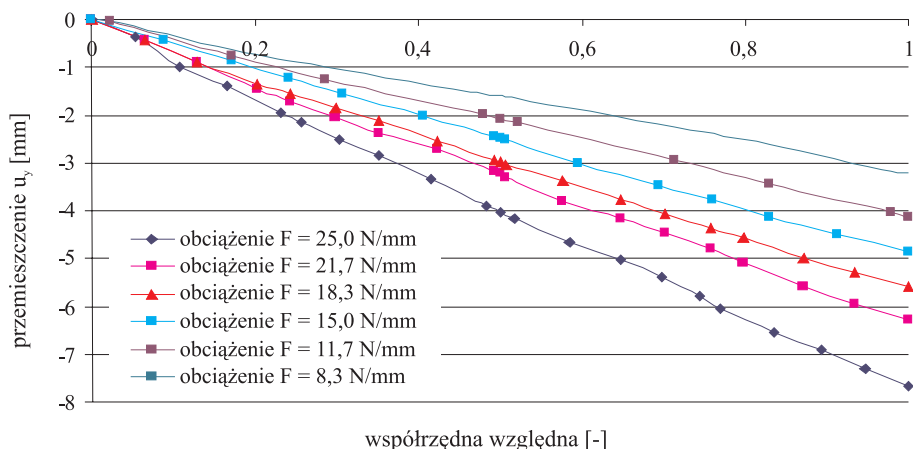
Rysunek 7.43 przedstawia mapy przemieszczeń w przypadku modelu korzenia marchwi, wyznaczone w drugim zakresie obciążenia. Wyraźnie widoczna jest deformacja modelu korzenia zarówno w kierunku osi pionowej, jak i poziomej. Pojawił się ślad powierzchni styku modelu korzenia marchwi z elementem obciążającym, a rozwarstwienie korzenia marchwi ulega pogłębieniu. W końcowej fazie obciążenia pojawia się wyraźna deformacja rdzenia. Warstwy przemieszczeń u_y w drugim zakresie obciążenia nie zmieniają w istotny sposób swojego kształtu, szczególnie w okolicach płaszczyzny współpracy z elementem obciążającym oraz w pobliżu osi pionowej modelu. W części warstwy kory, która nie ma styku z rdzeniem, warstwy przemieszczeń rozmieszczone są równoległe do siebie w kierunku promieniowym. W przekroju prostopadłym do kierunku działania obciążenia, mimo wyraźnej deformacji i rozwarstwienia przemieszczenia u_y są równe zero. Wynika to z warunków podparcia modelu założonego w trakcie jego budowy.



Rys. 7.43. Mapy przemieszczeń u_y dla modelu korzenia marchwi ($F^2=8,3 - 25,0$ N/mm) – model 3D

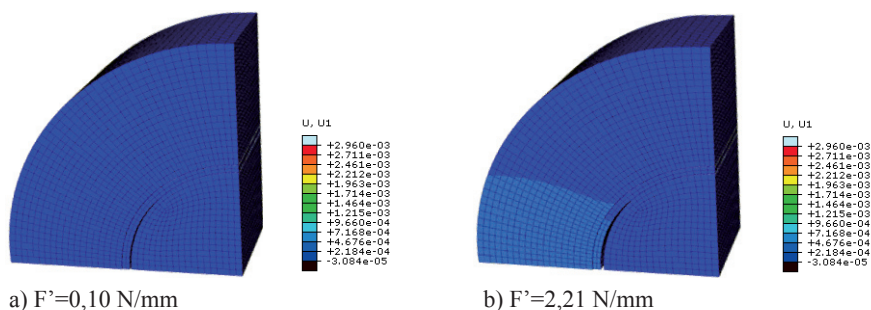
Fig. 7.43. The maps of displacements u_y for the cross section of the model of carrot root ($F^2=8,3$ to $25,0$ N/mm) – the 3D model

Rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi pionowej w drugim zakresie obciążeń (rys. 7.44) nie różnią się co do przebiegu od rozkładów wyznaczonych przy niskich wartościach obciążeń. Zmianie ulegają jedynie maksymalne wartości przemieszczeń w punkcie styku modelu z elementem obciążającym.



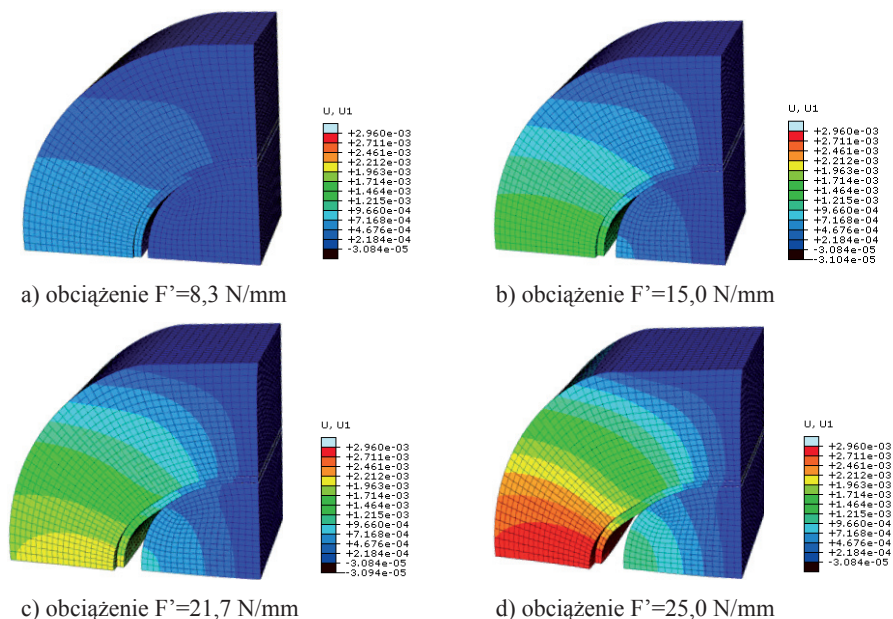
Rys. 7.44. Rozkłady przemieszczeń u_y modelu przekroju poprzecznego korzenia marchwi we współrzędnych względnych w kierunku osi Y ($F'=8,3 - 25,0$ N/mm – model 3D)
 Fig. 7.44. The distributions of displacements u_y for the model of cross section of the carrot root in the relative co-ordinates ($F'=8,3 - 25,0$ N/mm) – the 3D model

Przemieszczenia u_x mają mniejsze wartości niż przemieszczenia u_y . Przy niskich wartościach obciążenia (do $F'=2,5$ N/mm) wielkość przemieszczenia u_x nie przekracza 0,4 mm (rys. 7.45).



Rys. 7.45. Mapy przemieszczeń u_x dla modelu korzenia marchwi ($F'=8,3 -$ do $25,0$ N/mm) – model 3D
 Fig. 7.45. The maps of displacements u_x for the cross section of the model of carrot root ($F'=8,3 - 25,0$ N/mm) – the 3D model

Rysunek 7.46 przedstawia warstwicę przemieszczeń u_x w zakresie obciążeń z przedziału od $F'=8,3$ do $25,0$ N/mm. Wielkości przemieszczeń zbliżone do zera położone są w okolicach osi pionowej modelu oraz w pobliżu powierzchni styku z elementem obciążającym. Przy maksymalnych wielkościach obciążenia warstwicę przemieszczeń rozmieszczone są równoległe do siebie w kierunku promieniowym. Maksymalne wartości przemieszczenia u_x nie przekraczają 3 mm.



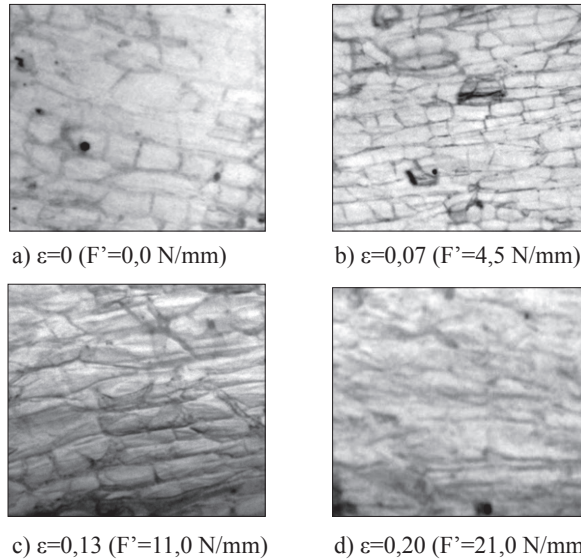
Rys. 7.46. Mapy przemieszczeń u_x dla modelu korzenia marchwi uzyskane przy obciążeniu w przedziale od $F'=8,3$ do $25,0$ N/mm – model 3D

Fig. 7.46. The maps of displacements u_x for the cross section of the model of carrot root obtain at the load in the interval $F'=8,3$ to $25,0$ N/mm – the 3D model

7.4. Badania mikroskopowe

Celem badań mikroskopowych było wyznaczenie charakterystycznych obrazów mikrostruktur korzenia marchwi w kolejnych fazach obciążenia. Rysunek 7.47a przedstawia nienaruszoną strukturę warstwy przyściennej komórek korzenia marchwi w okolicach punktu styku z elementem obciążającym przy zerowym odkształceniu. Komórki przylegają ściśle do siebie, nie są zdeformowane, wyraźnie widoczny jest zarys ścian komórkowych oraz przestrzenie międzykomórkowe. Na rysunku 7.47b widoczny jest obraz struktury wewnętrznej warstwy przyściennej przy odkształceniu $\epsilon=0,07$ odpowiadającemu obciążeniu $F'=4,5$ N/mm. Kształt komórek uległ tylko nieznacznej zmianie.

Krawędzie komórek zaczynają przybierać ostrzejsze kąty, jednak pole powierzchni się nie zmienia. Wyraźnemu zmniejszeniu ulegają przestrzenie międzykomórkowe. Można więc stwierdzić, że na tym etapie obciążania komórki nie podlegają wyrażnej deformacji, a więc ich uszkodzenie jest mało prawdopodobne.



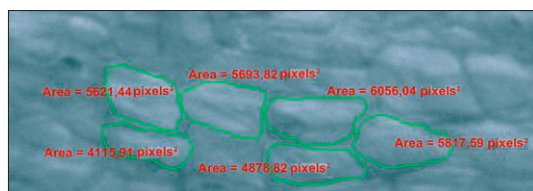
Rys. 7.47. Obrazy mikroskopowe powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi przy różnych wielkościach odkształceń przy powiększeniu 110-krotnym
 Fig. 7.47. The microscopic pictures of the surface of transverse cross section of the carrot root for different values of deformations seen at the 110-fold magnification

Przy odkształceniu $\epsilon=0,13$ odpowiadającemu sile $F'=11,0$ N/mm (rys. 7.47c) rozpoczyna się wyraźne oddziaływanie obciążenia na komórki korzenia marchwi. Kształt komórek wyraźnie się zmienia, komórki sąsiadujące ze sobą zaczynają nachodzić na siebie, a krawędzie komórek przybierać coraz ostrzejsze kąty, pole powierzchni nieznacznie maleje, a przestrzenie międzykomórkowe praktycznie zanikają. Nie zauważono jednak śladów zniszczenia ścian komórkowych. Można przypuszczać, że przy małej prędkości ściskania, przy której były prowadzone pomiary ($1,67 \times 10^{-5}$ m/s) następowała powolna migracja płynów na zewnątrz komórek poprzez ściany komórkowe, nie powodując ich uszkodzenia.

Odkształcenie $\epsilon=0,20$ ($F'=21,0$ N/mm) powoduje wyraźną zmianę obrazu mikrostruktury powierzchni badanej próbki (rys. 7.47d). Komórki ulegają zgnieceniu oraz znacznemu wydłużeniu, zanika zarys ścian komórkowych, wielkość ich pola powierzchni maleje, widoczne jest przemieszczanie się komórek względem siebie, jednak w żadnym przypadku nie zauważono całkowitego zniszczenia komórek.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy na podstawie obrazów mikroskopowych struktury wewnętrznej korzenia marchwi w różnych fazach obciążenia nie jest możliwe precyzyjne określenie wielkości odkształceń odpowiadających wytrzymałości biologicznej korzenia, tzn. odkształceń, przy których następuje uszkodzenie komórek w stopniu powodującym niebezpieczeństwo rozpoczęcia się procesów gnilnych. Można jedynie przypuszczać, że pierwsze symptomy uszkodzeń komórek pojawiają się pomiędzy odkształceniem $\varepsilon=0,07$, przy którym istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że komórki nie są uszkodzone, a odkształceniem $\varepsilon=0,13$, przy którym stopień deformacji komórek może wskazywać na ich uszkodzenie.

Konieczność precyzyjniejszego określenia odkształcenia odpowiadającego wytrzymałości biologicznej korzenia marchwi wymagało wykonania pomiarów ilościowych. Jako kryterium przyjęto zmianę maksymalnego wymiaru komórki w kierunku obciążenia w różnych fazach odkształcenia (rys. 7.48) oraz zmianę średniego pola powierzchni komórek. Pomiary prowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.5 za pomocą programu IRIS Laboratorium.



Rys. 7.48. Pomiar pola powierzchni komórki korzenia marchwi oraz jej maksymalnych wymiarów w kierunku obciążenia F

Fig. 7.48. The measurement of the area of the carrot root cell as well as its maximum dimensions in the direction of the load F

Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej mającej na celu sprawdzenie, w jakim stopniu wymiary komórek zależą od odkształcenia przekroju poprzecznego korzenia marchwi.

Przed przystąpieniem do analizy statystycznej danych sporządzono ich charakterystykę. W sumie analizie poddano 28 obserwacji przypadających na każdy czynnik, z czego po 7 przypadają na każdą wartość przemieszczenia. Do całej próby oraz do każdej wartości poszczególnych cech obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe, błąd standardowy oraz 95% przedział ufności dla wartości średniej. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.16 oraz w formie wykresów (rys. 7.49 i 7.50). Otrzymane wymiary oraz pole powierzchni komórek parenchymy korzenia marchwi w stanie nieodkształconym są zgodne z wynikami otrzymanymi przez Umedę na podstawie pomiarów przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu laserowego [Umeda i Namikawa 2004].

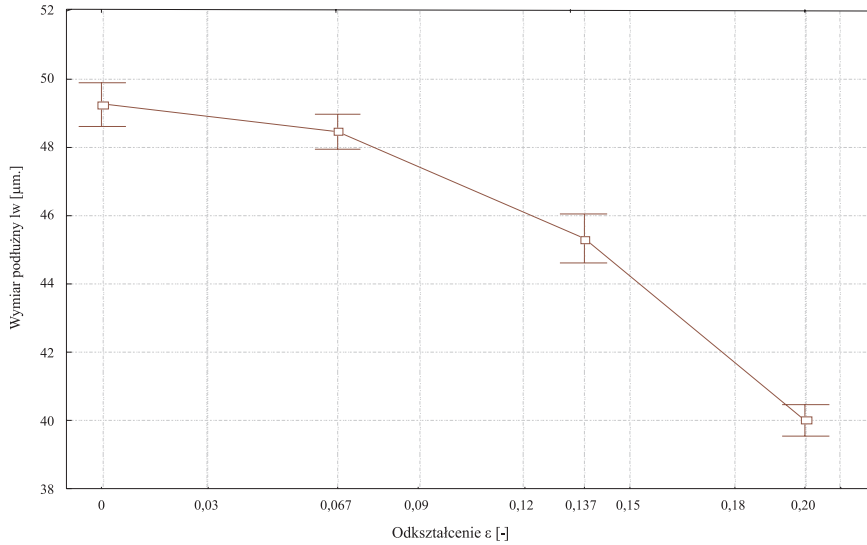
Tabela 7.16
Table 7.16

Wyniki analizy statystycznej wymiaru podłużnego oraz pola powierzchni komórki korzenia marchwi w zakresie odkształceń od $\varepsilon=0$ do 0,20
The results of the statistical analysis of longitudinal dimension as well as of the area of the cell of carrot root within the range of deformations from $\varepsilon=0$ to 0,20

Czynnik Factor	ε [-]	F [N/ mm]	N	Wartość średnia Mean value	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd standardowy Standard error	95% przedział ufności 95% cofidence interval	
Cała próba – Total test			28	45,76	3,73	0,70	44,31	47,20
Wymiar podłużny l_w [μm] Longitudinal dimension l_w [μm]	0,0	0,0	7	49,24	0,68	0,25	48,61	49,87
	0,07	4,5	7	48,45	0,56	0,21	47,93	48,97
	0,13	11,0	7	45,31	0,77	0,29	44,60	46,02
	0,20	21,0	7	40,02	0,49	0,18	39,57	40,48
Cała próba – Total test			28	2359,14	50,68	9,57	2339,48	2378,79
Pole powierzchni A [μm^2] Area A [μm^2]	0,0	0,0	7	2401,71	12,45	4,70	2390,19	2413,27
	0,07	4,5	7	2395,71	5,43	2,05	2390,68	2400,74
	0,13	11,0	7	2360,85	4,49	1,69	2356,70	2365,08
	0,20	21,0	7	2278,28	7,15	2,70	2271,66	2284,96

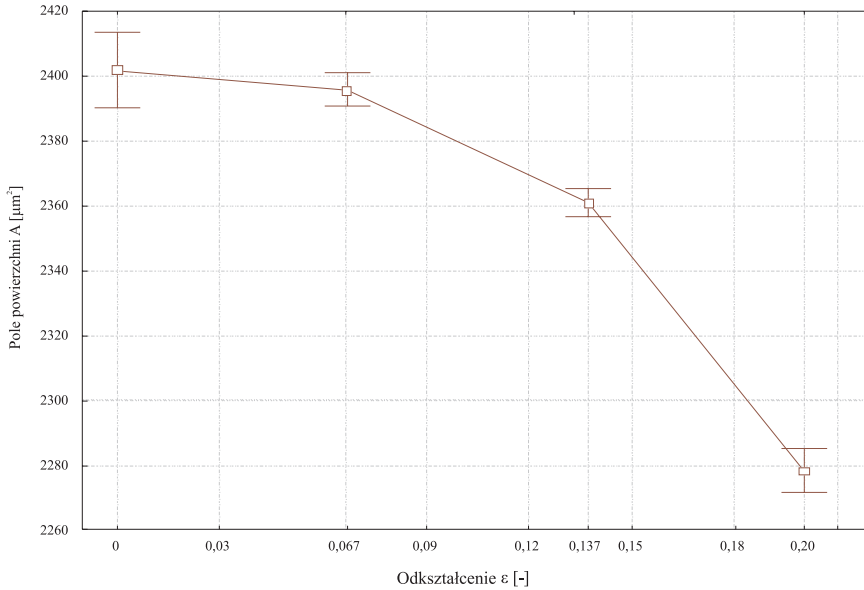
Przesłankę mogącą stanowić podstawę do wyznaczenia wytrzymałości przechowalniczej korzenia marchwi można uzyskać na podstawie analizy wykresu zmian maksymalnego wymiaru komórek w kierunku działania siły w zależności od odkształcenia (rys. 7.49). Do odkształcenia wynoszącego $\varepsilon=0,07$ maksymalny wymiar komórek w kierunku obciążenia praktycznie nie ulega zmianie ($\Delta l=0,8 \mu\text{m}$). Można stwierdzić, że w tym zakresie obciążenia całe odkształcenie spowodowane jest zniwelowaniem przestrzeni międzykomórkowych oraz nieznacznym przemieszczeniem nienaruszonych komórek. Możliwa jest również w niewielkim stopniu migracja płynu komórkowego poprzez półprzepuszczalne ściany komórkowe, bez ich uszkodzenia. Taki wniosek potwierdzają obserwacje obrazów mikroskopowych. Dopiero po przekroczeniu odkształcenia $\varepsilon=0,07$ następuje gwałtowniejsze oddziaływanie obciążenia bezpośrednio na komórki. Maksymalny wymiar komórek w kierunku obciążenia ulega wyraźnemu zmniejszeniu.

Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie analizy wykresu opisującego zmiany pola powierzchni komórek jako funkcji odkształcenia (rys. 7.48). Przy odkształceniu w zakresie od $\varepsilon=0$ do 0,07 pole powierzchni próbek zmienia się o wartość $\Delta A=5,81 \mu\text{m}^2$, co praktycznie mieści się w granicach błędu statystycznego, natomiast przy odkształceniu w zakresie $\varepsilon=0,07$ do 0,20 pole powierzchni komórek ulega zmniejszeniu o wartość $\Delta A=118,53 \mu\text{m}^2$.



Rys. 7.49. Wykres maksymalnego wymiaru komórek w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia jako funkcji odkształcenia

Fig. 7.49. The graph of maximum dimension of cells in the direction longitudinal to the direction of the load as the function of the deformation

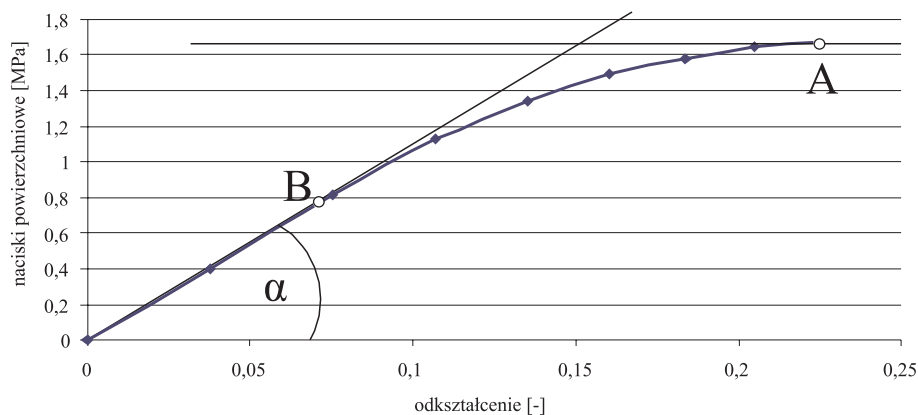


Rys. 7.50. Wykres zmian pola powierzchni komórek jako funkcji odkształcenia

Fig. 7.50. The graph of changes in the area of the cells as the function of deformation

7.5 Wyznaczanie nacisków dopuszczalnych

Dopuszczalne naciski powierzchniowe korzeni marchwi można rozpatrywać z dwóch punktów widzenia. Pierwszy z nich to naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość doraźną korzenia. Znajomość tej wielkości ma szczególne znaczenie w procesach przetwórczych, w których ważne jest prawidłowe rozdrobienie korzeni marchwi. Drugi punkt widzenia to naciski odpowiadające wytrzymałości przechowalniczej, to znaczy takiej, przy której nie ulega jeszcze uszkodzeniu mikrostruktura korzeni marchwi. Wielkość tych nacisków ma istotne znaczenie z punktu widzenia przechowalnictwa marchwi.



Rys. 7.51. Przykładowy wykres nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia
Fig. 7.51. The example graph of the surface pressures as the function of the load

Analizując wykres przedstawiający zależność nacisków powierzchniowych od wielkości odkształcenia (rys. 7. 51), można zauważyć, że składa się on z trzech charakterystycznych fragmentów. W początkowej fazie obciążania (rys. 7.51 od $\epsilon=0$ do $\epsilon=0,06$) przyrost nacisków powierzchniowych ma przebieg liniowy. Sugeruje to sprężysty charakter odkształceń materiału biologicznego w obrębie pojawienia się nacisków powierzchniowych. Przyrostowi obciążenia towarzyszy równomierny przyrost powierzchni wzajemnego oddziaływania. Na podstawie obrazów mikroskopowych można stwierdzić, że w tym zakresie obciążenia nie następują trwałe uszkodzenia tkanki roślinnej w miejscach styku próbki z elementem obciążającym, a więc tam, gdzie występują maksymalne wartości nacisków.

Drugi fragment wykresu (rys. 7.51 od $\epsilon=0,06$ do $\epsilon=0,02$) charakteryzuje się wyraźnym spadkiem nacisków powierzchniowych w miarę wzrostu odkształcenia. Wskazuje to na pojawienie się osłabienia materiału biologicznego spowodowanego uszkodzeniem tkanki roślinnej. Uszkodzenia te powiększają się w miarę wzrostu obciążenia, co powoduje coraz większe osłabienie materiału, a co za tym idzie wolniejszy wzrost

nacisków powierzchniowych. Potwierdzają to obrazy mikroskopowe korzenia marchwi wykonane dla tego etapu obciążania (rys. 7.47). W końcowej fazie obciążania pojawia się oddzielenie warstwy kory od rdzenia (rys. 3.1) oraz wyraźne ślady pęknięć warstwy kory w okolicach miejsc przyłożenia obciążenia, a krzywa na wykresie zbliża się asymptotycznie do stałej wartości nacisków. Towarzyszą temu wyraźne oznaki zniszczenia próbki.

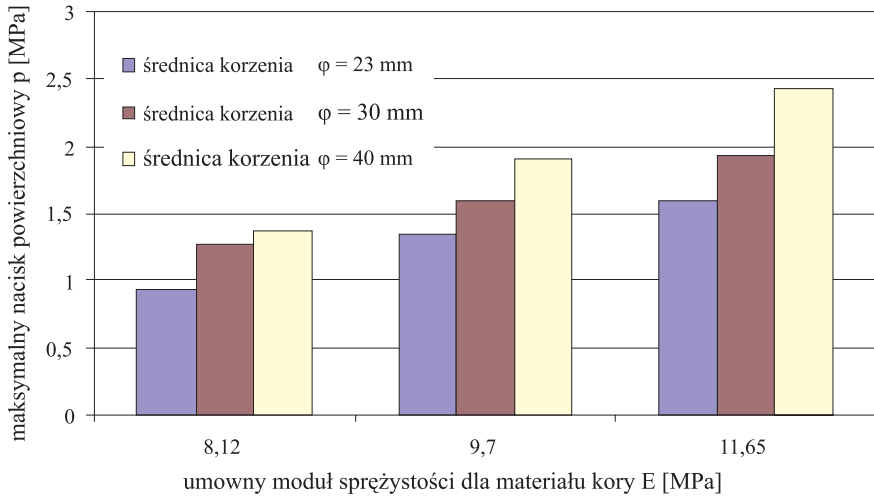
Z praktycznego punktu widzenia możemy wyróżnić dwa charakterystyczne momenty na krzywej nacisków powierzchniowych jako funkcji obciążenia. Pierwszy z nich, określający naciski powierzchniowe dopuszczalne ze względu na wytrzymałość przechowalniczą materiału korzenia marchwi, położony jest w miejscu początku zakrzywienia krzywej na wykresie (rys. 7.51, punkt B). Do tego momentu nie występują trwałe uszkodzenia materiału biologicznego, a odkształcenia mają charakter sprężysty. Nie ma więc miejsc, od których mogłyby się rozpoczynać procesy gnilne. Drugi charakterystyczny punkt (rys. 7.51, punkt A) określa maksymalne naciski powierzchniowe, jakie może przenieść korzeń marchwi. Naciskom tym towarzyszy całkowite zniszczenie makro- i mikrostruktury korzenia marchwi.

7.5.1. Naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość doraźną

Definicja nacisków powierzchniowych dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość mechaniczną korzeni marchwi jest stosunkowo łatwa do sformułowania. Najprościej można powiedzieć, że są to maksymalne naciski, jakie są możliwe do osiągnięcia w próbie promieniowego ściskania korzenia marchwi.

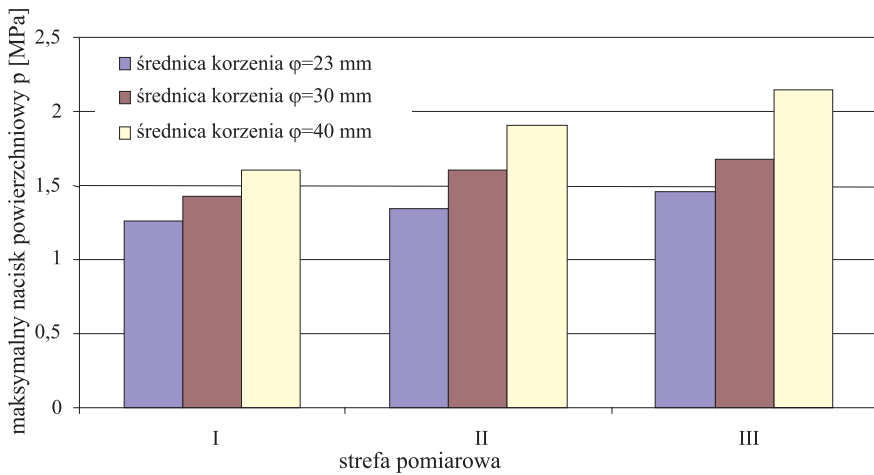
Wartość nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość doraźną można wyznaczyć na podstawie wykresu zależności nacisków powierzchniowych od odkształcenia próbki (rys. 7.51). W większości przebadanych próbek maksymalne naciski występują przy odkształceniu $\varepsilon=0,20$. Ich wartości w istotny sposób zależą od umownego modułu sprężystości warstwy kory oraz od średnicy korzenia marchwi (rys. 7.52). Przy niskich wartościach umownych modułów sprężystości ($E_1=8,12$ MPa) dopuszczalny nacisk powierzchniowy waha się w przedziale od $p=1,0$ do $p=1,4$ MPa w przebadanych próbkach o średnicach od $\varphi_1=23$ mm, $\varphi_2=30$ mm do $\varphi_3=40$ mm. Przy wyższych wartościach modułów sprężystości ($E_2=9,70$ MPa i $E_3=11,65$ MPa) występuje wyraźna zależność wartości nacisków dopuszczalnych od średnicy korzenia. Wartości te mieszczą się w granicach od $p=1,4$ MPa dla $\varphi_1=23$ mm i $E_2=9,70$ MPa do $p=2,4$ MPa dla $\varphi_3=40$ mm i $E_3=11,65$ MPa.

Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych w mniejszym stopniu zależą od strefy pomiarowej (rys. 7.53). Do określonej średnicy próbki oraz umownego modułu sprężystości zmiana wartości nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość korzenia marchwi w poszczególnych strefach pomiarowych mieści się w przedziale $\Delta p=0,2$ MPa. Wyjątek stanowią naciski wyznaczone do próbki o średnicy równej $\varphi=40$ mm. W tym przypadku różnica pomiędzy naciskami w strefie I i III wynosi $\Delta p=0,5$ MPa.



Rys. 7.52. Wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ze względu na wytrzymałość doraźną przy odkształceniu $\epsilon=0,20$ (II strefa pomiarowa)

Fig. 7.52. The value of the admissible surface pressures regarding the immediate strength at the strain $\epsilon=0,20$ (II measuring zone)



Rys. 7.53. Wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ze względu na wytrzymałość doraźną przy odkształceniu $\epsilon=0,20$ ($E_2=9,70$ MPa)

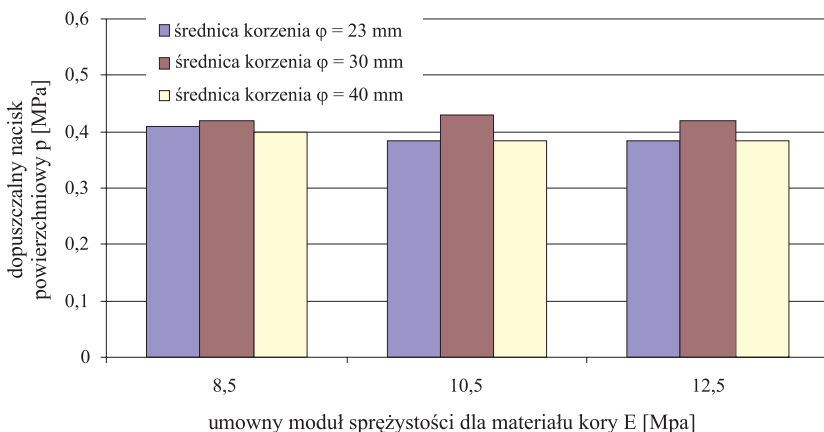
Fig. 7.53. The value of admissible surface pressures regarding the immediate strength at the strain $\epsilon=0,20$ ($E_2=9,70$ MPa)

7.5.2. Naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość przechowalniczą

Wyznaczenie nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą stwarza problemy wynikające z niejednoznaczności przyjętych kryteriów. Na wykresie zależności nacisków powierzchniowych od odkształcenia nie ma charakterystycznych punktów, które jednoznacznie określałyby granicę wytrzymałości przechowalniczej. Podobnie obrazy mikroskopowe nie są w stanie odpowiedzieć na pytanie, w którym momencie rozpoczyna się proces niszczenia komórek.

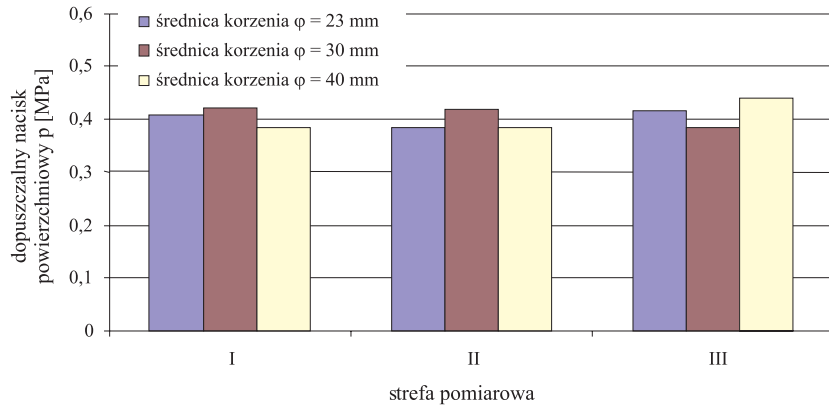
W związku z tym zdecydowano się na przyjęcie umownej granicy określającej wytrzymałość przechowalniczą korzenia marchwi. Jako podstawowe kryterium przyjęto punkt na wykresie przedstawiającym zależność nacisków powierzchniowych od odkształcenia (rys. 7.51, punkt B), w którym następuje wyraźne zakończenie prostoliniowego fragmentu wykresu. W większości przebadanych próbek punkt ten odpowiadał odkształceniom mieszczącym się w przedziale od $\varepsilon=0,05$ do $\varepsilon=0,06$. Za przyjęciem takiego kryterium przemawiają również obrazy mikroskopowe przedstawione w rozdziale 7.4. Uwzględniono również kryterium pewności wynoszące $k=0,8$ z uwagi na możliwość lokalnego pojawienia się odkształceń powodujących zniszczenie tkanki biologicznej.

Po rozpatrzeniu wszystkich przesłanek za naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość biologiczną przyjęto naciski odpowiadające odkształceniom, przy których kończy się prostoliniowy odcinek wykresu na krzywej ściskania pomniejszone o 20%. W przebadanych próbkach odkształcenie, przy którym określano naciski dopuszczalne wynosiło $\varepsilon=0,05$. Wartości nacisków dopuszczalnych, biorąc pod uwagę wytrzymałość przechowalniczą, przedstawiono na rysunkach 7.54 i 7.55. Jak wynika z analizy tych wykresów naciski dopuszczalne w niewielkim stopniu zależą od własności wytrzymałościowych korzenia, ich średnicy, a także strefy pomiarowej i mieszczą się w przedziale od $p=0,383$ MPa do $p=0,442$ MPa.



Rys. 7.54. Wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą przy odkształceniu $\varepsilon=0,05$ (II strefa pomiarowa)

Fig. 7.54. The value of the admissible surface pressures regarding the storage performance at the strain $\varepsilon=0,05$ (II measuring zone)



Rys. 7.55. Wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą przy odkształceniu $\epsilon=0,05$ ($E_2=9,70$ MPa)

Fig. 7.53. The value of admissible surface pressures regarding the storage performance at the strain $\epsilon=0,05$ ($E_2=9,70$ MPa)

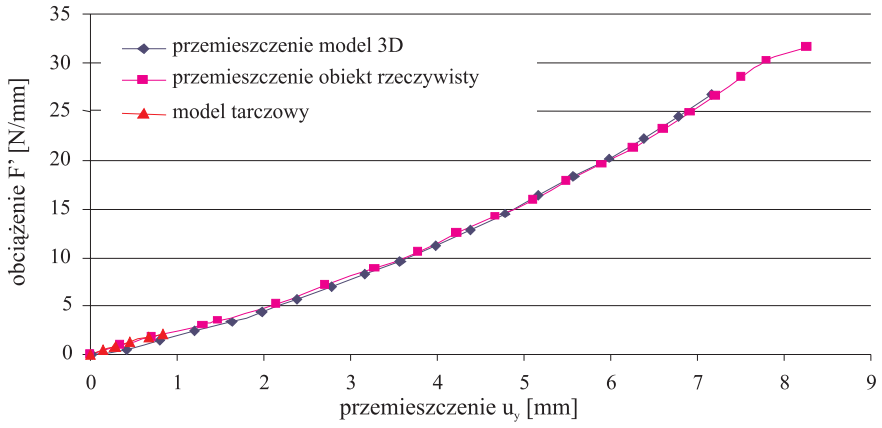
8. WERYFIKACJA DYSKRETNEGO MODELU KORZENIA MARCHWI

Weryfikację dyskretnego modelu marchwi przeprowadzono w oparciu o wyniki przemieszczeń otrzymanych w odniesieniu do marchwi odmiany Karotan o następujących parametrach: moduł sprężystości $E=9,70$ MPa, stała Poissona $\nu=0,475$, średnica zewnętrzna korzenia marchwi $\varphi_k=30$ mm, średnica rdzenia $\varphi_r=15$ mm. Próbkę wycięto z okolic środka korzenia, a więc z II strefy pomiarowej.

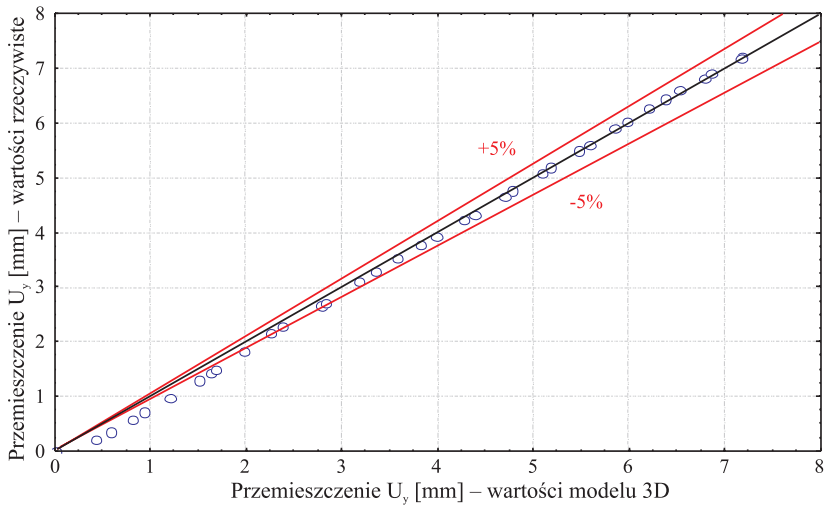
Weryfikację przeprowadzono w trzech krokach:

- porównanie zależności przemieszczenia punktu przyłożenia siły od obciążenia,
- porównanie jakościowe obrazów przemieszczeń na całej powierzchni obciążonej próbki,
- porównanie rozkładów przemieszczeń w wybranych przekrojach poprzecznych.

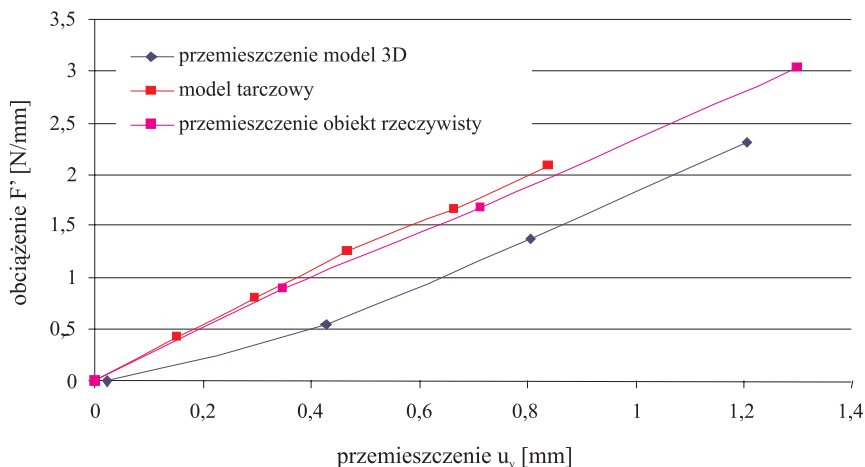
Podstawowym parametrem podlegającym weryfikacji była zależność przemieszczenia punktu przyłożenia siły od obciążenia (rys. 8.1 i 8.3). Na rysunku 8.1 przedstawiono zależność przemieszczenia od obciążenia obiektu rzeczywistego oraz modelu 3D uzyskanego za pomocą programu Abaqus i modelu tarczowego otrzymanego przy użyciu programu COSMOS/M. Jak wynika z porównania wartości eksperymentalnych z modelem 3D (rys. 8.2) prawie w całym zakresie obciążenia błąd względny nie przekracza 10%. Wyjątek stanowi początkowy fragment obciążenia od 0 do 2,5 N/mm (rys. 8.3), w którym średni błąd względny obliczony w oparciu o model 3D dochodzi do 60%, przy wartościach maksymalnych przekraczających 100% (tab. 8.1). Okazuje się więc, że w tym zakresie obciążenia model 3-D wykazuje nieco mniejszą sztywność niż próbka korzenia marchwi. Lepsze dopasowanie udało się uzyskać za pomocą modelu tarczowego (rys. 8.3). W początkowym zakresie obciążenia błąd względny w stosunku do modelu tarczowego jest stabilny i waha się w przedziale od 2,1 do 7,0%, a jego wartość średnia wynosi 5,5% (tab. 8.1). Powodem tego może być sposób modelowania połączenia rdzenia z warstwą kory. Przyjęte w modelu 3-D rozwarstwianie korzenia marchwi pojawia się już od początku obciążania i wpływa na zmniejszenie jego sztywności. W obiekcie rzeczywistym widoczny efekt rozwarstwiania pojawia się dopiero przy większym obciążeniu. W modelu tarczowym sposób podparcia i parametry geometryczne zostały tak dobrane, aby nie nastąpiło rozwarstwienie w trakcie obciążania.



Rys. 8.1. Zależność przemieszczenia u_y od obciążenia F'
 Fig. 8.1. The correlation of dislocation u_y with the load F'



Rys. 8.2. Porównanie przemieszczenia punktu przyłożenia siły w obiekcie rzeczywistym w stosunku do wartości modelowych (model 3D) w pełnym zakresie obciążenia
 Fig. 8.2. The comparison of deflection of the point of applying the force for actual object in relation to the model values (the 3D model) in the full range of load



Rys. 8.3. Zależność przemieszczenia u_y od obciążenia F' ($F'=0 - 2,5$ N/mm)
 Fig. 8.3. Correlation of the displacement u_y with the load F' ($F'=0 - 2,5$ N/mm)

Tabela 8.1

Table 8.1

Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_y obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych ($F'=0 - 2,5$ N/mm)

The comparison of experimental value of displacement u_y for actual object in relation to the model values ($F'=0 - 2,5$ N/mm)

Wykres Diagram	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Model tarczowy Disc model	25	wzg	%	5,5	2,1	7,0	1,8
		bezwzg	mm	0,8	0,1	1,3	0,1
Model 3D 3D model	27	wzg	%	62,2	26,3	125,0	19,5
		bezwzg	mm	5,8	6,0	5,8	1,3

Efektem takiego sposobu modelowania było przyjęcie założeń dotyczących zakresu weryfikacji modeli dyskretnych. W zakresie małych obciążeń (od 0 do 2,5 N/mm) zdecydowano się zastosować model tarczowy, natomiast w pozostałym zakresie model 3D.

8.1. Mapy i rozkłady przemieszczeń w modelu tarczowym MES

Porównanie stopnia dopasowania modelu dyskretnego do zachowania się obiektu rzeczywistego w miarę wzrostu obciążenia pod względem jakościowym przeprowadzono w oparciu o mapy przemieszczeń. Mapy przemieszczeń przekroju poprzecznego modelu dyskretnego korzenia marchwi uzyskano po przeprowadzeniu analizy nieliniowej w programie COMOS/M. Nieco trudniejsze do wyznaczenia były mapy przemieszczeń w obiekcie rzeczywistym. Wśród dostępnych metod pomiarowych jedyną metodą pozwalającą na ich otrzymanie okazała się metoda interferometrii plamkowej w wersji elektronicznej (ESPI – Electrical Speckle Pattern Interferometry). Pozwalała ona, zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 6.4.1, uzyskać rozkłady przemieszczeń na całej powierzchni przekroju poprzecznego korzenia marchwi w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Niedogodnością była duża czułość urządzenia, co zmuszało do przeprowadzenia pomiarów dla bardzo małych przyrostów obciążenia.

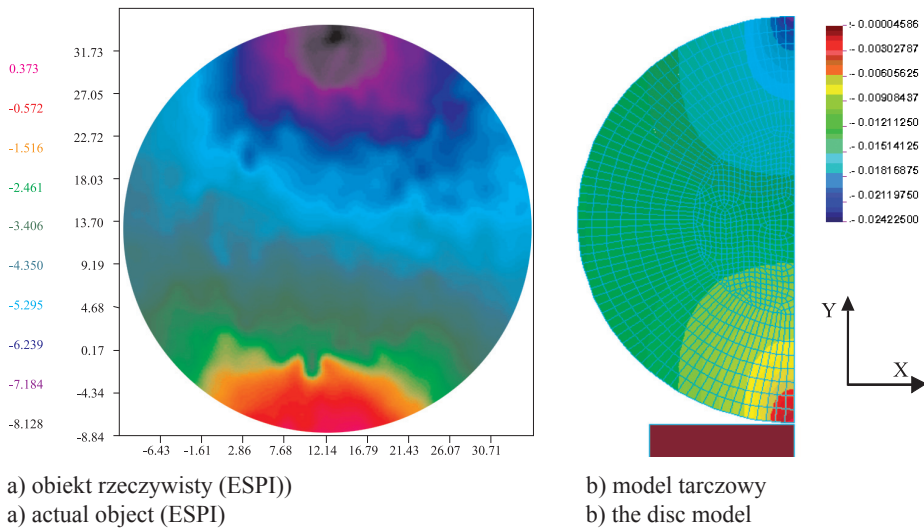
W rezultacie weryfikację modelu dyskretnego korzenia marchwi w oparciu o model tarczowy i pomiary za pomocą interferometrii plamkowej przeprowadzono przy przyroście obciążenia $\Delta F = 0,025 \text{ N/mm}$. Weryfikacji poddano mapy przemieszczeń przekroju poprzecznego u_y, u_x oraz rozkłady przemieszczeń u_y, u_x w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Rozkłady przemieszczeń wykonano na podstawie wyników pomiarów przedstawionych w rozdziale 7.3.1.

Weryfikacja modelu na podstawie map przemieszczeń polegała na porównaniu pod względem jakościowym obrazów otrzymanych na podstawie analizy modelu tarczowego i badań eksperymentalnych, przeprowadzonych za pomocą metody interferometrii plamkowej. Pod względem ilościowym porównano rozkłady przemieszczeń w wybranych kierunkach przekroju poprzecznego. Dla każdej pary wykresów wyznaczono różnicę bezwzględną oraz względną, odniesioną do wartości maksymalnej. Podano również wartość średnią różnicy przemieszczeń oraz wartości minimalne i maksymalne, a także odchylenie standardowe i liczbę punktów pomiarowych. Ponadto, sprawdzono zasadność przyjęcia założenia o braku przemieszczeń u_z w kierunku osi podłużnej korzenia marchwi.

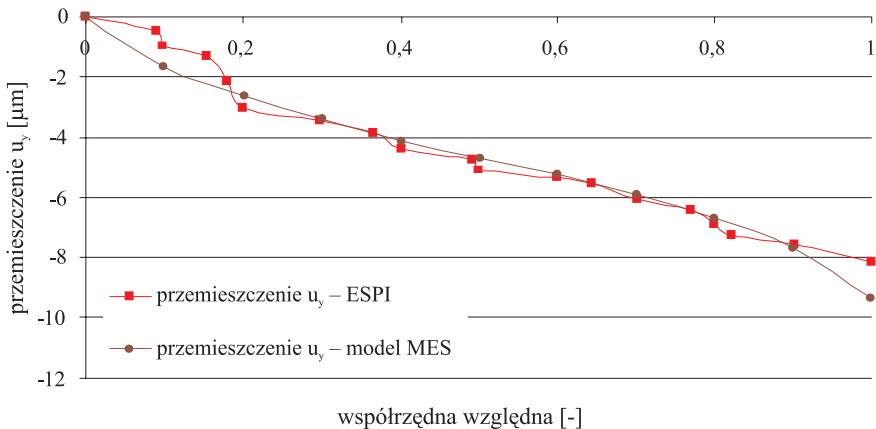
Analizując mapy przemieszczeń u_y przekroju poprzecznego korzenia marchwi w obiekcie rzeczywistym (rys. 8.4a) i modelu dyskretnym (rys. 8.4b) można zauważyć dużą zbieżność obrazów zarówno co do kształtu pól o jednakowych wartościach przemieszczeń, jak i co do bezwzględnych wartości (należy pamiętać, że wartości przemieszczeń u_y modelu tarczowego dotyczą połowy przekroju poprzecznego, co wynika z założeń przyjętych przy budowie modelu – rozdział 5.1).

Stałe wartości przemieszczeń w odniesieniu do obiektu rzeczywistego oraz modelu dyskretnego rozmieszczone były koncentrycznie w stosunku do punktu przyłożenia obciążenia. Maksymalne wartości przemieszczenia położone są w okolicach punktu przyłożenia siły (kolor ciemnogrnatowy), a przemieszczenia zbliżone do zera w punkcie podparcia (kolor jasnoczerwony). W strefie styku oprócz ściskania widoczne są przemieszczenia w kierunku rozciągania (kolor różowy) będące efektem pojawiających się

sił stycznych. W modelu tarczowym ze względu na małe wartości obciążenia pominięto wpływ sił tarcia na otrzymane wyniki. Podział modelu dyskretnego na trzy warstwy w rozpatrywanym zakresie obciążenia nie wpływa w istotny sposób na obraz przemieszczeń. Wpływ warstwowej budowy korzenia marchwi jest natomiast widoczny na mapie przemieszczeń obiektu rzeczywistego oraz na rozkładach przemieszczeń, a w szczególności w przekroju pionowym (rys. 8.5).



Rys. 8.4. Mapy przemieszczeń u_y
Fig. 8.4. The maps of displacements u_y



Rys. 8.5. Rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi X we współrzędnych względnych
Fig. 8.5. The distributions of displacements u_y in the X direction in the relative co-ordinates

W przekroju pionowym przemieszczenia u_y narastają od 0 w punkcie podparcia do wartości maksymalnej w punkcie przyłożenia obciążania z wyraźnym zaburzeniem w okolicach warstwy kambium (współrzędna względna 0,25 i 0,75). Nieliniowy przebieg krzywej przemieszczenia w obiekcie rzeczywistym (rys. 8.5) dobrze odwzorowuje pod względem jakościowym rozkład otrzymany na podstawie modelu tarczowego, chociaż nie jest wyraźnie zaznaczony wpływ warstwy kambium na wartości przemieszczeń. Analiza błędów przedstawiona w tabeli 8.2 pokazuje, że średni błąd względny przemieszczenia u_y wynosi 10,6%, ale przy małych wartościach przemieszczeń pojawia się błąd maksymalny wynoszący prawie 70%.

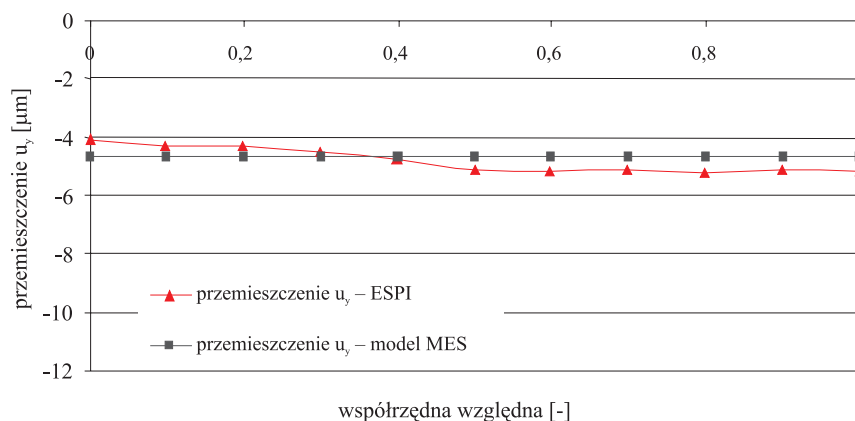
Tabela 8.2

Table 8.2

Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_y w kierunku osi X i Y obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych
The comparison of experimental values of displacement u_y in X and Y direction for actual object in relation to the model values

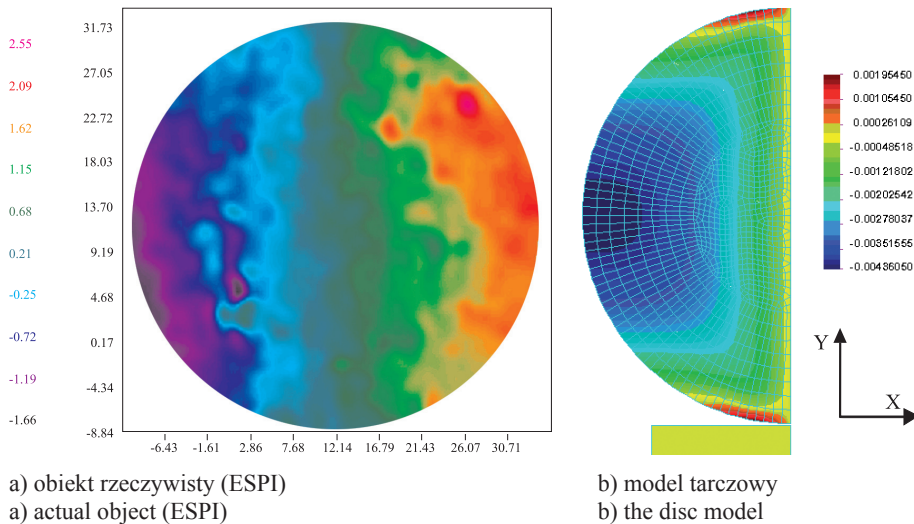
Wykres Diagram	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Rys. 8.5 Fig. 8.5	25	wzg	%	10,6	0,00	69,9	16,6
		bezwzg	μm	0,3	0,00	1,5	0,4
Rys. 8.6 Fig. 8.6	27	wzg	%	8,4	0,00	12,6	3,3
		bezwzg	μm	0,3	0,00	0,5	0,1

Przemieszczenia u_y wzdłuż osi poziomej (oś X) mają wartość w przybliżeniu stałą zarówno w obiekcie rzeczywistym jak i modelu (rys. 8.6). Błąd względny jest stabilny w całym przekroju i zmienia się w granicach od 0 do 12,7% przy wartości średniej wynoszącej 8,5% (tab. 8.2). W tym przekroju nie obserwuje się wpływu warstwy kambium na rozkład przemieszczeń u_y .

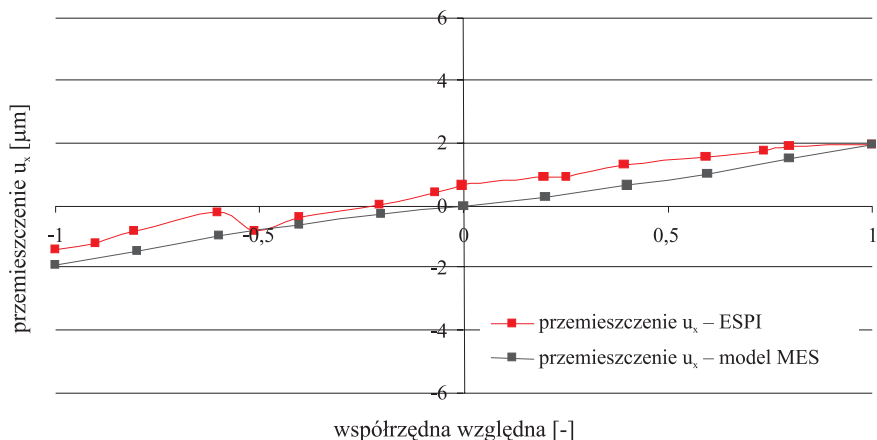


Rys. 8.6. Rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi we współrzędnych względnych
Fig. 8.6. The distributions of displacements u_y in the Y direction in the relative co-ordinates

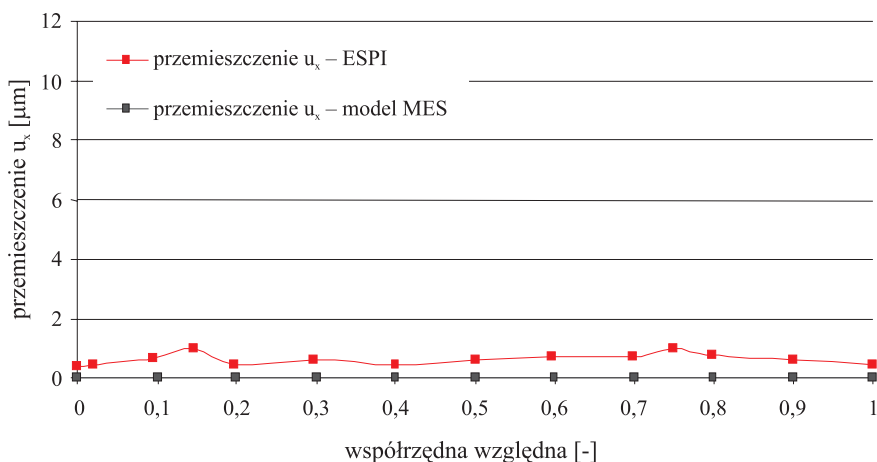
Mapy i rozkłady przemieszczeń u_y w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach w przypadku obiektów rzeczywistych i modelu tarczowym przedstawiono na rysunkach 8.7, 8.8 i 8.9. Zarówno w modelu, jak i obiekcie rzeczywistym w okolicach osi pionowej widoczna jest strefa zerowych wartości przemieszczeń u_y . W modelu strefa ta ma praktycznie postać linii (rys. 8.7b), ale w rzeczywistości jest to obszar wzdłuż osi pionowej próbki o szerokości kilku milimetrów (rys. 8.7a). Maksymalne wartości przemieszczeń u_y pojawiają się na krawędzi nieobciążonej na osi poziomej próbki. Znaki przemieszczeń u_y po obu stronach osi Y są przeciwne. W pobliżu styku badanej próbki z elementem obciążającym pojawia się charakterystyczny kształt pól przemieszczeń u_y . Stałe wartości przemieszczeń u_y rozkładają się w kierunku prostopadłym do kierunku działania obciążenia. Jest to dobrze widoczne w obiekcie rzeczywistym (rys. 8.7a) i znajduje potwierdzenie w rozwiązaniu modelowym, opartym na tarczowym modelu dyskretnym (rys. 8.7b). W strefie styku pojawiają się niewielkie, co do wartości bezwzględnej, przemieszczenia u_x o przeciwnych znakach w stosunku do przemieszczeń dominujących w rozpatrywanym obszarze, będące efektem działania sił tarcia. Widoczny jest wpływ na rozkład przemieszczeń u_x warstwowej budowy korzenia marchwi. W strefie kambium pojawia się zaburzenie rozkładu przemieszczeń (rys. 8.7a), co niestety nie jest obserwowane w przypadku rozwiązania modelowego, mimo uwzględnienia warstwowej budowy przy jego tworzeniu. Można to wytłumaczyć niewielkimi bezwzględnymi wartościami przemieszczenia.



Rys. 8.7. Mapy przemieszczeń u_x
Fig. 8.7. The maps of displacements u_x



Rys. 8.8. Rozkłady przemieszczeń u_x w kierunku osi X we współrzędnych względnych
 Fig. 8.8. The distributions of displacements u_x in the X direction in the relative co-ordinates



Rys. 8.9. Rozkłady przemieszczeń u_x w kierunku osi Y we współrzędnych względnych
 Fig. 8.9. The distributions of displacements u_x in the Y direction in the relative coordinates

Rozkłady przemieszczeń u_x w kierunku osi X i Y potwierdzają spostrzeżenia poczynione podczas analizy map przemieszczeń. W kierunku osi X przemieszczenia u_x zmieniają kierunek po przejściu osi pionowej próbki, chociaż w całym przekroju mają charakter przemieszczeń pochodzących od rozciągania tkanki korzenia marchwi. W strefie połączenia rdzenia z warstwą kory widoczne jest lokalne zaburzenie rozkładu. Dokładna analiza błędów, szczególnie w stosunku do błędów względnych, jest utrudniona ze względu na małe wartości przemieszczenia u_x oraz zmianę znaku w strefie środkowej

próbki. Średnia różnica pomiędzy wielkościami rzeczywistymi i otrzymanymi w oparciu o model wynosi 0,43 μm , co stanowi około 20% maksymalnych wartości przemieszczenia (tab. 8.3).

Tabela 8.3

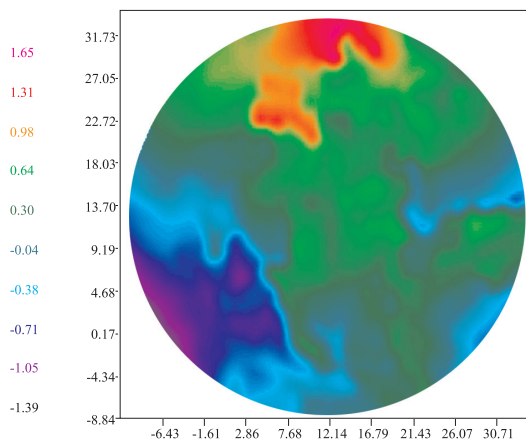
Table 8.3

Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_x w kierunku osi X i Y obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych
The comparison of experimental value of displacement u_x in X and Y direction for actual object in relation to the model values

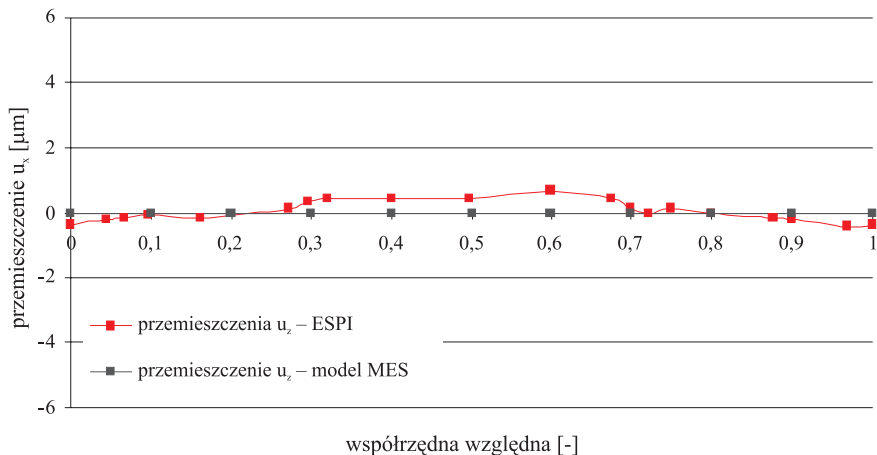
Wykres Diagram	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Rys. 8.8 Fig. 8.8	25	wzg	%	---	---	---	---
		bezwzg	μm	0,4	0,0	0,7	0,2
Rys. 8.9 Fig. 8.9	27	wzg	%	---	---	---	---
		bezwzg	μm	0,5	0,3	0,9	0,1

Przemieszczenia u_x w kierunku działania siły, uzyskane na podstawie map przemieszczeń próbki korzenia marchwi, mają w całym przekroju wartość w przybliżeniu stałą, różniącą się od wartości modelowej równej zeru średnio o około 0,57 μm . Ze względu na zerową wartość przemieszczeń uzyskaną w oparciu o model tarczowy trudno jest mówić o błędach względnych. W strefie kambium widoczne jest zaburzenie liniowego rozkładu przemieszczeń.

W celu skontrolowania poprawności założenia przyjętego w stosunku do płaskiego rozkładu przemieszczeń u_x wykonano pomiary przemieszczeń u_z w przekroju poziomym (rys. 8.10 i 8.11) oraz porównano je z rozwiązaniem teoretycznym (rys. 8.11, tab. 8.4).



Rys. 8.10. Mapa przemieszczeń u_z
Fig. 8.10. The map of displacements u_z



Rys. 8.11. Rozkłady przemieszczeń u_x w kierunku osi X we współrzędnych względnych
 Fig. 8.11. The distributions of displacements u_x in the X direction in the relative co-ordinates

Tabela 8.4
 Table 8.4

Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_x w kierunku osi X obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych
 The comparison of experimental values of displacement u_x in X direction for actual object in relation to the model values

Wykres Diagram	n	Typ odległości Type of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Rys.8.11 Fig. 8.11	25	wzg	%	---	---	---	---
		bezwzg	μm	0,1	0,0	0,0	0,1

Z wyjątkiem okolic punktu przyłożenia obciążenia na całej powierzchni przekroju poprzecznego dominuje kolor zielono-niebieski, co znaczy, że przemieszczenia u_x mieszczą się w przedziale od -0,71 do 0,64 μm . Pomimo tak niskich wartości przemieszczenia widoczne jest charakterystyczne uporządkowanie, polegające na tym, że kierunek przemieszczenia rdzenia i warstwy kory jest przeciwny.

Dobrze jest to widoczne na rysunku 8.11 przedstawiającym rozkład przemieszczeń u_x w kierunku osi X. W strefie kambium (współrzędna uogólniona 0,25 i 0,75 – rys. 8.11) następuje zmiana kierunku przemieszczenia u_x . W całym przekroju wartości przemieszczenia zmieniają się w zakresie od -0,38 do 0,59 μm przy wartości średniej wynoszącej 0,11 μm (tab. 8.4). Ujęcie procentowe porównania wykresów nie jest możliwe ze względu na fakt, że rozwiązanie teoretyczne jest równe zero w całym przekroju.

Można więc przyjąć, że założenie dotyczące tarczowego charakteru zachowania się badanych próbek podczas obciążania jest w dużym stopniu spełnione.

Fotografia plamkowa

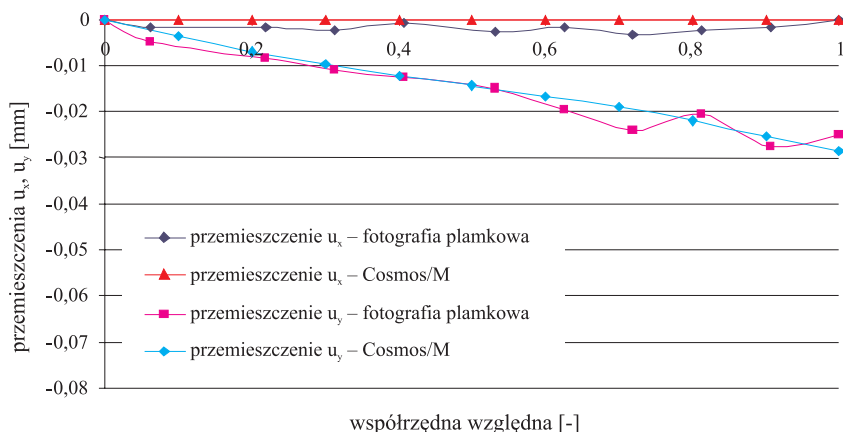
Rozkłady przemieszczeń u_y i u_x wyznaczone przy większych wartościach obciążenia ($F'=0,1$ do $0,2$ N/mm) za pomocą fotografii plamkowej potwierdzają dobre dopasowanie rozkładów rzeczywistych i uzyskanych w oparciu o model tarczowy MES. Rysunek 18 przedstawia przemieszczenia u_y i u_x w przekroju pionowym przy obciążeniu $F'=0,1$ N/mm powodującym maksymalne przemieszczenie $u_y=0,03$ mm. Średni błąd względny wyznaczenia u_y za pomocą modelu MES wyniósł w tym zakresie obciążenia 17% przy maksymalnym błędzie względnym wynoszącym 74% przy niskich wartościach przemieszczenia, dla których błąd bezwzględny był na poziomie 0,002 mm (tab. 8.5). Zmierzona wartość przemieszczeń u_x była mniejsza od teoretycznej w całym przekroju (rys. 8.12) średnio o 0,002 mm przy maksymalnych wartościach dochodzących do 0,004 mm (tab. 8.9).

Tabela 8.5

Table 8.5

Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_y w kierunku osi Y obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych ($F'=0,1$ N/mm)
The comparison of experimental values of displacement u_y in Y direction for actual object in relation to the model values ($F'=0,1$ N/mm)

Wykres Diagram	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Rys. 8.12 u_x Fig. 8.12 u_x	22	wzg	%	---	---	---	---
		bezwzg	mm	0,002	0,00	0,003	0,001
Rys. 8.12 u_y Fig. 8.12 u_y	22	wzg	%	17,0	0,00	74,1	29,7
		bezwzg	mm	0,002	0,00	0,004	0,001

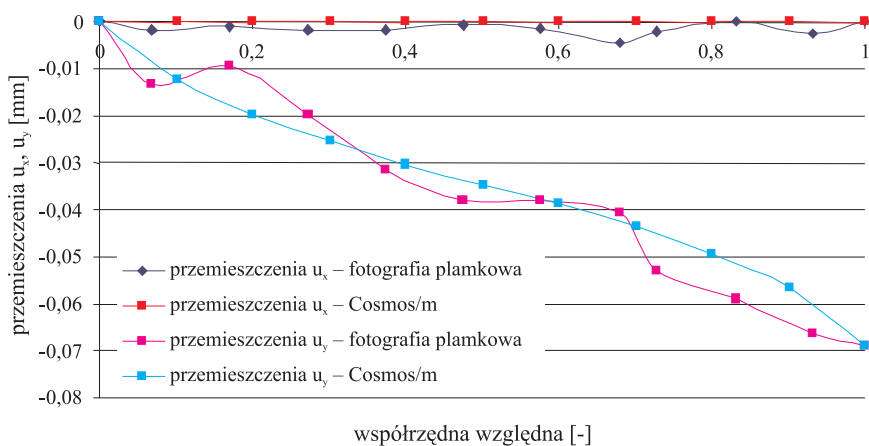


Rys. 8.12. Rozkłady przemieszczeń u_y i u_x w kierunku osi Y we współrzędnych względnych przy obciążeniu $F'=0,1$ N/mm

Fig. 8.12. The distributions of displacements u_y and u_x in the Y direction in the relative coordinates at the load $F'=0,1$ N/mm

Zwiększenie obciążenia do $F^*=0,2$ N/mm nie spowodowało zmiany charakteru rozkładu przemieszczeń u_y i u_x w przekroju zgodnym z kierunkiem działania obciążenia (rys. 8.13).

Przemieszczenia u_y rosły od zera do wartości maksymalnej w okolicach punktu przyłożenia obciążenia, a wartość przemieszczeń u_x w całym przekroju była w przybliżeniu stała i niewiele różniła się od zera. Średni błąd względny przy przemieszczeniu u_y wynosił 12,6% i zmieniał się w przedziale od 15 do 56% (tab. 8.6). Przy przemieszczeniach u_x średni błąd bezwzględny wynosił 0,0013 mm, a wartość maksymalna nie przekraczała 0,004 mm (tab. 8.6).



Rys. 8.13. Rozkłady przemieszczeń u_y i u_x w kierunku osi Y we współrzędnych względnych przy obciążeniu $F^*=0,2$ N/mm

Fig. 8.13. The distributions of displacements u_y and u_x in the Y direction in the relative coordinates at the load $F^*=0,2$ N/mm

Tabela 8.6

Table 8.6

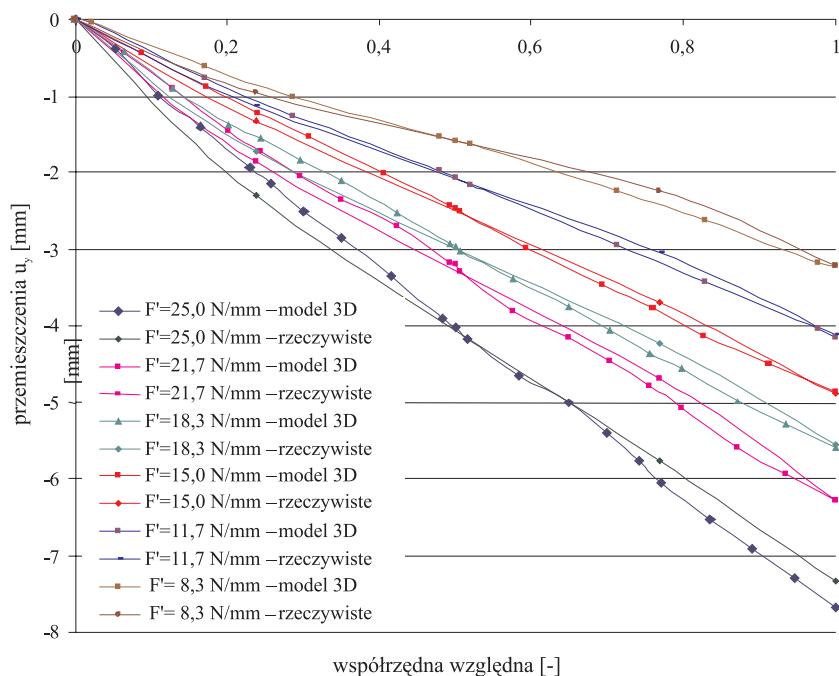
Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_y w kierunku osi Y obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych ($F^*=0,2$ N/mm)

The comparison of experimental value of displacement u_y in Y direction for actual object in relation to the model values ($F^* = 0,2$ N/mm)

Wykres Diagram	n	Typ odległości Type of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Rys. 8.13 u_x Fig. 8.13 u_x	23	wzg	%	---	---	---	---
bezwzg		mm	0,001	0,00	0,004	0,001	
Rys. 8.13 u_y Fig. 8.13 u_y	23	wzg	%	12,6	0,0	56,4	14,9
bezwzg		mm	0,003	0,00	0,008	0,003	

8.2. Rozkłady przemieszczeń dla modelu 3D MES

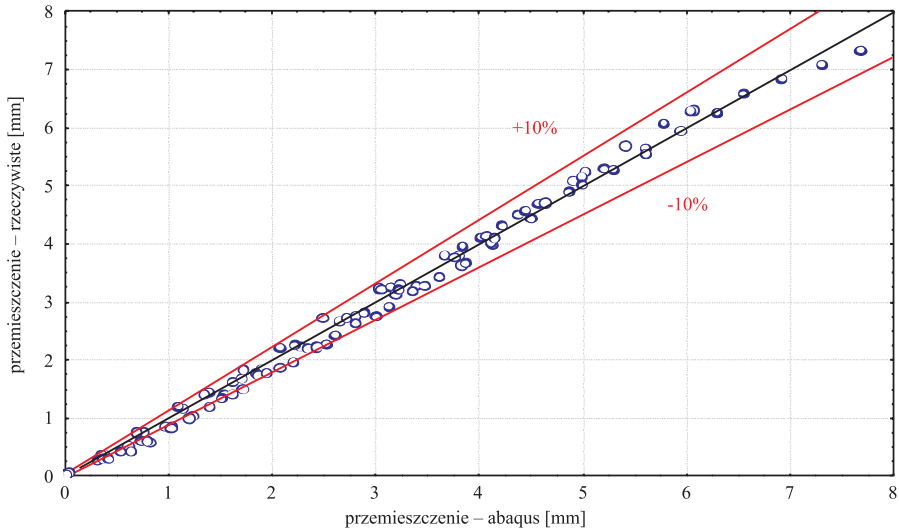
Weryfikację modelu dyskretnego MES w pełnym zakresie obciążenia przeprowadzono w oparciu o rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi Y, otrzymane na drodze doświadczalnej i na podstawie analizy modelu 3D w programie Abaqus. Na podstawie analizy modelu tarczowego uznawano, że najlepszym parametrem decydującym o stopniu dopasowania wykresów są przemieszczenia u_y w kierunku działania obciążenia. Rysunek 8.14 przedstawia rozkłady przemieszczeń u_y wzdłuż przekroju pionowego korzenia marchwi przy wartości obciążenia z przedziału od $F'=8,3$ N/mm, aż do wartości maksymalnej wynoszącej dla badanej odmiany $F'=25,0$ N/mm.



Rys. 8.14. Rozkłady przemieszczeń u_y w kierunku osi Y we współrzędnych względnych w pełnym zakresie obciążenia

Fig. 8.14. The distributions of displacements u_y and u_x in the Y direction in the relative coordinates at the full range of load

Średnie błędy względne w rozkładach przemieszczeń rzeczywistych i wyznaczonych w oparciu o model 3D, przedstawionych w rozdziałach 7.3.1 i 7.3.3 mieściły się w przedziale +/-10% (rys. 8.15). Wyjątek stanowią błędy powstałe przy niskich wartościach przemieszczeń, w których osiągają nawet 50% (tab. 8.7). Wynika to z jednej strony z błędów metody pomiarowej, szczególnie wysokich w okolicach miejsca podparcia próbki, a z drugiej strony ze sposobu obliczania błędu względnego.



Rys. 8.15. Zbiorne porównanie rzeczywistych rozkładów przemieszczeń u_y w kierunku osi Y w stosunku do wartości modelowych (model 3D)

Fig. 8.15. The summary comparison of distributions of displacements u_y in the direction of the axis Y in relation to the model values (the 3D model)

Tabela 8.7

Table 8.7

Porównanie doświadczalnych wartości przemieszczenia u_y w kierunku osi Y obiektu rzeczywistego w stosunku do wartości modelowych (pełny zakres obciążenia)

The comparison of experimental values of displacement u_y in Y direction for actual object in relation to the model values (the full range of load)

Obciążenie F' N/mm Load F' N/mm	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
25,0	25	względna	%	10,8	0,0	49,0	16,8
		bezwzględna	mm	0,12	0,00	0,33	0,12
21,7	23	względna	%	1,3	0,1	51,8	17,6
		bezwzględna	mm	0,09	0,00	0,25	0,07
18,3	23	względna	%	10,8	0,0	45,0	17,9
		bezwzględna	mm	0,06	0,00	0,18	0,05
15,0	19	względna	%	6,9	0,0	16,6	5,8
		bezwzględna	mm	0,12	0,00	0,23	0,07
11,7	15	względna	%	10,0	0,0	42,1	11,9
		bezwzględna	mm	0,11	0,00	0,217	0,08
8,3	15	względna	%	11,0	0,0	32,9	11,4
		bezwzględna	mm	0,10	0,00	0,20	0,08

9. Dyskusja nad wynikami

9.1. Właściwości wytrzymałościowe

Wyznaczenie podstawowych właściwości wytrzymałościowych badanych odmian marchwi miało na celu uzyskanie wiarygodnych i spójnych danych wejściowych do programów obliczeniowych MES oraz zidentyfikowanie parametrów mających istotne znaczenie ze względu na wyznaczenie nacisków powierzchniowych.

Z uwagi na zróżnicowanie właściwości materiału biologicznego oraz konieczność późniejszej walidacji modelu MES w oparciu o przemieszczenia odrzucono dosyć powszechnie stosowaną możliwość bezpośredniego korzystania z danych literaturowych obejmujących właściwości wytrzymałościowe materiału biologicznego przy budowie modelu dyskretnego produktu rolniczego. Między innymi Lewis [2008] wykonał model dyskretny jabłka w oparciu o stałe materiałowe (moduł sprężystości, stałą Poissona i naprężenia niszczące) uzyskane przez Abbotta i Lu [1996] oraz Mohsenina [1970]. Również Wu i Pitts [1999] zbudowali model pojedynczej komórki jabłka, wykorzystując dane dotyczące właściwości wytrzymałościowych elementów komórki uzyskane przez Pitta i Davisa [1984a, 1984b] oraz Mohsenina [1986]. Podobnie postąpili Dintwa i in. [2008], budując bardziej zaawansowany model jabłka, uwzględniający właściwości reologiczne i pozwalający na badania w warunkach obciążeń dynamicznych. Właściwości wytrzymałościowe przyjął na podstawie prac prowadzonych wcześniej przez różnych autorów [Hamann 1970, Jindal i Mohsenin 1976, Mohsenin 1977, Wu i in. 1994, Gołacki i Stropiek 2001, Van Zeebroeck 2005]. Właściwości tkanki jabłka, będące zależne od czynnika czasu w postaci czteroparametrowej funkcji relaksacji naprężeń, zostały zapożyczone z pracy Gołackiego i Stropka [2001]. W efekcie tak przyjętej metodyki powstały modele, które dostatecznie dobrze odzwierciedlały rzeczywisty obiekt badań, ale były trudne do walidacji ze względu na brak odpowiednich wyników badań.

W literaturze dostępne są szczegółowe dane dotyczące podstawowych właściwości wytrzymałościowych korzenia marchwi. Dotyczy to zarówno modułu sprężystości, jak i stałej Poissona uzyskanych różnymi metodami w różnych okresach przechowywania [Gołacki i in. 1987]. Analiza piśmiennictwa pozwala stwierdzić, że poza odmianą oraz okresem przechowywania korzeni marchwi, wartości tych parametrów zależą w istotny sposób od sposobu ich wyznaczania. Moduł sprężystości dla tej samej odmiany marchwi i takiego samego terminu badania zmienia się od wartości 8,73 MPa wyznaczonej w próbie ściskania do wartości 12,92 MPa wyznaczonej w próbie rozciągania. Podobny wpływ

na wartość modułu sprężystości ma okres i warunki przechowywania surowca do badań. W tym wypadku zmiany są nieco mniejsze i na przykład wyznaczone w próbie ściskania mieszczą się w przedziale od 8,73 MPa bezpośrednio po zbiorze do 8,08 MPa po czterech miesiącach przechowywania [Szot, Gołacki 1987].

Przyjmując założenie, że moduł sprężystości i stała Poissona mają stanowić parametry opisujące właściwości surowca pod kątem nacisków powierzchniowych, dane dostępne w literaturze mogły stanowić jedynie punkt odniesienia. W literaturze brakuje informacji pozwalających na ocenę wpływu właściwości wytrzymałościowych na wielkość nacisków powierzchniowych. W związku z tym uznano za konieczne przeprowadzenie pomiarów właściwości wytrzymałościowych wybranych do badań odmian marchwi bezpośrednio przed pomiarem rozkładu nacisków powierzchniowych. Otrzymane wyniki porównywano jednak na bieżąco z danymi dostępnymi w literaturze.

Przy wyborze metodyki wyznaczania własności wytrzymałościowych świadomie zrezygnowano z rozwiązań nowatorskich, nieopisanych jeszcze w literaturze, takich jak np. zastosowanie wideoestensometru czy systemu cyfrowej korelacji obrazu, a oparto się na sprawdzonej metodyce gwarantującej uzyskanie wiarygodnych i łatwych do weryfikacji wyników pomiarów.

Po wnikliwej analizie, wykorzystując wyniki prac innych autorów, odrzucono metody wyznaczania stałych materiałowych w próbie zginania [Kapsalis i in. 1972, Szot i Gołacki 1987], ścinania [Aubert i in. 1979, Szot i Gołacki 1987], rozciągania [Verlinden i in. 1994, Szot i Gołacki 1987] czy przy użyciu penetratora [Kuczyński i Bzowska-Bakalarz 1987, Bzowska-Bakalarz i Kuczyński 1987] i zdecydowano się na przeprowadzenie pomiarów w próbie ściskania. Moduł sprężystości wyznaczono metodą stycznych, [Gołacki i in. 1987, Sitkey 1986], natomiast do wyznaczenia stałej Poissona użyto metodę Hugesa i Segerlinda polegającą na wyznaczeniu modułów sprężystości przy ściskaniu swobodnym i nieswobodnym [Gołacki i Obroślak 1998]. Obie metody są szczegółowo opisane w literaturze przedmiotu, co pozwoliło na bieżącą kontrolę poprawności uzyskanych wyników. Po każdorazowej serii pomiarów porównywano otrzymane wyniki z wartościami dostępnymi w literaturze. Nie odbiegały one w znaczący sposób od danych innych autorów, a pojawiające się rozbieżności wynikały ze zróżnicowania właściwości materiału biologicznego i na ogół nie przekraczały kilkudziesięciu procent w wypadku modułów sprężystości oraz kilku procent w wypadku stałej Poissona.

9.2 Model dyskretny

Jednym z podstawowych etapów prac zmierzających do powstania modelu dyskretnego jest budowa modelu geometrycznego badanego obiektu. Lewis [2008] zbudował model geometryczny jabłka Golden Delicious, wykorzystując obraz powstały po zastosowaniu skanera laserowego i importując go do programu obliczeniowego ANALYSYS-DYNA. Pozwoliło to na wierne odwzorowanie zewnętrznego kształtu konkretnego jabłka, natomiast nie umożliwiło wyznaczenia kształtu pozostałych warstw przyjętych przy budowie modelu (tzn. miąższu i rdzenia). W rezultacie przyjęto uproszczony kształt

tych warstw zbudowany w oparciu o analizę przekroju poprzecznego jabłka. Podobne podejście do budowy modelu MES zaprezentowali Wu i Pitts [1997] w trakcie modelowania pojedynczej komórki parenchymy jabłka. Przeprowadzili oni precyzyjne pomiary kolejnych przekrojów poprzecznych wybranej komórki parenchymy, a następnie wykonali model 3D precyzyjnie odwzorowujący kształt komórki. Taki sposób modelowania, poza niewątpliwą zaletą, jaką jest odwzorowanie rzeczywistego kształtu badanego obiektu, ma kilka istotnych wad. Należy do nich zaliczyć między innymi trudności w interpretacji uzyskanych wyników, wysokie koszty budowy modelu oraz istotne wydłużenie czasu obliczeń. Natomiast Dintwa i in. [2008] zrezygnowali z precyzyjnego odwzorowania rzeczywistego obiektu badań i zbudowali wyidealizowany, trójwarstwowy, 3D model geometryczny w postaci połowy jabłka odmiany Jonagold, wygenerowany poprzez obrót cienkiego fragmentu modelu wokół osi pionowej jabłka.

Po rozważeniu wszystkich argumentów przy budowie modelu geometrycznego korzenia marchwi zdecydowano się na przyjęcie założeń upraszczających, zdając sobie sprawę z konsekwencji, jakie te uproszczenia mogą spowodować. Podobnie jak Dintwa i in. [2008] przyjęto osiowosymetryczny kształt trójwarstwowego modelu, a analizie numerycznej poddano jedynie jego część. Pozwoliło to na ograniczenie czasu obliczeniowego bez negatywnego wpływu na efekty obliczeń.

Następnym, niezmiernie ważnym krokiem prowadzącym do powstania modelu dyskretnego, jest sposób doboru właściwości wytrzymałościowych materiału biologicznego. W literaturze przedmiotu daje się zauważyć brak jednolitej techniki wprowadzania danych obejmujących właściwości wytrzymałościowe do programu obliczeniowego. Wynika to zarówno z przyjętego modelu, w oparciu o który przeprowadzona jest analiza numeryczna, jak i z dostępu do odpowiednich danych oraz sposobu późniejszej walidacji modelu. Najprostszy sposób wybrał Lewis [2008], który do swojego modelu wprowadził dane w postaci stałych materiałowych, zgodnych z liniową teorią sprężystości. Zupełnie inaczej postąpili Dintwa i in. [2008], którzy co prawda zrezygnowali z uwzględnienia anizotropii materiału biologicznego, twierdząc, że nie ma to istotnego wpływu na wyniki badań, ale analizę przeprowadzili w oparciu o czteroparametryczny model Maxwella, dobrze opisujący lekko sprężyste własności materiału biologicznego.

Po szczegółowym przeglądzie przedstawionych modeli, przy budowie modelu korzenia marchwi zdecydowano się na uwzględnienie nieliniowości i anizotropii właściwości wytrzymałościowych tkanki. Natomiast z uwagi na duże wartości odkształcenia korzenia marchwi analizę numeryczną, podobnie jak Kędzior [2005] przeprowadzon, używając modelu Arrudy-Boyce'a.

Oddzielnym zagadnieniem jest walidacja zbudowanego modelu MES. Najczęściej jest ona przeprowadzana w oparciu o wielkości będące celem modelowania. Zarówno Lewis [2008] jak i Dintwa i in. [2008] wykorzystali do tego celu pomiary nacisków dopuszczalnych. W odniesieniu do modelu dyskretnego korzenia marchwi uznano, że taki sposób walidacji może w pewnym stopniu ograniczyć wiarygodność otrzymanych wyników. Zdecydowano się wobec tego na walidację modelu korzenia marchwi przy wykorzystaniu innych wielkości niż będące przedmiotem badań. Za najefektywniejsze uznano rozkłady przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi.

Z uwagi na brak w literaturze przedmiotu danych dotyczących pomiarów przemieszczeń w materiałach biologicznych zdecydowano się na zaadaptowanie metodyki znanej z pomiarów materiałów konstrukcyjnych. Do wyznaczenia map przemieszczeń wykorzystano metodę interferometrii plamkowej (ESPI), a do wyznaczenia rozkładów przemieszczeń metodę fotografii plamkowej oraz pomiary przeprowadzone w programie AutoCad.

Dynamiczny rozwój aparatury pomiarowej stwarza obecnie możliwość wyznaczania rozkładów przemieszczeń na całej powierzchni przekroju poprzecznego materiałów pochodzenia biologicznego w pełnym zakresie obciążenia. W szczególności dotyczy to możliwości, jakie daje zastosowanie wideoekstensometru oraz systemów cyfrowej korelacji obrazu (DIC) Q-400 służącego do analizy pola odkształceń (3D). Podstawową zaletą tych systemów jest powtarzalność wyników w szerokim zakresie odkształceń próbek. Punkty pomiarowe wybierane są automatycznie na podstawie analizy poziomów szarości w obszarach, w których umieszczono znaczniki. Punkty te w miarę wzrostu odkształcenia są śledzone automatycznie z dokładnością zapewnioną przez ciągłą analizę poziomów szarości. Próbkowanie następuje z częstotliwością 100 milisekund (10 Hz). Każdy brak pewności co do identyfikacji punktów pomiarowych w trakcie obciążania powoduje przerwanie testu. Taki sposób przeprowadzenia pomiarów eliminuje błędy, których źródłem są decyzje podejmowane przez człowieka. Należy przypuszczać, że w najbliższym czasie metody te staną się ważnym narzędziem niezbędnym do wyznaczania pola przemieszczeń, a co za tym idzie właściwości wytrzymałościowych materiałów pochodzenia biologicznego.

9.3. Naciski powierzchniowe

Pomiar nacisków powierzchniowych należy do jednych z trudniejszych zadań w mechanice. Wynika to z konieczności uwzględnienia wielu zjawisk zachodzących w strefie styku. Najważniejsze z nich to zjawisko tarcia i to zarówno wynikające z chropowatości powierzchni stykających się ciał, jak i z oddziaływania cząsteczkowego. Zależy ono w istotny sposób od rodzaju i stanu stykających się powierzchni. Szczęólnego znaczenia zjawisko tarcia nabiera w stosunku do materiałów biologicznych, ze względu na duże wielkości odkształceń pojawiające się w trakcie obciążania.

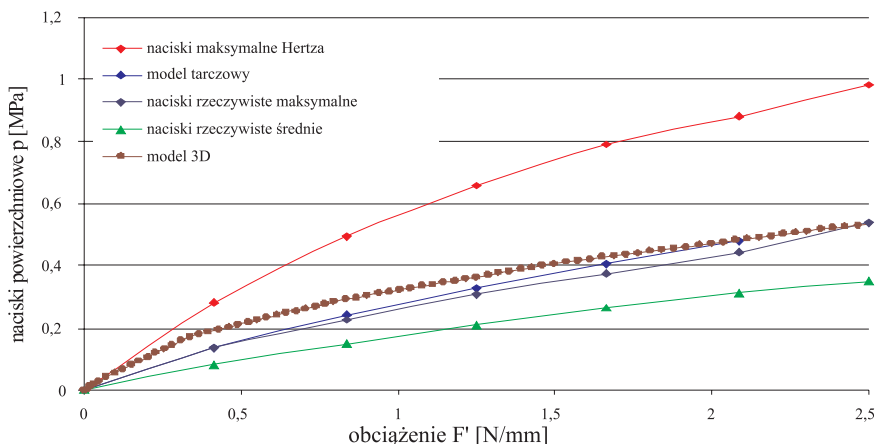
W świetle tego pomiar nacisków powierzchniowych poprzez wprowadzenie pomiędzy stykające się elementy dodatkowej warstwy pomiarowej może doprowadzić do pojawienia się błędów wynikających ze zmiany warunków styku. Pomiary nacisków powierzchniowych dla jabłka przeprowadzone przez Herolda przy zastosowaniu systemu Tekscan [Herold 2001] zdaniem Lewisa [2008] potwierdzają tę opinię. Lewis [2008] przeprowadził pomiary nacisków powierzchniowych metodą nie wymagającą wprowadzania dodatkowego elementu w strefę styku, polegającą na wykorzystaniu fal ultradźwiękowych i uzyskał zupełnie inną postać rozkładu nacisków wzdłuż powierzchni styku. Zaletą obu metod była możliwość wyznaczenia rozkładu nacisków powierzchniowych zarówno jako funkcji obciążenia, jak i w wybranych przekrojach poprzecznych.

Pomiar nacisków powierzchniowych korzenia marchwi przeprowadzono dwuetapowo, unikając wprowadzania dodatkowego elementu pomiarowego w strefę styku. Na pierwszym etapie wyznaczono rozkłady nacisków jako funkcji obciążenia, wykonując precyzyjne pomiary wielkości obciążenia oraz powierzchni styku, natomiast na drugim – rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym przy zastosowaniu metody elastoopływowej.

Porównanie nacisków powierzchniowych otrzymanych na drodze doświadczalnej oraz w oparciu o modelu dyskretny korzenia marchwi przeprowadzono przy wykorzystaniu danych uzyskanych dla marchwi odmiany Karotan, a więc tej, w oparciu o którą przeprowadzono weryfikację modelu dyskretnego. Do rozwiązania teoretycznego przeprowadzonego na podstawie wzorów Hertza przyjęto następujące parametry: moduł sprężystości $E=9,70$ MPa, stała Poissona $\nu=0,475$, średnica zewnętrzna korzenia marchwi $\varphi_k=30$ mm, średnica rdzenia $\varphi_r=15$ mm. Próbkę wycięto z II strefy pomiarowej. Porównaniu poddano rozkłady nacisków powierzchniowych jako funkcji siły obciążającej oraz rozkłady nacisków wzdłuż powierzchni styku próbki z elementem obciążającym.

9.3.1. Naciski powierzchniowe jako funkcja obciążenia

Rzeczywisty rozkład nacisków powierzchniowych korzenia marchwi jako funkcji obciążenia ma postać krzywej asymptotycznie zdążającej do wartości maksymalnych (rys. 9.1). Dotyczy to zarówno wartości średnich, jak i maksymalnych obliczonych w oparciu o rozkład eliptyczny. Kształt ten jest zbliżony z wynikami pomiarów przeprowadzonych dla jabłka przez Lewisa [2008], chociaż wartości maksymalnych nacisków na korzeń marchwi są około pięciokrotnie większe przy dwukrotnie mniejszym odkształceniu przekroju poprzecznego.



Rys. 9.1. Zależność nacisków powierzchniowych od obciążenia (pełny zakres obciążenia)

Fig. 9.1. Correlation of the surface pressure with the load (the full range of load)

Model 3D dobrze opisuje rozkłady rzeczywistych nacisków powierzchniowych w pełnym zakresie obciążenia (rys. 9.1). Średni błąd względny wynosił 5,28%, a jego wartość była stabilna i mieściła się w przedziale od 4,0 do 8,6% (tab. 9.1 i 9.2). W przedziale obciążenia od $F'=5$ do 20 N/mm wartości nacisków powierzchniowych obliczonych dla modelu 3D są zaniżone w stosunku do nacisków rzeczywistych.

Tabela 9.1

Table 9.1

Porównanie doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych w stosunku do wartości modelowych (pełny zakres obciążenia)

The comparison of experimental value of surface pressure in relation to the model values (the full range of load)

Wykres 9.1 Diagram 9.1	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Model 3D 3D model	24	wzg	%	5,3	4,0	8,6	5,2
		bezwzg	MPa	0,07	0,04	0,11	0,06
Wzory Hertza Hertz's theory	24	wzg	%	67,0	55,4	83,8	64,5
		bezwzg	MPa	0,94	0,54	1,40	0,87

Tabela 9.2

Table 9.2

Porównanie doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych w stosunku do wartości modelowych ($F'=0$ do 2,5 N/mm)

The comparison of experimental value of surface pressure in relation to the model values ($F'=0$ do 2,5 N/mm)

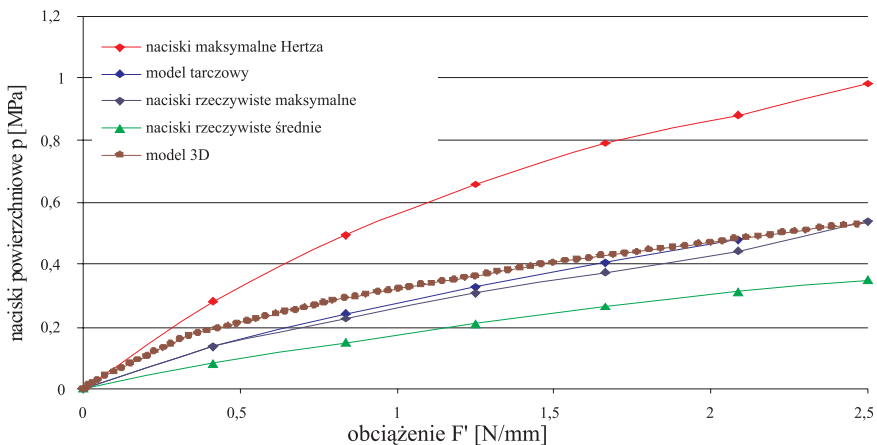
Wykres 9.2 Diagram 9.2	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Model 3D 3D model	25	wzg	%	18,4	12,1	30,0	22,2
		bezwzg	MPa	0,05	0,04	0,06	0,03
Model tarczowy Disc model	25	wzg	%	5,6	0,00	8,4	4,3
		bezwzg	MPa	0,03	0,00	0,06	0,03
Wzory Hertza Hertz's theory	25	wzg	%	109,0	105,0	115,4	99,8
		bezwzg	MPa	0,32	0,16	0,43	0,35

Obliczanie nacisków powierzchniowych w oparciu o wzory Hertza [Dyląg 2003]. powoduje istotne zawyżenie wartości. Średnia różnica pomiędzy nimi a wartościami rzeczywistymi w badanym zakresie obciążenia wynosi 67%, przy czym maksymalne różnice przekraczają nawet 80%. Wyniki te, niezależnie od wartości bezwzględnych, różnią się w istotny sposób od efektów badań uzyskanych przez Lewisa. Według niego naciski obliczone w oparciu o teorię Hertza są zgodne w całym zakresie obciążenia z wartościami doświadczalnymi, a wartości nacisków wyznaczonych na podstawie analizy MES są

wyższe zarówno od doświadczalnych, jak i obliczonych ze wzorów Hertza [Dyląg 2003]. Przyczyną tych różnic mogą być odmienne właściwości tkanki jabłka i korzenia marchwi oraz inny kształt stykających się ciał.

Średnie naciski powierzchniowe obliczone w oparciu o pomiar siły obciążającej i pola powierzchni styku, bez uwzględnienia eliptycznego rozkładu, powodują zaniżenia wartości o około 25% w całym zakresie obciążenia.

W początkowym zakresie obciążania (do obciążenia $F=2$ N/mm – co stanowi 12,5% obciążenia maksymalnego badanej odmiany korzenia marchwi) lepsze dopasowanie wykazuje model tarczowy wykonany w oparciu o program COSMOS/M (rys. 9.2). Średni błąd względny wynosi w tym przypadku tylko 5,6%, podczas gdy dla modelu 3D błąd ten wynosi 18,4%. Należy przy tym podkreślić, że bezwzględne wartości różnicy nacisków powierzchniowych (tab. 9.2) są stosunkowo małe i wahają się w przedziale od 0 do 0,056 MPa. Podobnie jak w całym zakresie obciążenia obliczenia nacisków w oparciu o wzory Hertza dają zawyżone wartości (nawet o ponad 100%), a obliczone w oparciu o wartość średnią zaniżone o ok. 25%.



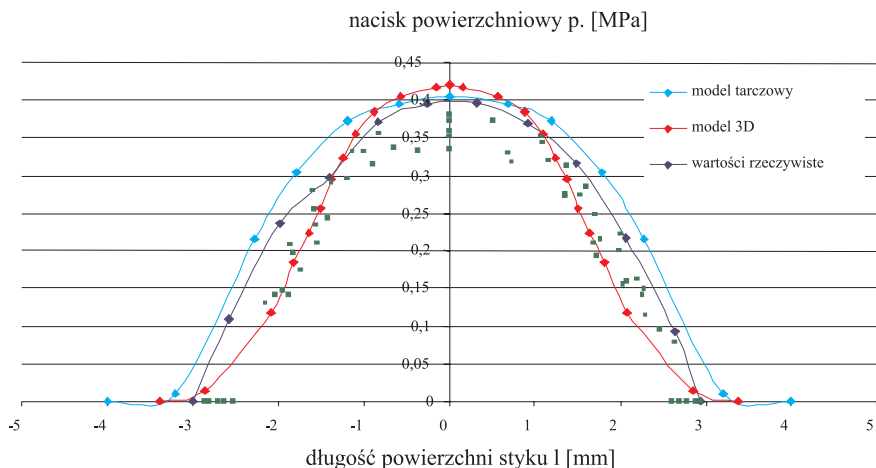
Rys. 9.2. Zależność nacisków powierzchniowych od obciążenia ($F'=0$ do 2,5 N/mm)

Fig. 9.2. Correlation of the surface pressure with the load ($F'=0 - 2,5$ N/mm)

Mimo wprowadzenia modułu sprężystości w postaci funkcji uzyskanej na podstawie badań eksperymentalnych oraz przeprowadzenia analizy nieliniowej zależność nacisków powierzchniowych od obciążenia nie rosła asymptotycznie do wartości maksymalnych. Pominięcie nieliniowości materiałowej [Lewis 2008] przy wprowadzaniu danych do programu obliczeniowego spowodowałoby ciągły wzrost nacisków powierzchniowych w miarę wzrostu obciążenia bez osiągnięcia wartości maksymalnej.

9.3.2. Naciski powierzchniowe wzdłuż powierzchni styku

Rozkład rzeczywistych nacisków powierzchniowych korzenia marchwi wzdłuż powierzchni styku przy obciążeniu promieniowym ma kształt zbliżony do krzywej parzystej o charakterystycznym plateau w okolicach strefy kontaktu (rys. 9.3). Szerokość plateau zwiększa się wraz ze wzrostem obciążenia i dla $F'=25$ N/mm osiąga prawie połowę powierzchni styku (rys. 9.6). Przebieg krzywej jest zgodny z wynikami pomiarów przeprowadzonych przez Herolda [2001], które polegały na wyznaczeniu rozkładu nacisków powierzchniowych dla dwóch walców o różnej wytrzymałości na zgniatanie, o średnicy 40 mm ściskanych promieniowo. Pomiary wykazały, że rozkład nacisków powierzchniowych na materiały o niższej wytrzymałości na zgniatanie, do których należy zaliczyć owoce i warzywa, konkretnie korzeń marchwi, ma przebieg bardziej płaski z wyraźnie zaznaczoną strefą o niewiele zmieniających się wartościach nacisków. Natomiast przebieg rozkładu nacisków powierzchniowych na wałek o wyższej odporności na zgniatanie posiada zupełnie inny kształt z charakterystycznym maksimum w okolicach strefy styku.



Rys. 9.3. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym ($F'=1,7$ N/mm)

Fig. 9.3. The distribution of surface pressure along the surface of the contact point of the loading head element with the carrot root ($F'=1,7$ N/mm)

Porównanie rzeczywistych rozkładów nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym z wynikami uzyskanymi w oparciu o model tarczowy oraz model 3D przeprowadzono przy sześciu wartościach obciążeń z przedziału od 1,7 do 25,0 N/mm. W zakresie małych obciążeń (do $F'=2,5$ N/mm), w którym lepsze dopasowanie wykazuje model tarczowy (rys. 9.3), wartości nacisków otrzymanych przy wykorzystaniu modelu 3D są mniejsze od wielkości rzeczywistych średnio o 28%, ale maksymalna różnica dochodzi nawet do 74% (tab. 9.3).

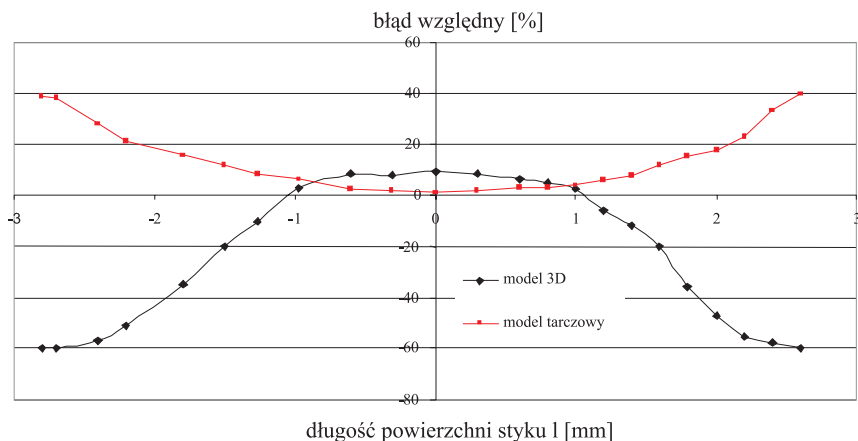
W przypadku modelu tarczowego uzyskane wyniki wykazują lepsze dopasowanie. Średnie odchylenie nacisków powierzchniowych od wartości rzeczywistych wynosi nieco ponad 16% przy maksymalnych wartościach nie przekraczających 40%.

Tabela 9.3
Table 9.3

Porównanie doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych w stosunku do wartości modelowych ($F'=1,7$ N/mm)
The comparison of experimental value of surface pressure in relation to the model values ($F'=1,7$ N/mm)

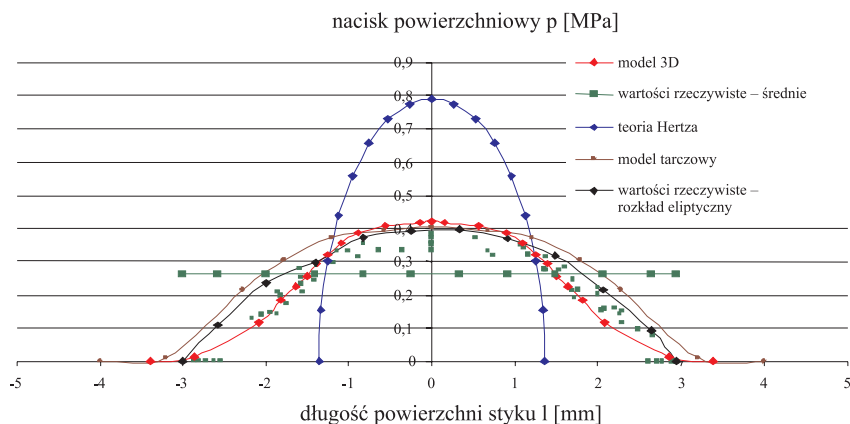
Wykres 9.3 Diagram 9.3	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Model 3D 3D model	24	wzg	%	-28,2	-5,9	-74,0	-35,8
		bezwzg	MPa	-0,05	-0,02	-0,10	- 0,02
Model tarczowy Disc model	24	wzg	%	16,2	1,0	40,0	28,9
		bezwzg	MPa	0,03	0,04	0,00	0,02

Maksymalne różnice pomiędzy wielkościami nacisków powierzchniowych obliczonymi w oparciu o modele MES i wielkościami rzeczywistymi występują na krawędziach styku próbki z elementem obciążającym. W tym obszarze dla modelu 3D mieszczą się w przedziale od 10 do 60%, natomiast dla modelu tarczowego w przedziale od 10 do 40%. W okolicach osi pionowej próbki przy maksymalnych wartościach nacisków różnice między wielkościami rzeczywistymi i otrzymanymi w oparciu o modele MES są najmniejsze i nie przekraczają 10%. Strefa ta obejmuje obszar około 50% powierzchni styku (rys. 9.4).



Rys. 9.4. Rozkłady błędów względnych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym przy naciskach powierzchniowych ($F'=1,7$ N/mm)
Fig. 9.4. The distributions of the relative errors along the surface of the contact point of carrot root with load applying element for surface pressures ($F'=1,7$ N/mm)

Przy niskich wartościach obciążenia daje się zauważyć istotną różnicę pomiędzy rozkładem rzeczywistych nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku, a rozkładem wyznaczonym w oparciu o wzory Hertza [Dyląg 2003] (rys. 9.5). Dotyczy to zarówno maksymalnych wartości nacisków, jak i długości powierzchni styku próbki z elementem obciążającym. Dużo lepsze dopasowanie do wartości rzeczywistych, w rozpatrywanym zakresie obciążenia, wykazują naciski obliczone w oparciu o wartości średnie, dla których względny błąd nie przekracza 25%.

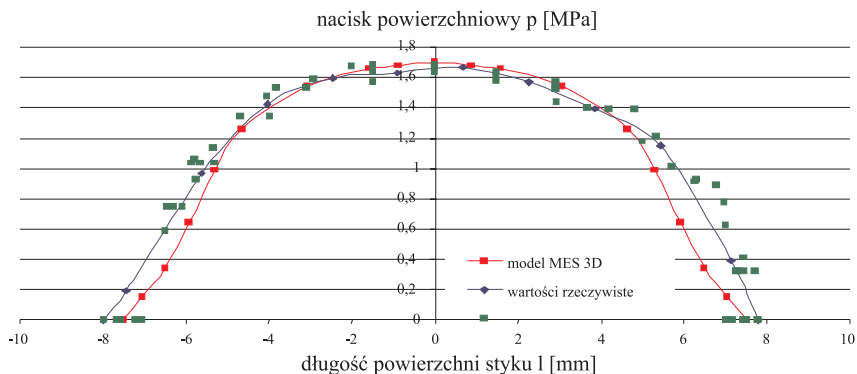


Rys. 9.5. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym ($F^*=1,7 \text{ N/mm}$)

Fig. 9.5. The distribution of surface pressure along the surface of the contact point of the loading head element with the carrot root ($F^*=1,7 \text{ N/mm}$)

W omawianym zakresie obciążenia kształt krzywej rozkładu nacisków powierzchniowych jest zgodny z przebiegiem krzywej uzyskanej przez Herolda dla jabłka odmiany Jonagold [Herold 2001]. W okolicach strefy styku naciski osiągają wartości maksymalne bez oznak gwałtownej utraty nośności przez miąższ jabłka.

Przy obciążeniach zbliżonych do wartości maksymalnych stopień dopasowania modelu 3D do wartości rzeczywistych przedstawiony jest na rysunku 9.6. Średnia różnica względna wynosi około 15% (tab. 9.4), chociaż wartości maksymalne zbliżone są do 50%. Takie duże rozbieżności pojawiają się jedynie na niewielkich fragmentach długości powierzchni styku (rys. 9.8.), w okolicach ich krawędzi, a więc przy niskich bezwzględnych wartościach nacisków. Dobrze to ilustruje wykres przedstawiony na rysunku 9.7. Większość punktów pomiarowych szczególnie dla wyższych wartości nacisków znajduje się wewnątrz zaznaczonego obszaru określającego granicę błędów $\pm 20\%$.



Rys. 9.6. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym ($F^{\prime}=25 \text{ N/mm}$)

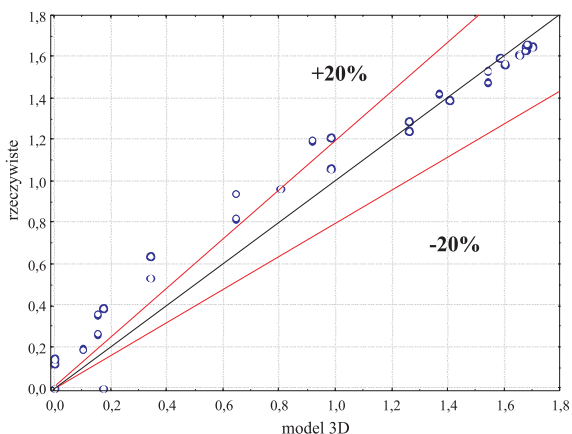
Fig. 9.6. The distribution of surface pressure along the surface of the contact point of the loading head element with the carrot root ($F^{\prime}=25 \text{ N/mm}$)

Tabela 9.4
Table 9.4

Porównanie doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych w stosunku do wartości modelowych ($F^{\prime}=25 \text{ N/mm}$)

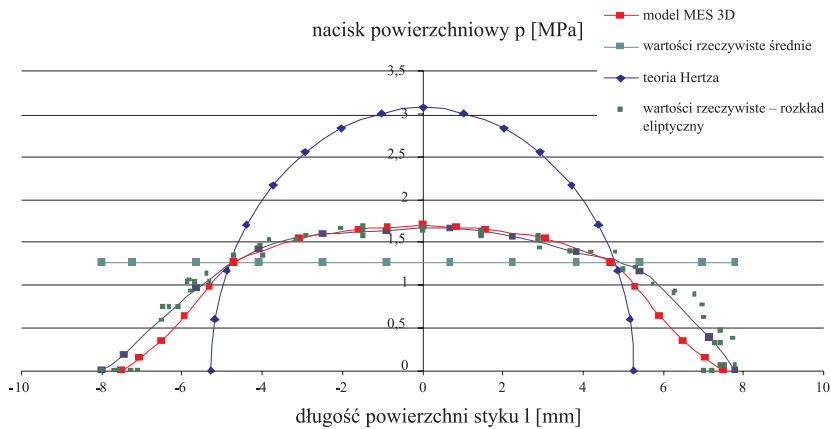
The comparison of experimental value of surface pressure in relation to the model values ($F^{\prime}=25 \text{ N/mm}$)

Wykres 9.3 Diagram 9.3	n	Typ odległości Typ of distance	Wymiar Dimension	Wartość średnia Mean value	Wartość minimalna Minimum value	Wartość maksymalna Maximum value	Odchylenie standardowe Standard deviation
Model 3D 3D model	24	wzg	%	15,4	0,0	47,3	21,3
		bezwzg	MPa	0,10	0,00	0,29	0,09



Rys. 9.7. Porównanie doświadczalnych wartości nacisków powierzchniowych w stosunku do wartości modelowych – model 3D ($F^{\prime}=25 \text{ N/mm}$)

Fig. 9.7. The comparison of experimental value of surface pressure in relation to the model values – the 3D model ($F^{\prime}=25 \text{ N/mm}$)



Rys. 9.8. Rozkłady nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym ($F'=25,0$ N/mm)

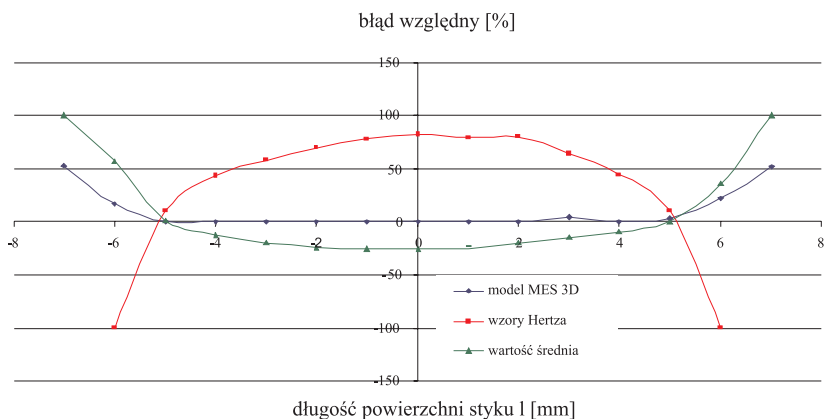
Fig. 9.8. The distribution of surface pressure along the surface of the contact point of the loading head element with the carrot root ($F'=25,0$ N/mm)

Rozkłady rzeczywistych nacisków powierzchniowych wyznaczonych w trakcie badań z naciskami obliczonymi ze wzorów Hertza [Dyląg 2003] oraz w oparciu o wartości średnie przedstawiono na rysunku 9.8. Naciski Hertza mają wartości wyraźnie większe od wartości rzeczywistych, ale długość powierzchni styku jest bardziej zbliżona do długości rzeczywistej. Naciski średnie nieco lepiej odwzorowują naciski rzeczywiste, szczególnie w okolicach osi pionowej próbki.

Analiza rozkładu błędów względnych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym (rys. 9.9) pokazuje, że na długości styku wynoszącej ok. 10 mm (od -5 mm do 5 mm), stanowiącej ponad 70% całkowitej długości różnica pomiędzy wynikami otrzymanymi dla modelu 3D oraz wartościami rzeczywistymi jest praktycznie równa zero.

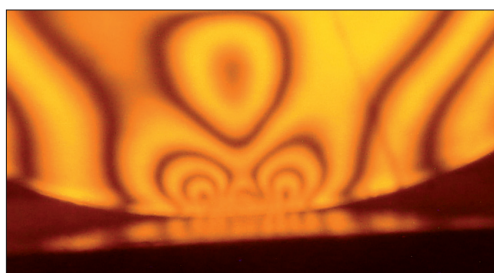
Dopiero w miejscach granicznych pojawia się wyraźna różnica dochodząca do 50%. Gorsze dopasowanie wykazuje przyjęcie liniowego rozkładu nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku i obliczanie ich wartości bezpośrednio z ilorazu siły obciążającej i powierzchni styku. Maksymalny błąd przy obliczaniu nacisków tą metodą w okolicach zbliżonych do osi pionowej próbki (dla maksymalnych wartości nacisków) nie przekracza 25%. W obszarach granicznych błąd ten osiąga duże wartości, a na samej granicy obliczanie ich traci sens.

Naciski obliczane na podstawie wzorów Hertza praktycznie na całej długości powierzchni styku odbiegają w istotny sposób od wartości rzeczywistych. W strefie zbliżonej do osi pionowej mają one wartości znacznie przewyższające naciski rzeczywiste. Różnica dochodzi do 80% i utrzymuje się na dużym odcinku wynoszącym ok. 60% całkowitej długości powierzchni styku. W obszarach granicznych różnica ta zmienia znak i naciski obliczone ze wzorów Hertza stają się wyraźnie mniejsze od rzeczywistych [Dyląg 2003].



Rys. 9.9. Rozkłady błędów względnych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym przy naciskach powierzchniowych ($F'=25,0$ N/mm)
 Fig. 9.9. The distributions of the relative errors along the surface of the contact point of carrot root with load applying element for surface pressures ($F'=25,0$ N/mm)

Mimo występowania bardzo wyraźnego plateau na krzywej rozkładu nacisków powierzchniowych (rys. 9.6) nie zaobserwowano opisanego przez Herolda i in. [2001] dla jabłek zjawiska polegającego na gwałtownej utracie nośności przez zniszczone komórki poddane maksymalnym naciskom powierzchniowym, znajdujące się w centralnym punkcie styku. Efektem tego zjawiska jest pojawienie się nacisków maksymalnych na obrzeżu powierzchni styku próbki z elementem obciążającym. Odmienny kształt rozkładu nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku dla korzeni marchwi może wynikać z innych właściwości komórek parenchymy jabłek i marchwi oraz ze specyfiki przyjętej metodyki badań polegającej na pomiarach nacisków poprzez wprowadzenie między stykające się elementy maty pomiarowej i nieuwzględnieniu tarcia. Wniosek ten potwierdzają badania elastooptyczne modeli zbudowanych z zachowaniem praw podobieństwa modelowego, które wyraźnie wskazują, że po przekroczeniu krytycznych wartości obciążenia maksymalne wartości nacisków pojawiają się na krawędzi powierzchni styku (rys. 9.10), co jest wynikiem działania sił tarcia powstałych w strefie styku.



Rys. 9.10. Rozkłady izochrom całkowitych dla elastooptycznego modelu korzenia marchwi
 Fig. 9.10. The isochroma pattern distributions for elastooptical model of the carrot root

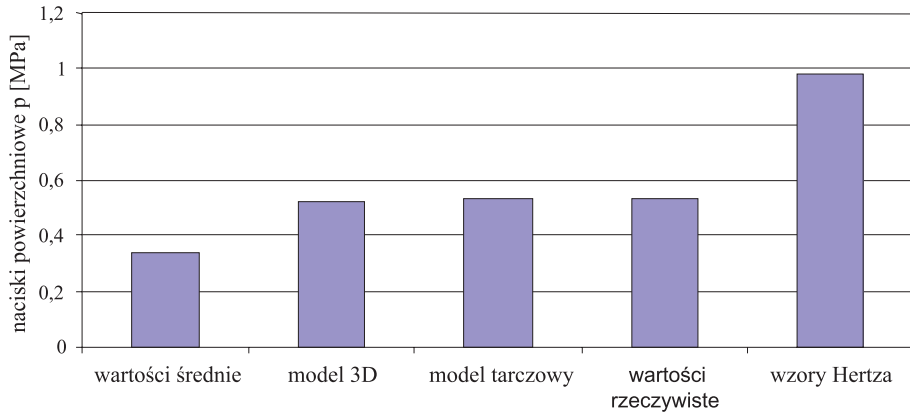
9.4. Naciski dopuszczalne

Wyznaczanie nacisków dopuszczalnych korzenia marchwi w oparciu o metodę elementów skończonych przebiega według następującego schematu. Na pierwszym etapie należy zbudować model dyskretny i zweryfikować go – najlepiej na podstawie przemieszczeń. Wybór przemieszczeń, jako wielkości służącej do weryfikacji modelu, wynika z konieczności niezależnienia efektów weryfikacji od wyznaczanych nacisków powierzchniowych oraz z coraz większej dostępności precyzyjnych metod pomiarów przemieszczeń. W przypadku wyznaczania nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą można zbudować model tarczowy, który w zakresie małych odkształceń odwzorowuje obiekt rzeczywisty na poziomie modelu 3D, ale znacznie skraca czas niezbędny do przeprowadzenia obliczeń i w mniejszym stopniu absorbuje pamięć operacyjną komputera. Ponadto właściwości materiałowe E i ν w modelu tarczowym korzenia marchwi w zakresie odkształceń do $\epsilon=0,05$ można wprowadzić w postaci liczb. Przy wyznaczaniu nacisków maksymalnych konieczna jest budowa modelu trójwymiarowego z uwzględnieniem możliwości oddzielenia się warstwy kory od rdzenia i wprowadzenia danych materiałowych w postaci nieliniowej zależności od obciążenia.

Następnym krokiem jest wprowadzenie umownych wartości dopuszczalnych odkształceń. W celu wyznaczenia nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą przyjęto (rozdz. 7.5) odkształcenie $\epsilon=0,05$, natomiast przy naciskach odpowiadających wytrzymałości doraźnej, odkształcenie $\epsilon = 0,20$. Podobny zakres odkształceń przyjęli Wu i Pitts [1998] podczas walidacji modelu pojedynczej komórki parenchymy jabłka uwzględniającej ciśnienie turgoru. Nie podali jednak odkształcenia, przy którym mógłby nastąpić proces rozpoczynający uszkodzenie komórki.

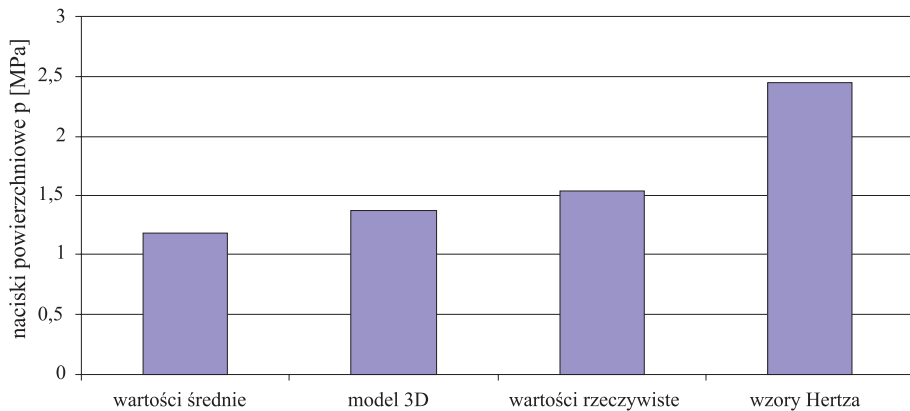
Rysunek 9.11 przedstawia porównanie nacisków dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość przechowalniczą ($\epsilon=0,05$) obliczoną w oparciu o model MES 3D, model MES tarczowy, wartości średnie i wzory Hertza z wartościami doświadczalnymi. Najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych są naciski obliczone przy zastosowaniu metody elementów skończonych (różnica nacisków powierzchniowych $\Delta p=0,01$ MPa). Naciski obliczone ze wzorów Hertza zawyżają wartości rzeczywiste prawie dwukrotnie, natomiast wartości średnie są mniejsze od doświadczalnych o $\Delta p=0,2$ MPa.

W przypadku nacisków maksymalnych również wartości otrzymane dzięki wykorzystaniu modelu dyskretnego (model 3D) są najbardziej zbliżone do rzeczywistych (rys. 9.12). Różnica nacisków wynosi tylko $\Delta p=0,17$ MPa, co stanowi 11% wartości doświadczalnych. Naciski obliczone przy wykorzystaniu wzorów Hertza są większe od doświadczalnych o 0,9 MPa, a więc o prawie 60%, natomiast obliczone w oparciu o wartości średnie są mniejsze o 0,36 MPa (24%).



Rys. 9.11. Porównanie wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ze względu na wytrzymałość przechwalniczą przy odkształceniu $\varepsilon=0,05$
 ($E_2=9,70$ MPa, $\varphi_2=30$ mm, II strefa pomiarowa)

Fig. 9.11. The comparison of the values of admissible surface pressures concerning the storage performance at the deformation $\varepsilon=0,20$ ($E_2=9,70$ MPa, $\varphi_2=30$ mm, II measuring zone)



Rys. 9.12. Porównanie wartości dopuszczalnych nacisków powierzchniowych ze względu na wytrzymałość doraźną przy odkształceniu $\varepsilon=0,20$
 ($E_2=9,70$ MPa, $\varphi_2=30$ mm, II strefa pomiarowa)

Fig. 9.12. The comparison of the values of admissible surface pressures concerning the immediate strength at the deformation $\varepsilon=0,20$ ($E_2=9,70$ MPa, $\varphi_2=30$ mm, II measuring zone)

10. PODSUMOWANIE

Problem zagadnienia kontaktowego w stosunku do warzyw i owoców pojawia się praktycznie na każdym etapie produkcji wyrobu finalnego. Działanie siły skupionej na małą powierzchnię może być przyczyną poważnych uszkodzeń, mimo iż bezwzględna wartość działającej siły nie jest istotnie duża. Stosowane metody obliczeniowe zaczerpnięte najczęściej wprost z teorii sprężystości i plastyczności nie dają wiarygodnych rezultatów, a wręcz mogą być źródłem błędów. Stosowanie teorii Hertza do wyznaczania dopuszczalnych nacisków powierzchniowych stoi w sprzeczności do założeń, przy których została wyprowadzona. Z teoretycznego punktu widzenia uwzględnienie w ścisłych rozwiązaniach takich zjawisk, jak pojawienie się sił tarcia w strefie kontaktu, czy występowanie dużych odkształceń stykających się produktów rolniczych, praktycznie nie jest możliwe.

W tej sytuacji pojawia się możliwość wykorzystania metod przybliżonych opartych na zaawansowanych technikach obliczeniowych. Dynamiczny rozwój programów opartych na wykorzystaniu metody elementów skończonych w połączeniu z postępowaniem technologicznym związanym z rozwojem informatyki pozwala na budowę modeli uwzględniających coraz bardziej złożone relacje pomiędzy badanymi obiektami. Jednoczesne pojawienie się wyrafinowanych metod pomiarowych sprzyja przeprowadzaniu wiarygodnych weryfikacji wyników otrzymanych w wyniku analizy modeli numerycznych.

W pracy zaproponowano metodę wyznaczania nacisków powierzchniowych w oparciu o metodę elementów skończonych przy wykorzystaniu programów COSMOS/M oraz Abaqus. Do przeprowadzenia obliczeń każdy z tych programów wymaga wprowadzenia wiarygodnych danych dotyczących własności materiałowych modelowych. W związku z tym wyznaczono dla badanych odmian korzeni marchwi moduł sprężystości podłużnej E i liczbę Poissona ν oraz określono parametry, od których wielkości te zależą. Moduł sprężystości wyznaczony metodą stycznych w zakresie naprężeń od 0 do 0,8 MPa mieścił się w przedziale od 4,04 do 4,88 MPa, a w zakresie od 1,0 do 1,9 MPa w przedziale od 9,70 do 15,38 MPa. Największe wartości osiąga moduł sprężystości mierzony w kierunku osi podłużnej korzenia marchwi (od 10,78 do 15,38 MPa), a kierunku obwodowym i promieniowym różnice są mniejsze (od 9,70 do 12,55 MPa). Otrzymane wielkości modułu sprężystości opisano za pomocą statystycznego modelu z sigma-ograniczeniami i uzyskano zgodność z wynikami doświadczalnymi na poziomie $\pm 15\%$ do przedziału naprężeń od 0 do 0,8 MPa oraz na poziomie $\pm 10\%$ do przedziału naprężeń od 1,0 do 1,9 MPa. Liczba Poissona ν w badanych odmianach marchwi mieściła się w przedziale od 0,468 do 0,482.

Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że na wartość modułu sprężystości istotny wpływ ma warstwa, z jakiej została pobrana próbka oraz kierunek zadanego obciążenia, natomiast podobnej zależności nie wykazano w stosunku do liczby Poissona. Z uwagi na nieliniową charakterystykę materiału korzenia marchwi istotny wpływ na wartość modułu sprężystości ma zakres obciążenia. Dane do programu COSMOS/M, za pomocą którego wyznaczano naciski powierzchniowe przy niskich wartościach obciążenia (w przedziale od 0 do 2,5 N/mm), wprowadzono w postaci stałej Poissona ν oraz modułów sprężystości podłużnej E_x i E_y wyznaczonych metodą siecznych w rozpatrywanym zakresie obciążenia. Do programu Abaqus pozwalającego na przeprowadzenie obliczeń w pełnym zakresie obciążenia oprócz stałej Poissona wprowadzono w miejsce modułów sprężystości zależności naprężenia od odkształcenia w postaci funkcji.

Weryfikację zbudowanych trójwarstwowych modeli korzeni marchwi przeprowadzono w oparciu o rozkłady przemieszczeń w marchwi odmiany Karotan. Wyniki uzyskane do modelu tarczowego zbudowanego przy wykorzystaniu programu COSMOS/M porównano z mapami i rozkładami przemieszczeń u_x , u_y i u_z wyznaczonymi do obiektu rzeczywistego za pomocą metody interferometrii plamkowej oraz fotografii plamkowej. Obszary o stałych wartościach przemieszczeń u_y rozmieszczone były koncentrycznie wokół punktu podparcia oraz punktu przyłożenia obciążenia. Rozkład przemieszczeń u_y w kierunku pionowym warstwy kory i rdzenia miał przebieg malejący. Wzdłuż osi poziomej przemieszczenia u_y mają w przybliżeniu stałą wartość. Przemieszczenia u_x w kierunku osi pionowej mają wartości zbliżone do zera, natomiast wzdłuż osi poziomej punkty przekroju poprzecznego przemieszczają się równomiernie w przeciwnych kierunkach równoległych do osi poziomej. Przemieszczenia u_z w kierunku osi korzenia marchwi mają wartości bliskie zeru, co potwierdza założenie o płaskim stanie odkształcenia. Do modelu 3D weryfikację wyników przeprowadzono na podstawie rozkładów przemieszczeń u_y w kierunku zgodnym z kierunkiem obciążenia uzyskanych na podstawie badań polegających na rejestracji odkształconych powierzchni przekroju poprzecznego i pomiarach przeprowadzonych w programie AutoCad.

Prawie w całym zakresie obciążenia błąd względny, wynikający z porównania eksperymentalnych wartości przemieszczeń u_y punktu przyłożenia obciążenia oraz otrzymanych dla modelu 3D zbudowanego w oparciu o program Abaqus, nie przekracza 10%. Wyjątek stanowi początkowy fragment obciążenia od 0 do 2,5 N/mm, w którym średni błąd względny obliczony do modelu 3D dochodzi do 60%. W tym zakresie obciążenia lepsze dopasowanie wykazują wyniki wyznaczone w oparciu o model tarczowy zbudowany za pomocą programu COSMOS/M. Błąd względny w stosunku do modelu tarczowego jest stabilny i waha się w przedziale od 2,1 do 7,0%, a jego wartość średnia wynosi 5,5%.

Weryfikacja modeli MES, zbudowanych przy wykorzystaniu programów COSMOS/M i Abaqus w oparciu o rozkłady przemieszczeń, wykazała dobrą zgodność zarówno pod względem jakościowym, jak i w odniesieniu do wartości bezwzględnych. W początkowym zakresie obciążenia (od 0 do 2,5 N/mm) wyniki modelu tarczowego obarczone są średnim błędem nieprzekraczającym 17% w stosunku do wartości przemieszczeń u_x , u_y i u_z uzyskanych za pomocą interferometrii plamkowej (ESPI) i fotografii plamkowej. W pozostałym zakresie obciążenia przemieszczenia u_y wyznaczone w spo-

sób eksperymentalny i obliczone za pomocą modelu 3D programu Abaqus mieszczą się w granicach +/- 10 %.

Naciski powierzchniowe wyznaczono w oparciu o metodykę zaproponowaną przez autora. Polegała ona na pomiarach pola powierzchni styku próbki z elementem obciążającym w funkcji siły wymuszanej oraz wyznaczeniu rozkładów nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku przy wykorzystaniu metody elastooptrycznej. Badaniom poddano trzy odmiany marchwi różniące się w istotny sposób wymiarami i własnościami wytrzymałościowymi poszczególnych warstw.

Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych badanych odmian korzeni marchwi uzyskane przy obciążeniu $F'=25$ N/mm mieściły się w przedziale od 0,867 do 2,604 MPa. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że istotny wpływ na wartość maksymalnych nacisków, oprócz siły obciążającej ma średnica korzenia marchwi oraz wartość modułu sprężystości, a w mniejszym stopniu strefa, z której została pobrana próbka. Na podstawie wyników zbudowano model statystyczny z sigma-ograniczeniami i uzyskano zgodność wyników otrzymanych z oczekiwanymi na poziomie +/- 20%.

Wzrost modułów sprężystości w zakresie od $E_1=8,12$ MPa w odmianie Merida do $E_3=11,65$ MPa w odmianie Major powoduje wzrost maksymalnych nacisków powierzchniowych w granicach od 1,18 MPa do 2,05 MPa. Wzrost średnicy badanych próbek od $\phi_1=23$ mm do $\phi_3=40$ mm w odmianie Karotan powodował wzrost maksymalnych nacisków powierzchniowych o wartość $\Delta p=0,2 - 0,5$ MPa w zależności od różnych stref pomiarowych. Zmiana maksymalnych nacisków powierzchniowych wzdłuż osi podłużnej korzenia marchwi niezależnie od wartości modułów sprężystości mieściła się w przedziale $\Delta p=0,16 - 0,25$ MPa.

Uzyskane wyniki porównano z wartościami otrzymanymi do modeli dyskretnych korzeni marchwi zweryfikowanymi poprzez przemieszczenia. Średni błąd względny wynosi 5,3%, a jego wartość mieściła się w przedziale od 4,0 do 6,6%. Rozkłady przemieszczeń jako funkcji siły obciążającej w zakresie od 0 do 2,5 N/mm lepiej są odwzorowane przez wyniki uzyskane w oparciu o model tarczowy, natomiast w pozostałym zakresie obciążenia przez model 3D. Rozkład nacisków wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej uzyskano w postaci funkcji eliptycznej z maksimum w centralnym punkcie styku. Są one dobrze odwzorowane poprzez wyniki uzyskane do modeli dyskretnych zbudowanych zarówno w oparciu o program COSMOS/M, jak i Abaqus w odpowiednich przedziałach obciążenia. Przy dużych wartościach odkształceń naciski powierzchniowe w pobliżu osi pionowej próbki miały wartości niewiele różniące się od wartości maksymalnych. Szczególnie dotyczy to obciążenia zbliżonego do wartości maksymalnych.

Wyznaczanie nacisków powierzchniowych za pomocą modeli zbudowanych w oparciu o metodę elementów skończonych wymaga przyjęcia kryteriów definiujących naciski dopuszczalne. W pracy, na podstawie wyników badań mikroskopowych i pomiarów wielkości komórek przed i po odkształceniu w kierunku działania siły obciążającej, zaproponowano przyjęcie umownej wartości granicznego odkształcenia odpowiadającego naciskom maksymalnym na poziomie $\varepsilon_y=0,20$. Natomiast odkształcenie odpowiadające naciskom powierzchniowym dopuszczalnym ze względu na trwałość przechowalniczą

(związaną z pojawieniem się zjawisk prowadzących do rozpoczęcia procesów gnilnych) na poziomie $\varepsilon_y=0,05$.

Przeprowadzona analiza błędów wskazuje, że spośród zastosowanych sposobów wyznaczania nacisków powierzchniowych najlepsze dopasowanie do rzeczywistych rozkładów nacisków powierzchniowych wykazują modele zbudowane w oparciu o metodę elementów skończonych. Obliczanie nacisków powierzchniowych na podstawie wartości średnich, będących ilorzem siły obciążającej i powierzchni styku bez uwzględnienia rozkładu eliptycznego dają wartości zaniżone o ponad 20%. Stosowanie teorii Hertza do obliczania nacisków powierzchniowych na korzeń marchwi powoduje zawyżenie otrzymanych wartości nawet o 80%.

11. WNIOSKI

Przeprowadzone badania i obliczenia wykonane przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Na podstawie wieloczynnikowej analizy wariancji uzyskanych wyników wykazano, że:

- a) na wartość modułu sprężystości istotnie wpływa warstwa korzenia marchwi, z której pobrano próbkę do badań, kierunek oraz wartość obciążenia;
- b) na wartość liczby Poissona nie miał istotnego wpływu kierunek obciążenia, warstwa korzenia, a także zaproponowany podział na dwa przedziały naprężenia;
- c) istotny wpływ na wartość maksymalnych nacisków, oprócz siły obciążającej ma średnica korzenia marchwi oraz wartość modułu sprężystości, a w mniejszym stopniu strefa, z której została pobrana próbka.

2. Rozkład nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku przy niskich wartościach obciążenia ($F=1,7$ N/mm) jest zbliżony do rozkładu eliptycznego charakterystycznego dla materiałów liniowo sprężystych, natomiast przy wzroście obciążenia ($F=18,3$ N/mm) pojawia się w okolicach centralnego punktu styku strefa nacisków o zbliżonej wartości (plateau) charakterystyczna przy odkształceniach plastycznych. Strefa ta zwiększa się wraz ze wzrostem obciążenia i dla wartości maksymalnych stanowi ok. 50% całkowitej powierzchni styku.

3. Jako naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość doraźną należy przyjąć naciski powierzchniowe odpowiadające maksymalnym odkształceniom wynoszącym w badanych odmianach $\varepsilon=0,20$. Naciski dopuszczalne z uwagi na własności przechowalnicze zaproponowano w formie umownej, jako wartości odpowiadającej odkształceniom równym $\varepsilon=0,05$, przy zachowaniu 20% marginesu bezpieczeństwa. Naciski dopuszczalne ze względu na wytrzymałość przechowalniczą w niewielkim stopniu zależą od własności wytrzymałościowych korzenia, ich średnicy, a także strefy pomiarowej i mieszczą się w przedziale od $p=0,383$ MPa do $p=0,442$ MPa.

4. Weryfikacja modeli MES zbudowanych przy wykorzystaniu programów COSMOS/M i Abaqus w oparciu o rozkłady przemieszczeń wykazała dobrą zgodność zarówno pod względem jakościowym, jak i w odniesieniu do wartości bezwzględnych. W początkowym zakresie obciążenia (od 0 do 2,5 N/mm) wyniki modelu tarczowego obarczone są średnim błędem nieprzekraczającym 17% w stosunku do wartości przemieszczeń u_x , u_y i u_z uzyskanych za pomocą interferometrii plamkowej (ESPI) i fotografii plamkowej. W pozostałym zakresie obciążenia przemieszczenia u_y wyznaczone w spo-

sób eksperymentalny i obliczone za pomocą modelu 3D programu Abaqus mieszczą się w granicach +/- 10 %.

5. Weryfikację modelu dyskretnego korzenia marchwi zbudowanego w oparciu o MES korzystnie jest przeprowadzić w oparciu o przemieszczenia – wystarczy wyznaczyć zależność przemieszczenia od obciążenia. Zweryfikowany w ten sposób model może posłużyć do wyznaczania nacisków powierzchniowych bez konieczności prowadzenia skomplikowanych pomiarów rzeczywistych korzeni marchwi.

6. Z punktu widzenia praktycznego zastosowania MES do modelowania nacisków powierzchniowych na korzeń marchwi, jeżeli nie jest możliwe bezpośrednio wprowadzenie zależności naprężenia od odkształcenia do programu obliczeniowego, wymaganą charakterystykę materiału można uzyskać poprzez podział całego zakresu obciążenia na dwa przedziały i wyznaczenie modułów sprężystości w tych przedziałach metodą stycznych. Otrzymana w ten sposób bilinearna charakterystyka lepiej opisuje rzeczywiste własności materiału niż jedna wartość modułu sprężystości wyznaczona metodą siecznych mająca tylko znaczenie umowne.

7. Płaski model tarczowy korzenia marchwi zbudowany przy założeniu braku rozwarstwienia podczas obciążania po przeprowadzeniu analizy nieliniowej danych wprowadzonych liczbowo dobrze opisuje naciski powierzchniowe w zakresie niskich wartości obciążenia, a więc do odkształceń quasisprężystych. Trójwarstwowy model 3D ulegający rozwarstwieniu w miarę wzrostu obciążenia po wykonaniu analizy nieliniowej na podstawie danych wprowadzonych w formie doświadczalnej zależności naprężenia od odkształcenia umożliwia wyznaczanie nacisków powierzchniowych w pełnym zakresie obciążenia z dokładnością na poziomie +/-10%.

8. Porównanie rzeczywistych rozkładów nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem obciążającym oraz wyznaczonych do modeli MES wskazuje, że w zakresie małych obciążeń (do $F^*=2,5$ N/mm) lepsze dopasowanie wykazuje model tarczowy, którego błąd względny wynosi 16,0%. Wartości nacisków otrzymanych przy wykorzystaniu modelu 3D są mniejsze o wielkości rzeczywistych średnio o 28,0%. W pozostałym zakresie obciążenia model MES najlepiej odzwierciedla rzeczywisty rozkład nacisków w okolicach centralnego punktu styku. W tym obszarze błąd względny nie przekracza kilku procent. Na granicy obszaru styku błąd ten jest największy i może osiągnąć nawet kilkadziesiąt procent.

9. Obliczanie nacisków powierzchniowych w oparciu o wzory Hertza prowadzi do zawyżenia ich wartości. Maksymalne wartości nacisków powierzchniowych obliczone tą metodą są większe od rzeczywistych o ok. 80%.

12. PIŚMIENNICTWO

- Abaqus, 1998. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., 100 Medway St., Providence, Rhode Island.
- Abbott J.A., Lu R., 1996. Anisotropic mechanical properties of apples, *Trans. ASAE* 39 (4), pp. 1451–1459.
- 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*, 13(4), 413–422.
- Adams G.G., Nosonovsky M., 2000. Contact modeling – forces. *Tribology International*, Volume 33, Issues 5–6, 431–442.
- Akyurt M., Zachariah G.L., Haugh C.G., 1972. Constitutive relations for plant materials. *Trans. ASAE* 15, 766–769.
- Anazodo U.G.N., Chikwendu S.C., 1983. Poission's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials. Small deformaton approximations. *Transaction of the ASAE* 26, (3): 923–929.
- Andruszkiewicz M., Jankowski L.J., Stopa R., 2008. Fotografia plamkowa w badaniach odkształcalności korzenia marchwi. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 4 (102). s. 37–46.
- Apeland I., Hoftun H., 1974. Effects of temperature – regime on carrot during storage. *Acta Horticulturae* 38, 1.
- Argyris J.H., 1977. *Metody obliczeniowe w mechanice nieliniowej*. Ossolineum, Wrocław.
- Arruda E.M., Boyce M.C., 1993. A three dimensional constitutive model for the large deformation stretch behaviour of rubber elastic materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 41, 389–412.
- ASAE , 1995. Compression test of food materials of convex shape. *ASAE Standards* (S 368.3).
- ASAE Standard S368.1, 1988. Compression test of food materials of convex shape.
- Aubert S., Bonnet A., Szot 13., 1979. Mise on point d'indices rhe'ologiques de texture en realitions avec quelques caracte' res biohimiques chez la carotte (*Dacus carota* L.). *Ann. Technol. Agric.* 28. 4. 397–422.
- Aubert S., Bonnet A., Szot 13., 1979. Mise on point d'indices rheologiques de texture en realitions avec quelques caracteres biohimiques chez la carolte (*Dacus carota* L.). *Ann. Technol. Agric.* 28. 4. 397–422.1979.
- Bajema R.W., Hyde G.M., 1998. Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. *Trans. ASAE* 41, 1399–1405.

- Bajema R.W., Hyde G.M., Baritelle A.L., 1998. Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tissue. *Trans. ASAE* 41(3), 733–740.
- Baumann H., 1974. Preservation of carrot quality under various storage conditions. *Acta Horticulturae* 38. 1.
- Berbec S., Byszewski W., 1986. *Szczegółowa Uprawa Roślin*. Wydanie szóste. PWN, Warszawa.
- Bieluga B., Bzowska-Bakalarz M., 1980a. Badania wybranych właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych. *Roczn. Nauk Rol.*, 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 2ⁿ International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Gódólló*. (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.*, 76–C–2, 47–66.
- Bieluga B.: 1978. Methods for determining the physico-mechanical properties of agricultural products. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 203, 375–381.
- Blahovec J., 1985a. Jednoduchy model procesu stlacovani a mechanickeho poskozeni duznin. *Zemedska Technika*, 31(6), 349–364.
- Blahovec J., 1985b. Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to mechanical damage. *Papers of the 3¹ International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 57–64.
- Blahovec J., 1989. Strenght and elasticity of some plant materials. *Proceedings of the 4th International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Rostock*, 60–66.
- Blahovec J., Patocka K., Mica B., 1984. Mechanicke a elektricke vlasnosti korenu a hliz v prubehu stlacovani. *Zemedska Technika*, 30, 335–354.
- Blahovec J., Patocka K., Mica B., 1985. Mechanicke vlasnosti duznin zeleniny, *Zemedska Technika*. 31(7), 393–410.
- Blahovec J., Reznicek R., Janal R., 1975. Reologicke a texturni vlasnosti nekterych zemelskych materialu, *VSZ, Praha*.
- Blahovec J., Strouhal J., Mica B., 1987. Nestejnorodnost hliz brambor vzhledem k jejich pevnosti. *Zemedska Technika*, nr 33(4), 235–244.
- Blahovec J., Valentova M., Patocka K., 1990. Mechanicke vlasnosti zakladnich casti bramborove hlizy, *Zemedska Technika*, nr 35(9), 539–552.
- Blahovec J., 1985b. Resistance of potatoes and similar fleshy vegetable products to mechanical damage. *Papers of the 3¹ International Conference Physical Properties of Agricultural Materials in Praha*, 57–64.
- Blahovec J., 2001b. Static mechanic and texture of fruits and vegetables. *Research in Agricultural Engineering*, nr 47(4), 144–169.
- Bohdziewicz J., 2001a. Właściwości mechaniczne i reologiczne wybranych odmian buraka ćwikłowego. *Acta Agrophysica*, 45, 17–29.
- Bohdziewicz J., 2001b. Właściwości reologiczne związane z morfologią korzenia marchwi, *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 51–58.

- Bohdziewicz J., 2001c. Zmienność cech reologicznych korzenia pietruszki. *Inżynieria Rolnicza*, 12(32), 59–64.
- Bohdziewicz J., 2004. Właściwości reologiczne mięszu warzyw rzepowatych. *Acta Agrophysica*, 112 vol. 4(3), 607–617.
- Bohdziewicz J., 2007. Modelowanie przebiegu odkształcenia tkanek parenchymy warzyw w warunkach quasistatycznych zmian obciążenia. *Zesz. Nauk. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu*, Wrocław.
- Bohdziewicz J., 2008. Ocena możliwości wyznaczenia współczynnika sprężystości warzyw o kształcie kulistym. *Inżynieria Rolnicza*, 4 (102), 133–140.
- Bollen A.F., Cox N.R., 1991. A technique for predicting the probability of bruising for use with an instrumented sphere. *ASAE Paper*, 91–6595.
- Borowski A., 1985. Statyczna analiza układów prętowych w zakresach sprężystym i plastycznym. PWN, Poznań.
- Bourne M.C., 1966. Measure of shear and compression components of puncture test. *J. Food Scie.*, 31.
- Bourne M.C., 1982. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. Academic Press. INC (London).
- Bourne M.C., 1975. Is rheology enough for food texture measurement? *Journal of Texture Studies*, 6(3), 259–265.
- Boussinesq J., 1885. *Application des Potentiels à l'étude de l'équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques*. Gauthier-Villars, Paryż, 30.
- Boyce M.C., Arruda E.M., 2000. Constitutive models of rubber elasticity: a review. *Rubber. Chem. and Tech.*, 73, 504–523.
- Bradley R.S., 1932. The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids. *Phil. Mag.*, 13, 853–862.
- 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.
- Bufler H.T. 1959. Zur Theorie der rollenden Reibung. *Ing. Arch.* 27, 137.
- Burczyński T., 1998. Współczesne tendencje w rozwoju metod komputerowych w naukach stosowanych. Wykład inauguracyjny, Gliwice, Politechnika Śląska.
- 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.*, 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., 1993. Model reologiczny tkanki korzenia buraka cukrowego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 408, 283–290.
- Bzowska-Bakalarz M., 1995. Relaksacja naprężeń w korzeniach buraków cukrowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 423, 85–92.
- Bzowska-Bakalarz M., 1996a. Badania właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych – uwagi metodyczne. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 443, 189–198.

- Bzowska-Bakalarz M., 1996b. Conventional coefficient of elasticity for sugar beet roots. *Int. Agrophysic*, 12(3), 192–198.
- Bzowska-Bakalarz M., 1998. Wytrzymałość mechaniczna tkanki korzeni buraka cukrowego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 454, 207–212.
- Bzowska-Bakalarz M., Bochyński W., 1992. Badania właściwości mechanicznych korzeni buraków cukrowych – test pełzania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 402, 163–171.
- Carot Conference 2000.
- Cattaneo C., 1938. Sul contatto di due corpi elastici: distribuzione locale degli sforzi. *Rendiconti dell' Accademia nazionale dei Lincei*. 27(6): 342–8, 433–6, 474–8.
- Celba J., Havlicek Z., Horka B., Kubesova A., 1981. Mechanicke vlastnosti biologickych materialu. *Zemedelska Technika*, 27(1), 1–10.
- Celba J.: 1979. Mechanicke vlastnosti brambor. *Zemedelska Technika*, 25(1), 17–28.
- Chang W.R., Etsion L., Bogy D.B., 1987. An elastic–plastic model for the contact of rough surfaces. *ASME J. Tribol.*, 109, 257–263.
- Chappel T.W., Hamman D.D., 1969. Poisson's ratio and Young's modulus for apple flesh under compressive loading. *Transaction of the ASAE* 11, (5): 608–610.
- Chen P., Chen Z., 1984. Critical strain failure criterion: pros and cons. *Transaction of the ASAE* 27(1): 278–281.
- Chen P., Sun Z., 1981. Impact Parameters Related to Bruise Injury in Apples. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI, 81–3041.
- Chen P., Tang S., Chen S., 1985. Instrument for testing the response of fruits to impact. *ASAE* 85–3537.
- Chen P., Yazdani R., 1991. Prediction of apple bruising due to impact on different surfaces. *Trans. ASAE* 34, 956–961.
- Chikwendu S.C., Anazodo U.G.N., 1984. Poission's ratio and elastic modulus of radially compressed biomaterials – II. Large deformation approximations. *Transaction of the ASAE* 27(5), 1563–1572.
- Chwiej P., Kuryłowicz M., 1972. Niektóre właściwości reologiczne buraków ćwikłowych. *Rocznik Technologii i Chemii Żywności*, XII (3–4), 289–294.
- Cloud, G., 1995. *Optical Methods of Engineering Analysis*. Cambridge: University of Cambridge.
- Cooke J.R., De Baerdemaeker J.G., Rand R.H., Mang H.A., 1976. A finite element shell analysis of guard cell deformation. *Trans. ASAE* 19, 1107–1121.
- COSMOS/M, 1993a. *Advanced Modules User Guide*. Advanced Dynamics, Heat Transfer, and Nonlinear Static & Dynamic Analyses, Ver. 1.70, Vol. 4, Santa Monica, California.
- COSMOS/M., 1993b. *Basic FEA System*. Linear Statics, Natural Frequency and Buckling Analysis. Ver. 1.70, Vol. 3, Santa Monica, California.
- COSMOS/M., 1993c. *Command Reference*, Ver. 1.80, Vol. 2, Santa Monica, California.
- COSMOS/M *Finite Element Analysis System Advanced Seminar*. Structural Research & Analysis Corporation, Santa Monica, California.
- COSMOS/M., 1993d. *Preprocessing, Analysis and Postprocessing Interface*. Ver. 1.70, Vol. 1, Santa Monica, California.

- Datta A.K., Morrow C.T., 1983. Graphical and computational analysis of creep curves. *Transactions of the ASAE*, 26(6), 1870–1874.
- Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P., 1975. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *J. Colloid Interface Sci.*, 314–326.
- Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Y.P., 1975. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *J. Colloid Interface Sci.*, 314–326.
- 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.
- Dietrich M., 1999. *Podstawy konstrukcji maszyn*. WNT, Warszawa.
- Dimitroff G., 1982. Spannungsrelaxationsuntersuchungen zum lagerverhalten von Kartoffeln. *Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR*, 208, 193–200.
- Dintwa E., Van Zeebroeck M., Ramon H., Tijskens E., 2008. Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 49 260–276.
- Drake B., Selstam E., 1971a. The structure of carrot. 1., SIK Rapport No. 287, 38.
- Drake B., Selstam E., 1971b. The structure of carrot. II., SIK Rapport No. 288, 46.
- Drinkwater B.W., Dwyer-Joyce R.S., Cawley P., 1996. A study of the interaction between ultrasound and a partially contacting solid–solid interface. *Proc. R. Soc. Ser. A* 452, 2613–2628.
- Dwyer-Joyce R.S., Drinkwater B.W., 1998. Analysis of contact pressure using ultrasonic reflection. *Proceedings of 11th Annual Conference on Experimental Mechanics*, Balkema, Rotterdam, 747–754.
- Dyłaż Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., 2003. *Wytrzymałość materiałów*. WNT, Warszawa.
- Finney E.E., Hall C.W., 1967. Elastic properties of potatoes. *Transaction of the ASAE* 10, (1), 4–8.
- 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.
- Flamant A.A., 1886. *Stabilité des constructions – Résistance des matériaux*, Baudry et Cie, coll. *Encyclopédie des travaux publics*, Paris, 632 p.
- Fluck R.C., Ahmed E.M., 1973. Impact testing of fruits and vegetables. *Trans. ASAE*, 660–666.
- Gabryszewski Z., 2001. *Teoria sprężystości i plastyczności*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- 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*, 33(2), 233–256.
- Gao Q., Pitt R.E., 1991. Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure. *Trans. ASAE* 34(1), 232–238.
- Garcia C.R., Ruiz M., Chen P., 1988. Impact parameters related to bruising in selected fruits. *ASAE* 88–6027.

- Garcia I.L., Barreiro P., Ruiz-Altisent M., Vincente M., 1994. Use of electronic fruit to evaluate fruit damage along the handling process. International Conference of Agricultural Engineering A-gEng'94, Milano, Report No. 94-G-045.
- Garcia J.L., Ruiz-Altisent M., Barreiro P., 1995. Factors influencing mechanical properties and bruise susceptibility of apples and pears. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 11–18.
- 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* 23, 453–466.
- Gerhard H., Busse G., 2005a. Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing. Vth International Workshop, Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials Québec City (Canada).
- Gerhard H., Busse G., 2005b. Two new techniques to improve interferometric deformation-measurement: Lockin and Ultrasound excited Speckle-Interferometry. Proc. Fringe, Ed. W. Osten, Springer-Verlag Berlin.
- Giessmann E.J., Grau P., 1981. Spannungsrelaxationsmessungen an Kartoffeln. Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 188, 225–231.
- Giessmann E.J., Sager D., 1982. Temperaturabhängigkeit der relaxation bei Kartoffeln. Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 208, 63–69.
- Giessmann E.J., Szot B., 1982. Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf den Wert der relaxationskonstanten. Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 208, 53–61.
- Gołacki K., Stropek, Z., 2001. Viscoelastic properties of Jonagold apple flesh. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 4 (electronic journal: <http://www.ejpau.media.pl/series/volume4/issue2/engineering/art-02.html>).
- 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.*, 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.*, 399, 77–81.
- Gołacki K., 1994. Usage of criterion of strain failure in case of carrot roots *Int. Agrophysics*, 8, 497–499.
- Gołacki K., 1996a. Prędkość i energia w procesie deformacji materiału roślinnego na przykładzie korzeni marchwi. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 425, 61–66.
- Gołacki K., 1996b. Test relaksacji naprężeń dla korzeni marchwi. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 433, 347–351.
- Gołacki K., 1998. A quick method to determine the mechanical condition of carrot roots. *Acta Hort.* 421.259–263.
- Gołacki K., Kęsik T., Szot B., 1987. Badanie zmienności właściwości korzeni marchwi w zależności od cech odmianowych, czynników agrotechnicznych i okresu przechowywania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 316, 227–343.

- Gołacki K., Obroślak R., 1977. Poisson's ratio and water potential of carrot root. Proceedings of ISAMA97. 233-238, Taipei, Taiwan.
- Gołacki K., Obroślak R., 1998. Wyznaczanie współczynnika Poissona korzeni marchwi. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 454, 221–227.
- Gołacki K., Stropek Z., 2000. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio for plant material of high moisture content, Komitet Techniki Rolniczej PAN, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa – Warszawa, PTIR, 53–60.
- Gołacki K., Stropek Z., 2004. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio for plant material of high moisture content. Annual Review of Agricultural Engineering, 3/1, 43–49.
- Goodman L.E., 1962. Contact stress analysis of normally loaded rough spheres. ASME J. Appl. Mech. 29, 515–522.
- Górski J., 2007. Raporty. Dostępny w Internecie: <http://www.wir.org.pl/raporty/marchew.htm>.
- Gyasi S., Fridley R.B., Chen P., 1981. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. Transaction of the ASAE 24, (3), 747–750.
- Haghighi K., Segerlind L.J., 1988. Failure of biomaterials subjected to temperature and moisture gradient using finite element method: II stress analysis of an isotropic sphere during drying. Transaction of the ASAE 31(3), 938–946.
- Haman J., Konstantkiewicz K., 2000. Destruction Processes in the Cellular Medium of a Plant. Theoretical Approach. Int. Agrophysics 14, 37–42.
- Haman J., Szot B., Kęsik T., 1982. Mechanische Eigenschaften der Karottenwurzel. Tagungsbericht Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 208, 71–80.
- Hamann, D.D., 1970. Analysis of stress during impact of fruit considered to be viscoelastic. Trans. ASAE 13, 893–899.
- Hammerle J.R., McClure W.F., 1971. The determination of Poissons ratio by compression tests of cylindrical specimens. Journal of Texture Studies 2, 31–49.
- Hammerle J.R., Mohsenin N.N., 1966. Some dynamic aspects of fruit impacting hard and soft materials. Trans. ASAE 9, 484–488.
- Herold B., Geyer M., Studman C.J., 2001. Fruit contact pressure distributions equipment. Comput. Electron. Agric. 32, 167–179.
- 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.
- Hertz H., 1882. Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Harte (On the contact of elastic solids and on hardness). J. Reine und angewandte Mathematik, 156–171 English translation in Jones and Scholl (Eds.), 1896. Miscellaneous Papers by H. Hertz, vol. 5. Macmillan, London, 90–156.
- Hill R., 1950. The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, Oxford.
- Hinton E., Owen D.R.J., 1980. Finite Element in Plasticity. Pineridge Press, London.
- Hodgson K., Dwyer-Joyce R.S., Drinkwater B.W., 2000. Ultrasound as an experimental tool for investigating engineering contacts. Proceedings of the Ninth Nordic Symposium on Tribology, 'Nordic 2000', vol. 2, 377–386.

- Holt J.E., Schoorl D., 1984. Package protection and energy dissipation in apple packs. *Sci. Hortic.* 24, 165–176.
- Holt J.E., Schoorl D., Lucas C., 1981. Prediction of bruising in impacted multilayered apple packs. *Trans. ASAE*, 43, 242–247.
- Holt J.K., Schrool D., 1977. Bruising and energy dissipation in apples. *J. Text. Stud.* 7, 421–432.
- Horvath M., Horvath L., 1982. Heat-induced changes in the texture of carrots. *Acta Alimentaria* 11(1), 65–74.
- Hossdorf H., 1975. *Statyka modelowa*. Arkady, Warszawa.
- Huges H., Segerlind L.J., 1972. A rapid mechanical method for determining Poisson's ratio in biological materials. *ASAE 72–310*, SAE, St. Josheps, MI 49085.
- Hung Y.C., 1993. Latent damage systems perspective, [in:] R.L. Shewfelt and S.E. Prussia, Editors, *Postharvest Handling – a Systems Approach*, Academic Press, San Diego, CA Chapter 10.
- Huyskens-Keil S., Schreiner M., Widell S., 1998. *Qualitatssicherung bei Radies*. *TASPO-Gartenbaumagazin*, 7(2), 40–41.
- Hyde G.M., 1997. Bruising-impacts, why apples bruise, and what you can do to minimize bruising. *Treefruit Postharvest J.*, Wash. State Univ. 4, 9–12.
- Hyde G.M., Bajema R.W., Zhang W., 1993. Measurement of impact damage thresholds in fruits and vegetables, [in:] Juste, F. (Ed.), *Proceedings on the 4th International Symposium on Fruit, Nut and Vegetable production Engineering*, Valencia–Zaragoza, Spain, March 22–26. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion Instituto Nacional de Investigacion y Tecnologia Agraria y Alimentaria y Inia. Madrid.
- Ishlinsky A.J., 1944. The axisymmetrical problem in plasticity and the Brinell test. *Prikladnaia Matematika i Mekhanika* 8, 204.
- Janiszewska I., Kępkowa A., Mańczak M., 1986. *Warzywnictwo*. PWRiL, Warszawa.
- Jasnowska J., Radomski J., 1995. *Botanika, Brasika*, Szczecin.
- Jindal, V.K., Mohsenin, N.N., 1976. Analysis of a simple pendulum impacting device for determining dynamic strength of selected food materials. *Trans. ASAE* 19, 766–770.
- Johnson K.L., 1985. *Contact mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Johnson K.L., 1998. Mechanics of adhesion. *Tribol. Int.* 31, 413–418.
- Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D., 1971. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc. Royal Soc. London A324*, 301–313.
- Jones C.S., Holt J.E., Schoorl D., 1991. A model to predict damage to horticultural produce during transport. *J. Agric. Eng. Res.* 4, 259–272.
- Jones R., Wykes C., 1983. *Holographic and Speckle Interferometry*. A discussion of the theory, practice and application of the techniques. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.

- Kapsalis I.G., Segars R.A., Krizik I.A., 1972. An instrument for measuring rheological properties by bending. Application to food materials of plant origin. *J. Texture Studies*, 3(1), 31–50.
- Kendall K., Tabor D., 1971. An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces. *Proc. R. Soc. Ser. A* 323, 321–340.
- Kędzior D., 2005. Trójwymiarowe zagadnienie kontaktowe ciał sprężystych przy dużych deformacjach. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Krakowska.
- Kępkowa A., Janiszewska I., Mańczak M., 1985. *Warzywnictwo*. PWRiL, Warszawa.
- Kleiber M., 1989. *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*. PWN, Warszawa–Poznań.
- Klein D., 1987. Relationship of harvest date, storage conditions, and fruit characteristics to bruise susceptibility of apples. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 1 (1987), 113–118.
- 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*, 379, 491–498.
- Kolowca J., Krzysztofik B., 2003. Właściwości lepkosprężyste mięszu bulw ziemniaka różnej wielkości. *Acta Agrophysica*, nr 2(4), 771–776.
- Kołota E., Orłowski M., 1999. *Uprawa warzyw. Brasika*, Szczecin.
- Kołota E., Orłowski M., Osińska M., 1994. *Warzywnictwo*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Konstankiewicz K., Pawlak K., Zdunek A., 2001b. Quantitative method for determining cell structural parameters of plant tissues. *Int. Agrophysics* 15, 161–164.
- Konstankiewicz K., Pawlak K., Zdunek A., 2001a. Influence of structural parameters of potato tuber cells on their mechanical properties. *Int. Agrophysics*, 15(4), 243–246.
- Konstankiewicz K., Pukos A., 1995. Inspiracje Hamana w kierunku rozwoju nauk agrofizycznych. *Zesz. Probl. Podst. Nauk Rol.*, 424, 59–63.
- Konstankiewicz K., Pukos A., 1998. Metodyczne aspekty w badaniach nad nową mechaniką materiałów rolniczych. *Inżynieria Rolnicza*, 2(3), 5–20.
- Konstankiewicz K., Pukos A., Zdunek A., 1996. Teorie odkształceń materiałów biologicznych w świetle relaksacji naprężeń. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 443, 353–363.
- Konstankiewicz K., Zdunek A., 2001. Influence of turgor and cell size on the cracking of potato tissue. *Int. Agrophysics* 15, 27–30.
- Konstaropoulos A.E., 1981. The introduction of an empirical expression in the texture studies of vegetables. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 14(2), 97–99.
- Koper R., Gowin J., 1976. Elastooptyczne badania stanu naprężeń w przekroju poprzecznym źdźbła pszenicy. *Mat. konf. pt. Fizyczne właściwości materiałów roślinnych i ich oddziaływanie na procesy technologiczne*. Zakład Agrofizyki PAN, Lublin.
- Koper R., Gowin J., 1978a. Wykorzystanie elastooptycznej metody modelowej do badań właściwości mechanicznych źdźbła pszenicy. *Zeszyty Problemowe PNR* 73–C–2.
- Koper R., Gowin J., 1978b. Photoelastic investigation of the state of stress in the cross-section of the straw stalk. *Zeszyty Problemowe PNR* 203.

- Kramer A., Szcześniak A.S., 1973. Texture measurements of foods. Reidel Publishing ed., Dordrech.
- Kuczyński A., Bzowska-Bakalarz M., 1987. Moduł sprężystości tkanki korzenia buraka cukrowego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 321, 97–103.
- Lack A.J., Evans D.E., 2003. Biologia roślin. PWN, Warszawa.
- Leuchner E., 1984. Grundlagen der gutschonenden Technik im Gartenbau. Agrotechnik, 10.
- Lewis R., Yoxall A., Marshall M.B., Canty L.A., 2008. Characterising pressure and bruising in apple fruit. Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom, Wear, 264 37–46.
- Lichtensteiger M.J., Holmes R.G., Hamdy M.Y., Blaisdell J.L., 1988. Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. Trans. ASAE 31, 595.
- Lippert F., 1995. Methode zur Induktion der Rissbildung bei Sprossknollen von Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes* L.). Gartenbauwissenschaft, 60(4), 187–190.
- Love A.E.H., 1939. Boussinesq's problem for a rigid cone. Quart. J. Math., Oxford Series 10, 161–175.
- Lu R., Abbott J.A., 1996. Finite element analysis of modes of vibration in apples, J. Texture Stud. 27, 265–286.
- Lu R., Abbott J.A., 1997. Finite element modelling of transient responses of apples to impulse excitation, Trans. ASAE 40 (5), 395–1409.
- Lu R., Puri V.M., 1991. Characterization of nonlinear creep behavior of two food products. Journal of Rheology, 35(6), 1209–1233.
- Łukasiak P., 2007. Jak utrzymać się na rynku. Dostępny w Internecie: <http://www.ho.ha-slo.pl/article.php?id=930>.
- Mackerle J., Brebbia C.A., 1988. The boundary element reference book. Southampton, Boston, Computational Mechanics Publications, Berlin.
- Malinin N.N., Rżysko J., 1981. Mechanika materiałów. PWN, Warszawa.
- Marshall M.B., Lewis R., Drinkwater B.W., Dwyer-Joyce R.S., 2004. An ultrasonic approach for contact stress mapping in joints and concentrated contacts. J. Strain Anal. Eng. Des. 39 (4), 339–350.
- Matthews J.R., 1980. Indentation hardness and hot pressing. Acta Met. 28, 311–318.
- Mazurkiewicz M., Ostachowicz W., 1983. Theory of finite element method for elastic contact problems of solid bodies. Computers and Structures. Vol. 17, 51–59.
- McGarry A., 1995. Cellular basis of tissue toughness in carrot (*Daucus carota* L.) storage roots. Annals-of-Botany, nr 75(2), 157–163.
- McLaughlin N.B., Pitt R.E., 1984. Failure characteristics of apple tissue under cyclic loading. Trans. ASAE 27, 311–320.
- Mempel H., Herold B., Meyer M., 1997. Relation between water allowance and damage susceptibility of carrots. Abstract of International Conference on Agrophysics, Lublin.
- Mindlin R.D., 1949. Compliance of elastic bodies in contact. ASME J. Appl. Mech. 16, 259–268.
- Mohsenin N.N., 1970. Physical properties of plant and animal materials. Volume I. Structure, physical characteristics and mechanical properties. Gordon and Breach Science Publishers, New York, London, Paris.

- Mohsenin N.N., 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, vol. 1. Gordon and Breach, 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., Jindal V.K., Manor A.N., 1978. Mechanics of impact of a falling fruit on a cushioned surface. *Trans. ASAE*, 594–600.
- Mohsenin N.N., 1986. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon&Breach Science Publ., New York.
- Mohsenin, N.N., 1977. Characterization and failure in solid foods with particular reference to fruits and vegetables. *J. Texture Stud.* 8, 169–193.
- Mollo E., Blasco J., Stcinmetz V., Bourely A., Navarron F., Perotto G., 1998. Multisensor inspection and robotic packing of fruit *Ag. Eng' 98 Oslo*, Book of abstracts, 359–360.
- Morrow C.T., Mohsenin N.N., 1966. Consideration of selected agricultural products as viscoelastic materials. *Journal of Food Science*, nr 31(5), 688–698.
- Mossakovski V.I., 1963. Compression of elastic bodies under conditions of adhesion. *Prikladnaia Matematika i Mekhanika*, 418.
- Murase H., Merva G.E., 1977. Constitutive equations for vegetative Media. *ASAE 77–5513*.
- Murase H., Merva G.E., 1979. Hydraulic conductivity of vegetative tissue. *Transaction of the ASAE 22(5)*, 877–880.
- Murase H., Merva G.E., DeBaerdmaecker 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 Godólló*, 35, 55–63.
- Murase H., Merva G.E., Segerlind L.I., 1975. Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. *ASAE 79–3065*.
- 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*, 23(4), 794–800.
- Murase H., Merva G.E., Segerling L.J., 1980. Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential. *Trans. ASAE 23(3)*, 794–800.
- Nason A., Dehaan R.L., 1981. *Świat biologii*. PWRiL, Warszawa.
- Nason A., Dehaan R.L., 1981. *Świat biologii*. PWRiL, 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*, 75(9), 1286–1292.
- Nikolaev B.A., Guryanova S.S., Troyanska N.I., Panova E.I., Soloveva G.N., 1980. Variations in structural and mechanical properties of carrot and cabbages during storage. *Pischevaya Tekhnologiya 2*, 50–54.
- Nilsson S.B., Hertz C.H., Falk S., 1958. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. II. *Physiol. Plantarum 11*, 818–837.
- 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.

- Nowicki W., Banasik P., Kołodziejczyk P., 1978. Creep process of beet roots subject to axial compression. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 203, 403–406.
- Nowicki W., Gąsiorowski H., Banasik P., Kołodziejczyk P., 1976. Relaxace napeti bulvy cukrove repy pri jednoosem namachani v tlaku. *Zemledelska Technika*, 22(10), 591–594.
- Ochnik Ł., 2007. Wpływ budowy wewnętrznej korzenia marchwi na rozkłady przemieszczeń i nacisków powierzchniowych przy ściskaniu promieniowym. Praca magisterska, Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.
- Olszak W., Perzyna P., Sawczuk A., 1965. Teoria plastyczności. PWN, Warszawa.
- Orkisz J., 1995. Metoda różnic skończonych. Cz. III, Mechanika techniczna, komputerowe metody mechaniki ciał stałych. pod red. M. Kleibera, PWN, Warszawa.
- Orłowski M., 1992. Uprawa warzyw. Wyd. Brasika, Szczecin.
- Pabis S., 2009. Metodologia i metody nauk empirycznych. Politechnika Koszalińska, Koszalin.
- Pang D.W., Studman C.L., Banks N.H., 1994. Apple bruising thresholds for an instrumented sphere. *Transactions of the ASAE* 37(3), 893–897.
- Pang W., Studman C.J., Ward G.T., 1992. Bruising damage in apple-to-apple impact. *J. Agric. Eng. Res.* 52, 229–240.
- Paulsen M.R., 1978. Failure resistance to compressive loading. *Transactions of ASAE*, nr 21(4), 1210–1216.
- 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., 1980. Food process engineering. Applied Science Publ. Ltd, London.
- Phan C.T., Hsu H., Sarker S.K., 1973. Physical and chemical changes in the carrot root during storage. *Canadian J. of Plant Science* 53, 3.
- Pindera W., 1953. Zarys elastooptyki. PWT, Warszawa.
- Pitt R.E., 1982. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. *Transactions of the ASAE*, 25(6), 1776–1784.
- Pitt R.E., 1992. Viscoelastic properties of fruits and vegetables, [in:] Rao M.A., Steffe J.F. (Eds.), *Viscoelastic Properties of Foods*, pp. 49–76.
- Pitt R.E., Chen H.L., 1983. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. *Transactions of the ASAE*, 26(4), 1275–1280.
- Pitt R.E., Davis D.C., 1984. Finite element analysis of fluid-filled cell response to external loading. *Transaction of the ASAE*, 27(6), 1976–1983.
- Pitt R.E., Davis, D.C., 1984. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue. *Trans. ASAE* 27, 1976–1983.
- 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.
- Rabelo G.F., Fabbro I.M., Linares A.W., 2001. Contact stress area measurement of spherical fruit, *Proceedings of Sensors in Horticulture III*, 195–200.
- Ragni L., Berardinelli A., 2001. Mechanical behaviour of apples, and damage during sorting and packaging. *J. Agric. Eng. Res.* 78, 273–279.

- Rao M.A., Rizvi S.S.H., 1995. Engineering properties of foods. Marcel Dekter Inc. New York.
- Reznicek R., 1984. Physical properties of agricultural material. VSZ, Praha.
- Rocznik statystyczny 2008.
- Rodriguez L., Ruiz M., Dc Felipe M.R., 1990. Differences in the structural response of Granny-Smith' apples under mechanical impact and compression. J. Textl. Stud. 21. 155–164.
- 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, 28(3), 245–255.
- Romański L., Stopa R., 2002. Rozkład izochrom w modelu nasiona bobiku dla jego różnych położeń w szczelinie roboczej gniotownika walcowego. Inż. Rol. 5(38), 176–182.
- Romański L., Stopa R., Niemiec A., 2003. Zastosowanie metody elastooptycznej do badania nacisków w trakcie zgniatania ziarna pszenicy w gniotowniku walcowym. Inż. Rol. 7 (49): 189–194.
- Romański L., Stopa R.: 2002a. Rozkład izochrom w modelu nasiona bobiku dla jego różnych położeń w szczelinie roboczej gniotownika walcowego. Inż. Rol. 5(38)
- Roudot A.C., Duprat F., Wenian C., 1991. Modelling the response of apples to loads. J. Agric. Eng. Res. 4, 249–259.
- 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.
- Rusiński E., 1994. Metoda elementów skończonych, System COSMOS. WKiŁ, Warszawa.
- Rusiński E., Smolnicki T., Czmochoowski J., 2000. Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Sager D., 1988. On the determination of Young's modulus in farm material. Sbornik Mechanizacni Fakulty VZ, Praha, 209–214.
- Sargent S.A., Brecht J.K., Zoellner I.I., 2002. Instrumented sphere impact analysis of tomato and bell pepper packing lines. Applied Engineering in Agriculture 8(1), 76–83.
- Scanlon M.G., Long A.E., 1995. Fracture strengths of potato tissue under compression and tension at two rates of loading. Food Research International, 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, 29(5–6), 481–488.
- Schoorl D., Holt J.E., 1980. Bruise resistance measurements in apples. J. Texture Stud., 389–394.
- Schulte N.L., Timm E.J., Armstrong P.A., Brown G.K., 1991. Apple Bruising – a Problem During Hand Harvesting, 91–1021, ASAE, St. Joseph, MI.
- Schulte N.L., Timm E.J., Brown G.K., Marshall D.E., Burton C.L., 1990. Apple damage assessment during intrastate transportation. Appl. Eng. Agric, 6, 753–758.
- Segerlind L.I., Snovar B.A., Heldman D.R., 1977. Compression and relaxation properties of car-rots. J. Texture Studies 7(4), 451–456.

- Shama R, 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.
- Shewfelt R.L., Prussia S.E., 1995. *Postharvest Handling – a Systems Approach*, Academic Press, San Diego, CA Chapter 2.
- Sitkey G., 1986. *Mechanics of agricultural materials*. Academia Kiado, Budapest.
- Siyami S., Brown G.K., Burgess G.J., Gerrish J.B., Tennes B.R., Burton C.L., Zapp R.H., 1988. Apple impact bruise prediction models. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 41, 1038–1046.
- Skorzyńska Z., Zdanowicz A., 1978. Studies on potato resistance to mechanical damage. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, nr 203, 407–112.
- Smith J.M., 1968. *Mathematical ideas in biology*, University Press, Cambridge.
- Smolnicki T., 1999. Zastosowanie superelementu bieżnia – kula – bieżnia do wyznaczania nacisków w wielkogabarytowym łożysku tocznym. *Przegląd Mechaniczny*, 5/1999.
- Sneddon I.N., 1948. Boussinesq's problem for a rigid cone. *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 44, 492.
- Sojak M., Głowacki S., 2008. Klasyfikacja marchwi z wykorzystaniem systemu eksperckiego. *Inżynieria Rolnicza*, 7(105)/ 201.
- Spence D.A., 1968. Self-similar solutions to adhesive contact problems with incremental loading. *Proc. Royal Soc. A* 305, 55–80.
- Spence D.A., 1975. The Hertz contact problem with finite friction. *J. Elasticity*, 297.
- Stankiewicz A., 2005. Identyfikacja zmiennego w czasie współczynnika Poissona lepko-sprężystych materiałów biologicznych na podstawie testu pełzania. *Inżynieria Rolnicza*, 14/2005, 339–346.
- Stankiewicz A., Gołacki K., 2003. Metoda wyznaczania ciągłego spektrum relaksacji lepko-sprężystych materiałów roślinnych. *Acta Agrophysica*, 2(3),
- Stedle E., Wieneke J., 1985. Changes in water relations and elastic properties of apple fruit cells during growth and development. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 110, 824–829.
- Stopa R., Romański L., 2002b. Wpływ ułożenia modelu nasiona bobiku na obraz izochrom w procesie zgniatania pomiędzy równoległymi płytami. *Inż. Rol.* 5(38), 145–156.
- Stopa R., 2002c. Maksymalne naprężenia stykowe dla korzeni marchwi wyznaczone w próbie ściskania promieniowego, *Inżynieria Rolnicza*, 5(38), 166–174.
- Stopa R., Romański L., 2003. Zastosowanie metody interferometrii plamkowej do pomiaru przemieszczeń przekroju poprzecznego. *Scientiarum Polonorum. Acta Technica Agraria*. 2(1), 43–54.
- Stopa R., Romański L., 2006. Wpływ kształtu elementu obciążającego na obrazu izochrom w dwuwarstwowym modelu przekroju poprzecznego korzenia marchwi. *Inżynieria Rolnicza*, 7 (82), 399–406.
- Stopa R., Romański L., 2007. Badania elastoptycznych modeli przekroju poprzecznego korzeni marchwi o różnych własnościach wytrzymałościowych warstwy kory i rdzenia. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 5 (93), 389–395.

- Stopa R., Romański L., Jankowski L.J., 2008. Obrazy izochrom w modelach przekroju poprzecznego korzenia marchwi dla różnych wartości sił spójności warstw kory i rdzenia. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 5 (103), 283–290.
- Stopa R., Romański L., Niemiec A., 2005. Rozkład nacisków powierzchniowych dla ziarna zgniatanego pomiędzy płaskimi płytami. *Inż. Rol.*, 11(71), 413–423.
- Stopa R., Romański L., Niemiec A., 2006. Wpływ kształtu rdzenia w dwuwarstwowych modelach przekroju poprzecznego korzeni marchwi na obrazy izochrom. *Inżynieria Rolnicza*, 4 (79), 215–222.
- Studman C.J., 1996. Model of fruit bruising, [in:] *Proceedings of the 2nd Australasian Postharvest Conference, Science and Technology for the Fresh Food Revolution*, Monash University, Melbourne. Institute for Horticultural Development, Department of Natural Resources and the Environment, 241–246.
- Studman C.J., 1997. Factors affecting the bruise susceptibility of fruit, [in:] G. Jeronimidis and J.F.V. Vincent, Editors, *Proceedings of Conference on Plant Biomechanics*, University of Reading, Reading, UK, 273–281.
- Studman C.J., Brown G.K., Timm E.J., Schulte N.L., Vriegg M., 1997. Bruising on blush and non-blush sides in apple to apple impacts. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 6, 1655–1663.
- Studman C.J., 1999. Handling Systems and Packaging, [in:] F.W. Bakker-Arkema, Editor, *CIGR Agricultural Engineering Handbook IV.3*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 291–340 Chapter 3.
- Stuermann E., Shtaerman I.Y., 1939. On Hertz theory of local deformation of compressed bodies. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS* 25, 359–361.
- Szcześniak A.S., 1975. Theory determination and control of physical properties of food materials. Riedel Publ. Co., Dordrecht.
- Szefer G., 1998. Contact Problems in Terms of Large Deformations'. *ZAMM, Z. Angew. Math. Mech.*, 78, 523–533.
- 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., 1987. Ocena właściwości mechanicznych korzeni marchwi na podstawie pomiarów podstawowych parametrów wytrzymałościowych, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 321, 175–184.
- 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., 1991b. The influence of the speed of deformation on the course of stress relaxation in carrot roots. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 397, 69–73.
- 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.*, 389, 205–212.
- Sztóff W., 1971. *Modelowanie i filozofia*. PWN, Warszawa.
- Tabor D., 1970. Hardness of solids. *F. Phys. in Tech.* 1, 145–179.

- Tamura S., Senda T., 1992. Fine Structure of the Cell Wall of Carrot Parenchyma Revealed by Quick-Freeze, Deep-Etch Electron Microscopy. *Journal of Electron Microscopy* 41(2), 91–98.
- Tarnowski W., Bartkiewicz S., 2000. Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Tarnowski W., 2003. Modelowanie systemów technicznych. Wydawnictwa Pol. Koszalińskiej, Koszalin.
- Tekscan, 2000. Tekscan technology.
- Thompson A.K., 1996. Post harvest technology of fruit and vegetable, Blackwell Science Ltd, Oxford, p. 136.
- Thomson W. (Lord Kelvin), 1887. *Phil. Mag.*, 24, 503.
- Timoshenko S.P., Goodier J.N., 1970. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York.
- Turner M.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J., 1956. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *J. Aero Sci.*, 23, 805–823.
- Umeda M., Namikawa K., Nagasaka Y., Motomura T., Nakahara T., 1997. Mechanical Properties of Tetrakaidecahedron Model Cell (Part 1). Analysis of Reaction Force of a Single Model Cell. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 59, 55–62.
- Umeda M., Namikawa K., 1994. Modeling the deformation of cell to loads using model cell of rubber balk fitted with water. *Int. Agrophysics*, 8, 597–601.
- Vamos-Vigyazo L., 1981. Polyphenol oxidase and peroxidase in fruits and vegetables, *CRC. Critical Reviews in Food Sciences and Nutrition*. 49–127.
- Van Zeebroeck M., Tijssens E., Van Liedekerke P., Deli V., De Baerdemaeker J., Ramon H., 2003. Determination of the dynamical behaviour of biological materials during impact using a pendulum device. *J. Sound Vib.* 266, 465–480.
- Van Zeebroeck, M., 2005. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. PhD thesis no. 643. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.
- Verlinden B.E., De Baerdemacher J., 1994. Development and testing of tensile method for measuring the mechanical properties of carrot tissue during cooking. *AgEng94*. Milano, 94–G–055.
- Villee C.A., 1990. *Biologia*. PWRiL, Warszawa.
- Washizu K., 1968. *Variational methods in elasticity and plasticity*. Pergamon Press.
- Weber J., 1990. Intercellular spaces enhance potato tuber elasticity. *Potato Research*, nr 33(3), 335–340.
- Wenian C., Dupart F., Roudot A.C., 1991. Evaluation of the importance of the cellular tissue geometry on the strains observed on apples after a compression or an impact. *Sciences des Aliments*, 11, 99–110.
- Weres J., 1992. Analiza wpływu materiałowych właściwości suszonego ośrodka na transport wody w procesach konwekcyjnego suszenia ziarna kukurydzy w cienkiej warstwie. Rozprawa habilitacyjna. Wydział Techniki i Energetyki Rolnictwa, Akademia Rolnicza w Krakowie.

- Weres J., Olek W., 2005. Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products. *Drying Technology*, 23(8): 1737–1750.
- Wirsing F., Horneburg B., 1994. Die beschädigungsempfindlichkeit von Kartoffelknollen in Abhängigkeit von Genotyp. *Kartoffelbau*, 45(5), 198–201.
- Wu N., Pitts M.J., 1998. Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell. *Postharvest Biology and Technology* 16 (1999) 1–8.
- Wu N., Pitts M.J., 1999. Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell. *Postharvest Biology and Technology* 16, 1–8.
- Wu N., 1993. Modeling Apple Firmness Sensors with Finite Element Method. M.S. Thesis. Washington State University, Pullman, WA.
- Wu N., Pitts M.J., Davis D.C., Cavalieri R.P., 1994. Modeling mechanical behaviour of apple with the finite element method. ASAE paper, No. 943585.
- Younce F.L., Pitts M.J., Glenn G.M., 1991. Solid model geometry by screen digitizing images. *Appl. Eng. Agric.* 7, 361–363.
- Zdunek A., Konstankiewicz K., Gancarz M., 2001. Failure and acoustic emission of potato tuber tissue of selected varieties in compression tests at various strain rates. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Agricultural Engineering* 4, 2.
- Zdunek A., Umeda M., Konstankiewicz K., 2004. Method of parenchyma cells parametrisation using fluorescence images obtained by confocal scanning laser microscope, *EJPAU*, 7(1), 1.
- Zienkiewicz O.C., 1972. *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., 1991. *The Finite Element Method*. Fourth Edition. Vol. 1, Vol. 2, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- www.umw.edu.pl/botanika/.

Modelling of the carrot root deformation in concentrated load condition by the finite element method

S u m m a r y

The problem of the mutual contact in relation to vegetables and fruit occurs practically at each stage of production of the final product. The computational methods applied in practice, most often stemming directly from the theory of elasticity and plasticity, do not give credible results, and they can outright make the source of errors. This is where the field of operation for approximate methods based upon advanced computational techniques is opening.. Simultaneously the subtle measuring methods that have appeared foster carrying out credible verification of the results obtained as the result of analysis of numeric models.

In this thesis a method of determining surface pressures based upon the method of finite element has been proposed with the use of the computer software COSMOS/M as well as Abaqus. For the studied varieties of the carrot root the modulus of longitudinal elasticity E and the Poisson ratio ν have been applied as the input data to the computer calculation software. The obtained values of the modulus of elasticity have been described with the use of the statistical model with sigma-limitations and compatibility with the experimental results have been obtained at the level $\pm 15\%$ for the stress range from 0 to 0,8 MPa and at the level $\pm 10\%$ for the stress range from 1,0 to 1,9 MPa.

On the basis of the statistical analysis it has been found out that the value of the modulus of elasticity is essentially influenced by the layer from which the sample for investigation was taken and the direction of the set load, whereas no similar correlation has been shown in relation to the Poisson ratio. Due to non-linear characteristics of the material of carrot root it is the range of load that has essential influence on the value of the modulus of elasticity. The data for the COSMOS/M software used for determining of the surface pressures at low values of the load have made the input in the form of Poisson's constant and the longitudinal elasticity modules E_x and E_y , which had been determined by the method of secants within the considered range of load. The Abaqus software, which enables execution of calculations in the full range of load, has been provided as the input with the Poisson's constant, together with the correlations of tension with deformation, which in the form of continuous function replaced the modules of elasticity.

The verification of the constructed three-layer models of carrot root has been carried out as supported on the distributions of the displacements as determined for carrot

of Karotan variety. The results obtained for the disc model, built with the use of the COSMOS/M software have been compared with the maps and distributions of displacements u_x , u_y and u_z , which had been determined for a real object with the help of the methods of speckle pattern interferometry as well as little speckle photography. For the 3D model (Abaqus software) the verification of results was conducted on the basis of distributions of displacements u_y in the direction congruent to the direction of the load.

Verification of the MES models built with the use of COSMOS/M and Abaqus software on the basis of distribution of displacements has shown good compatibility both when quality and the absolute value are concerned. In the initial range of the load the results received for disc model are burdened with the average error not exceeding 17% in relation to the values of displacements u_x , u_y and u_z obtained with the help of speckle pattern interferometry (ESPI) and speckle photography. In the remaining range of load the displacements u_y determined in the experimental way and calculated with the use of 3D model of Abaqus software are within the range $\pm 10\%$.

The surface pressures have been determined on the basis of the methodology proposed by the author. It consists in measurements of the area of the contact point of the sample with the load applying element as the function of the force extorted and determining the distributions of surface pressures along the contact surface with the use of the elastooptical method. Three varieties of carrot which underwent investigations differed substantially in their dimensions and the strength properties of individual layers

The statistical analysis that was carried out has shown that what influences essentially on the values of maximum pressures is not only the loading force but also the diameter of the carrot root and the value of modulus of elasticity, and to a lesser extent the zone from which the sample had been taken. A statistical model with sigma-limitations has been constructed on the basis of the results and good compatibility of the results received with those expected has been achieved at the level of $\pm 20\%$.

The results received were compared with the values obtained from the discreet models of the carrot root verified by displacements. The average relative error was 5,3%, and its value was within the range from 4,0 % to 6,6 %. It turned out that the distributions of displacements as the function of the loading force within the interval from 0 to 2,5 N/mm are better reflected by the results obtained on the basis of the disc model, whereas in the remaining range of load by the 3D model. The surface pressures along the surface of the contact point of the carrot root with the operating element of the testing machine have elliptic distribution with maximum in the central point of contact.

To determine the surface pressures with the help of models constructed on the basis of the finite element method it is necessary to accept criteria defining the admissible pressures. In this study it has been proposed, on the basis of results of microscopic investigations and measurements of the size of cells before and after deformation, in the direction of acting of the loading force, to adopt a conventional value of border deformation which corresponds to the maximum pressures at the level of $\epsilon_y = 0.20$. However the deformation which corresponds to the surface pressures that are admissible, regarding the storage performance (connected with occurrence of the phenomena leading to the start of processes of rotting) at the level $\epsilon_y = 0.04$.

The conducted analysis of errors shows that among the applied ways of determining the surface pressures the best matching to the actual distributions of the surface pressures is shown by the models constructed on the basis of the finite element method. The calculation of the surface pressures, on the basis of average values calculated as the quotient of the loading force and the area of the contact point, disregarding the elliptic distribution, gives the values decreased by about more than 20%. Applying Hertz's theory to the calculation of the surface pressures for carrot roots brings in enlarging the calculated values by even as much as 80 %.

Key words: surface pressure, finite element method, carrot root, displacement, speckle interferometry, speckle photography, photoelastic method, discreet model

Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych

Streszczenie

Problem zagadnienia kontaktowego w stosunku do warzyw i owoców pojawia się praktycznie na każdym etapie produkcji wyrobu finalnego. Stosowane metody obliczeniowe zaczerpnięte najczęściej wprost z teorii sprężystości i plastyczności nie dają wiarygodnych rezultatów, a wręcz mogą być źródłem błędów. W tej sytuacji pojawia się pole działania dla metod przybliżonych opartych na zaawansowanych technikach obliczeniowych. Jednoczesne pojawienie się wyrafinowanych metod pomiarowych sprzyja przeprowadzaniu wiarygodnych weryfikacji wyników otrzymanych w wyniku analizy modeli numerycznych.

W pracy zaproponowano metodę wyznaczania nacisków powierzchniowych w oparciu o metodę elementów skończonych przy wykorzystaniu programów COSMOS/M oraz Abaqus. Do przeprowadzenia obliczeń każdy z tych programów wymaga wprowadzenia wiarygodnych danych dotyczących własności materiałowych modelowych. W związku z tym wyznaczono dla badanych odmian korzeni marchwi moduł sprężystości podłużnej E i liczbę Poissona ν oraz określono parametry, od których wielkości te zależą. Otrzymane wielkości modułu sprężystości opisano za pomocą statystycznego modelu z sigma-ograniczeniami i uzyskano zgodność z wynikami doświadczalnymi na poziomie +/- 15% dla przedziału naprężeń od 0 do 0,8 MPa oraz na poziomie +/- 10% dla przedziału naprężeń od 1,0 do 1,9 MPa.

Na podstawie analizy statystycznej stwierdzono, że na wartość modułu sprężystości istotny wpływ ma warstwa, z jakiej została pobrana próbka oraz kierunek zadanego obciążenia, natomiast podobnej zależności nie wykazano w stosunku do liczby Poissona. Z uwagi na nieliniową charakterystykę materiału korzenia marchwi istotny wpływ na wartość modułu sprężystości ma zakres obciążenia. Dane do programu COSMOS/M, za pomocą którego wyznaczano naciski powierzchniowe dla niskich wartości obciążenia, wprowadzono w postaci stałej Poissona ν oraz modułów sprężystości podłużnej E_x i E_y wyznaczonych metodą siecznych w rozpatrywanym zakresie obciążenia. Do programu Abaqus pozwalającego na przeprowadzenie obliczeń w pełnym zakresie obciążenia oprócz stałej Poissona wprowadzono w miejsce modułów sprężystości, zależności naprężenia od odkształcenia w postaci funkcji ciągłej.

Weryfikację zbudowanych trójwarstwowych modeli korzeni marchwi przeprowadzono w oparciu o rozkłady przemieszczeń dla marchwi odmiany Karotan. Wyniki uzyskane dla modelu tarczowego zbudowanego przy wykorzystaniu programu COSMOS/M porównano z mapami i rozkładami przemieszczeń u_x , u_y i u_z wyznaczonymi dla obiektu rzeczywistego za pomocą metody interferometrii plamkowej oraz fotografii plamkowej. Dla modelu 3D weryfikację wyników przeprowadzono na podstawie rozkładów przemieszczeń u_y w kierunku zgodnym z kierunkiem obciążenia uzyskanych na podstawie badań polegających na rejestracji odkształconych powierzchni przekroju poprzecznego i pomiarach przeprowadzonych w programie AutoCad.

Weryfikacja modeli MES zbudowanych przy wykorzystaniu programów COSMOS/M i Abaqus w oparciu o rozkłady przemieszczeń wykazała dobrą zgodność zarówno pod względem jakościowym jak i w odniesieniu do wartości bezwzględnych. W początkowym zakresie obciążenia wyniki otrzymane dla modelu tarczowego obciążone są średnim błędem nieprzekraczającym 17% w stosunku do wartości przemieszczeń u_x , u_y i u_z uzyskanych za pomocą interferometrii plamkowej (ESPI) i fotografii plamkowej. W pozostałym zakresie obciążenia przemieszczenia u_y wyznaczone w sposób eksperymentalny i obliczone za pomocą modelu 3D programu Abaqus mieszczą się w granicach $\pm 10\%$.

Naciski powierzchniowe wyznaczono w oparciu o metodykę zaproponowaną przez autora. Polegała ona na pomiarach pola powierzchni styku próbki z elementem obciążającym w funkcji siły wymuszanej oraz wyznaczeniu rozkładów nacisków powierzchniowych wzdłuż powierzchni styku przy wykorzystaniu metody elastoptycznej. Badaniom poddano trzy odmiany marchwi różniące się w istotny sposób wymiarami i własnościami wytrzymałościowymi poszczególnych warstw.

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że istotny wpływ na wartość maksymalnych nacisków, oprócz siły obciążającej ma średnica korzenia marchwi oraz wartość modułu sprężystości, a mniejszym stopniu strefa, z której została pobrana próbka. Na podstawie wyników zbudowano model statystyczny z sigma-ograniczeniami i uzyskano zgodność wyników otrzymanych z oczekiwanymi na poziomie $\pm 20\%$.

Uzyskane wyniki porównano z wartościami otrzymanymi dla modeli dyskretnych korzeni marchwi zweryfikowanymi poprzez przemieszczenia. Średni błąd względny wynosi 5,3%, a jego wartość mieściła się w przedziale od 4,0% do 6,6%. Rozkłady przemieszczeń jako funkcji siły obciążającej w zakresie od 0 do 2,5 N/mm lepiej są odwzorowane przez wyniki uzyskane w oparciu o model tarczowy, natomiast w pozostałym zakresie obciążenia przez model 3D. Rozkład nacisków wzdłuż powierzchni styku korzenia marchwi z elementem roboczym maszyny wytrzymałościowej uzyskano w postaci funkcji eliptycznej z maksimum w centralnym punkcie styku. Są one dobrze odwzorowane poprzez wyniki uzyskane dla modeli dyskretnych zbudowanych zarówno w oparciu o program COSMOS/M jak i Abaqus w odpowiednich przedziałach obciążenia. Przy dużych wartościach odkształceń naciski powierzchniowe w pobliżu osi pionowej próbki miały wartości niewiele różniące się od wartości maksymalnych. Szczególnie dotyczy to obciążenia zbliżonego do wartości maksymalnych.

Wyznaczanie nacisków powierzchniowych za pomocą modeli zbudowanych w oparciu o metodę elementów skończonych wymaga przyjęcia kryteriów definiujących

naciski dopuszczalne. W pracy, na podstawie wyników badań mikroskopowych i pomiarów wielkości komórek przed i po odkształceniu w kierunku działania siły obciążającej, zaproponowano przyjęcie umownej wartości granicznego odkształcenia odpowiadającego naciskom maksymalnym na poziomie $\epsilon_y = 0,20$. Natomiast odkształcenie odpowiadające naciskom powierzchniowym dopuszczalnym ze względu na trwałość przechowalniczą (związaną z pojawieniem się zjawisk prowadzących do rozpoczęcia procesów gnilnych) na poziomie $\epsilon_y = 0,05$.

Przeprowadzona analiza błędów wskazuje, że spośród zastosowanych sposobów wyznaczania nacisków powierzchniowych najlepsze dopasowanie do rzeczywistych rozkładów wykazują modele zbudowane w oparciu o metodę elementów skończonych. Obliczanie nacisków powierzchniowych na podstawie wartości średnich, będących ilorazem siły obciążającej i powierzchni styku bez uwzględnienia rozkładu eliptycznego, dają wartości zaniżone o ponad 20%. Stosowanie teorii Hertza do obliczania nacisków powierzchniowych dla korzeni marchwi powoduje zawyżenie otrzymanych wartości nawet o 80%.

Słowa kluczowe: naciski powierzchniowe, metoda elementów skończonych, korzeń marchwi, przemieszczenie, interferometria plamkowe, fotografia plamkowa, metoda elastooptyczna, model dyskretny