

WPLYW ZRÓŻNICOWANIA MORFOLOGICZNEGO NA ZMIANĘ  
PARAMETRÓW MODELI REOLOGICZNYCH MIĄŻSZU  
WYBRANYCH WARZYW KORZENIOWYCH

*Jerzy Bohdziewicz*

Instytut Inżynierii Rolniczej, Akademia Rolnicza, ul. Chełmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław  
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

**Streszczenie.** Przeprowadzono test ściskania próbek tkanek pobranych z korzeni marchwi i pietruszki, uwzględniono zróżnicowanie morfologiczne. Wyniki porównano z wartościami parametrów modeli reologicznych, obliczonymi na podstawie testu pełzania i relaksacji. Nie stwierdzono istotnej korelacji pomiędzy naprężeniem i modułem sprężystości a parametrami modeli reologicznych, w odniesieniu do pojedynczego korzenia. Z porównania wartości średnich modułów sprężystości  $E$ , lepkości dynamicznej  $\eta$  i pozornej  $\eta_a$ , można zaobserwować różnice, w zachowaniu się tkanek kory i walca osiowego pod wpływem obciążenia.

Słowa kluczowe: pietruszka, marchew, wytrzymałość, model reologiczny

WSTĘP

Przyrost wtórny korzeni spichrzowych warzyw, objawia się znacznym zróżnicowaniem tkanek. W budowie anatomicznej korzenia marchwi i pietruszki możemy wyróżnić stosunkowo wąski pierścień zewnętrzny kory (felloderma), stykający się z warstwą miękiszu (floem), ten zaś jest oddzielony pierścieniem kambium od centralnie usytuowanego miękiszu drzewnego (ksylem) [12,15]. Badania właściwości mechanicznych próbek, pobranych z różnych stref korzeni, wykazały występowanie zauważalnych różnic wartości naprężenia doraźnego i umownego modułu sprężystości [4,5]. Może mieć to istotne znaczenie, ponieważ podatność miąższu na uszkodzenia mechaniczne, jest przyczyną powstawania znacznych strat plonu podczas zbioru warzyw. Przyjmuje się, że pęknięcie korzenia marchwi zachodzi przy naprężeniach bliskich 2 MPa, porównywalnych z wartością ciśnienia osmotycznego w komórkach [2,3,7,10,11]. Heterogeniczność i anizotropowość struktur tkankowych

ma swoje odzwierciedlenie w postaci niejednakowych właściwości mechanicznych, pojawia się pytanie, czy dotyczy to także zmian parametrów przyjętych modeli reologicznych? Dotychczasowe próby wyznaczenia wartości modułu sprężystości i lepkości dynamicznej miąższu marchwi, na podstawie uogólnionego modelu Maxwella, udowodniły ich zależność od zawartości i potencjału wody [6,9,14]. Nie wykazano jednak, w jakim stopniu zbieżne jest zachowanie się poszczególnych tkanek w zadanych warunkach realizacji testów reologicznych.

Celem pracy było określenie korelacji, pomiędzy wartościami naprężenia doraźnego oraz umownego modułu sprężystości, a parametrami modeli reologicznych, wyznaczonymi na podstawie testów ściskania, pełzania i relaksacji tkanek korzenia marchwi i pietruszki.

#### MATERIAŁ I METODY

Do badań wybrano dwadzieścia korzeni marchwi odmiany Nantejska oraz pietruszki odmiany Berlińska. Próbki miały postać walca o średnicy 8 mm i wysokości  $10,5 \pm 0,5$  mm, przy ich pobieraniu uwzględniono morfologię korzenia. Materiał pobrany z centralnej części korzenia oznaczono dalej jako ksylem, z części skrajnej jako felloderma, ze strefy przejściowej jako kambium. Każdorazowo wycinano dwanaście próbek, z czego sześć wykorzystano do przeprowadzenia próby ściskania, na jej podstawie obliczano średnią wartość siły  $F_{\max}$ , jako opisującej moment biologicznego zniszczenia badanej tkanki. Testy pełzania i relaksacji przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu Instron 5566, w fazie wstępnej przesuw głowicy wynosił  $1 \text{ mm min}^{-1}$ , obciążenie równe  $50\% F_{\max}$ . Proces przerwano po upływie 900 s.

Na podstawie równania Clapeyrona obliczano wartość umownego modułu sprężystości  $E_C$ , traktując energię zmagazynowaną w materiale jako iloczyn zastępczego naprężenia i rzeczywistego odkształcenia [1]. Dla celów porównawczych wyznaczano także: moduł sieczny (secant modulus)  $E_S$ , jako stosunek naprężenia doraźnego do odpowiadającego mu odkształcenia; moduł styczny (tangent modulus)  $E_T$ , jako współczynnik kierunkowy prostej, aproksymującej rzeczywisty przebieg zmian naprężenia.

Do opisu przebiegu zmian wartości naprężenia  $\sigma_{(t)}$  wykorzystano uogólniony model Jeffreysa, utworzony przez analogię do ciała Burgersa:

$$\sigma_{(t)} = \sum_{i=1}^2 a_i \cdot e^{b_i \cdot t} + c \cdot t \quad (1)$$

gdzie:  $t$  – czas realizacji testu relaksacji ;  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c$  – współczynniki równania.

Do opisu przebiegów zmian wartości odkształcenia  $\varepsilon$  w funkcji czasu, przyjęto równanie, określane jako model Lethersicha:

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{i=1}^2 a_i (1 - e^{b_i \cdot t}) + c \cdot t \quad (2)$$

Przy wyznaczaniu wartości współczynników obu równań wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów, następnie dla przyjętych przedziałów czasowych obliczono wartości chwilowych modułów sprężystości  $E$  oraz lepkości dynamicznej  $\eta$ , i pozornej  $\eta_a$ , jako parametrów przyjętego modelu [13]. Do analizy zmiany tych wartości w czasie trwania testu, wykorzystano zestawienie sekwencyjne dla sześciu przedziałów czasowych [8].

#### WYNIKI I DYSKUSJA

Zestawienie wyników obliczeń średnich wartości naprężenia doraźnego oraz umownych modułów sprężystości, zamieszczono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Zestawienie średnich wartości właściwości mechanicznych tkanek korzenia  
**Table 1.** Mean values of mechanical properties of root tissues

Właściwości mechaniczne Mechanical properties	Marchew Carrot			Pietruszka Parsley		
	Felloderma cortex	Kambium cambium	Ksylem xylem	Felloderma cortex	Kambium cambium	Ksylem xylem
Naprężenie Stress (MPa)	1,49 ± 0,17	1,42 ± 0,16	1,38 ± 0,10	1,51 ± 0,14	1,65 ± 0,13	1,60 ± 0,18
Moduł Modulus $E_C$ (MPa)	4,43 ± 0,14	5,03 ± 0,20	4,93 ± 0,18	4,15 ± 0,17	4,22 ± 0,13	3,57 ± 0,19
Moduł Modulus $E_S$ (MPa)	5,42 ± 0,13	5,26 ± 0,21	5,25 ± 0,16	4,49 ± 0,14	5,26 ± 0,14	4,18 ± 0,19
Moduł Modulus $E_T$ (MPa)	5,56 ± 0,17	5,40 ± 0,19	5,42 ± 0,16	4,66 ± 0,15	5,65 ± 0,15	4,60 ± 0,17

Zakres zmienności wartości średniej dla dwudziestu korzeni obliczono na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Z zestawienia wartości umownego modułu sprężystości  $E_C$  wynika, że spośród tkanek korzenia marchwi kora (felloderma) charakteryzuje się najmniejszą sprężystością i jednocześnie największą wytrzymałością. W przypadku pietruszki podobnymi właściwościami charakteryzują się tkanki walca osiowego (ksylem). Jak można zauważyć (tab. 1), uwzględnienie innych modułów może prowadzić do odmiennego wnioskowania. Stwierdzono występowanie liniowej zależności, pomiędzy wartościami modułów sprężystości a naprężeniem doraźnym, współczynnik korelacji  $R^2 \approx 0,5$ .

Konfrontacja wyników obliczeń wartości parametrów przyjętych modeli (tab. 2 i 3), pozwala na stwierdzenie, że obserwowane zróżnicowanie właściwości mechanicznych poszczególnych tkanek ma swoje odzwierciedlenie także w wynikach testów reologicznych. Występuje liniowa zależność zmiany wartości parametrów rozpatrywanych modeli, w zależności od poziomu naprężenia doraźnego, wskaźnik  $R^2 \approx 0,8$ . Brak jest jednak jednoznacznych powiązań pomiędzy wartościami umownych modułów sprężystości, wyznaczonymi podczas testu ściskania i w pozostałych testach ( $R^2 \approx 0,3$ ).

Można zauważyć (tab. 2), że moduł sprężystości  $E$  modelu Lethersicha ma mniejszą wartość w przypadku kory (felloderma), niż w innych tkankach korzenia marchwi. Jednocześnie, zwiększona jest lepkość pozorna  $\eta_a$ , co w tym przypadku oznacza mniejszą podatność na odkształcenia. Właściwości tkanek walca osiowego pietruszki różnią się w stosunku do pozostałych, przede wszystkim wartością lepkości pozornej  $\eta_a$ .

Rozpatrując model Jeffreysa (tab. 3) uzyskuje się bardziej wyrazisty obraz niejednorodności cech reologicznych poszczególnych tkanek korzenia marchwi. Analogicznie, zróżnicowanie właściwości poszczególnych tkanek pietruszki jest znacznie mniejsze.

Na rysunku 1 przedstawiono sekwencyjne zestawienie wyników obliczeń wartości parametrów trzelementowego modelu Lethersicha. Jak widać, zmiany wartości modułów sprężystości badanych tkanek w poszczególnych przedziałach czasowych, mają podobny przebieg. Należy jednak zwrócić uwagę na zauważalne różnice w przebiegu zmian wartości współczynników lepkości. W tym przypadku, skrócenie czasu trwania testu do 300 sekund skutkowałoby zmianą relacji wzajemnej uzyskanych wyników, a w konsekwencji innym wnioskowaniem.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń parametrów modelu Lethersicha, test pelzania w czasie 900 sekund  
 Table 2. The Lethersich model parameters, calculated for 900 seconds creep test

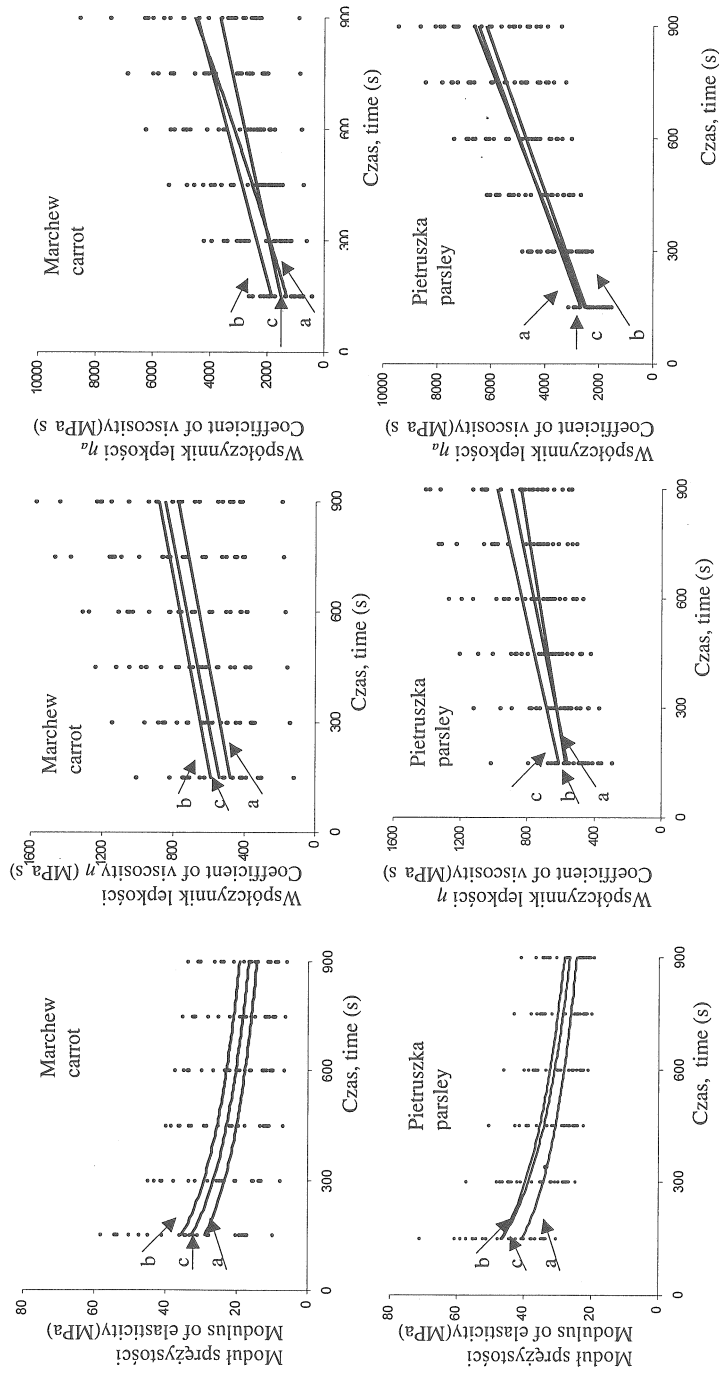
Materiał Material	Miejsce Place	Model pięcioelementowy Five-element model					Model trzyelementowy Three-element model				
		$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ (GPa s)	$\eta_2$ (GPa s)	$\eta_a$ (GPa s)	$E_1$ (MPa)	$\eta_1$ (GPa s)	$\eta_a$ (GPa s)	$\eta_1$ (GPa s)	$\eta_a$ (GPa s)
Felloderma		17,9 ± 2,3	36,8 ± 5,3	2,67 ± 0,48	0,48 ± 0,06	6,99 ± 1,13	14,9 ± 1,3	0,77 ± 0,13	4,57 ± 0,65		
	cortex										
Marchew Carrot	Kambium	26,9 ± 3,1	50,9 ± 7,3	2,99 ± 0,35	0,56 ± 0,07	5,07 ± 0,58	20,4 ± 1,8	0,86 ± 0,11	4,26 ± 0,55		
	cambium										
Ksylem		21,9 ± 1,7	40,4 ± 5,1	2,83 ± 0,25	0,48 ± 0,04	5,56 ± 0,47	17,7 ± 0,9	0,83 ± 0,07	3,53 ± 0,43		
	xylem										
Felloderma		36,3 ± 2,1	56,1 ± 3,1	3,54 ± 0,24	0,53 ± 0,06	7,58 ± 0,42	25,4 ± 1,4	0,82 ± 0,07	6,27 ± 0,34		
	cortex										
Pietruszka Parsley	Kambium	42,1 ± 3,3	66,1 ± 6,2	4,39 ± 0,38	0,63 ± 0,12	7,57 ± 0,74	29,8 ± 2,4	1,01 ± 0,13	6,33 ± 0,59		
	cambium										
Ksylem		35,4 ± 2,4	60,9 ± 3,4	3,87 ± 0,25	0,55 ± 0,04	6,89 ± 0,72	26,3 ± 1,7	0,95 ± 0,06	5,65 ± 0,50		
	xylem										

Zakres zmienności wartości średniej dla dwudziestu korzeni obliczono na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .  
 Variability of mean value were calculated with significance level  $\alpha = 0,05$ .

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń parametrów modelu Jeffreysa, test relaksacji w czasie 900 sekund  
 Table 3. The Jeffreys model parameters, calculated for 900 seconds relaxation test

Material Material	Miejsce Place	Model pięcioelementowy Five-element model					Model trzyelementowy Three-element model				
		$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ (MPa s)	$\eta_2$ (MPa s)	$\eta_a$ (GPa s)	$E_1$ (MPa)	$\eta_1$ (MPa s)	$\eta_a$ (GPa s)	$\eta_1$ (MPa s)	$\eta_a$ (GPa s)
Marchew Carrot	Felloderma	0,56 ± 0,01	0,69 ± 0,01	2,05 ± 0,05	30,1 ± 1,4	60,1 ± 1,6	1,03 ± 0,01	14,8 ± 0,2	41,1 ± 1,1		
	cortex										
Marchew Carrot	Kambium	0,71 ± 0,01	1,18 ± 0,02	3,92 ± 0,08	91,9 ± 2,6	45,5 ± 1,2	1,51 ± 0,02	47,3 ± 1,2	32,9 ± 0,7		
	cambium										
Ksylem xylem	Ksylem	0,83 ± 0,01	1,35 ± 0,02	5,18 ± 0,09	117,0 ± 2,5	50,7 ± 1,3	1,71 ± 0,02	56,5 ± 1,1	39,8 ± 1,0		
	xylem										
Felloderma cortex	Felloderma	0,51 ± 0,06	0,64 ± 0,06	1,99 ± 0,25	43,1 ± 5,8	25,3 ± 7,5	0,90 ± 0,09	18,6 ± 1,0	21,2 ± 6,2		
	cortex										
Pietruszka Parsley	Kambium	0,55 ± 0,08	0,74 ± 0,22	2,65 ± 0,64	55,7 ± 6,1	26,4 ± 1,7	0,98 ± 0,19	29,3 ± 4,7	21,5 ± 1,4		
	cambium										
Ksylem xylem	Ksylem	0,44 ± 0,12	0,64 ± 0,23	2,13 ± 0,87	49,4 ± 8,7	17,5 ± 5,6	0,80 ± 0,24	25,3 ± 3,1	14,3 ± 4,5		
	xylem										

Zakres zmienności wartości średniej dla dwudziestu korzeni obliczono na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .  
 Variability of mean value were calculated with significance level  $\alpha = 0,05$ .



Rys. 1. Sekwencyjne zestawienie zmian parametrów modelu Lethersicha w czasie 900 sekund. Oznaczono tkanki: felloderma (a), kambium (b), ksylem (c)  
 Fig. 1. Changes in the Lethersich's model parameters in 900 second time. Tissues marked as: cortex (a), cambium (b), xylem (c)

## WNIOSKI

1. Zróznicowanie wartości umownego modułu sprężystości  $E_C$  tkanek korzenia marchwi i pietruszki, ma swoje odzwierciedlenie także we wzajemnych relacjach wartości parametrów przyjętych modeli reologicznych. Spośród tkanek, w przekroju poprzecznym korzenia marchwi, najmniejszą sprężystością charakteryzuje się felloderma. Analogiczną właściwość mają tkanki walca osiowego (ksylem) pietruszki. Obserwowane zmiany wartości lepkości pozornej, mogą być skutkiem występowania różnych zjawisk fizycznych, podczas realizacji testu pełzania i relaksacji. Należy także podkreślić, że uzyskane wyniki odnoszą się do próbek selektywnie dobranego materiału, obciążanego na poziomie 50% jego wytrzymałości biologicznej.

2. Z zestawienia sekwencyjnego, przeprowadzonego dla sześciu przedziałów czasowych wynika, że skrócenie czasu realizacji testów relaksacji i pełzania może skutkować zmianą wzajemnej relacji wartości lepkości pozornej  $\eta_a$  poszczególnych tkanek korzenia.

## PIŚMIENNICTWO

1. Ashby M.F., Jones D.R.H.: Materiały inżynierskie. t.1. WNT, Warszawa, 1995.
2. Blahovec J.: Jednoduchý model procesu stlačování a mechanického poškození dužnin. Zemědělska Technika, 31(6), 349-364, 1985.
3. Blahovec J., Patočka K., Miča B.: Mechanické vlastnosti dužnin zeleniny. Zemědělska Technika, 31(7), 393-410, 1985.
4. Bohdziewicz J.: Właściwości reologiczne związane z morfologią korzenia marchwi. Inżynieria Rolnicza, 12(32), 51-58, 2001.
5. Bohdziewicz J.: Zmienność cech reologicznych korzenia pietruszki. Inżynieria Rolnicza, 12(32), 59-64, 2001.
6. Gołacki K.: Influence of deformation speed and water potential on parameters of plant tissue critical resistance. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 399, 77-81, 1993.
7. Gołacki K.: Charakterystyki lepko-sprężyste korzeni marchwi w szerokim zakresie prędkości obciążeń mechanicznych. Rozprawa habilitacyjna, AR Lublin, 1998.
8. Kisiel I.: Reologiczne równania stanu ośrodków quasiliniowych. PAN Wrocław 1980.
9. Mempel H., Herold B., Geyer M.: Relations between water balance and damage susceptibility of carrots. Abstracts of 7<sup>th</sup> International Conference on Agrophysics, Lublin, 1997.
10. Murase H., Merva G.E., DeBaerdmaeker J.G., Segerlind L.J.: Importance of the water potential concept in studying physical properties of plant materials. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference Physical Properties of Agricultural Materials, Gödöllő, 1980.
11. Lewicki P. (red.): Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego. WNT, Warszawa, 1999.
12. Orłowski M., Kołota E.: Uprawa warzyw. Wyd. Brasika Szczecin, 1992.
13. Szczepiński W. (red.): Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego. Mechanika techniczna, t.X, PWN, Warszawa, 1984.



14. **Szot B., Gołacki K.:** The relationship between the elasticity and viscosicity and the parameters determining the status of water of carrot roots. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference Physical Properties of Agricultural Materials, Rostock, 1989.
15. **Tolpa J., Radomski J., Czerwiński W.:** Botanika. PWN, Warszawa, 1974.

EFFECTS OF MORPHOLOGICAL DIVERSIFICATION  
ON THE VARIABILITY OF RHEOLOGICAL PARAMETERS  
OF THE VEGETABLE FLESH MODEL

*Jerzy Bohdziewicz*

Institute of Agricultural Engineering, University of Agriculture  
ul. Chelmońskiego 37/41, 51-630 Wrocław  
e-mail: bohdziewicz@imr.ar.wroc.pl

**Abstract.** The paper present results of a compression test carried out on the tissues sampled from carrot and parsley roots with respect to their morphological diversification. The results of the above tests were compared with parameters of the rheological model calculated on the basis of a creep and relaxation test. In relation to a single root, it was affirmed that there are non-essential correlations between compression and other test results. The mean values of the elastic modulus  $E$ , viscosity dynamics  $\eta$  and apparent viscosity  $\eta_a$  showed that the behaviour of the cortex and stele tissues under the influence of a load is different.

**Key words:** parsley, carrot, strength, rheological model

