

ZMIANA NACISKÓW POWIERZCHNIOWYCH KORZENI MARCHWI W FUNKCJI CZASU PRZY STAŁEJ WARTOŚCI PRZEMIESZCZENIA POCZĄTKOWEGO

Eugeniusz Kamiński, Roman Stopa, Bogdan Stępień
Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Przedstawiono wyniki pomiarów nacisków powierzchniowych korzeni marchwi przy ściskaniu promieniowym z uwzględnieniem czynnika czasu dla trzech wartości odkształcenia próbki. Otrzymane wyniki porównano z wartościami teoretycznymi obliczonymi w oparciu o wzory Hertz'a. W trakcie procesu relaksacji, trwającego 1200s, wartości nacisków powierzchniowych redukują się od 56-68% w zależności od poziomu wstępnego odkształcenia próbki. Badania wykazały, że wartości nacisków powierzchniowych, obliczone w oparciu o wzory Hertz'a, są nawet 3-krotnie wyższe od wartości doświadczalnych.

Słowa kluczowe: naciski powierzchniowe, korzeń marchwi, ściskanie, relaksacja naprężeń, wzory Hertz'a

Wstęp

Materiały biologiczne takie jak warzywa i owoce poddane są różnorodnym obciążeniom statycznym i dynamicznym związanym ze zbiorem, przeładunkiem, transportem, sortowaniem i innymi zabiegami niezbędnymi do uzyskania wyrobu finalnego. Większość uszkodzeń powstaje w wyniku działania długotrwałych statycznych obciążeń ścisających. Poznanie właściwości reologicznych ma bardzo ważne znaczenie praktyczne umożliwiając rozwiązywanie istotnych problemów związanych np. z oceną stopnia odporności na uszkodzenia, określeniem warunków przechowywania, porównywaniem odmian czy oceną stopnia dojrzałości. Gołacki [1996] wykorzystał test relaksacji naprężeń do oceny stopnia uszkodzeń wewnętrznych korzeni marchwi w różnych warunkach obciążeń.

Ze względu na kształt produktów rolniczych decydujący wpływ na rodzaj i wielkość uszkodzenia mają obciążenia kontaktowe charakteryzujące się działaniem siły na małą powierzchnię. W przypadku takich obciążeń może się zdarzyć, że w materiale o stosunkowo wysokich właściwościach wytrzymałościowych nastąpi lokalna koncentracja naprężeń co w efekcie może doprowadzić do naruszenia ciągłości tkanek badanego obiektu.

Materiały pochodzenia biologicznego ze względu na anizotropową budowę stwarzają poważne problemy zarówno podczas prowadzenia prac badawczych jak również w trakcie rozważań teoretycznych. Brak spójnej teorii pozwalającej na obliczanie rzeczywistych

i dopuszczalnych wartości nacisków powierzchniowych w odniesieniu do plodów rolnych utrudnia zarówno prace projektowe przy tworzeniu nowych maszyn rolniczych jak również stwarza kłopoty przy opracowywaniu nowych technologii przetwórczych.

Z punktu widzenia zagadnień kontaktowych w odniesieniu do materiałów pochodzenia biologicznego najlepiej opisane są badania doświadczalne dotyczące zachowania się jabłek pod działaniem sił zewnętrznych [Herold i in. 2001; Rabelo i in. 2001; Lewis i in. 2008]. Bardzo często do wyznaczenia nacisków powierzchniowych korzystano ze wzorów Hertza, chociaż zostały one wyprowadzone przy założeniach wykluczających zastosowanie ich do obiektów pochodzenia biologicznego. Wydaje się jednak, że ze względów praktycznych wobec braku lepszych rozwiązań, należy sprawdzić przydatność wzorów Hertz'a do wyznaczania nacisków powierzchniowych powstających w procesie przetwórstwa owoców i warzyw. Rabelo [2001] zastosował metodę Hertz'a do analizy zagadnień kontaktowych dla pomarańczy, jednak otrzymane wyniki wskazały wyraźnie na ograniczenia stosowania tej teorii w odniesieniu do tak złożonych materiałów jak miąższ owoców.

Cel badań

Celem badań było:

- wyznaczenie zmian wartości nacisków powierzchniowych korzenia marchwi w funkcji czasu, podczas próby ściskania promieniowego,
- porównanie nacisków powierzchniowych wyznaczonych w próbie ściskania z wartościami teoretycznymi obliczonymi w oparciu o wzory Hertz'a.

Metodyka i przedmiot badań

Badania przeprowadzone zostały w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Testy realizowano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5566 wyposażonej w głowicę tensometryczną o zakresie pomiarowym do 1 kN. Maszyna współpracowała z komputerem stacjonarnym PC który sterował przebiegiem testu i rejestrował wyniki badań. Prędkość posuwu głowicy do osiągnięcia obciążenia początkowego wynosiła 1mm/min.

Korzenie marchwi odmiany Karotka pochodziły z gospodarstwa rolnego w Ramiszowie pod Wrocławiem. Odmiana ta jest powszechnie uprawiana na terenie Polski. Do badań wybierano korzenie zdrowe, o podobnym przekroju i długości. Korzenie miały średnicę zawierającą się w przedziale od 23 do 30 mm, a ich długość mieściła się w przedziale od 140 do 155 mm. W czasie trwania badań przechowywano je w warunkach zapewniających mały ubytek wilgoci. Próbkę przeznaczoną do testów przygotowano w sposób opisany w pracy [Stopa 2010]. Z każdego korzenia marchwi wycięto 6 próbek w postaci plastrów o grubości 10 mm ze środkowej strefy korzenia. Jedna z próbek przeznaczona była do wyznaczenia granicznych wartości obciążenia przy quasistatycznym ściskaniu promieniowym. Test przeprowadzono do momentu zniszczenia próbki.

Test relaksacji przeprowadzono pomiędzy dwiema płaskimi powierzchniami przy zastosowaniu przyrządu szczegółowo opisanego w pracy [Stopa 2010] pozwalającego na pomiar powierzchni styku próbki z podporą. Wielkość powierzchni styku wyznaczano przy

pomocy programu Irys Laboratorium. Pomiar przeprowadzono przy trzech wartościach przemieszczenia wstępnego w 5 powtórzeniach. Czas relaksacji naprężeń określono na 1200 s, a rejestrację nacisków powierzchniowych przeprowadzano w odstępach co 60 s od momentu osiągnięcia wartości zadanej przemieszczenia. Na podstawie badań pilotażowych ustalono, że największe zmiany nacisków powierzchniowych następują w pierwszych 20 min. przebiegu procesu.

Na całkowity błąd wyznaczenia doświadczalnych wartości stałej nacisków powierzchniowych składały się błędy związane z kształtem próbek, z pomiarem siły nacisku oraz wyznaczeniem pola powierzchni styku próbki korzenia marchwi z podłożem. Ze względu na bardzo staranne przygotowanie próbek do badań, błąd kształtu jako błąd systematyczny można pominąć. Pomiar siły dokonano za pomocą głowicy pomiarowej o zakresie 1 kN i błędzie $\Delta F = 1$ N. Przesunięcie rejestrowano z dokładnością do 0,05 mm. Pomiar pola powierzchni styku próbki z elementem obciążającym przeprowadzono na podstawie zarejestrowanych obrazów przy pomocy programu Irys Laboratorium z błędem wynoszącym $\Delta A = 0,1$ mm². Graniczna wartość całkowitego błędu wyznaczonego metodą różniczeki zupełnej wynosiła $u_\sigma = 0,013$.

Znając pole powierzchni styku próbki z elementem obciążającym obliczono średnie wartości nacisków powierzchniowych p_{sr} w stałych odstępach czasowych korzystając ze wzoru:

$$p_{sr} = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdzie:

F – siła obciążająca [N],

A – pole powierzchni styku próbki z urządzeniem obciążającym [mm²].

Następnie, przyjmując eliptyczny rozkład nacisków wzdłuż powierzchni styku, wyznaczono wartości nacisków maksymalnych $p_{sr \max}$ ze wzoru:

$$p_{sr \max} = p_{sr} \cdot \frac{4}{\pi} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Według teorii Hertza wartość maksymalnych teoretycznych nacisków powierzchniowych $p_{H \max}$ obliczono ze wzoru:

$$p_{H \max} = \sqrt{\frac{F'}{R \cdot k \cdot \pi}} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

gdzie:

F'=F/l – siła docisku przypadająca na jednostkę długości obszaru styku [N·mm⁻¹],

R – promień ściskanej próbki [mm],

k – współczynnik.

$$k = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad [-] \quad (4)$$

gdzie:

ν_1, ν_2 – stała Poissona odpowiednio: dla stali $\nu_1 = 0,3$ i badanego materiału $\nu_2 = 0,46$ [Stopa 2010].

E_1, E_2 – moduł sprężystości wzdłużnej odpowiednio dla stali $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ [MPa] i badanego materiału $E_2 = 12$ [MPa] [Stopa 2010].

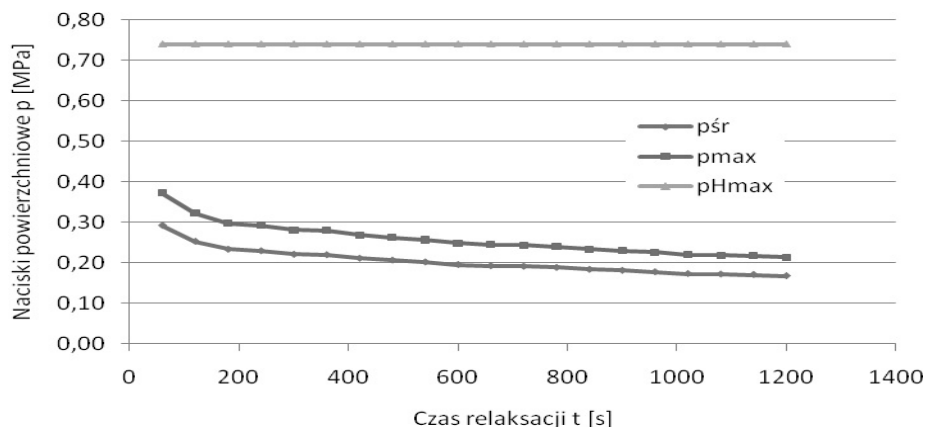
Wyniki badań i ich analiza

Przed rozpoczęciem każdego cyklu testu relaksacji naprężeń przeprowadzono test ściskania próbki w celu wyznaczenia wartości siły niszczącej F_{\max} oraz wartości odpowiadającego jej przemieszczeniu Δl_{\max} stanowiącemu podstawę do obliczenia wartości wstępnego odkształcenia próbki: $\Delta l_1 = 10\% \Delta l_{\max}$, $\Delta l_2 = 20\% \Delta l_{\max}$ oraz $\Delta l_3 = 30\% \Delta l_{\max}$. Pomiar przeprowadzono w 5 powtórzeniach dla tej samej partii materiału. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów ustalono następujące wartości początkowe procesu relaksacji naprężeń (tabela 1).

Tabela 1. Parametry początkowe procesu relaksacji naprężeń
Table 1. Initial parameters of stress relaxation process

Parametr	Δl [mm]	F_0 [N]
10% Δl_{\max}	0,84	24,74
20% Δl_{\max}	1,32	38,77
30% Δl_{\max}	2,82	85,38

Dla wartości przemieszczenia $\Delta l = 0,84$ mm i $\Delta l = 1,32$ mm pole powierzchni styku próbki korzenia marchwi z podłożem zmieniało się nieregularnie w przedziale o 1,6 do 2,4% wartości średniego odchylenia standardowego, a więc praktycznie w granicach błędu pomiaru. Można więc przyjąć, że w trakcie przeprowadzania testu relaksacji naprężeń pole powierzchni nie wpływało w istotny sposób na wartość nacisków powierzchniowych.

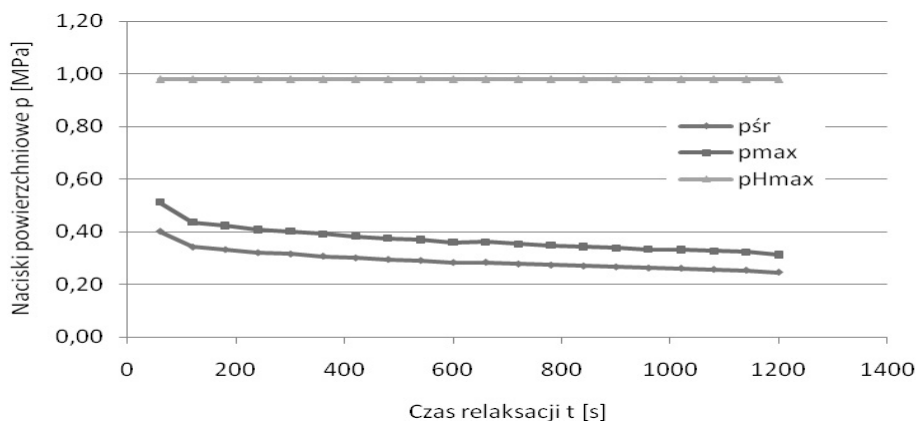


Rys. 1. Naciski powierzchniowe p_{\max} , p_{sr} i $p_{H\max}$ w funkcji czasu relaksacji ($\Delta l = 0,84$ mm)
Fig. 1. Surface pressure p_{\max} , p_{sr} i $p_{H\max}$ as a function of relaxation time ($\Delta l = 0,84$ mm)

Wyraźnej zmianie ulegała siła nacisku w miarę upływu czasu relaksacji naprężeń. Po początkowym okresie relaksacji (do ok. 200s), charakteryzującym się gwałtownym spadkiem siły nacisku, następował okres powolnego i równomiernego spadku obciążenia

Zmiana nacisków powierzchniowych...

w tempie od $0,0055 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ do $0,0078 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$. W rezultacie po 1200s wartość siły obciążającej spadła do poziomu 60% wartości siły początkowej.



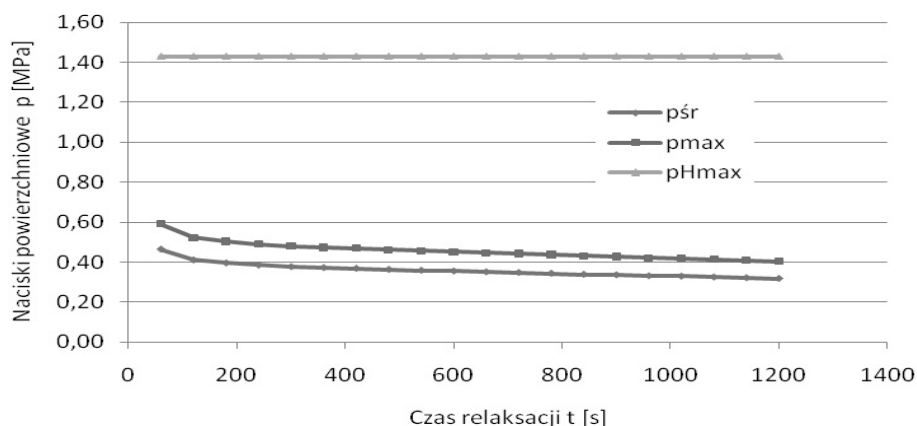
Rys. 2. Nacisków powierzchniowe p_{max} , p_{sr} i p_{Hmax} w funkcji czasu relaksacji ($\Delta l = 1,32 \text{ mm}$)
Fig. 2. Surface pressure p_{max} , p_{sr} i p_{Hmax} as a function of relaxation time ($\Delta l = 1,32 \text{ mm}$)

Zmiany wartości siły nacisku oraz pola powierzchni styku próbki korzenia marchwi z podłożem przekładają się zgodnie ze wzorami (1, 2 i 3) na wartości nacisków powierzchniowych (rys. 1 i 2). Maksymalne naciski średnie zmieniają się w założonym okresie relaksacji w przedziale od 0,37 MPa do 0,21 MPa, co oznacza, że uległy zmniejszeniu do 56% wartości początkowej w tempie $0,016 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartości nacisków obliczone w oparciu o wzory Hertz'a nie uwzględniają czynnika czasu (mają wartość wynoszącą 0,74 MPa) i są zawyżone w stosunku do wartości doświadczalnych o 200% do 352%.

Dla wartości przemieszczenia początkowego $\Delta l = 3,3 \text{ mm}$ pole powierzchni styku próbki korzenia marchwi z podłożem w trakcie przeprowadzania testu relaksacji naprężeń wzrosło o ok. 3,2% wartości początkowej.

Siła nacisku w miarę upływu czasu relaksacji zmieniała się w zakresie od początkowej wartości $F_0 = 85,4 \text{ N}$ do $F_k = 60,0 \text{ N}$. Spadek siły nacisku w ustalonym okresie relaksacji w zakresie od 72,80 N do 60,0 N nastąpił w tempie $0,013 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$. W rezultacie po 1200s wartość siły obciążającej spadła do poziomu 70,2% wartości siły początkowej.

Maksymalne naciski średnie zmieniają się w przyjętym okresie relaksacji (rys. 3) w przedziale od 0,59 MPa do 0,40 MPa, a więc uległy redukcji do 68% wartości początkowej w tempie $0,019 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Wartości nacisków obliczone w oparciu o wzory Hertz'a nie uwzględniają czynnika czasu (mają wartość wynoszącą 1,43 MPa) i są zawyżone w stosunku do wartości doświadczalnych o 243% do 360%.



Rys. 3. Naciski powierzchniowe p_{\max} , p_{sr} i $p_{H\max}$ w funkcji czasu relaksacji ($\Delta l = 2,82$ mm)
 Fig. 3. Surface pressure p_{\max} , p_{sr} i $p_{H\max}$ as a function of relaxation time ($\Delta l = 2,82$ mm)

Wnioski

1. Przy niskich wartościach przemieszczenia początkowego pole powierzchni styku próbki korzenia marchwi z podłożem w trakcie testu relaksacji praktycznie nie ulega zmianie. Dopiero przy przemieszczeniu początkowym równym 30% przemieszczenia maksymalnego widoczny jest nieznaczny, ale wyraźny wzrost pola powierzchni w miarę upływu czasu relaksacji.
2. Spadek wartości siły nacisku w teście relaksacji przebiega zgodnie z teorią relaksacji naprężeń, a jej prędkość spadku zależy od parametrów początkowych i zmienia się w zakresie od $0,0055 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ przy przemieszczeniu $\Delta l = 0,84$ mm do $0,013 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ przy przemieszczeniu $\Delta l = 2,82$ mm.
3. Początkowe wartości nacisków powierzchniowych zależą od parametrów początkowych testu relaksacji i zmieniają się w zakresie od 0,37 MPa przy przemieszczeniu $\Delta l = 0,84$ mm do 0,59 MPa przy przemieszczeniu $\Delta l = 2,82$ mm. W trakcie procesu relaksacji naciski powierzchniowe uległy redukcji od 56% wartości początkowej przy przemieszczeniu $\Delta l = 0,84$ mm do 68% przy przemieszczeniu $\Delta l = 2,82$ mm.
4. Obliczanie wartości nacisków powierzchniowych w oparciu o wzory Hertz'a prowadzi do uzyskania wartości zawyżonych w stosunku do doświadczalnych w zakresie od 159% do 300%.
5. Z praktycznego punktu widzenia przedstawione wyniki badań mogą przyczynić się do prawidłowego projektowania procesu załadunku surowca w przechowalnictwie. Przy założeniu odpowiedniego dla danego surowca poziomu nacisków dopuszczalnych z punktu widzenia jakości przechowywania, można określić maksymalną szybkość załadunku pozwalającą na redukcję nacisków powierzchniowych oraz maksymalną ilość magazynowanego surowca wiążącą się z dopuszczalnym obciążeniem.

Bibliografia

- Golacki K.** 1996. Test relaksacji naprężeń dla korzeni marchwi. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych. Z. 433. s. 347-351.
- Herold B., Geyer M., Studman C.J.** 2001. Fruit contact pressure distributions—equipment. Computer and Electronics in Agriculture 32. s. 167-179.
- Hughes 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.
- Lewis R., Yoxall A., Marshall M.B., Canty L.A.** 2008. Characterizing pressure and bruising in apple fruit. Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD. United Kingdom. Wear. s. 37-46
- Rabelo G.F., Fabbro I.M., Linares A.W.** 2001. Contact stress area measurement of spherical fruit, Proceedings of Sensors in Horticulture III. s. 195-200.
- Stopa R.** 2010. Modelowanie deformacji korzenia marchwi w warunkach obciążeń skupionych metodą elementów skończonych. Monografie XCIII. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. ISSN 1898-1151.

CHANGE IN CARROT ROOT SURFACE PRESSURE VALUES IN FUNCTION OF TIME FOR CONSTANT INITIAL DISPLACEMENT VALUE

Abstract. The work presents the measurement results for carrot root surface pressure values during radial compression, taking into account the time factor for three sample deformation values. The obtained results were compared to theoretical values computed on the basis of Hertz's formulas. During relaxation process lasting 1200s, surface pressure values are reduced from 56-68%, depending on an initial sample deformation level. The research has proven that surface pressure values computed according to Hertz's formulas are even 3 times higher than empirical values.

Key words: surface pressure values, carrot root, compression, stress relaxation, Hertz's formulas.

Adres do korespondencji:

Roman Stopa; e-mail: roman.stopa@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław

