

## WYZNACZENIE LICZBY POISSONA DLA KORZENIA MARCHWI Z WYKORZYSTANIEM WIDEOEKSTENSOMETRU

Roman Stopa

*Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki pomiarów odkształcenia walcowej próbki korzenia marchwi za pomocą bezdotykowej metody opartej na wykorzystaniu wideoekstensometru. Wyznaczono zależność odkształcenia od obciążenia dla próbki korzenia marchwi w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Na tej podstawie wyznaczono wartości liczby Poissona jako funkcji obciążenia. Przeprowadzone badania wykazały przydatność wideoekstensometru do analizy odkształcenia materiału biologicznego oraz wyznaczania podstawowych stałych materiałowych.

**Słowa kluczowe:** wideoekstensometr, korzeń marchwi, odkształcenie, liczba Poissona

### Wstęp

Pomiary przemieszczeń i odkształceń przekroju poprzecznego warzyw i owoców nie były przedmiotem szczególnie zainteresowania ze strony badaczy. 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 numerycznych technikach obliczeniowych stworzył konieczność poszukiwania możliwości wiarygodnego weryfikowania otrzymanych wyników badań modelowych. Szansę taką dają pomiary rozkładu przemieszczeń przekrojów poprzecznych modelowanych warzyw i owoców. Pomiar przemieszczenia delikatnej tkanki mięszu produktów rolniczych za pomocą tradycyjnych metod wykorzystujących ekstensometri mechaniczne jest uciążliwy. Dynamiczny rozwój bezdotykowych metod optycznych daje pomiarowcom narzędzie pozwalające na uzyskanie wiarygodnych wyników. Dzięki pomiarom rozkładu przemieszczeń można otrzymać pełną informację o zachowaniu się badanego obiektu w całym zakresie obciążenia. Wyniki pomiarów przemieszczeń  $u_x$  i  $u_y$  mogą posłużyć do wyznaczenia umownego modułu sprężystości i ułamka Poissona.

Spośród metod pomiarowych pozwalających na wyznaczenie rozkładów przemieszczeń należy wymienić przede wszystkim metody wykorzystujące światło spójne takie jak fotografia płamkowa [Cloud 1995, Andruszkiewicz i in. 2008], interferometria holograficzna [Gerhard, Busse 2005] lub elektroniczna wersja interferometrii płamkowej (ESPI) [Gerhard, Busse 2005, Stopa i in. 2003]. Cechą charakterystyczną tych metod jest wysoka czułość, co przy materiałach biologicznych o niskich modułach sprężystości stanowi pewien

problem. Duże nadzieje można wiązać z zastosowaniem wideoekstensometru pozwalającego na pomiar dużych odkształceń przy zachowaniu wysokiej dokładności.

## Cel pracy

Celem pracy było wykonanie pomiarów odkształcenia walcowej próbki korzenia marchwi jako funkcji siły obciążającej za pomocą bezdotykowej metody z wykorzystaniem wideoekstensometru oraz wyznaczenie liczby Poissona dla korzenia marchwi.

### Pomiar odkształceń z wykorzystaniem wideoekstensometru

Spośród wymagań stawianych urządzeniom realizującym bezdotykowy pomiar deformacji materiału biologicznego najważniejsza jest możliwość rejestracji dużych wartości odkształceń przy wysokiej dokładności pomiarów. Taką możliwość stwarza zastosowanie wideoekstensometru pozwalającego na wizualny odczyt odkształceń poprzez cyfrową analizę obrazu. Zasada działania polega na filmowaniu za pomocą pełno obrazowej kamery CCD testowanej próbki, na której naniesione są kontrastowe znaczniki. Otrzymany obraz jest analizowany w czasie rzeczywistym za pomocą wideo procesora sterowanego komputerem. Dołączone oprogramowanie zapewnia ciągły pomiar odkształceń podczas testu w dużym zakresie deformacji. Długość bazy pomiarowej mierzona była z tą samą dokładnością z jaką wykonywany był pomiar przyrostu wydłużenia. W czasie testów następowało automatyczne wybieranie punktów o największym kontraście oraz kompensacja błędów spowodowanych rozciągnięciem znaczników podczas próby. Dokładność przeprowadzonych pomiarów przemieszczenia wynosiła 0,005 mm przy pomiarze  $\Delta l = 1$  mm.

### Liczba Poissona

Jednym z najważniejszych parametrów niezbędnych dostosowania numerycznych metod obliczeniowych jest liczba Poissona. Dla materiałów biologicznych najczęściej wykorzystuje się metodę opracowaną przez Hughesa i Segerlinda polegającą na wyznaczeniu modułów sprężystości przy ściskaniu swobodnym i nieswobodnym (1)

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

gdzie:

- $E_c$  – umowny moduł sprężystości dla próbki ściskanej nieswobodnie,
- $E$  – umowny moduł sprężystości podłużnej.

Metoda ta oprócz wielu zalet, do których można zaliczyć proste oprzyrządowanie, posiada również istotne 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 nieuwzględnienia w trakcie pomiarów tarcia pomiędzy cylindrem, badaną próbką i tłokiem, a także dokładność dopasowania wymiarów poprzecznych próbki i wewnętrznej średnicy

cyindra. Ponadto na wyniki ma wpływ konieczność stosowania dwóch próbek – jednej do wyznaczenia modułu sprężystości przy ściskaniu swobodnym, a drugiej przy ściskaniu nieswobodnym.

Wymienionych niedogodności wyznaczania liczby Poissona można uniknąć poprzez wykonanie pomiarów odkształcenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach jednej próbki w teście ściskania. Wartość liczby Poissona można obliczyć wprost z definicji jako stosunek odkształcenia w kierunku poprzecznym do odkształcenia w kierunku wzdłużnym (2).

$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{poprz}}}{\epsilon_{\text{wzdł}}} \quad (2)$$

gdzie:

- $\nu$  – ułamek Poissona [-],
- $\epsilon_{\text{poprz}}$  – odkształcenie poprzeczne [-],
- $\epsilon_{\text{wzdł}}$  – odkształcenie wzdłużne [-].

Należy przy tym pamiętać, aby strefa pomiarowa znajdowała się w obszarze, w którym panuje jednoosiowy stan naprężenia oraz aby kierunek naprężenia pokrywał się z kierunkiem odkształcenia wzdłużnego.

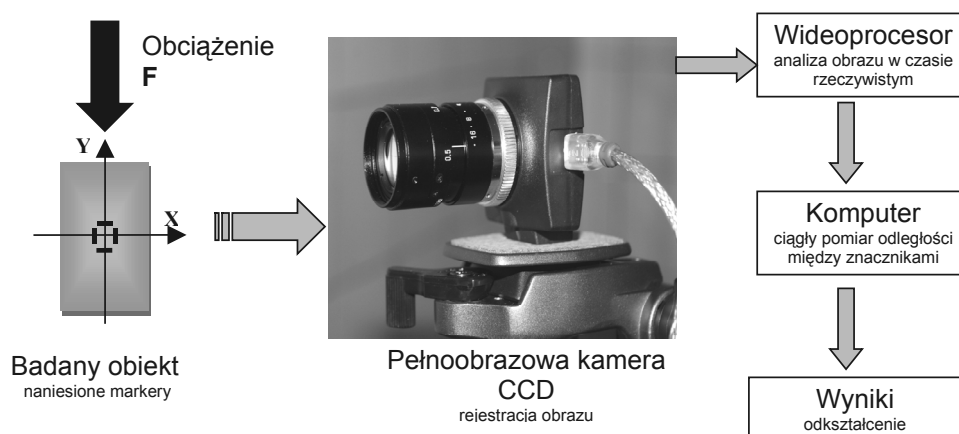
## Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań były próbki pobrane z korzeni marchwi odmiany Nantejska. Pomiarzy były prowadzone na przełomie października i listopada 2009 roku, a próbki zostały pobrane ze środkowej części korzeni marchwi przechowywanej przez około miesiąc od momentu zbioru w gospodarstwie rolnym w okolicach Wrocławia. Próbki wycinano z rdzenia korzenia marchwi w kształcie walców o średnicy  $\phi = 15$  mm i długości  $l = 24$  mm przy użyciu specjalnie wykonanego przyrządu. Szczególną uwagę przykładano do zachowania równoległości płaszczyzn podstaw walca oraz ich prostopadłości do osi próbki. Próbki poddawano promieniowemu obciążeniu quasistatycznemu przy obciążeniu działającym wzdłuż osi pionowej próbki. Na powierzchni bocznej próbki naniesiono kontrastowe markery stanowiące bazę dla pomiarów za pomocą wideoekstensometru.

Testy wytrzymałościowe zostały wykonane 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. W pomiarach wykorzystano układ składający się z dwóch wideoekstensometrów pozwalających na pomiar odkształcenia w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach.

Przygotowane próbki korzenia marchwi z naniesionymi markerami umieszczano w przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej. Próbki obciążano z prędkością przesuwu głowicy wynoszącą  $1,67 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Dwie kamery CCD wideoekstensometru ME-46 firmy Messphysik rejestrowały obraz zdeformowanej próbki, który był analizowany

w czasie rzeczywistym poprzez sterowany komputerem wideoprocessor. Komputer w sposób ciągły dokonywał pomiaru odległości pomiędzy markerami i obliczał wartość odkształcenia (rys. 1). Markery umieszczono w rdzeniu na powierzchni bocznej próbki w miejscu, gdzie występuje jednoosiowy stan naprężenia. Pomiaru zostały przeprowadzone w Instytucie Inżynierii Rolniczej Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.



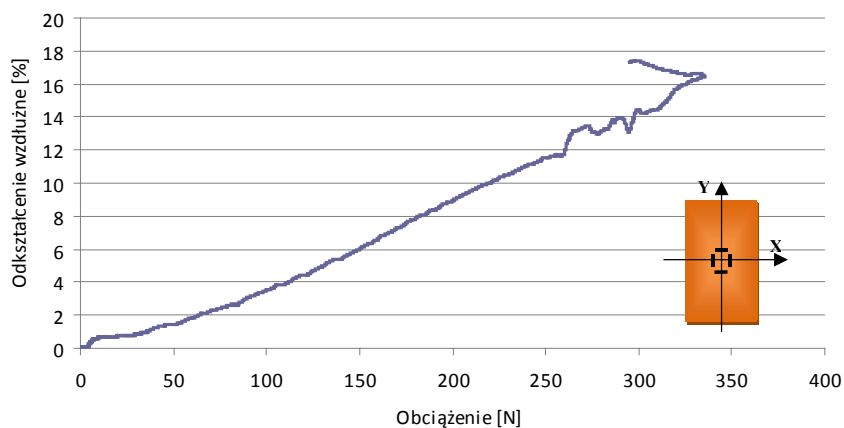
Rys. 1. Schemat pomiaru odkształceń za pomocą wideoekstensometru

Fig. 1. The scheme of deformation measurement with the use of video-extensometer

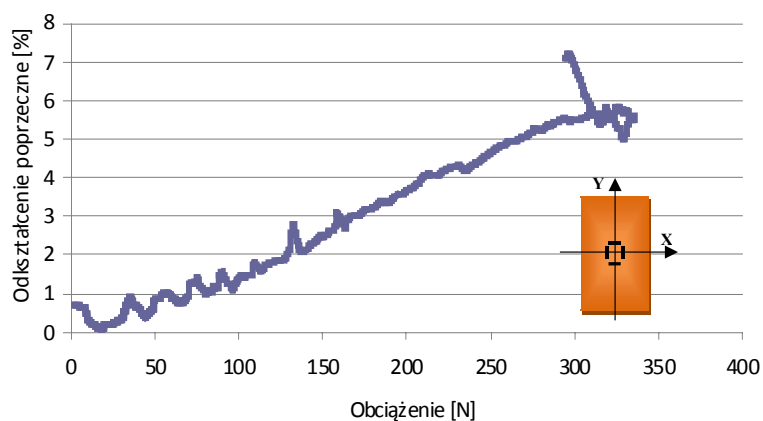
## Wyniki badań

Rysunek 2 przedstawia przebieg odkształcenia wzdłużnego  $\varepsilon_y$  próbki walcowej rdzenia korzenia marchwi jako funkcji obciążenia. W pierwszym etapie obciążenia (w zakresie od  $F=0$  N do 100 N) widoczna jest nieliniowa zależność odkształcenia wzdłużnego od obciążenia. Wzrost obciążenia w zakresie od  $F=100$  N do 250 N powoduje w przybliżeniu liniowy wzrost odkształcenia od  $\varepsilon_y=3$  do 11%. Po przekroczeniu obciążenia  $F=250$  N następuje destrukcja materiału próbki, co objawia się początkowo niewielkimi zaburzeniami, a następnie gwałtownym wzrostem odkształcenia przy niewielkich zmianach wartości siły obciążającej.

Nieco inny przebieg ma zależność odkształcenia poprzecznego  $\varepsilon_x$  walcowej próbki rdzenia korzenia marchwi jako funkcji obciążenia (rys. 3). W początkowym etapie obciążania (w zakresie od  $F=0$  N do 100 N) wyraźnie widoczne są stopniowo zanikające zaburzenia wzrostu odkształcenia poprzecznego dochodzące do 0,5%. Po przekroczeniu obciążenia wynoszącego ok. 100 N następuje liniowy wzrost odkształcenia (poza niewielkimi wahaniami), aż do wartości krytycznej, przy której następuje destrukcja próbki ( $F=300$  N). W tym zakresie obciążenia wartość odkształcenia zmienia się w przedziale od  $\varepsilon_x=1$  do 5,5%. Po przekroczeniu obciążenia  $F=300$  N następuje, podobnie jak w przypadku odkształcenia wzdłużnego gwałtowny wzrost wartości odkształcenia przy niewielkich zmianach obciążenia.



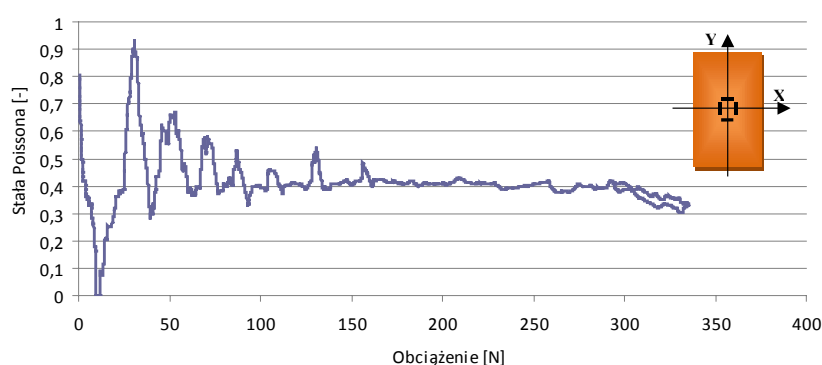
Rys. 2. Odkształcenie  $\epsilon_y$  walcowej próbki rdzenia korzenia marchwi jako funkcji obciążenia  
 Fig. 2. Deformation  $\epsilon_y$  of the roll sample of the stem of the carrot root as a load function



Rys. 3. Odkształcenie  $\epsilon_x$  walcowej próbki korzenia marchwi jako funkcji obciążenia  
 Fig. 3. Deformation  $\epsilon_x$  of the roll sample of the carrot root as (a) load function

Analizując wykresy odkształceń rdzenia korzenia marchwi (rys. 2 i 3) można stwierdzić, że najbardziej stabilną wartością stałej Poissona można uzyskać w przedziale odkształcenia wzdluznego od  $\epsilon_y = 4\%$  do  $\epsilon_y = 12\%$ . Wniosek ten potwierdza wykres zależności stałej Poissona od obciążenia (rys. 4) wyznaczony na podstawie wykresów odkształceń poprzecznych i podłużnych walcowej próbki rdzenia korzenia marchwi. Przy obciążeniu wstępnym w zakresie od 0 do 100 N odpowiadającym niskim wartościom odkształcenia stosunek wartości odkształcenia wzdluznego do poprzecznego zmienia się w szerokim zakresie, a jego wartość średnia waha się w przedziale od 0 do 0,95. Po przekroczeniu obciążenia  $F=100$  N wartość stosunku odkształceń wzdluznych o poprzecznych, tzn. stałej Poissona stabilizuje się na poziomie od  $\nu = 0,42$  do  $\nu = 0,43$ .

Na całkowity błąd wyznaczenia doświadczalnych wartości stałej Poissona składały się błędy związane z geometrią próbek, z pomiarem siły oraz pomiarem odkształcenia poprzecznego i podłużnego próbki. Ze względu na bardzo staranne przygotowanie próbek do badań przy wykorzystaniu przyrządów pozwalających na wykonanie próbek o jednokształtów kształtach, błąd ten jako błąd systematyczny można pominąć. Pomiar siły dokonano za pomocą głowicy pomiarowej o zakresie 1 kN i błędzie  $\Delta F = 1$  N. Pomiar przemieszczenia poprzecznego i podłużnego przeprowadzono przy wideoekstensometru z błędem  $\Delta x = 0,001$  mm i  $\Delta y = 0,001$  mm. Graniczna wartość całkowitego błędu wyznaczonego metodą różniczeki zupełnej wynosiła  $u_c = 0,0013$ .



Rys. 4. Wartość stałej Poissona  $\nu$  jako funkcji obciążenia  
 Fig. 4. The value of Poisson constant  $\nu$  as a load function

## Podsumowanie

Przedstawione wyniki pomiarów dają podstawę do stwierdzenia, że przedstawiona metoda pomiaru odkształceń walcowych próbek korzeni marchwi z wykorzystaniem wideoekstensometru może służyć do wyznaczania ułamka Poissona dla obiektów biologicznych. Zastosowanie wideoekstensometru uniezależnia wyniki pomiarów od błędów powstałych w próbie ściskania swobodnego i nieswobodnego próbek przy wyznaczaniu liczby Poissona w oparciu o metodę Hughesa i Segerlinda. Jak wykazały przedstawione wyniki badań ułamek Poissona dla korzenia marchwi osiąga najbardziej stabilne wartości w przedziale odkształcenia wzdłużnego  $\epsilon_y = 3\%$  do  $11\%$ .

## Bibliografia

- Andruszkiewicz M., Jankowski L. J., Stopa R. 2008. Fotografia plamkowa w badaniach odkształcalności korzenia marchwi. Inżynieria Rolnicza. Nr 4 (102). s. 37-46.  
 Cloud G. 1995. Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge: University of Cambridge.

**Gerhard H., Busse G.** 2005. 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), 2-4 Aug. 2005.

**Hughes H., Segerlind L.J.** 1972. A rapid mechanical method for determining Poisson's ratio in biological materials. ASAE paper No. 72-310, SAE, St. Josheps, MI 49085.

**Stopa R., Romański** 2003. Zastosowanie metody interferometrii plamkowej do pomiaru przemieszczeń przekroju poprzecznego korzenia marchwi. Scientiarum Polonorum Tech. Agr. Inż. Rol., 2(1) s. 43-54.

## **DETERMINATION OF THE POISSON RATIO FOR CARROT ROOTS BY MEANS OF VIDEO EXTENSOMETER**

**Abstract.** The study presents the results of deformation of a roll sample of a carrot root using a non-contact method based on the use of video - extensometer. The relation between deformation and the load for a carrot root sample in two mutually perpendicular directions was determined. On this basis, values of the Poisson ratio as a load function were determined. The performed research revealed the usability of the video- extensometer in the deformation analysis of biological material as well as in determining basic material constants

**Key words:** video-extensometer, carrot root, deformation, Poisson ratio

**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