

MODELOWANIE NUMERYCZNE SUROWCÓW ROLNO-SPOŻYWCZYCH  
NA PRZYKŁADZIE OWOCÓW ORZECHA WŁOSKIEGO (*Juglans regia* L.),  
ORZECHY PODZIEMNEJ (*Arachis hypogaea* L.)  
I LESZCZYNY POSPOLITEJ (*Corylus avellana* L.)

*Andrzej Anders, Zdzisław Kaliniewicz, Piotr Markowski*

Katedra Maszyn Roboczych i Metodologii Badań  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
ul. M. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn  
e-mail: anders@uwm.edu.pl

**Streszczenie.** Celem pracy było zbudowanie za pomocą skanera 3D modeli numerycznych owoców orzecha włoskiego bez okrywy zewnętrznej, orzechy podziemnej i leszczyny pospolitej, określenie cech geometrycznych owoców na podstawie tych modeli i porównanie z wynikami uzyskanymi za pomocą cyfrowej analizy obrazu, pomiarów suwmiarką oraz piknometrem cieczowym. Średnia masa owocu orzecha włoskiego jest większa od średniej masy owocu orzechy podziemnej o około 84% i od średniej masy owocu leszczyny pospolitej o około 83%. Na podstawie wyników uzyskanych po skanowaniu skanerem 3D wynika, że średnie pole powierzchni owocu orzecha włoskiego jest o 61% większe od średniego pola powierzchni owocu orzechy podziemnej i o 72% większe od średniego pola powierzchni owocu leszczyny pospolitej. Średnia objętość owocu orzecha włoskiego jest o 78% większa od średniej objętości owocu orzechy podziemnej i o 84% większa od średniej objętości owocu leszczyny pospolitej. Modele 3D owoców badanych gatunków uzyskane za pomocą skanera mogą służyć do analizy ich właściwości geometrycznych. Wykonane pomiary ukazują, że mierzenie długości, szerokości i grubości suwmiarką i skanerem 3D daje podobne wyniki, które nie różnią się istotnie od siebie przy założonym do obliczeń poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyniki pomiarów i obliczeń cech geometrycznych uzyskane na podstawie zdjęć badanych owoców orzechów różnią się istotnie w większości przypadków od wyników uzyskanych za pomocą suwmiarki oraz skanera 3D. Zbudowane modele numeryczne mogą zostać zarchiwizowane i w dowolnym momencie wykorzystane do dalszej analizy kształtu za pomocą odpowiedniego oprogramowania komputerowego.

**Słowa kluczowe:** inżynieria odwrotna, skaner 3D, modelowanie, *Juglans regia* L., *Arachis hypogaea* L., *Corylus avellana* L.

## WYKAZ OZNACZEŃ

- $A$  – pole powierzchni owocu obliczone na podstawie wzoru ( $\text{mm}^2$ ),  
 $A^{3D}$  – pole powierzchni owocu określone skanerem 3D ( $\text{mm}^2$ ),  
 $A_{gg}$  – pole powierzchni owocu obliczone na podstawie wzoru ( $\text{mm}^2$ ),  
 $D_g^{3D}$  – średnica zastępcza owocu obliczona na podstawie pomiarów modelu 3D (mm),  
 $D_g$  – średnica zastępcza owocu (mm),  
 $L^{suw}$  – długość owocu określona za pomocą suwmiarki (mm),  
 $L^{AO}$  – długość owocu określona na podstawie analizy obrazu (mm),  
 $L^{3D}$  – długość owocu określona na podstawie modelu 3D (mm),  
 $L_m$  – połowa sumy szerokości i długości owocu (mm),  
 $m$  – masa owocu (g),  
 $N$  – liczebność próby,  
 $R_a^{3D}$  – współczynnik kształtu obliczony na podstawie pomiarów modelu 3D (%),  
 $R_a$  – współczynnik kształtu (%),  
 $T^{suw}$  – grubość owocu określona za pomocą suwmiarki (mm),  
 $T^{AO}$  – grubość owocu określona na podstawie analizy obrazu (mm),  
 $T^{3D}$  – grubość owocu określona na podstawie modelu 3D (mm),  
 $U$  – współczynnik zależny od długości owocu,  
 $W^{suw}$  – szerokość owocu określona za pomocą suwmiarki (mm),  
 $W^{AO}$  – szerokość owocu określona na podstawie analizy obrazu (mm),  
 $W^{3D}$  – szerokość owocu określona na podstawie modelu 3D (mm),  
 $V^{3D}$  – objętość owocu określona skanerem 3D ( $\text{mm}^3$ ),  
 $V_{gg}$  – objętość owocu obliczona na podstawie wzoru ( $\text{mm}^3$ ),  
 $V_p$  – objętość owocu określona piknometrem ( $\text{mm}^3$ ),  
 $\phi$  – współczynnik kulistości (%),  
 $\phi^{3D}$  – współczynnik kulistości obliczony na podstawie pomiarów modelu 3D (%).

## WSTĘP

Przemysł rolno-spożywczy wprowadza na rynek nowe produkty i technologie. Aby ten proces przyspieszyć, wykorzystuje się we wstępnych analizach ekonomicznych modele surowców spożywczych. Modelowanie surowców rolniczych wykorzystywanych w przemyśle spożywczym powinno możliwie realistyczne i ściśle być powiązane z projektowanym procesem technologicznym (Datta i Halder 2008). Do projektowania i optymalizacji procesów technologicznych można zastosować modele 3D surowców rolniczych lub spożywczych z dokładnie określonymi właściwościami geometrycznymi. Tradycyjne badania modelowe opierają się na założeniu jednorodności i izotropowości oraz na przypisywaniu regularnych kształtów (np. cylinder, kula, stożek, itp.) surowcom rolno-spożywczym. Dokładna

charakterystyka geometryczna (pomiar wymiarów i oszacowanie pola powierzchni oraz objętości) produktu rolniczego bądź spożywczego jest pierwszym krokiem w symulacji komputerowej. Modelowanie numeryczne produktów o nieregularnych kształtach, oparte na tradycyjnych metodach polegających na cięciu próbki na plastry o określonej grubości, rejestracji obrazu każdego plastra kamerą cyfrową, a następnie wyodrębnianiu z uzyskanych fotografii konturów i łączeniu ich w gotowy model za pomocą specjalistycznego oprogramowania jest zadaniem żmudnym i trudnym (Goni i in. 2007). W przypadku wymiarów owoców wielu autorów ogranicza się do wykonania pomiarów, wykorzystując narzędzia analizy obrazu lub stosując przyrządy miernicze typu suwmiarka lub mikrometr (Aydin 2003, Ozguven i Vursavus 2005, Frączek i Wróbel 2006, Bayram 2011, Seyedabadia i in. 2011). Tylek w 2012 roku wykonał analizę cech geometrycznych nasion żołądki dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.), obliczył współczynniki kształtu z uwzględnieniem ich przynależności do klas żywotności. Pomiary cech rozdzielczych wykonał za pomocą komputerowej analizy obrazów żołądki. Jancsok i in. (2001) użyli wizyjnego systemu modelowania komputerowego do budowy modeli numerycznych owoców gruszy odmiany Konferencja. Sabliov i in. (2002) opracowali metodę analizy obrazu do pomiaru objętości i powierzchni osiowo symetrycznych produktów rolniczych. Scheerlinck i in. (2004) użyli 3-wymiarowego modelu truskawki, otrzymanego dzięki zastosowaniu komputerowego systemu wizyjnego, do opracowania termicznego systemu odkażania powierzchni owoców. Eifert i in. (2006) opracowali komputerową technikę wizyjną do określania pola powierzchni surowców o nieregularnych kształtach. Kim i in. (2007) opracowali metodologię tworzenia trójwymiarowych geometrycznych modeli produktów spożywczych o skomplikowanym kształcie, wykorzystując technikę tomografii komputerowej. Goni i in. (2008) zastosowali do modelowania geometrii metodologię stosowaną w obrazowaniu za pomocą rezonansu magnetycznego. Mieszkalski i Sołoduha (2008) modelowali zbiór brył nasion fasoli odmiany Aura za pomocą równań matematycznych. Otrzymane na podstawie modelu matematycznego wyniki objętości modeli brył nasion fasoli porównano z objętością rzeczywistą określoną eksperymentalnie. Wróbel w 2011 roku zaprezentował metodę tworzenia trójwymiarowych modeli nasion pszenżyta w aplikacji do komputerowego wspomaganie projektowania SolidEdge. Otrzymane modele zachowywały charakterystyczne cechy geometryczne nasion (wymiarów główne, promienie krzywizn). Rahmi i Ferruh (2009) skanowali laserowym skanerem 3D wybrane owoce takie jak jabłko, banan, truskawkę i gruszkę. Anders i in. (2014a i 2014b) badali właściwości geometryczne i fizyczne owoców wybranych odmian gruszy oraz nasion konopi siewnej na podstawie modeli numerycznych uzyskanych za pomocą skanera 3D. Skanery 3D mogą być stosowane do budowy modeli 3D i określania pola powierzchni i objętości produktów rolno-spożywczych. Uzyskane w ten sposób modele numeryczne surowców i produktów spożywczych można wykorzystać w programach CFD (Computational

Fluid Dynamics) do dalszej symulacji różnych procesów zachodzących w produkcji rolniczej i spożywczej. Celem pracy było zbudowanie za pomocą skanera 3D modeli numerycznych owoców orzecha włoskiego bez okrywy, orzechy podziemnej i leszczyny pospolitej, określenie cech geometrycznych owoców na podstawie tych modeli i porównanie z wynikami uzyskanymi za pomocą cyfrowej analizy obrazu, pomiarów suwmiarką oraz piknometrem cieczowym.

#### MATERIAŁ I METODY

Materiał badawczy stanowiły owoce orzecha włoskiego bez okrywy (*Juglans regia* L.), orzechy podziemnej zwanej pospolicie orzechem ziemnym (*Arachis hypogaea* L.) oraz leszczyny pospolitej zwanej pospolicie orzechem laskowym (*Corylus avellana* L.), które były przechowywane w pomieszczeniu o stałej temperaturze  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  oraz wilgotności powietrza 60%. Owoce orzecha włoskiego bez okrywy mają kształt kulisty, owalny, eliptyczny lub trójkątny, barwę jasnobrązową (Majewska i in. 2003, Ercisli i in. 2012, LingNa Chen i in. 2014), owoce orzechy podziemnej to strąki z bruzdową włóknistą okrywą zawierające we wnętrzu od 1 do 4 nasion, natomiast owoce leszczyny pospolitej to jasnobrązowe orzechy o dość zmiennym kształcie (Aydin 2002). Owocem orzecha włoskiego jest nibypestkowiec z mięsistą okrywą, która odpada po uzyskaniu dojrzałości, znajdujący się wewnątrz mezokarp zawierający zarodek z liścieniami stanowi surowiec rolno-spożywczy. Materiał został zakupiony w sieci sklepów spożywczych PSS Spółem w Olsztynie, a do badań wybrano losowo po 30 owoców orzecha włoskiego, orzechy podziemnej oraz owoców leszczyny bez widocznych uszkodzeń. W pierwszej kolejności mierzono długość, szerokość i grubość orzechów za pomocą suwmiarki z dokładnością 0,05 mm. Następnie wykonano w rozdzielczości 3264 x 2448 pikseli fotografie badanych obiektów cyfrowym aparatem fotograficznym Canon A720. Aparat fotograficzny był zamocowany w statywie na wysokości 30 cm nad fotografowanymi obiektami. Pojedyncze owoce fotografowano w dwóch kierunkach – prostopadle do podstawowych wymiarów liniowych: długości i grubości. Fotografowano owoce i umieszczoną obok suwmiarkę o dokładności  $d = 0,05$  mm. Uzyskane fotografie posłużyły do określenia ich wymiarów w programie ImageJ (Rasband 1997-2014). Dokładność pomiarów wynosiła  $d = 0,05$  mm. Pole powierzchni oraz objętość owoców określano, korzystając z zależności geometrycznych (1) (McCabe i in. 1986) oraz (2) i (5) (Gaston i in. 2002):

$$A = \pi \cdot D_g^2 \quad (1)$$

$$A_g = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot L_m \cdot \left( \frac{L_m}{L} + \frac{1}{U} \cdot \arcsin(U) \right) \quad (2)$$

$$L_m = \frac{W + T}{2} \quad (3)$$

$$U = \frac{(L^2 - L_m^2)^{\frac{1}{2}}}{L} \quad (4)$$

$$V_{\frac{\pi}{6}} = \frac{\pi}{6} \cdot L \cdot W \cdot T \quad (5)$$

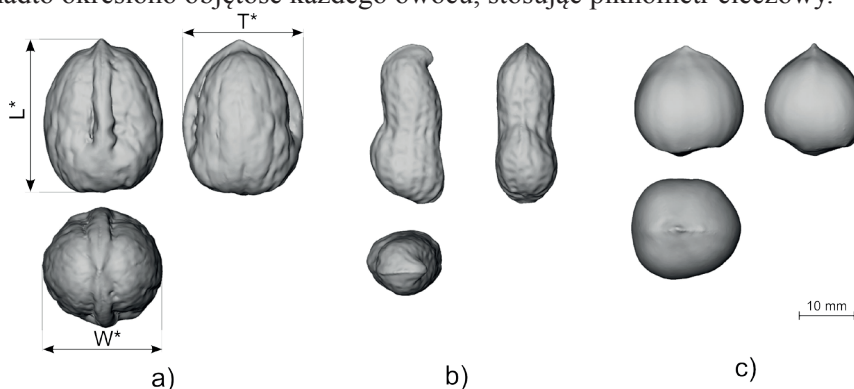
Średnicę zastępczą  $D_g$ , współczynnik kulistości  $\phi$  oraz w współczynnik kształtu  $R_a$  obliczono na podstawie wzorów (Mohsenin 1986):

$$D_g = (L \cdot W \cdot T)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$\phi = \frac{(L \cdot W \cdot T)^{\frac{1}{3}}}{L} \quad (7)$$

$$R_a = \frac{W}{L} \quad (8)$$

Zastosowany w badaniach laserowy skaner 3D firmy Nextengine pozwolił na skanowanie wcześniej badanych owoców (<http://www.nextengine.com>). Gęstość skanowania wynosiła 248 punktów na  $\text{mm}^2$ . Gotowe modele posłużyły do określenia pola powierzchni, objętości, długości, szerokości i grubości obiektu (rys. 1) w programie MeshLab (<http://meshlab.sourceforge.net/>). Każdy z owoców zważono na wadze elektronicznej RADWAG WAA PS 1000/C/2 z dokładnością 0,001 g. Ponadto określono objętość każdego owocu, stosując piknometr cieczowy.



**Rys. 1.** Owoce orzecha włoskiego (a), orzechy podziemnej (b) oraz leszczyny pospolitej (c) – przykładowe modele uzyskane po skanowaniu 3D:  $L$  – długość,  $W$  – szerokość,  $T$  – grubość

**Fig. 1.** Walnuts (a), peanuts (b) and hazelnuts (c) – example models generated after 3D scanning:  $L$  – length,  $W$  – width,  $T$  – thickness

Wyniki pomiarów owoców otrzymane na podstawie odczytów z suwmiarki, analizy obrazu fotografii, otrzymane z modeli 3D oraz wykonane piknometrem porównano, wykonując testy ANOVA jednoczynnikowa. Ponieważ badane zmienne są mierzalne i niezależne, ich normalność badano testem Shapiro-Wilka, a jednorodność wariancji za pomocą testów Levene'a i Browna-Forsythe'a. Wielokrotne porównania średnich wykonano testem Duncana. Obliczenia statystyczne sporządzono przy wykorzystaniu programu Statistica 10 przyjmując poziom istotności  $\alpha = 0,05$ .

## WYNIKI I DYSKUSJA

Średnia masa owocu orzecha włoskiego jest większa od średniej masy owocu orzechy podziemnej z okrywą o około 84% i od średniej masy owocu leszczyny pospolitej z okrywą o około 83%. Na podstawie wyników uzyskanych po skanowaniu skanerem 3D wynika, że średnie pole powierzchni owocu orzecha włoskiego jest o 61% większe od średniego pola powierzchni owocu orzechy podziemnej i o 72% większe od średniego pola powierzchni owocu leszczyny pospolitej. Średnia objętość owocu orzecha włoskiego jest o 78% większa od średniej objętości owocu orzechy podziemnej i o 84% większa od średniej objętości owocu leszczyny pospolitej.

Z przeprowadzonego testu Duncana dla owoców orzecha włoskiego, orzechy podziemnej i leszczyny pospolitej wynika, że wykonując pomiary długości i szerokości owoców z użyciem suwmiarki oraz określając je za pomocą skanera 3D, uzyskano wyniki, które istotnie nie różnią się od siebie. Istotne różnice występują podczas mierzenia długości i szerokości owoców badanych gatunków za pomocą analizy obrazu owoców. Określając grubość owoców orzecha włoskiego za pomocą opisanych wcześniej narzędzi pomiarowych, otrzymane wyniki różniły się od siebie istotnie. Grubość owoców orzechy ziemnej oraz leszczyny pospolitej określana za pomocą analizy obrazu różniła się istotnie od wyników uzyskanych za pomocą skanera 3D oraz suwmiarki (tab. 1). Na taki wynik pomiarów wykonanych na podstawie fotografii miały wpływ wymiary owoców, które znacznie odstawały od powierzchni, na której leżała fotografowana suwmiarka. Największe średnie pole powierzchni owoców orzecha włoskiego to pole powierzchni określone za pomocą formuły 2, gdy do obliczeń wykorzystano wymiary określone za pomocą analizy obrazu ( $A_{gg}^{AO}$ ) i nie różni się ono istotnie od średniego pola powierzchni określonego za pomocą formuły 1 ( $A^{AO}$ ). Nieco mniejsze jest średnie pole powierzchni określone za pomocą skanera 3D ( $A^{3D}$ ). Najmniejsze średnie pole powierzchni owoców orzecha włoskiego otrzymano, korzystając z formuły 1 i 2 i podstawiając do obliczeń wyniki określone za pomocą suwmiarki. Największe średnie pole powierzchni owoców orzechy podziemnej to pole określone za pomocą formuły 2, gdy do obliczeń wykorzystano wyniki pomiarów wykonane za pomocą analizy obrazu ( $A_{gg}^{AO}$ ) a najmniejsze to pole powierzchni określone za

**Tabela 1.** Zestawienie wyników pomiarów długości, szerokości i grubości owoców badanych gatunków (mm)  
**Table 1.** Dimensions of fruits – length, width and thickness (mm)

Zmienna Variable	Orzech włoski / Walnut		Orzecha podziemna / Peanut		Leszczyna pospolita / Hazelnut	
	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range
$L^{suw}$	40,71±1,35 <sup>a</sup>	5,35	36,69±4,69 <sup>a</sup>	18,30	22,15±1,30 <sup>a</sup>	6,25
$L^{AO}$	45,93±1,87 <sup>b</sup>	8,37	39,23±5,00 <sup>b</sup>	18,97	23,71±1,43 <sup>b</sup>	6,57
$L^{3D}$	40,24±1,38 <sup>a</sup>	6,55	36,51±4,62 <sup>a</sup>	17,74	21,94±1,40 <sup>a</sup>	6,82
$W^{suw}$	33,70±1,43 <sup>a</sup>	5,15	16,23±1,18 <sup>a</sup>	5,20	18,56±2,66 <sup>a</sup>	8,50
$W^{AO}$	37,54±1,39 <sup>b</sup>	6,11	16,96±1,33 <sup>b</sup>	5,52	19,98±2,73 <sup>b</sup>	9,60
$W^{3D}$	33,54±1,18 <sup>a</sup>	4,37	15,91±1,17 <sup>a</sup>	5,05	18,37±2,62 <sup>a</sup>	8,77
$T^{suw}$	33,39±1,05 <sup>a</sup>	4,05	15,26±1,05 <sup>a</sup>	4,00	16,74±2,21 <sup>a</sup>	7,45
$T^{AO}$	38,10±1,63 <sup>b</sup>	6,07	16,54±1,06 <sup>b</sup>	4,40	18,14±2,19 <sup>b</sup>	7,03
$T^{3D}$	32,57±1,4 <sup>c</sup>	5,89	14,99±1,03 <sup>a</sup>	4,60	16,33±2,06 <sup>a</sup>	6,74

Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b, c ( $p \leq 0,05$ ),  $^{suw}$  – pomiar suwmiarką,  $^{AO}$  – cyfrowa analiza obrazu,  $^{3D}$  – skanowanie 3D / Values in columns marked with identical letters do not differ significantly: a, b, c ( $p \leq 0.05$ ),  $^{suw}$  – calliper measurements,  $^{AO}$  – digital image analysis,  $^{3D}$  – 3D scanning

pomocą formuły 1, gdy do obliczeń wykorzystano pomiary wykonane suwmiarką. Średnie pola powierzchni owocu orzechy podziemnej określone za pomocą formuły 1, 2 ( $A^{AO}$ ,  $A_{gg}^{suw}$ ) oraz za pomocą skanera 3D ( $A^{3D}$ ) nie różniły się istotnie. W przypadku określania średniego pola powierzchni owoców leszczyny pospolitej tylko średnie pola określone za pomocą formuły 1 i 2, do których podstawiano wyniki obliczeń wielkości owoców za pomocą analizy obrazu, różniły się istotnie (tab. 2).

**Tabela 2.** Zestawienie wyników pomiarów pola powierzchni owoców badanych gatunków (mm<sup>2</sup>)  
**Table 2.** Surface areas of fruits (mm<sup>2</sup>)

Zmienna Variable	Orzech włoski / Walnut		Orzecha podziemna / Peanut		Leszczyna pospolita / Hazelnut	
	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range
$A^{suw}$	4023,51±244,08 <sup>b</sup>	934,76	1367,01±172,22 <sup>b</sup>	766,49	1139,92±207,02 <sup>a</sup>	690,82
$A_{gg}^{suw}$	4050,72±243,51 <sup>b</sup>	946,92	1525,32±213,26 <sup>a</sup>	886,17	1155,41±199,16 <sup>a</sup>	673,66
$A^{AO}$	5118,77±366,33 <sup>c</sup>	1587,80	1551,80±186,84 <sup>a</sup>	837,32	1320,60±222,43 <sup>b</sup>	780,52
$A_{gg}^{AO}$	5153,63±367,58 <sup>c</sup>	1595,51	1732,26±229,50 <sup>c</sup>	974,37	1337,28±214,42 <sup>b</sup>	766,95
$A^{3D}$	4220,96±283,59 <sup>a</sup>	1072,30	1617,13±226,09 <sup>a</sup>	984,35	1138,45±160,20 <sup>a</sup>	551,65

Wartości w kolumnach z różnymi literami różnią się istotnie; a, b, c ( $p \leq 0,05$ ),  $^{suw}$  – pomiar suwmiarką,  $^{AO}$  – cyfrowa analiza obrazu,  $^{3D}$  – skanowanie 3D / Values in columns marked with identical letters do not differ significantly: a, b, c ( $p \leq 0.05$ ),  $^{suw}$  – calliper measurements,  $^{AO}$  – digital image analysis,  $^{3D}$  – 3D scanning

Wyniki średniej objętości owoców orzecha włoskiego, orzechy podziemnej i leszczyny pospolitej określone na podstawie formuły 5 ( $V_{gg}^{AO}$ ), gdy do obliczeń brano wymiary otrzymane za pomocą analizy obrazu, różnią się istotnie od wyników otrzymanych pozostałymi metodami pomiarowymi. Średnia objętość owoców



orzecha włoskiego, orzechy podziemnej i leszczyny pospolitej określona za pomocą skanera 3D nie różniła się istotnie od średniej objętości owoców określanej za pomocą piknometru. Określenie objętości owoców orzechy podziemnej i leszczyny pospolitej z wykorzystaniem formuły 5 ( $V_{gg}^{suw}$ ), gdy podstawiano do obliczeń wyniki pomiarów suwmiarką, nie różniło się istotnie od średniej objętości tych owoców określonej skanerem 3D i piknometrem (tab. 3).

**Tabela 3.** Zestawienie wyników pomiarów objętości owoców badanych gatunków (mm<sup>3</sup>)  
**Table 3.** Volumes of fruits (mm<sup>3</sup>)

Zmienna Variable	Orzech włoski / Walnut		Orzecha podziemna / Peanut		Leszczyna pospolita / Hazelnut	
	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range
$V_{gg}^{suw}$	24030,17±2204,38 <sup>b</sup>	8465,97	4780,16±891,61 <sup>a</sup>	3991,26	3661,79±1000,53 <sup>a</sup>	3354,80
$V_{gg}^{AO}$	34500,18±3748,25 <sup>c</sup>	16394,71	5778,61±1027,30 <sup>b</sup>	4608,19	4558,99±1147,09 <sup>b</sup>	4073,57
$V_p$	22285,04±1998,74 <sup>a</sup>	7400,01	4874,96±813,76 <sup>a</sup>	3617,16	3446,38±797,97 <sup>a</sup>	2705,11
$V^{3D}$	22626,00±2149,73 <sup>a</sup>	7566,99	4843,62±843,60 <sup>a</sup>	3855,59	3490,35±767,34 <sup>a</sup>	2604,77

Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b, c ( $p \leq 0,05$ ), <sup>suw</sup> – pomiar suwmiarką, <sup>AO</sup> – cyfrowa analiza obrazu, <sup>3D</sup> – skanowanie 3D, <sub>p</sub> – pomiar piknometrem / Values in columns marked with identical letters do not differ significantly: a, b, c ( $p \leq 0.05$ ), suw – calliper measurements, AO – digital image analysis, <sup>3D</sup> – 3D scanning, p – pycnometer measurements

Średnica zastępcza obliczona dla owoców orzecha włoskiego, orzechy ziemnej oraz leszczyny pospolitej na podstawie wyników otrzymanych z zastosowaniem suwmiarki oraz skanera 3D nie różniła się istotnie. Istotne różnice wystąpiły, gdy obliczenia średnicy zastępczej wykonano na podstawie wyników otrzymanych z analizy obrazu badanych owoców. Aby wyeliminować powstałe różnice, należy uwzględnić wysokość fotografowanej próbki i prawidłowo przeskalować obraz według wzorca. El-Sayed i in. (2001) badając amerykańskie, chińskie i egipskie odmiany orzechy podziemnej, wykorzystali do pomiarów suwmiarkę o dokładności 0,05 mm i otrzymali zbliżone wyniki pomiarów średnicy zastępczej. Wyniki obliczeń średniego współczynnika kształtu  $R_a$  oraz średniego współczynnika kulistości  $\phi$  dla badanych owoców nie różniły istotnie bez względu na zastosowany sposób pomiaru. Na podstawie obliczeń współczynnika kulistości  $\phi$  wynika, że najbardziej zbliżone do kształtu kuli są owoce orzecha włoskiego i leszczyny pospolitej (tab. 4). Wyniki pomiarów owoców leszczyny pospolitej wykonane przez Ozdemir i Akinci w 2003 roku suwmiarką elektroniczną na odmianach *Palaz*, *Tombul*, *Cakildak* i *Kara* różnią się nieznacznie od wyników uzyskanych dla badanych owoców (tab. 1, 2, 3 i 4). Najbardziej zbliżone do otrzymanych wyników są wyniki uzyskane dla odmiany *Kara*. Aydin w 2002 badając orzechy laskowe odmiany *Tombul* do pomiaru ich długości, szerokości i grubości użył mikrometru o dokładności 0,01 mm. Obliczony przez niego współczynnik kulistości był większy, natomiast średnica zastępcza mniejsza.



**Tabela 4.** Zestawienie wyników obliczeń cech geometrycznych i fizycznych owoców badanych gatunków  
**Table 4.** Calculated geometric and physical parameters of fruits

Zmienna Variable	Orzech włoski		Orzecha podziemna		Leszczyna pospolita	
	Walnut		Peanut		Hazelnut	
	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range	Średnia Mean	Rozstęp Range
$D_g^{suw}$ – średnica zastępcza (mm) Geometric mean diameter (mm)	35,77±1,07 <sup>a</sup>	4,11	20,82±1,33 <sup>a</sup>	5,90	18,97±1,71 <sup>a</sup>	5,70
$D_g^{AO}$ – średnica zastępcza (mm) Geometric mean diameter (mm)	40,34±1,42 <sup>b</sup>	6,13	22,18±1,35 <sup>b</sup>	6,09	20,43±1,72 <sup>b</sup>	5,99
$D_g^{3D}$ – średnica zastępcza (mm) Geometric mean diameter (mm)	35,29±1,17 <sup>a</sup>	5,06	20,52±1,27 <sup>a</sup>	5,01	18,69±1,62 <sup>a</sup>	5,51
$R_a^{suw}$ – współczynnik kształtu (%) Aspect ratio (%)	0,83±0,03 <sup>a</sup>	0,15	0,45±0,05 <sup>a</sup>	0,23	0,84±0,14 <sup>a</sup>	0,39
$R_a^{AO}$ – współczynnik kształtu (%) Aspect ratio (%)	0,82±0,02 <sup>a</sup>	0,12	0,44±0,06 <sup>a</sup>	0,26	0,84±0,13 <sup>a</sup>	0,37
$R_a^{3D}$ – współczynnik kształtu (%) Aspect ratio (%)	0,83±0,02 <sup>a</sup>	0,11	0,44±0,06 <sup>a</sup>	0,27	0,84±0,14 <sup>a</sup>	0,42
$\Phi^{suw}$ – współczynnik kulistości (%) Sphericity (%)	0,88±0,02 <sup>a</sup>	0,09	0,57±0,05 <sup>a</sup>	0,21	0,86±0,09 <sup>a</sup>	0,25
$\Phi^{AO}$ – współczynnik kulistości (%) Sphericity (%)	0,88±0,02 <sup>a</sup>	0,09	0,57±0,05 <sup>a</sup>	0,23	0,86±0,08 <sup>a</sup>	0,24
$\Phi^{3D}$ – współczynnik kulistości (%) Sphericity (%)	0,88±0,02 <sup>a</sup>	0,09	0,57±0,05 <sup>a</sup>	0,22	0,85±0,08 <sup>a</sup>	0,25
Masa orzecha (g) Nut weight (g)	13,93±1,46	6,16	2,22±0,55	2,29	2,34±0,53	2,02
Masa jądra orzecha (g) Seed weight (g)	6,38±0,728	3,00	1,54±0,45	1,91	1,03±0,29	1,03

Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b ( $p \leq 0,05$ ), <sup>suw</sup> – pomiar suwmiarką, <sup>AO</sup> – cyfrowa analiza obrazu, <sup>3D</sup> – skanowanie 3D / Values in columns marked with identical letters do not differ significantly: a, b, c ( $p \leq 0.05$ ), <sup>suw</sup> – calliper measurements, <sup>AO</sup> – digital image analysis, <sup>3D</sup> – 3D scanning

Badania suwmiarką elektroniczną wielkości i obliczenia cech morfologicznych orzechów włoskich odmian rosnących na terenie północno-wschodniej i południowo-wschodniej Polski oraz odmian rosnących na Białorusi, Mołdawii, Uzbekistanie i Azerbejdżanie przeprowadzone przez Majewską i in. (2003) ukazują nieco inne wyniki. Średnia masa jednego owocu bez okrywy z drzew uprawianych w Polsce według Majewskiej i in. waha się od 4 do 10 g, jądro stanowi od 20 do 50% masy owocu, natomiast średnia masa badanych owoców orzechów włoskich odmiany *Hartley* była większa, a masa jądra stanowiła około 45% masy owocu. Gharibzahedi i in. 2012 badał orzechy włoskie odmiany *Karaj*, *Toyserkan* i *Chaboksar*. Do pomiarów wykorzystał suwmiarkę elektroniczną o dokładności 0,01 mm. Jak dotąd żaden z autorów zajmujących się badaniem cech geometrycznych owoców orzechów włoskich nie korzystał w swoich badaniach ze skanera 3D.

## WNIOSKI

Modele 3D owoców badanych roślin uzyskane za pomocą skanera mogą służyć do analizy właściwości geometrycznych. Zbudowane modele numeryczne owoców mogą zostać zarchiwizowane i w dowolnym momencie wykorzystane do dalszej analizy kształtu za pomocą odpowiedniego oprogramowania komputerowego. Nie podlegają one wpływowi czynników zewnętrznych, które w przypadku świeżych owoców powodują ich deformację i uszkodzenie w trakcie przechowywania. Wykonane pomiary owoców ukazują, że mierzenie długości, szerokości i grubości suwmiarką i skanerem 3D daje podobne wyniki, które nie różnią się istotnie od siebie przy założonym do obliczeń poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyniki pomiarów i obliczeń cech geometrycznych uzyskane na podstawie obrazów badanych owoców różnią się istotnie w większości przypadków od wyników uzyskanych za pomocą suwmiarki oraz skanera 3D. Przyczyną tego są błędy w uzyskanych obrazach próbek wynikające z wymiarów badanych owoców oraz wysokości położenia suwmiarki, która służyła za wzorzec. Przypisanie do modelu numerycznego owocu uzyskanego w trakcie skanowania skanerem 3D, właściwości fizycznych na przykład, jego masy pozwala na wykorzystanie tego modelu w pracach badawczych i projektowych.

## PIŚMIENNICTWO

1. Anders A., Markowski P., Kaliniewicz Z., 2014 a. Badanie właściwości geometrycznych i fizycznych owoców wybranych odmian gruszy na podstawie modeli numerycznych uzyskanych za pomocą skanera 3D. ZPPNR, 577, 3-12.
2. Anders A., Markowski P., Kaliniewicz Z., 2014 b. Wykorzystanie skanera 3D do badania właściwości geometrycznych nasion konopi siewnych (*Cannabis Sativa* L.). Acta Agroph., 21(4), 391-402.
3. Aydin C., 2002. Physical properties of hazel nuts. Bios. Eng., 82 (3), 297-303, doi:10.1006/bioe.2002.0065
4. Aydin C., 2003. Physical properties of almond nut and kernel. J. Food Eng., 60, 315-320, doi:10.1016/S0260-8774(03)00053-0
5. Bayram M., 2011. Comparison of unsplit inshell and shelled kernel of the pistachio nuts. J. Food Eng., 107, 374-378, doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.07.001
6. Datta A.K., Halder A., 2008. Status of food process modeling and where do we go from here (synthesis of the outcome from brainstorming). Comp. Rev. Food Sci. Food Saf., 7, 117-120, doi:10.1111/j.1541-4337.2007.00037.x
7. Eifert J.D., Sanglay G.C., Lee D.-J., Sumner S.S., Pierson M.D., 2006. Prediction of raw produce surface area from weight measurement. J. Food Eng., 74, 552-556, doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.02.030
8. El-Sayed A.S., Yahaya R., Wacker P., Kutzbach H.D., 2001. Characteristic attributes of the peanut (*Arachis hypogaea* L.) for its separation. Int. Agrophys., 15, 225-230.
9. Ercisli S., Sayincib B., Karab M., Yildiz C., Ozturk I., 2012. Determination of size and shape features of walnut (*Juglans regia* L.) cultivars using image processing. Sci. Hortic., 133, 47-55, doi:10.1016/j.scienta.2011.10.014

10. Frączek J., Wróbel M., 2006. Metodyczne aspekty oceny kształtu nasion. *Inżynieria Rolnicza* 12 (87), 155-163.
11. Gastón Analía L., Abalone Rita M., Giner Sergio A., 2002. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *J. Food Eng.*, 52(4), 313-322, doi:10.1016/S0260-8774(01)00121-2
12. Gharibzahedi S.M.T., Mousavi S.M., Hamed M., Khodaiyan F., 2012. Comparative analysis of new Persian walnut cultivars: nut/kernel geometrical, gravimetric, frictional and mechanical attributes and kernel chemical composition. *Sci. Hortic.*, 135, 202-209, doi:10.1016/j.scienta.2011.11.030
13. Goni S.M., Purlis E., Salvadori V.O., 2007. Three-dimensional reconstruction of irregular food-stuffs. *J. Food Eng.*, 82, 536-547, doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.03.021
14. Goni S.M., Purlis E., Salvadori V.O., 2008. Geometry modeling of food materials from magnetic resonance imaging. *J. Food Eng.*, 88, 561-567, doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.03.020
15. Jancsok P.T., Clijmans L., Nicolai B.M., De Baerdemaeker J., 2001. Investigation of the effect of shape on the acoustic response of 'conference' pears by finite element modeling. *Postharvest Biol. Tech.*, 23, 1-12, doi:10.1016/S0925-5214(01)00098-9
16. Kim J., Moreira R.G., Huang Y., Castell-Perez M.E., 2007. 3-D dose distributions for optimum radiation treatment planning of complex foods. *J. Food Eng.*, 79, 312-321, doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.01.061
17. LingNa Chen, QingGuo Ma, YongKun Chen, BaoQing Wang, DongPei, 2014. Identification of major walnut cultivars grown in China based on nut phenotypes and SSR markers. *Sci. Hort.*, 168, 240-248, doi:10.1016/j.scienta.2014.02.004
18. Majewska K., Kopytowska J., Łojko R. E., Zadernowski R., 2003. Wybrane cechy fizyczne dojrzałych owoców orzecha włoskiego. *Acta Agroph.*, 2(3), 597-609.
19. McCabe W.L., Smith J.C., Harriot P., 1986. *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, New York.
20. MeshLab Visual Computing Lab – ISTI – CNR, 2013. <http://meshlab.sourceforge.net>.
21. Mieszkalski L., Sołoduha K., 2008. Metody modelowania zbioru brył nasion. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 39-44.
22. Mohsenin N.N., 1986. *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Public, New York.
23. NextEngine User Manual, 2010. <http://www.nextengine.com>.
24. Ozdemir F., Akinci I., 2003. Physical and nutritional properties of four major commercial Turkish hazelnut varieties. *J. Food Eng.*, 63, 341-347, doi:10.1016/j.jfoodeng.2003.08.006
25. Ozguven F., Vursavus K., 2005. Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*) nuts. *J. Food Eng.*, 68, 191-196, doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.05.031
26. Rahmi U., Ferruh E., 2009. Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling. *J. Food Eng.*, 93, 337-343, doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.01.034
27. Rasband W.S., 1997-2014. ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>
28. Sabliov C.M., Bolder D., Keener K.M., Farkas B.E., 2002. Image processing method to determine surface area and volume of axi-symmetric agricultural products. *Int. J. Food Prop.*, 5, 641-653, doi:10.1081/JFP-120015498
29. Scheerlinck N., Marquenie D., Jancsok P.T., Verboven P., Moles C.G., Banga J.R., Nicolai B.M., 2004. A model-based approach to develop periodic thermal treatments for surface decontamination of strawberries. *Postharvest Biol. Technol.*, 34, 39-52, doi:10.1016/j.postharvbio.2004.04.004

30. Seyedabadia E., Khojastehpourb M., Sadrniab H., Saiediradc M.H., 2011. Mass modeling of cantaloupe based on geometric attributes: A case study for Tile Magasi and Tile Shahri. *Sci. Hortic.*, 130, 54-59, doi:10.1016/j.scienta.2011.06.003
31. Tylek P., 2012. Wielkość i kształt jako cechy rozdzielcze nasion dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). *Acta Agroph.*, 19(3), 673-687.
32. Wróbel M. 2011. Metoda rekonstrukcji 3D nasion w aplikacji typu CAD. *Inżynieria Rolnicza*, 6(131), 281-288.

NUMERICAL MODELLING OF GEOMETRIC AND PHYSICAL PROPERTIES OF AGRI-FOOD PRODUCTS USING THE EXAMPLES OF WALNUTS, PEANUTS AND HAZELNUTS

*Andrzej Anders, Zdzisław Kaliniewicz, Piotr Markowski*

Department of Machines and Research Methodology  
University of Warmia and Mazury in Olsztyn  
ul. M. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, Poland  
e-mail: anders@uwm.edu.pl

**Abstract.** The aim of the study was to use a 3D scanner to develop numerical models of walnuts, hazelnuts and peanuts, to define geometric features of nuts based on these models, and to compare them against findings from digital image analysis, and measurements taken with a calliper and a pycnometer. The mean weight of a walnut is about 84% greater than the mean weight of a peanut, and about 83% greater than the mean weight of a hazelnut. Results from 3D scanning indicated that the mean surface area of a walnut is 61% larger than that of a peanut and 72% larger than that of a hazelnut. The mean volume of a walnut is 78% greater than that of a peanut and 84% greater than that of a hazelnut. 3D models of walnuts obtained by scanning can be used for the analysis of geometric properties. Measurements of nuts' length, width and thickness taken with a calliper and 3D scanner provide similar results, and the differences are not statistically significant at  $\alpha = 0.05$ . The use of a calliper is the simplest and fastest method of measurement. Findings from measurements and calculations of geometric properties obtained based on the image analysis of examined nuts are significantly different in most cases from findings obtained using a calliper or 3D scanner. The developed numerical models of nuts can be archived and used at any time for further analysis of shape by suitable computer software.

**Keywords:** reverse engineering, 3D scanner, modelling, *Juglans regia* L., *Arachis hypogaea* L., *Corylus avellana* L.