

## Wybrane cechy szyszek jodły pospolitej *Abies alba* Mill. w aspekcie procesu wyluszczenia i jakości nasion

Selected traits of Silver fir *Abies alba* Mill. cones in the context of the extraction process and seed quality

Monika Aniszewska\* , Jacek Brzózko, Witold Zychowicz 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Leśny, Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych,  
ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa, Polska

\*Tel. +48 22 5934520, e-mail: monika\_aniszewska@sggw.pl

**Abstract.** Fir cones *Abies alba* Mill. are not as extensively described in the literature as cones of other species and therefore there is no description of the changes in water content and their dynamics during the extraction process. Developing a mathematical model describing these changes based on cone parameters and air temperature is a step forward to determine the optimal conditions for the extraction process. Here we present such a model derived using fresh cones collected in a seed production stand in the Zwoleń Forest District (RDSF Radom). For 120 randomly chosen cones, the length and the largest diameter of the cone were measured, using the Multiscan program. In addition, for 60 randomly selected cones, the diameter was measured along the entire length of the cone at 10 mm intervals. This allowed us to generate cone models approximating rotational solids for which the outer surface area was calculated using a fourth degree polynomial function and the obtained area was then used to determine cone volume. To facilitate the generalization of surface area and volume calculations to other cones, the ks1 and ks2 coefficients were derived, which simplified the employed formulas without significantly affecting accuracy.

Analogous analyses were also carried out for cone stems, which allowed the process of seed extraction from cones to be described by mathematical equations. The stem of the cone was found to constitute 2.6% of its volume and 4% of its dry mass. An exponential equation was used to describe the mass change of the cone during the seed extraction process, in which the parameters are the initial and final water content in the cone and the power factor b, which is a function of the cone thickness. For the extracted seeds, energy content and germination rate were determined 14 and 28 days after sowing. The seeds obtained in the investigated extraction process did not reach first grade quality.

**Keywords:** water content, desiccation rate, cones, stem, seeds

### Spis symboli / Symbols list:

$As(t), Bs(t), Cs(t), Ds(t), Es(t)$  – współczynniki wielomianu kształtu szyszki (s) / coefficients of the polynomial shape of cone (s), trzpienia (t) / stem (t)

b – współczynnik charakterystyczny szyszki,  $1 \cdot h^{-1}$  / cone characteristic indicator,  $h^{-1}$

dL – różniczka krzywej kształtu / curve of shape differential

ds – grubość szyszki, cm / cone thickness, cm

$d_t$  – grubość trzpienia, cm / stem thickness, cm

exp – e(2,718) podstawa logarytmu naturalnego / e(2,718) basis of natural logarithm

$h_s$  – długość szyszki, cm / cone length, cm

$h_t$  – długość trzpienia, cm / stem length, cm

$ks_1 = V_{Sobl}/V_{Sw}$  – wskaźnik 1 dla szyszki (s) / cone in dicator 1 (s)

$ks_2 = S_{Sobl}/S_{Sw}$  – wskaźnik 2 dla szyszki (s) / cone in dicator 2 (s)

$kt_1 = V_{tobl}/V_{tw}$  – wskaźnik 1 dla trzpienia (t) / stem in dicator 1 (s)

$kt_2 = S_{tobl}/S_{tw}$  – wskaźnik 2 dla trzpienia (t) / stem in dicator 2 (s)

l – liczba łusek, szt. / number of scales, pcs.

$m_{H_2O}$  – masy wody, g / mass of water, g

$m_s$  – masa suchej substancji, g / mass of dry substance, g

$m_{ss}$  – masa sucha szyszki, g / mass of drycone, g

N – liczba nasion, szt. / numer of seeds, pcs.

R – współczynnik determinacji / coefficient of determination

$S_{Sobl}$  – pole powierzchni bocznej liczone z wielomianu kształtu szyszki,  $cm^2$  / area of surface calculated from the polynomial shape of cone,  $cm^2$

$S_{tobl}$  – pole powierzchni bocznej liczone z wielomianu kształtu trzpienia,  $cm^2$  / area of surface calculated from the polynomial shape of stem,  $cm^2$

Wpłynęło: 28.02.2018 r., recenzowano: 23.03.2018 r., zaakceptowano: 18.04.2018 r.

- $u_i$  – zawartość wody w szyszkach / water content in cones  
 $u_k$  – zawartość końcowa wody w szyszkach,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$  / final content of water in cones,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$   
 $u_o$  – zawartość początkowa wody w szyszkach,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$  / initial content of water in cones,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$   
 $V_{\text{Sobl}}$  – objętość liczona z wielomianu kształtu szyszki,  $\text{cm}^3$  / volume calculated from the polynomial of cone shape,  $\text{cm}^3$   
 $V_{\text{tobl}}$  – objętość liczona z wielomianu kształtu trzpienia,  $\text{cm}^3$  / volume calculated from the polynomial of stem shape,  $\text{cm}^3$   
 $\rho_s$  – gęstość szyszki,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  / density of cone,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$   
 $\rho_t$  – gęstość trzpienia,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  / density of stem,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$   
 $\tau$  – czas, h / time, h

## 1. Wstęp

Jodła pospolita *Abies alba* Mill. jest gatunkiem rosnącym w południowej i środkowej części Polski, osiągając północną granicę swojego zasięgu. Występuje w Karpatach na wysokości od 500 do 1100 m n.p.m., w Górach Świętokrzyskich, w Sudetach, na Roztoczu i innych obszarach kraju, o czym publikowali: Boratyński (1983), Bednarek (2002), Sugiero (2005), Barzdajn (2009), Szeligowski i in. (2011), Bis i Dobrowolska (2012). Jodła pospolita rosnąca w zwarciu zaczyna obradzać w wieku około siedemdziesięciu lat, zaś gdy wzrasta na otwartej przestrzeni – około trzydziestego roku życia (Załęski 1995). Gatunek ten obradza średnio co 3 lub 4 lata. Według Tyszkiewicza (1949) szyszki jodły mają długość od 10 do 17 cm, grubość od 3 do 5 cm, z kolei nasiona ze skrzydełkami pozyskane z szyszek od 10 do 25 mm. Według Gudeckiego (1966) nasiona jodły bez skrzydełek mają długość od 7,5 do 12,5 mm. Szyszki ze Słowacji badane przez Kočiová (1974) miały długość od 7,6 do 19,9 cm, a grubość od 3,0 do 5,2 cm, natomiast Nanu (1977) podaje, że na terenie Rumunii występują szyszki o długości od 7,0 do 19,5 cm i grubości od 2,9 do 4,6 cm. Z kolei Boratyński (1983) zmierzył długość i grubość szyszek jodły, które wynosiły odpowiednio od 10 do 15 cm i od 3 do 5 cm. Podobne wyniki dotyczące grubości szyszek otrzymał Suszka (1983), przy czym długość szyszek dochodziła do 18 cm.

O podstawowych parametrach wielkościowych szyszek, łusek, skrzydełek i nasion jodły pochodzących z różnych regionów i o ich wzajemnych zależnościach pisali również: Gunia, Simak (1968), Czernik (1993), Ballian i Čabaravdić (2005), Tracz i Barzdajn (2007), Politi i in. (2011), Illoul-Hachi i in. (2015).

Wpływ środowiska na populacje jodły oraz hybryd analizowali Kobliha i in. (2014), a zdrowotności nasion Boncaldo i in. (2010).

Szyszki *A. alba* rosną pionowo na gałęzi, a po dojrzeniu rozpadają się na łuski i nasiona, opadające na ziemię, oraz trzpień pozostający na drzewie.

Zbiór szyszek z drzew stojących wykonuje się ręcznie przed całkowitym ich dojrzeniem. Pozyskanie nasion jodły z szyszek nie wymaga stosowania specjalistycznych urządzeń łuszcarskich i wyższych temperatur niż w przypadku świerka pospolitego *Picea abies* (L.) Karst., sosny zwyczaj-

nej *Pinus sylvestris* L. czy modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill. Według „Instrukcji gromadzenia i przechowywania zasobów genowych” (LBGK2007) szyszki jodły po zebraniu umieszcza się w skrzyniach z perforowanym dnem w wentylowanej hali, w której panuje temperatura 20°C. Podczas składowania szyszki są przegarniane, a wysychając częściowo rozsypują się na łuski, nasiona i trzpień. Następnie materiał podlega rozkruszeniu i oddzielaniu w bębnowym odsiewaczu nasion jodły. Proces ten może być zmechanizowany. Od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku we włoskich lasach państwowych w Dagona di Peri koło Werony oraz w wyluszcarni w Laufen w nadleśnictwie Teisendorf w południowo-wschodniej Bawarii stosuje się urządzenie typu "Tiber", o wysokim stopniu mechanizacji, służące do rozkruszania szyszek (oddzielenia nasion od łusek i trzpienia), odskrzydlania i separacji nasion jodły (Suszka 2000). Obecnie w Polsce nie wykonuje się procesu łuszczenia (obniżenia zawartości wody w szyszkach jodły) w kontrolowanych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych, przez co proces suszenia każdej partii nie jest powtarzalny. Łuszczenie szyszek jodły można byłoby przeprowadzić, wykorzystując do tego znajdujące się niemal w każdej wyluszcarni szafy lub komory łuszcarskie. W celu pozyskania dobrych jakościowo nasion jodły niezbędna jest znajomość zarówno budowy szyszek (Aniszewska et al. 2017), jak i parametrów przebiegu procesu łuszczenia.

Celem większości badań dotyczących sosny zwyczajnej, świerka pospolitego czy modrzewia europejskiego było poszukiwanie takich sposobów konwekcyjnego suszenia szyszek, których efektem byłyby możliwie krótki czas trwania procesu, przy zachowaniu dobrej żywotności nasion. Literatura, dotycząca wyluszczenia nasion z szyszek jodły, nie zawiera jednak dostatecznego opisu przebiegu procesu i czynników nim sterujących. Dotychczas nie określono dynamiki zmian wilgotności szyszek jodły pospolitej podczas procesu łuszczenia. Nieznane są więc ani czynniki warunkujące przebieg tych zmian, ani wilgotność szyszek w chwili uzyskania stanu ich otwarcia. Jedną z dróg do poszukiwania optymalnych warunków procesu łuszczenia mogłoby być opracowanie modelu matematycznego opisującego zmianę wilgotności szyszki w czasie w zależności od jej parametrów i temperatury suszącego powietrza. Częścią takiego modelu jest stworzenie opisu zmienności szyszek.

W czasie badań została podjęta próba ustalenia zmienności szyszek na podstawie określenia ich kształtu. Pozwoliło to na opracowanie dokładnego modelu powierzchni i objętości zamkniętych szyszek jodły pospolitej, o czym pisały Aniszewska i Błuszkowska (2016), oraz opisu procesu ich łuszczenia w suszarce laboratoryjnej z wymuszonym obiegiem powietrza. Opracowanie modelu pozwala prognozować zmianę wilgotności szyszek w zależności od ich wielkości, wilgotności początkowej, temperatury suszenia, a przede wszystkim określić czas dochodzenia szyszki do stanu otwarcia i oddzielenia się łusek z nasionami od trzpienia.

Znajomość opisywanych parametrów i charakterystyki zmiany procesu łuszczenia pozwoli optymalizować i normalizować warunki realizacji łuszczenia z uwzględnieniem właściwości badanego materiału w wyluszczeniach gospodarczych.

## 2. Materiał i metody

W badaniach wykorzystano świeże szyszki jodły popolitej zebrane w gospodarczym drzewostanie nasiennym w gminie Ciepeliów w Nadleśnictwie Zwolen (Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych w Radomiu), z regionu pochodzenia leśnego materiału podstawowego J60.

Każdej ze 120 losowo wybranych szyszek wykonywano zdjęcia (o rozmiarze 3888×2126 pikseli i rozdzielczości 300 dpi) i przeniesiono je do programu Multiscan v. 18, za pomocą którego mierzono długość i grubość czyli największą średnicę szyszki, a dodatkowo sekwencyjnie średnicę 60 sztuk w odstępach co 10 mm, z dokładnością do 0,5 mm. Punkty pomiarowe oznaczono manualnie, po wcześniejszym skalowaniu zdjęć i nałożeniu siatki o wielkości oczka 10 mm × 10 mm. Nie stosowano dodatkowych przekształceń morfologicznych obrazu, wybrano opcję automatyczną. Na podstawie pomiaru długości oraz średnicy obliczono pole powierzchni zewnętrznej i objętość każdej szyszki. Zamknięte szyszki traktowano jako bryły obrotowe. Wyznaczono tworzącą powierzchni zewnętrznej. Odległość położenia przekroju od podstawy szyszki przyjęto za zerowy punkt układu współrzędnych (Aniszewska 2001). Współrzędne położenia przekroju i promień wyznaczone dla każdej szyszki były podstawą aproksymacji równania określającego tworzącą powierzchni zewnętrznej szyszki.

Dla badanego zbioru ogólne równanie tworzącej kształt szyszki lub trzpienia ma postać:

$$y = As(t)x^4 + Bs(t)x^3 + Cs(t)x^2 + Ds(t)x + Es(t) \quad (1)$$

gdzie:

$x \in (0, h)$ ,

$As(t), Bs(t), Cs(t), Ds(t), Es(t)$  – współczynniki równania kształtu szyszki ( $s$ ) lub trzpienia ( $t$ ).

Funkcja kształtu  $y=f(x)$  jest ciągła i nieujemna na całej długości ( $h_s$ ) szyszki, więc pole powierzchni ( $S_{Sobl}$ ) można obliczyć, korzystając ze wzoru:

$$S_{Sobl} = 2 \cdot \pi \int_a^b y \, dL = 2 \cdot \pi \int_0^h y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \, dx \quad (2)$$

gdzie:

$a, b$  – granice,

$dL$  – różniczka krzywej kształtu.

Ponieważ pola podstawy tej bryły są niewielkie, przyjęto, że powierzchnia boczna bryły jest równa powierzchni zewnętrznej szyszki.

Objętość szyszki ( $V_{Sobl}$ ) wyznaczono ze wzoru (3):

$$V_{Sobl} = \pi \int_0^h y^2 \, dx \quad (3)$$

Po wyluszczeniu materiału badawczego, opisaną powyżej metodą, obliczono też pole powierzchni  $S_{tobl}$  i objętość trzpieni szyszek  $V_{tobl}$  (Aniszewska, Błuszkowska 2016).

Powierzchnię zewnętrzną i objętość szyszek obliczono również drugim sposobem, stosując powszechnie znane wzory na powierzchnię boczną i objętość walca ( $S_{S_w}, V_{S_w}$ ). W celu porównania obliczonych wartości objętości i pola powierzchni wprowadzono wskaźniki zgodności:  $ks_1 = V_{Sobl}/V_{S_w}$ ,  $ks_2 = S_{Sobl}/S_{S_w}$ . Aby zastosować model walca do obliczenia objętości dowolnej szyszki, traktując objętość i pole powierzchni szyszki obliczonej z krzywej tworzącej jako objętość rzeczywistą (Aniszewska, Błuszkowska 2016), należy otrzymane wartości pomnożyć przez wskaźniki  $ks_1$  i  $ks_2$ . Analogicznie, chcąc zastosować wzór na walec do obliczenia pola powierzchni ( $S_{t_w}$ ) i objętości trzpienia ( $V_{t_w}$ ), należy otrzymane wyniki pomnożyć odpowiednio przez współczynniki  $kt_2$  i  $kt_1$ .

Do analizy parametrów zewnętrznych wykorzystano opis statystyczny wykonany za pomocą programu Statistica 10 (StatSoft Inc. 2011). Średnie pola powierzchni i objętości porównano testem t, F analizy wariancji, przetestowano również jednorodność wariancji (test Levene'a) oraz zgodność z rozkładem normalnym. Do testowania normalności rozkładu cechy zależnej zastosowano test Shapiro-Wilka. Wszystkie analizy wykonano na poziomie istotności 0,05.

Do pomiaru masy początkowej i masy suchej substancji szyszek użyto wagi laboratoryjnej WPS 600 o dokładności do 0,01 g. Masę suchej substancji określano po zakończeniu procesu łuszczenia, susząc szyszkę (łuski i trzpień) bez nasion metodą suszarkowo-wagową, stosowaną do drewna, w temperaturze 103±2°C aż do ustalenia się stałej masy (Kubiak, Laurow 1994). W badaniach określono liczbę łusek ( $I$ ) znajdujących się na szyszce, ich masę oraz liczbę ( $N$ ) i masę nasion, trzpienia oraz gęstość zamkniętych szyszek  $\rho_s$  (jako stosunek masy początkowej szyszki do jej objętości  $V_{Sobl}$ ) i trzpienia  $\rho_t$  (jako stosunek masy trzpienia do  $V_{tobl}$ ).

Procesowi suszenia w suszarce laboratoryjnej Heraeus UT 6120 z wymuszonym obiegiem powietrza, zapewniającej utrzymanie stałej temperatury poddano 60 wybranych losowo szyszek. Początkowo suszono je przez 5 godzin w temperaturze 25°C, a następnie w 35°C, przy wilgotności powietrza zmniejszającej się od 53% do 10%. Podczas procesu pojedyncze szyszki znajdowały się na rusztach wewnątrz suszarki. Ubytek masy, wilgotność i temperaturę powietrza wewnątrz suszarki rejestrowano w odstępach początkowo co 60 min (± 5 min), a później, co 120 min, z przerwą nocną ok. 8 h. Temperaturę powietrza mierzono z dokładnością 0,01°C, a wilgotność – 0,01% za pomocą miernika FTH 100 (Qeo FENNEL).

Podczas łuszczenia szyszek mierzono ich chwilową masę  $m_i$  w podanych odstępach czasowych, co – po ustaleniu suchej substancji  $m_s$  – pozwoliło określić chwilową zawartość w nich wody  $u_i$  (nazywaną też wilgotnością szyszki) jako stosunek masy wody  $m_{H_2O}$  do masy suchej szyszki  $m_{S_s}$ . Do opisu zmian zawartości wody w szyszkach podczas łuszczenia w suszarce przyjęto równanie wykładnicze odpowiadające, zgodnie z hipotezą pierwszą, drugiemu okresowi suszenia ciał stałych:

$$u = (u_o - u_k) \cdot \exp(-b \cdot \tau) + u_k \quad (4)$$

gdzie:

$u_o$  – zawartość początkowa wody,

$u_k$  – zawartość końcowa wody,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ ,

$\tau$  – czas, h,

$b$  – współczynnik charakterystyczny szyszki,  $1 \cdot \text{h}^{-1}$ ,

$\exp$  – podstawa logarytmu naturalnego ( $e=2,718$ ).

Wartość współczynnika  $b$  (Aniszewska 2008, 2012) wyznaczono dla każdej szyszki na podstawie rzeczywistego przebiegu zmian wilgotności z następującego wzoru:

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{u_i - u_k}{u_o - u_k}}{\tau_i} \quad (5)$$

gdzie:

$n$  – liczba odczytów wartości masy szyszki  $m_i$ ,

$\tau_i$  – czas luszczania.

Tak uśredniony współczynnik  $b$  przyjęto jako charakterystyczny parametr modelu matematycznego procesu zmian wilgotności szyszek. W pracy badana była zależność tego współczynnika od parametrów wielkościowych (długości i grubości) szyszki.

Charakterystycznymi parametrami modelu matematycznego są też początkowa zawartość wody w szyszce  $u_o$  i końcowa zawartość wody rejestrowanego procesu  $u_k$ . Na ich wartość mają wpływ założone warunki realizacji procesu luszczania. Wartość  $u_o$  można zmienić przez poddanie szyszki wstępnemu podsuszaniu, natomiast wartość  $u_k$  zależy od warunków suszenia.

Szybkość suszenia (ubytku wilgoci szyszki względem czasu) obliczono jako pochodną względem czasu wilgotności  $u_i$ :

$$\frac{du}{d\tau} = -b \cdot (u_o - u_k) \cdot \exp(-b \cdot \tau) \quad (6)$$

Zarejestrowane podczas eksperymentów zmiany wilgotności szyszek opisano równaniami matematycznymi, a ich adekwatność zweryfikowano metodami statystycznymi. Zależności funkcyjne były podstawą do analizy wpływu parametrów wielkościowych szyszek na przebieg procesu luszczania i czasu doprowadzenia ich do stanu otwarcia.

Do sprawdzenia założonych warunków wyluszczania nasion wykonano ocenę ich żywotności (zdolności i energii kiełkowania) wg normy BN-76/9211-02 oraz Załęskiego i in. (2006). Nasiona jodły wysiewano na bibule na kiełkowniku Jacobsena w trzech powtórzeniach po 100 szt. i przetrzymywano je w temperaturze zmiennej w zakresie 20–30°C, po wcześniejszym 21 dniowym chłodzeniu w 3–5°C. Obserwacje energii kiełkowania wykonano po 14 dniach, a zdolności kiełkowania po 28 dniach od wysiania.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Parametry charakterystyczne szyszek

Długość ( $h$ ) badanych 120 szyszek jodły pospolitej zawierała się w granicach od 12,40 do 19,70 cm, średnio 15,96

cm (odchylenie standardowe  $\pm 1,66$  cm), a ich grubość ( $d$ ) od 2,90 cm do 5,07 cm, średnio 3,93 ( $\pm 0,42$ ) cm. Analiza statystyczna dla badanej partii wykazała istotną słabą zależność liniową między grubością a długością szyszek (7).

$$d_s = 3,048 + 0,0554 \cdot h_s \quad R=0,218 \quad (7)$$

W tabeli 1 zamieszczono wartości długości ( $h_s$ ) i grubości ( $d_s$ ) szczegółowo badanych 60 szyszek jodły pospolitej. Długość szyszek zawierała się w granicach od 12,93 do 19,25 cm, średnio 15,97 cm (odchylenie standardowe  $\pm 1,46$  cm), a grubość od 3,75 cm do 5,07 cm, średnio 4,34 ( $\pm 0,39$ ) cm.

Masa zamkniętych świeżych szyszek średnio wynosiła 109,73 ( $\pm 23,72$ ) g i zawierała się w granicach od 71,65 do 158,62 g (tab. 1). Średnia wilgotność początkowa szyszek wynosiła 112%, a ich gęstość od 0,52  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  do 0,73  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , średnio 0,63 ( $\pm 0,06$ )  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Trzpień szyszek pozyskane po luszczaniu średnio miały długość 14,88 ( $\pm 1,42$ ) cm, a grubość mierzona w środku długości wynosiła 0,64 ( $\pm 0,06$ ) cm, przy czym grubość maksymalna przy ogonku szyszki – średnio 1,11 ( $\pm 0,21$ ) cm (tab. 2). Nie wykazano istotnej liniowej zależności między długością i grubością trzpienia. Gęstość trzpienia średnio wynosiła 0,44  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  i była mniejsza o 0,19  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  od gęstości liczonej dla zamkniętej szyszki.

#### 3.2. Powierzchnia i objętość zamkniętych szyszek oraz trzpienia

Wybrano wielomian czwartego stopnia jako dobrze odwzorowujący kształt szyszek. Wybór ten uzasadnia wysoki współczynnik determinacji, który zawierał się w granicach od 0,959 do 0,997, średnio 0,981. Wielomian trzeciego stopnia wykazał współczynnik istotnie niższy, a piątego porównywalny do podanego czwartego stopnia (nieróżniący się istotnie).

Średnie (wraz z odchyleniem standardowym), minimalne i maksymalne wartości współczynników od  $As$  ( $At$ ) do  $Es$  ( $Et$ ) podano w tabeli 3 i 4. Przykładowy przebieg zmian krzywej tworzącej dla szyszki i trzpienia pokazano na rycinie 1, a poniżej przedstawiono ich opis matematyczny (8) i (9).

Szyszka:

$$r_s = -0,00029 \cdot h_s^4 + 0,01031 \cdot h_s^3 - 0,12944 \cdot h_s^2 + 0,64571 \cdot h_s + 1,21638$$

$$R = 0,993 \quad (8)$$

Trzpień:

$$r_t = 0,00007 \cdot h_t^4 - 0,00288 \cdot h_t^3 + 0,03839 \cdot h_t^2 - 0,20675 \cdot h_t + 0,70108$$

$$R = 0,967 \quad (9)$$

Wyznaczone równania tworzących poszczególnych szyszek pozwoliły na obliczenie pola powierzchni  $S_{sobl}$  i objętości  $V_{sobl}$  (tab. 3).

Duża zmienność współczynników  $As$ ,  $Bs$ ,  $Cs$  i  $Es$  wielomianu dla poszczególnych szyszek powoduje, że mimo istotnych zależności od długości nie ma możliwości prak-

**Tabela 1. Charakterystyczne parametry szyszek jodły pospolitej**

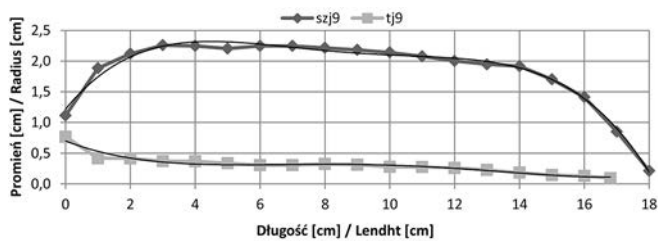
Table 1. Parameters characterizing fir cones

Dane Data	Średnia Mean	Min Min	Maks Max	Rozstęp Range	Warian- cja Variance	Odch. stand. Std. deviation	Wsp. zmn. Coeffi- cient of variation	Stan- dard. błąd Std. error	Skośność Skewness	Kurtoza Kurtosis
<b>Długość</b> Length $h_s$ [cm]	15,97	12,93	19,25	6,31	2,12	1,46	9,11	0,27	0,26	-0,15
<b>Grubość maks</b> Thickness max $d_s$ [cm]	4,34	3,75	5,07	1,32	0,15	0,39	8,93	0,07	0,07	-1,17
<b>Masa początkowa</b> Initial weight $m_{s_s}$ [g]	109,73	71,65	158,62	86,97	562,80	23,72	21,62	0,58	-0,62	109,73
<b>Gęstość</b> Density $\delta_s$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	0,63	0,52	0,73	0,20	0,00	0,06	9,23	0,20	-0,91	0,63
<b>Liczba łusek</b> Number of scales $l$	184,13	140,00	229,00	89,00	406,33	20,16	10,95	0,44	0,45	184,13
<b>Liczba nasion</b> Number of seeds $N$	268	195	357	170	1965,95	44	16,52	8,10	0,44	-0,37

**Tabela 2. Charakterystyczne parametry trzpienia jodły pospolitej**

Table 2. Parameters characterizing the stem of fir cones

Dane Data	Średnia Mean	Min Min	Maks Max	Rozstęp Range	Warian- cja Variance	Odch. stand. Std. deviation	Wsp. zmn. Coeffi- cient of variation	Stan- dard. błąd Std. error	Skośność Skewness	Kurtoza Kurtosis
<b>Długość</b> Length $h_t$ [cm]	14,88	11,14	17,33	6,19	2,01	1,42	10,21	0,26	0,49	-0,11
<b>Grubość</b> Thickness $d_t$ [cm]	0,64	0,48	0,72	0,24	0,004	0,06	9,84	0,01	-0,85	0,38
<b>Grubość przy podstawie szyszki</b> Thicknes [cm]	1,11	0,75	1,53	0,78	0,04	0,21	18,17	0,034	0,67	-0,18
<b>Masa sucha</b> Dry weight $m_t$ [g]	1,94	1,19	3,27	2,08	0,20	0,44	22,71	0,08	1,33	3,35
<b>Gęstość</b> Density $\delta_t$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	0,44	0,28	0,78	0,50	0,01	0,10	21,86	0,02	1,51	4,56



Rycina 1. Wykres przykładowej krzywej tworzącej szyszki i trzpienia jodły pospolitej

Figure 1. Graph of an exemplary generatrix of fir cone and cone stem

tycznego zastosowania wzoru do obliczenia objętości i pola powierzchni dowolnej szyszki jodły, gdy znane są jedynie jej podstawowe parametry wielkościowe. Dla współczynnika  $E_s$

nie wykazano istotnej zależności od długości szyszki, co potwierdziły Aniszewska i Błuszkowska (2016).

Ocena statystyczna współczynników równań regresji opisujących kształt trzpienia  $At-Et$  nie wykazała istotnych zależności od długości i grubości trzpienia.

Wartości pola powierzchni szyszki ( $S_{s_{obl}}$ ), obliczone ze wzoru 2, wynosiły od 134,18 cm<sup>2</sup> do 242,89 cm<sup>2</sup>, średnio 180,30(±24,01) cm<sup>2</sup>, a objętości ( $V_{s_{obl}}$ ), według wzoru 3, od 108,77 cm<sup>3</sup> do 258,99 cm<sup>3</sup>, średnio 175,70(±35,98) cm<sup>3</sup> (tab. 3).

Wartości pola powierzchni szyszki ( $S_{s_w}$ ) liczone według wzorów na walec wynosiły od 158,86 cm<sup>2</sup> do 268,79 cm<sup>2</sup>, średnio 217,13(±26,56) cm<sup>2</sup>, a objętości ( $V_{s_w}$ ) od 155,23 cm<sup>3</sup> do 311,41 cm<sup>3</sup>, średnio 236,67(±45,07) cm<sup>3</sup> (tab. 3).

Wartość wskaźnika  $ks_1$ , zawierała się w granicach od 0,65 do 0,89 średnio 0,74(±0,05), a wartość wskaźnika  $ks_2$  od 0,65 do 0,93 średnio 0,83(±0,05). Zastosowanie uśrednio-

Tabela 3. Podstawowe wartości statystyczne wielomianu, objętości, pola powierzchni i wskaźników szyszek

Table 3. Basic statistical values of polynomial, volume, surface area and indicators of cones

Dane Data	Średnia Mean	Min Min	Maks Max	Rozstęp Range	Warian- cja Variance	Odch. stand. Std. deviation	Wsp. zmn. Coeffi- cient of variation	Stan- dard. błąd Std. error	Skośność Skewness	Kurtoza Kurtosis
$A_s$	-0,0006	-0,0013	-0,0003	0,0010	0	0,00023	-40,26	0,000042	-0,67	0,86
$B_s$	0,0182	0,0092	0,0325	0,0233	0	0,00586	32,17	0,001069	0,17	-0,46
$C_s$	-0,2082	-0,2996	-0,1239	0,1757	0,0030	0,05124	-24,61	0,009355	0,20	-1,17
$D_s$	0,9728	0,6457	1,2831	0,6374	0,0310	0,17577	18,07	0,032091	-0,11	-0,96
$E_s$	0,5998	0,3356	1,2164	0,8808	0,0290	0,17085	28,48	0,031193	1,88	5,17
<b>Objętość</b> Volume $V_{s_{obl}}$ [cm <sup>3</sup> ]	175,70	108,77	258,99	150,22	1294,73	35,98	20,48	6,57	0,29	-0,23
<b>Pole powierzchni</b> Surface area $S_{s_{obl}}$ [cm <sup>2</sup> ]	180,30	134,18	242,89	108,70	576,48	24,01	13,32	4,38	0,46	0,72
<b>Objętość</b> Volume $V_{s_w}$ [cm <sup>3</sup> ]	236,67	155,23	311,41	156,18	2030,97	45,07	19,04	8,23	0,02	-0,95
<b>Pole powierzchni</b> Surface area $S_{s_w}$ [cm <sup>2</sup> ]	217,13	158,86	268,79	109,93	705,59	26,56	12,23	4,85	-0,11	-0,11
<b>Wskaźnik</b> Indicator $ks_1$	0,74	0,65	0,89	0,24	0,00	0,05	7,36	0,01	0,69	0,51
<b>Wskaźnik</b> Indicator $ks_2$	0,83	0,65	0,93	0,29	0,00	0,05	6,10	0,01	-1,40	5,50

nych wskaźników  $ks_1$  i  $ks_2$  do obliczenia objętości i pola powierzchni szyszki jodły wykazało brak istotnych różnic między wartościami  $V_{s_{obl}}$  i  $S_{s_{obl}}$ , co potwierdził test t dla prób zależnych ( $p=0,817$  i  $p=0,970$ ) oraz analiza wariancji ( $p=0,950$ ;  $F=0,0039$  i  $p=0,989$ ;  $F=0,0002$ ).

Wartości pola powierzchni trzpienia ( $St_{obl}$ ) obliczone ze wzoru 2, wynosiły od 17,61 cm<sup>2</sup> do 36,02 cm<sup>2</sup>, średnio 26,46(±4,66) cm<sup>2</sup> a objętości ( $Vt_{obl}$ ), według wzoru 3, od 2,40 cm<sup>3</sup> do 6,92 cm<sup>3</sup>, średnio 4,51(±1,11) cm<sup>3</sup> (tab. 4). Stosując podobieństwo trzpienia do bryły walca, średnio pole powierzchni wynosi 27,81 cm<sup>2</sup>, a objętość 4,48 cm<sup>3</sup>. Test T dla prób zależnych wykazał istotne różnice między  $St_{obl}$  a  $St_w$  ( $p=0,043$ ), a nie wykazał różnic między  $Vt_{obl}$  a  $Vt_w$  ( $p=0,855$ ). Średnio trzpień stanowi 2,59(±0,52)% objętości zamkniętej szyszki, jest średnio krótszy od szyszki o 1,09(±0,51) cm i stanowi 3,87(±0,67)% jej suchej substancji.

### 3.3. Proces luszzenia szyszek jodły, pozyskanie i ocena nasion

Całkowity czas luszzenia szyszek wynosił 35 h. Temperatura suszenia maksymalnie wynosiła 35°C, a wilgotność powietrza wewnątrz suszarki zmniejszała się od 53% do 10%.

Na rycinie 2 zaprezentowano zmianę zawartości wody i szybkość suszenia w czasie dla wybranej szyszki. Opis matematyczny przebiegu procesu przedstawiają równania zawartości wody ( $u$ ) i szybkości (dynamiki) suszenia ( $du \cdot dt^{-1}$ ) szyszek w czasie, opisane według wzorów 4 i 6. Przykładowe równanie modelowe  $u$  dla wybranej szyszki podano poniżej:

$$u = 1,038 \cdot e^{-0,080 \cdot \tau} + 0,084; \quad (10)$$

(dla  $u_0 = 1,122 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ ,  $u_k = 0,084 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ ,  $b = 0,080 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$$du \cdot dt^{-1} = -0,083 \cdot e^{-0,080 \cdot \tau}; \quad (11)$$

a liniowa postać równania szybkości suszenia od wilgotności szyszki to:

$$du \cdot dt^{-1} = -0,080 \cdot (u - 0,084) \quad (12)$$

W tabeli 5 przedstawiono średnie, minimalne i maksymalne wartości poszczególnych parametrów równań. Szyszki jodły miały średnio początkową zawartość wody 1,127 kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>·kg<sub>s.m.</sub><sup>-1</sup>, a końcową według modelu 0,115 kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>·kg<sub>s.m.</sub><sup>-1</sup>. Współczynnik  $b$  wynosił średnio 0,065 l·h<sup>-1</sup>. Wyznaczono liniową zależność między współczynnikiem  $b$  i grubością szyszki ( $R=0,441$ ), a jej brak między tym współczynnikiem a długością. Przy doborze szyszek o podobnych właściwościach wymiany masy należałoby się posłużyć przy ich selekcji grubością szyszek, jako parametrem bardziej jednoznacznie niż długość wpływającym na zmiany współczynnika  $b$ . Zauważono, że im wyższa była wartość współczynnika  $b$ , tym proces suszenia przebiegał szybciej (szyszki intensywniej zmniejszały wilgotność).

W większości przypadków końcowa rzeczywista zawartość wody nie równała się końcowej modelowej zawartości wody, różnica między nimi wynosiła średnio 11(±5,6)%. Test T wykazał istotną różnicę między nimi ( $p<0,05$ ).

Dla rzeczywistych wartości zmiany zawartości wody podczas suszenia zaproponowano inne równanie wykładnicze

**Tabela 4. Podstawowe wartości statystyczne wielomianu, objętości, pola powierzchni i wskaźników trzpieni**

Table 4. Basic statistical values of polynomial, volume, surface area and indicators of cone stems

Dane Data	Średnia Mean	Min Min	Maks Max	Rozstęp Range	Warian- cja Variance	Odch. stand. Std. deviation	Wsp. zmn. Coeffi- cient of variation	Stan- dard. błąd Std. error	Skośność Skewness	Kurtoza Kurtosis
At	0,0001	-0,0002	0,0002	0,0004	0	0,0001	142,41	0,000014	-1,40	4,30
Bt	-0,0020	-0,0052	0,0054	0,0106	0	0,0022	-110,33	0,000395	1,22	3,28
Ct	0,0225	-0,0435	0,0535	0,0970	0	0,0206	91,78	0,003767	-0,96	2,04
Dt	-0,1102	-0,2350	0,1016	0,3367	0,006	0,0774	-70,21	0,014128	0,45	0,34
Et	0,5293	0,3708	0,7547	0,3839	0,009	0,0955	18,04	0,017436	0,67	-0,15
$Vt_{obl}$ [cm <sup>3</sup> ]	4,51	2,40	6,92	4,53	1,23	1,11	24,62	0,20	0,13	-0,30
$St_{obl}$ [cm <sup>2</sup> ]	26,46	17,61	36,02	18,40	21,72	4,66	17,62	0,85	0,11	-0,09
$Vt_w$ [cm <sup>3</sup> ]	4,48	2,25	5,75	3,50	0,80	0,89	19,96	0,16	-0,79	-0,06
$St_w$ [cm <sup>2</sup> ]	27,81	18,74	35,39	16,64	13,82	3,72	13,37	0,69	-0,53	0,42
$kt_1$	1,02	0,68	1,52	0,83	0,05	0,22	21,63	0,04	0,72	-0,21
$kt_2$	0,95	0,73	1,20	0,47	0,02	0,12	12,89	0,02	0,45	-0,26

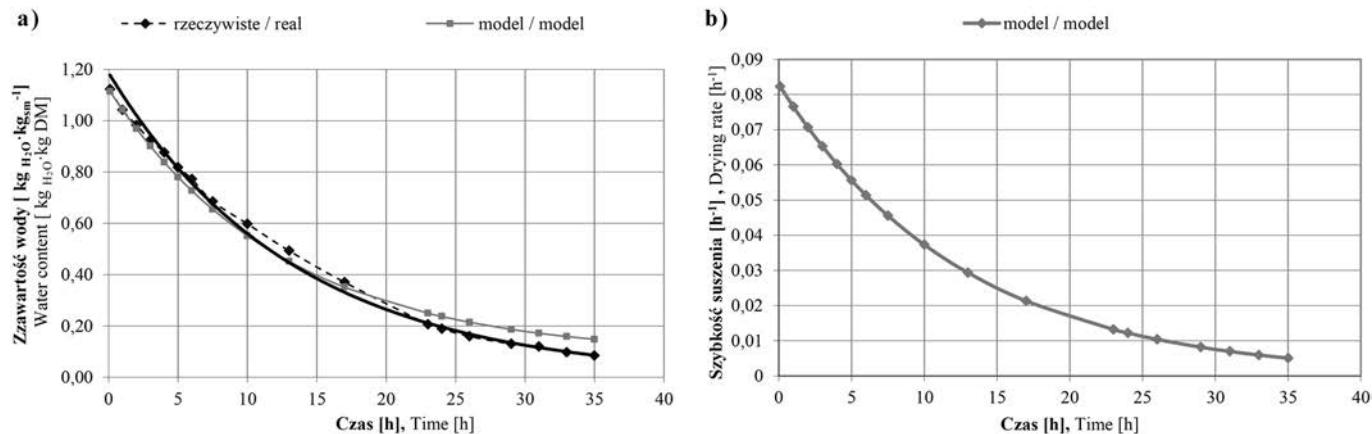
według Statistica 10 (13). Wykres opisujący równanie zamieszczono na rycinie 2a.

$$u = 1,187 \cdot e^{(-0,075 \cdot \tau)} \quad (13)$$

Ustalono istotną zależność liniową między końcową  $u_k$  a początkową  $u_o$  zawartością wody. Oceniając zakres zmiany

zawartości wody w szyszkach dla całego procesu, czyli różnicę między początkową a końcową jej zawartością, można zauważyć, że najwięcej procentowo szyszek (63,3%) mieściła się w przedziale od 0,900 do 1,100  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$ .

Na rycinie 3 pokazano zmianę zawartości wody w czasie suszenia szyszek o początkowej zawartości wody 0,872



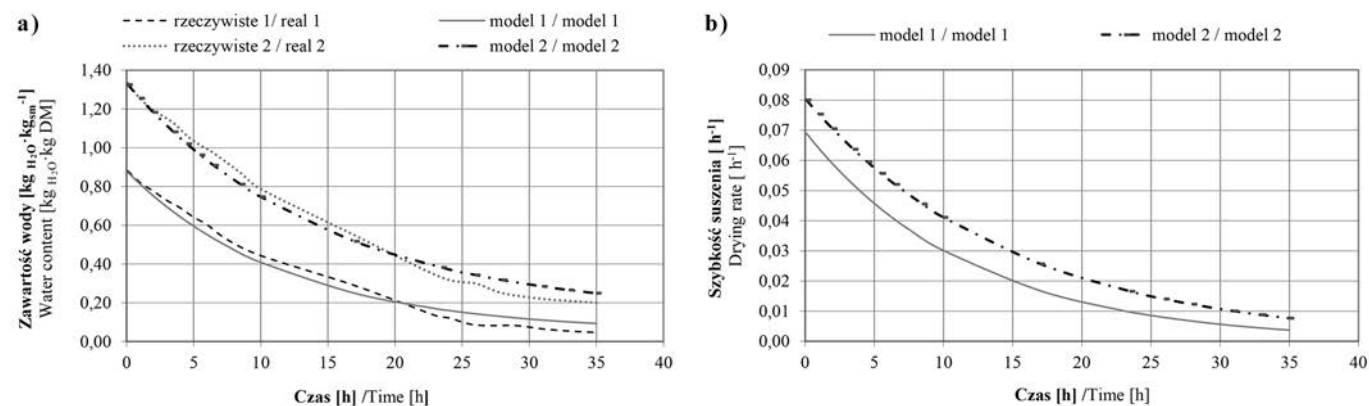
Rycina 2. Wykresy: a – zmiana zawartości wody w czasie wybranych szyszek (rzeczywisty, modelowy, wykładniczy), b – szybkość (dynamika) suszenia

Figure 2. Graphs: a – change in water content over time for selected cones (real, model, exponential), b – speed (dynamics) of drying

Tabela 5. Podstawowe wartości statystyczne parametrów równania zmiany zawartości wody i szybkości suszenia

Table 5. Basic statistical values of the parameters of the equation for changing of the water content and the drying rate

Dane Data	Średnia Mean	Min Min	Maks Max	Rozstęp Range	Warian- cja Variance	Odch. stand. Std. deviation	Wsp. zmn. Coeffi- cient of variation	Stan- dard. błąd Std. error	Skośność Skewness	Kurtoza Kurtosis
$u_o$	1,127	0,869	1,338	0,470	0,017	0,131	11,605	0,024	-0,221	-0,319
$u_k$	0,115	0,036	0,248	0,232	0,003	0,053	46,178	0,097	0,327	0,019
b	0,065	0,040	0,100	0,060	0,000	0,015	22,283	0,003	0,612	-0,300



Rycina 3. Wykresy: a – zmiana w czasie zawartości wody w szyszkach o różnej zawartości (1 – większej, 2 – mniejszej) wody (rzeczywisty i modelowy), b – szybkość suszenia

Figure 3. Graphs: a – water content in time for cones with different water content (1 – street, 2 – smaller), real and modeled, b – drying rate

i  $1,325 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$  i końcowej odpowiednio  $0,049$  i  $0,185 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$  oraz współczynnika  $b$  równym  $0,084$  i  $0,075 \text{ h}^{-1}$ . W czasie 35 h, wystarczającym do pozyskania nasion, wilgotność szyszek zmniejszyła się o ok. 80% dla pierwszej krzywej suszenia (zawartość wody  $-0,08 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$ ) i o 115% dla drugiej ( $1,15 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$ ). Szybkość suszenia szyszek, czyli ubytek wody z szyszek, była od początku malejąca, co jest charakterystyczne dla opisywanego w literaturze tzw. drugiego okresu suszenia ciał stałych (Pabis 1982).

Po procesie łuszczenia szyszki rozpadły się na łuski, nasiona i trzpień. Liczba łusek w szyszce wynosiła od 140 do 229, średnio  $184(\pm 20,15)$ , a liczba nasion średnio  $268(\pm 44)$  (tab. 1). Wykazano istotną liniową zależność między liczbą łusek a liczbą pozyskanych nasion ( $R=0,750$ ). Średnio masa pozyskanych nasion z szyszki wynosiła 16,6 g, z czego wynika, że masa 1000 nasion to średnio 62 g.

Przeprowadzona ocena jakości nasion wykazała, że nasiona jodły po procesie suszenia wykiełkowały w 32% w czasie 28 dni, z czego 21% w czasie 14 dni od wysiania. Według norm, nasiona jodły zaliczane są do I klasy jakości, gdy osiągną od 61 do 80%. Otrzymany wynik świadczy, że badanych nasion nie można zaliczyć do pierwszej klasy jakości. Dlatego w celu sprawdzenia oddziaływania zaproponowanego procesu łuszczenia na szyszki jodły i pozyskane z nich nasiona wykonano próbę kontrolną oceny żywotności nasion pozyskanych z szyszek niepoddanych suszeniu w suszarce. Otrzymano podobne wyniki żywotności, bowiem w ciągu 28 dni wykiełkowało zaledwie 35% nasion.

#### 4. Dyskusja

Porównując wyniki parametrów zewnętrznych badanych szyszek jodły, zauważono, że mieszczą się one w granicach podawanych przez innych autorów. Najbardziej zbliżone były do parametrów dla szyszek jodły z Rumunii (Nanu 1977), które miały długość od 7,0 do 19,5 cm, a grubość od 2,9 do 4,6 cm. Podobne wyniki podała także Kočiová (1974), opisując szyszki ze Słowacji. Z kolei wyniki masy 1000 nasion jodły przewyższały wartości opisane przez Antosiewiczą (1970) średnio ok. 12 g.

Dzięki znajomości długości i grubości szyszki można obliczyć pole powierzchni i objętości szyszki zamkniętej. Zaproponowany model, w postaci wielomianu czwartego stopnia, posłużył jedynie do opisu kształtu szyszki i do obliczenia pola powierzchni oraz objętości konkretnych szyszek. Próba zastosowania tego wielomianu dla innych szyszek z partii, przy wykorzystaniu uśrednionych wartości współczynników równania  $A_s, B_s, C_s, D_s, E_s$ , nie powiodła się, bo uzyskano znacznie zawyżone wyniki. Zaproponowany drugi sposób obliczania pola powierzchni i objętości szyszki jodły jako walca okazał się bardziej przydatny. Możliwe jest łatwe zastosowanie go do szyszek z innych partii poprzez określenie odpowiednich współczynników (dla badanej partii szyszek wynosiły one 0,74 dla objętości i 0,83 dla powierzchni). Dodatkowo określono, że trzpień szyszki stanowi ok. 2,6% objętości szyszki zamkniętej, a jego masa stanowi ok. 4% masy suchej szyszki.

Podobne badania prowadzone dla innego pochodzenia jodły pospolitej czy innych gatunków, tj. sosny zwyczajnej i świerka pospolitego określiły sposób obliczania pola powierzchni i objętości ze wzorów na stożek (Gawart, Miłkaszewicz 2000; Aniszewska 2001; Aniszewska, Błuszkowska 2016), jednak odwzorowanie walcowe daje lepsze wyniki.

Badane wartości pola powierzchni i objętości oraz opisane zmiany zawartości wody i krzywe szybkości suszenia mogą być wykorzystane przy tworzeniu i programowaniu cieplnych procesów łuszczenia w szafach łuszcarskich w warunkach gospodarczych w celu pozyskania dobrych jakościowo nasion.

Zaproponowane warunki wewnątrz komory suszenia, czyli temperatura powietrza do  $35^\circ\text{C}$  i wilgotność w ostatniej fazie suszenia do 10%, pozwalają pozyskać żywotne nasiona, o czym świadczy przeprowadzona próba kiełkowania nasion. Wskazane jest jednak dodatkowe sprawdzenie jakości nasion przy zastosowaniu innych metod na przykład próby krojenia czy barwienia zarodków w roztworze tetrazoliny. Nasiona jodły są bardzo wrażliwe na zmiany temperatury i wilgotności podczas wyluszczenia, przygotowywania do przechowywania i samego przechowywania (Załęski et al. 2009). Według informacji uzyskanych z SON w Sękocinie nasiona, które w próbie barwienia zarodków w roztworze tetrazoliny mają wysoką żywotność (kilkadziesiąt procent), w próbie kiełkowania często kiełkują na poziomie tylko kilku procent. Według Załęskiego (1995) średnia żywotność nasion jodły pospolitej w Polsce, oznaczona próbą krojenia, wynosi 43,3%. Otrzymany niski wynik żywotności nasion może być związany ze stanem fizycznym i składem biochemicznym samych nasion (Aniśko et al. 2001), a to z kolei jest związane ze stadium ich dojrzałości oraz warunkami atmosferycznymi panującymi w czasie zawiązywania i wykształcania się nasion.

Przedstawione badania parametrów wielkościowych, masy, procesu suszenia, w tym zmiany zawartości wody i oceny jakości można traktować jako pilotażowe. Ich wyniki należałoby potwierdzić poprzez przeprowadzenie doświadczeń na szyskach z różnych pochodzeń i lat pozyskania.

#### 5. Wnioski

Kształt szyszki jodły pospolitej wystarczająco dokładnie opisuje krzywa będąca wielomianem czwartego stopnia. Jednakże ze względu na duże różnice w wartościach uśrednionych wielomianu i wartościach rzeczywistych szyszek opisu tego nie można wykorzystać do obliczenia objętości oraz pola powierzchni dowolnej szyszki, mimo istotnej zależności od długości i grubości szyszki (poza współczynnikiem  $D$ ).

Ogólnym modelem obliczeniowym opisującym pole powierzchni i objętość szyszek jodły pospolitej może być wzór na walec. Wartości objętości wyliczone za pomocą wzoru na walec należy dla badanej partii szyszek pomnożyć przez wartość stałą, wynoszącą 0,74, a w przypadku pola powierzchni

przez 0,83. Dla innych partii szyszek można spodziewać się niewielkich zmian wielkości tych współczynników.

Zmianę masy szyszki w procesie łuszczenia w funkcji czasu opisuje równanie wykładnicze, w którym parametrami są zawartość początkowa wody w szyszce – średnio  $1,127 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ , zawartość końcowa wody –  $0,115 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$  i współczynnik potęgowy  $b$  równy  $0,065 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Wilgotność końcowa zależy od wilgotności początkowej szyszki, a jej wartość zwiększa się wraz z wilgotnością początkową. Współczynnik  $b$  zależy od grubości szyszki i zmniejsza się wraz ze wzrostem grubości szyszki, co można opisać równaniem regresji liniowej.

Nasiona pozyskane w badanym procesie łuszczenia w temperaturze suszenia do  $35^\circ\text{C}$  i wilgotności do 10% nie osiągnęły pierwszej klasy jakości nasion. Wykonana próba kontrolna oceny żywotności nasion tego samego pochodzenia nie poddanych łuszczeniu dała podobne wyniki. Dlatego nie można wykluczyć stosowania zautomatyzowanego procesu łuszczenia szyszek jodły w badanych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych.

## Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów

## Podziękowania i źródła finansowania

Badania sfinansowano ze środków własnych Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie. Badania przeprowadzono w laboratorium Zakładu Mechanizacji Leśnictwa.

## Literatura

Aniszewska M. 2001. Zmienność podstawowych parametrów szyszki świerka. *Sylwan* 145(6): 87–93.

Aniszewska M. 2008. Charakterystyka wielofazowego procesu wyluszczenia nasion modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill. na przykładzie wyluszczeniarni gospodarczej w Czarnej Białostoczek. *Leśne Prace Badawcze* 69(2): 155–163.

Aniszewska M. 2012. Porównanie procesu wyluszczenia nasion sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z szyszek całych i pozabawionych trzpienia. *Leśne Prace Badawcze* 73(1):65–72. DOI 10.2478/v10111-012-0007-3.

Aniszewska M., Błuszkowska U. 2016. Variability of silver fir (*Abies alba* Mill.) cones – variability of cone parameters. *Leśne Prace Badawcze* 77(3): 221–229. DOI 10.1515/frp-2016-0024.

Aniszewska M., Gendek A., Śliwińska J. 2017. Variability of silver fir (*Abies alba* Mill.) cones – variability of scale surface area. *Leśne Prace Badawcze* 78(1): 5–13. DOI 10.1515/frp-2017-0001.

Aniśko E., Witkowska O., Załęski A. 2001. Ustalenie wilgotności nasion przeznaczonych do przechowywania (wartości graniczne), szczególnie jodły, jaworu, brzozy, olszy czarnej, lipy, jesionu i innych. Sprawozdanie naukowe IBL, 39 s.

Antosiewicz Z. 1970. Nasiennictwo. w: Poradnik Leśnika (red. Kamiński E). SITLiD, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 306-330.

Ballain D., Čabaravdić A. 2005. Međupopulacijskavarijabilnostnekih morfoloških svojstava obične jele (*Abies alba* Mill.) izsredišnje Bosne. *Rad. Šumar. Inst.* 40(1):5–18.

Barzdajn W. 2009. Adaptacja różnych pochodzeń jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) do warunków Sudetów. *Leśne Prace Badawcze* 70(1): 49–58. DOI 10.2478/v10111-009-0005-2.

Bednarek T. 2002. Zmienność osobnicza jodły (*Abies alba* Mill.) w lasach zarządzanych przez Regionalną Dyрекcyję Lasów Państwowych we Wrocławiu. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im H. Kollątaja w Krakowie* 339:181–195.

Bis R., Dobrowolska D. 2012. Występowanie jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w Puszczy Iłżeckiej. *Leśne Prace Badawcze* 73(4): 273–282. DOI 10.2478/v10111-012-0020-6.

Boratyński A. 1983. Systematyka i geograficzne rozmieszczenie jodły, w: Białobok S. (red.) Jodła pospolita (*Abies alba* Mill.). PWN, Warszawa–Poznań, 41–86. ISBN 83-01-04028-9.

Boncaldo E., Bruno G., Sicoli G., Tommasi F., Mastropasqua L. 2010. Germinability and fungal occurrence in seeds of *Abies alba* Mill. populations in southern Italy. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 144(3): 740–745. DOI 10.1080/11263501003755549.

Czernik Z. 1993. Badania właściwości geometrycznych nasion jodły. *Sylwan* 8: 57–64.

Gawart B., Mikłaszewicz M. 2000. Modele matematyczne kształtu szyszek sosny i świerka. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej* 2:20–22.

Gudeski A. 1966. Morfologija na semeno i na šišarkite na elata (*Abies alba* Mill.) od nacionalniot park „Risnak”. *Godišen Zbornik na Zemjodelsko-Šumarskiot Fakultet na Univerzitetot – Skopje* 19: 187–215.

Gunia S., Simak M. 1968. Effect of damaging resin vesicles in the seed coat on the germination of silver fir (*Abies alba* Mill.) seeds, in: Proceedings of the International Symposium on Seed Physiology of Woody Plants. Kórnik, Poland, Institute of Dendrology and Kórnik Arboretum, Polish Academy of Sciences, 79–83.

LBGK. 2007. Instrukcja gromadzenia i przechowywania zasobów genowych. Leśny Bank Genów Kostrzyca.

Illoul-Hachi M., Derridj A., Fady B. 2015. Efficiency of seed production and cone size of *Abies numidica* De Lannoy in the plantation in Algeria. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences* 3(7): 9–16.

Kobliha J., Škorpík P., Stejskal J., Češka P. 2014. Hybridization results using the hybrid *Abies cilicica* × *Abies cephalonica*. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus* 13(4): 23–31.

Kočíová M. 1974. Dedivost’ plodov jedle bielej (*Abies alba* Mill.) na Slovensku. *Acta Musei Silesiae, Series Dendrologia (Opava)* 23: 171–179.

Kubiak M., Laurow Z. 1994. Surowiec drzewny. Fundacja, Rozwój SGGW, Warszawa. ISBN 83-86241-33-0.

Nanu N. 1977. Contributii la biometriaconurilor de brad (*Abies alba* Mill.). *Revista Pădurilor* 92(3): 140–147.

Norma branżowa BN-76/9211-02, Leśnictwo, Wydawnictwa Normalizacyjne.

Pabis J. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów. Warszawa. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 228 s. ISBN 83-09-00597-0.

Politi P.I., Georghiou K., Arianoutsou M. 2011. Reproductive biology of *Abies cephalonica* Loudon in Mount Aenos National Park, Cephalonia, Greece. *Trees* 25: 655–668. DOI 10.1007/s00468-011-0542-1.

Statistica 10. 2011. Start Soft. www.statsoft.com.

- Sugiero D. 2005. Jodła pospolita (*Abies alba* Mill.) w drzewostanach zespołu żywej buczyny karpackiej (*Dentarioglandulosae-Fagetum*). *Sylwan* 149(11): 42–49.
- Suszka B. 1983. Rozmnażanie generatywne, w: Białobok S.(red). Jodła pospolita *Abies alba* Mill. PWN, Warszawa–Poznań, 566 s. ISBN 83-01-04028-9.
- Suszka B. 2000. Nowe technologie i techniki w nasiennictwie leśnym. Bogucki Wydawnictwo Naukowe S.C., Warszawa, 269 s. ISBN 83-88163-14-0.
- Szeligowski H., Bolibok L., Buraczyk W., Drozdowski S. 2011. Characteristics of Silver fir (*Abies alba* Mill.) in a provenance trial in Rogów. *Leśne Prace Badawcze* 72(3): 225–231. DOI 10.2478/v10111-011-0022-9.
- Tracz M., Barzdajn W. 2007. The morphological traits of cones and seeds of *Abies alba* in Middle Sudeten. *Dendrobiology* 58: 59–65.
- Tyszkiewicz S. 1949. Nasiennictwo Leśne. Instytut Badawczy Leśnictwa, Seria D. 2. 358.
- Załęski A. (red) 1995. Nasiennictwo leśnych drzew i krzewów iglastych. Oficyna Edytorska Wydawnictwo Świat. Warszawa, 180 s. ISBN 83-85597-27-1.
- Załęski A., Aniśko E., Konratowicz W. 2009. Zawartość wody w poduszonych nasionach drzew leśnych a wilgotność względna suchszego powietrza. *Leśne Prace Badawcze* 70(2): 151–160.
- Załęski A., Aniśko E., Kantorowicz W. 2006. Zasady oceny nasion w Lasach Państwowych, w: Elementy genetyki i hodowli selekcyjnej drzew leśnych (red. J. Sabor). CILP, Warszawa, 317–326. ISBN 83-88478-21-4.

### Wkład poszczególnych autorów

M.A.– koncepcja, przegląd literatury, metodyka, pomiary, opracowane wyników, analiza statystyczna, wnioski, pisanie, korekta; J.B.– pisanie, pomiary, korekta, W.Z. – tłumaczenie, korekta.

## The extraction process and seed quality of silver fir cones *Abies alba* Mill.

Monika Aniszewska\* , Jacek Brzózko, Witold Zychowicz 

Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Faculty of Forestry, Department of Agricultural and Forest Machinery,  
ul. Nowoursynowska 164, 02–787 Warszawa, Poland

\*Tel. +48 22 5934520, e-mail: monika\_aniszewska@sggw.pl

**Abstract.** Fir cones *Abies alba* Mill. are not as extensively described in the literature as cones of other species, and therefore, there is no description of the changes in water content and their dynamics during the extraction process. Developing a mathematical model describing these changes based on cone parameters and air temperature is a step forward in determining the optimal conditions for the extraction process. Here, we present such a model derived using fresh cones collected in a seed production stand in the Zwoleń Forest District (RDSF Radom). For 120 randomly chosen cones, the length and the largest diameter of the cone were measured, using the Multiscan program. In addition, for 60 randomly selected cones, the diameter was measured along the entire length of the cone at 10 mm intervals. This allowed us to generate cone models approximating rotational solids for which the outer surface area was calculated using a fourth degree polynomial function and the obtained area was then used to determine cone volume. To facilitate the generalization of surface area and volume calculations to other cones, the  $ks_1$  and  $ks_2$  coefficients were derived, which simplified the employed formulas without significantly affecting accuracy.

Analogous analyses were also performed for cone stems, which allowed the process of seed extraction from cones to be described by mathematical equations. The stem of the cone was found to constitute 2.6% of its volume and 4% of its dry mass. An exponential equation was used to describe the change in cone mass during the seed extraction process, in which the parameters are the initial and final water content of the cone and power factor  $b$ , which is a function of cone thickness. The energy content and germination rate for the extracted seeds were determined 14 and 28 days after sowing. The seeds obtained in the investigated extraction process did not reach first grade quality.

**Keywords:** water content, desiccation rate, cones, stem, seeds

### List of symbols:

$As(t), Bs(t), Cs(t), Ds(t), Es(t)$  – coefficients of the polynomial shape of cone (s), stem (t)  $b$  – cone characteristic in dicator,  $h^{-1}$   
 $dL$  – curve of shaped differential  
 $ds$  – cone thickness, cm  
 $d_t$  – stem thickness, cm  
 $exp$  –  $e(2.718)$  basis of natural logarithm  $h_s$  – cone length, cm  
 $h_t$  – stem length, cm  
 $ks_1 = V_{s_{obl}}/V_{s_w}$  – cone in dicator 1 (s)  
 $ks_2 = S_{s_{obl}}/S_{s_w}$  – cone in dicator 2 (s)  
 $kt_1 = V_{t_{obl}}/V_{t_w}$  – stem in dicator 1 (t)  
 $kt_2 = S_{t_{obl}}/S_{t_w}$  – stem in dicator 2 (t)  
 $l$  – number of scales, pcs.  
 $m_{H_2O}$  – mass of water, g

$m_s$  – mass of dry substance, g  
 $m_{ss}$  – mass of dry cone, g  
 $N$  – number of seeds, pcs.  
 $R$  – coefficient of determination  
 $S_{s_{obl}}$  – area of surface calculated from the polynomial shape of a cone,  $cm^2$   
 $S_{t_{obl}}$  – area of surface calculated from the polynomial shape of a stem,  $cm^2$   
 $u_i$  – water content in cones  
 $u_k$  – final water content in cones,  $kg_{H_2O} \cdot kg_{s.m.}^{-1}$   
 $u_o$  – initial water content in cones,  $kg_{H_2O} \cdot kg_{s.m.}^{-1}$   
 $V_{s_{obl}}$  – volume calculated from the polynomial of the cone shape,  $cm^3$   
 $V_{t_{obl}}$  – volume calculated from the polynomial of the stem shape,  $cm^3$   
 $\rho_s$  – cone density,  $g \cdot cm^{-3}$   
 $\rho_t$  – stem density,  $g \cdot cm^{-3}$   
 $\tau$  – time, h

Received: 28.02.2018, reviewed: 23.03.2018, accepted: 18.04.2018.

## Introduction

The silver fir *Abies alba* Mill. is a species growing in the southern and central part of Poland, where it reaches the northern limit of its range. It is found in the Carpathians at an altitude of 500 to 1100 m above sea level, in the Świętokrzyskie Mountains, in the Sudetes Mountains, in Roztocze and other areas of the country, as published by: Boratyński (1983), Bednarek (2002), Sugiero (2005), Barzdajn (2009), Szeligowski et al. (2011), Bis, Dobrowolska (2012). A fir tree growing in dense stands begins to produce abundant seed crops at about seventy years of age, and when it grows in open space – at about thirty years of age (Załęski 1995). This species has abundant seed crops, on an average every 3 or 4 years. According to Tyszkiewicz (1949), fir cones have a length of 10 to 17 cm, a thickness of 3 to 5 cm, while seeds with wings are acquired from cones of 10 to 25 mm. According to Gudeski (1966), fir seeds without their wings have a length of 7.5 to 12.5 mm. Cones from Slovakia examined by Kočova (1974) had a length from 7.6 to 19.9 cm, and a thickness from 3.0 to 5.2 cm, whereas Nanu (1977) reports that there are cones in Romania of 7.0 to 19.5 cm in length and from 2.9 to 4.6 cm thick. In turn, Boratyński (1983) measured the length and thickness of fir cones, which were respectively from 10 to 15 cm and from 3 to 5 cm. Similar results regarding the thickness of cones were obtained by Suszka (1983), with the length of cones reaching 18 cm.

Gunia, Simak (1968), Czernik (1993), Ballian and Čabaravdić (2005), Tracz, Barzdajn (2007), Politiet al.(2011), and Illoul-Hachi et al. (2015) also wrote about the basic size parameters of cones, scales, wings and seeds from different regions and their interrelationships.

The influence of the environment on fir populations and hybrids was analyzed by Kobliha et al. (2014), and the healthiness of seeds by Boncaldo et al. (2010).

*A. alba* cones grow vertically on the branch, and after ripening, they disintegrate into scales and seeds that fall to the ground, with the stem remaining on the tree.

Collecting cones from standing trees is done manually before they are fully ripened. Extracting fir seeds from cones does not require the use of specialized extraction equipment or higher temperatures than in the case of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst., Scots pine *Pinus sylvestris* L. or European larch *Larix decidua* Mill. According to the "Instructions for the Collection and Storage of Genetic Resources" (LBGK2007), after collecting the fir cones, they are placed in boxes with a perforated bottom in a ventilated hall at a temperature of 20°C. During storage, the cones are raked, and as they desiccate, they partially disintegrate into scales, seeds and stems. The material is then crushed and separated in a fir seed drum sifter. This process can be mechanized. Since the 1990s, a "Tiber" device with a high degree of mechaniza-

tion is used to crush cones (separate the seeds from the scales and stems), de-wing and separate the fir seeds in the Italian state forests in Dagona di Peri near Verona and in the seed extraction facility in Laufen in the Teisendorf forest district in south-eastern Bavaria (Suszka 2000). Currently in Poland, no extraction process is performed (lowering the water content of the fir cones) under controlled temperature and humidity conditions, so the process of drying each batch is not repeatable. Extracting the seeds from fir cones could be done using the cabinets or drying chambers located in almost every extraction facility. In order to obtain good quality fir seeds, one needs to know the construction of the cones (Aniszewska et al. 2017) as well as the parameters of the extraction process.

The aim of most studies on Scots pine, European spruce or European larch was to look for the methods of convection drying of cones that would be of the shortest possible duration and maintain good viability of seeds. The literature on fir cone seed extraction, however, does not sufficiently describe the process and the factors controlling it. So far, the dynamics of changes in the water content of fir cones during the extraction process has not been described. Therefore, we do not know the factors determining the course of these changes, nor the water content of cones at the moment they open. One of the ways to find the optimal conditions for the extraction process could be to develop a mathematical model describing the change in cone water content over time depending on its parameters and the temperature of the drying air. Part of such a model is to develop a description of the variability of cones.

During the research, an attempt was made to determine the variability of cones based on a determination of their shape. This allowed us to develop a detailed model of the surface area and volume of closed fir cones, which was reported by Aniszewska and Błuszkowska (2016), and to describe the process of their desiccation in a laboratory dryer with forced air circulation. The development of the model allows the change in the water content of the cones to be predicted, depending on their size, initial water content, drying temperature, and above all, allows the time to be determined when the cones will open and the seeds will separate from the scales and the stem.

Knowledge of the described parameters and the characteristics of the changes occurring during the extraction process will optimize and standardize the conditions of the process, taking into account the properties of the tested material in commercial extraction facilities.

## Materials and methods

The study used fresh silver fir cones collected in a commercial seed stand in the Ciepeliów township from the Zwoleń Forest Inspectorate (Regional Directorate of State Forests in Radom), from the J60 region of provenance of basic forest material.

Photographs were taken of 120 randomly selected cones (of  $3888 \times 2126$  in size at 300 dpi) and transferred to the Multiscan v. 18 program, which was used to measure length and thickness, that is, the largest diameter of the cone, as well as the diameter of 60 cones taken sequentially in increments of 10 mm, with an accuracy of 0.5 mm. Measuring points were marked manually after scaling the images and applying a  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  grid. No additional morphological transformations of the image were used, the automatic option was chosen. On the basis of the measurement of length and diameter, the area of the outer surface and the volume of each cone were calculated. The shape of closed cones has been approximated using solids of revolution. The equation of the generating function of outer surface was determined. The distance between the position of the cross-section and the base of the cone was assumed to be the zero point of the coordinate system (Aniszewska 2001). The coordinate positions of the cross-section and the radius determined for each cone were the basis for approximating the equation describing the generating function of outer surface.

For the studied batch, the general equation calculating the shape of a cone or stem is:

$$y = As(t)x^4 + Bs(t)x^3 + Cs(t)x^2 + Ds(t)x + Es(t) \quad (1)$$

where:

$x \in (0, h)$ ,

$As(t), Bs(t), Cs(t), Ds(t), Es(t)$  – coefficients of the polynomial shape of the cone ( $s$ ) or stem ( $t$ ).

The shape function  $y=f(x)$  is continuous and non-negative over the entire cone length ( $h_s$ ), so the surface area ( $Ss_{obl}$ ) can be calculated using the equation:

$$Ss_{obl} = 2 \cdot \pi \int_a^b y \, dL = 2 \cdot \pi \int_0^h y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \, dx \quad (2)$$

where:

$a, b$  – boundaries,

$dL$  – curve of shape differential.

Because the base areas of this solid are small, it was assumed that the lateral surface area of the shape is equal to the external surface area of the cone.

Cone volume ( $Vs_{obl}$ ) is determined by the equation (3):

$$Vs_{obl} = \pi \int_0^h y^2 \, dx \quad (3)$$

After extracting the study material using the method described above, the surface area  $St_{obl}$  and the volume  $Vt_{obl}$  of cone stems were also calculated (Aniszewska, Błuszkowska 2016).

The outer surface and the volume of the cones were also calculated by a second method, using the commonly known models for lateral surface area and volume of a cylinder ( $Ss_w, Vs_w$ ). In order to compare the calculated values of volume

and surface area, indicators of convergence were introduced:  $ks_1 = Vs_{obl} / Vs_w, ks_2 = Ss_{obl} / Ss_w$ . To apply the model of a cylinder in calculating the volume of a given cone, treating cone volume and surface area calculated from the formed curve as actual volume (Aniszewska, Błuszkowska 2016), the obtained values should be multiplied by  $ks_1$  and  $ks_2$  indicators. Similarly, to apply the model of a cylinder to calculate the surface area ( $St_w$ ) and volume ( $Vt_w$ ) of a stem, the obtained values should be multiplied by  $kt_2$  and  $kt_1$ . A statistical description made using the Statistica 10 program (StatSoft Inc. 2011) was used for the analysis of external parameters. The mean surface area and volume were compared using the t-test and F analysis of variance, while the equality of variance (Levene test) and convergence with the normal distribution were also tested. The Shapiro-Wilk test was used to test the normality of the distribution of dependent characteristics. All analyses as a significance level of 0.05.

To measure the initial weight and dry mass of cones, a WPS 600 laboratory scale with an accuracy of up to 0.01 g was used. The dry mass of the material was determined after the end of the extraction process, by drying the cone (scales and stems) without seeds using the drying-weighing method applied for wood, at a temperature of  $103^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ , until a constant mass is established (Kubiak, Laurow 1994). The study determined the number of scales ( $l$ ) on the cone, their mass and number ( $N$ ) and the mass of seeds, stems and the density of closed cones  $\rho_s$  (as the ratio of initial cone mass to its volume  $Vs_{obl}$ ) and stems  $\rho_t$  (as the ratio of stem mass to  $Vt_{obl}$ ).

60 randomly selected cones were dried in a Heraus UT 6120 laboratory dryer with forced air circulation, ensuring the maintenance of a constant temperature. Initially, the cones were dried for 5 hours at a temperature of  $25^\circ \text{C}$  and then at  $35^\circ \text{C}$ , with air humidity decreasing from 53% to 10%. During the drying process, individual cones were on the grates inside the dryer. The decrease in mass as well as the air temperature and humidity inside the dryer were recorded at intervals of initially every 60 min ( $\pm 5$  min), and then, every 120 min, with a break at night of about 8 hours. Air temperature was measured within an accuracy of  $0.01^\circ \text{C}$ , and humidity – 0.01% using an FTH 100 (Qeo FENNEL) meter.

During the extraction process, cone mass  $m_i$  was measured at given intervals, which – after determining the dry weight of the material  $m_s$  – allowed us to determine their water content  $u_i$  at that point in time (also known as cone moisture content) as the ratio of water mass  $m_{H_2O}$  to dry cone mass  $m_{ss}$ . To describe the changes in water content of the cones during their extraction process in the dryer, an exponential equation was assumed, describing, in accordance with the first hypothesis, the second period of drying the solid matter:

$$u = (u_o - u_k) \cdot \exp(-b \cdot \tau) + u_k \quad (4)$$

where:

$u_o$  – initial amount of water,

$u_k$  – final amount of water,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ ,

$\tau$  – time, h,

$b$  – cone characteristic indicator,  $1 \cdot \text{h}^{-1}$ ,

$\exp$  – basis for the natural logarithm ( $e=2.718$ ).

The value of coefficient  $b$  (Aniszewska 2008, 2012) was determined for each cone based on the actual course of changes in water content using the following formula:

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{u_i - u_k}{u_o - u_k}}{\tau_i} \quad (5)$$

where:

$n$  – number of readings of cone mass  $m_i$ ,

$\tau_i$  – time of extraction process.

Such an averaged coefficient  $b$  was assumed as the characteristic parameter of the mathematical model of the process of change in cone water content. The study investigated the dependence of this coefficient on the size parameters (length and thickness) of the cone.

Characteristic parameters of the mathematical model are also the initial water content of the cone  $u_o$  and its final water content  $u_k$  recorded during the extraction process. Their values are influenced by the assumed conditions of the implemented extraction process. The  $u_o$  value can change by subjecting the cone to pre-drying, while the  $u_k$  value depends on the drying conditions.

The drying rate (decrease of cone water content relative to time) was calculated as a derivative of the time the water content  $u_i$  was measured:

$$\frac{du}{d\tau} = -b \cdot (u_o - u_k) \cdot \exp(-b \cdot \tau) \quad (6)$$

The changes in cone water content recorded during the study were described by mathematical equations, and their adequacy was verified by statistical methods. Functional dependencies were the basis for analyzing the influence of the size parameters of a cone on the course of extraction process and the time it took the cones to open.

To check the assumed conditions for seed extraction, an assessment of their viability (germination rate and energy content) was performed according to the standards of BN-76/9211-02 and Załęski et al. (2006). Fir seeds were sown on tissue paper in a Jacobsen's germinator, repeated three times with 100 pieces each and kept at a variable temperature in the range of 20–30°C, after an earlier 21-day cooling period at 3–5°C. Observations of the energy content of germination were made after 14 days, and germination viability after 28 days from sowing.

## 3. Results

### 3.1. Characteristic parameters of the cones

The length ( $h$ ) of the 120 fir cones studied was in the range of 12.40 to 19.70 cm, with an average of 15.96 cm (standard deviation  $\pm 1.66$  cm), and their thickness ( $d$ ) was from 2.90 cm to 5.07 cm, with an average of 3.93 cm ( $\pm 0.42$  cm). The statistical analysis for the tested batch indicated a significant weak linear relationship between the thickness and length of the cones (7).

$$d_s = 3.048 + 0.0554 \cdot h_s \quad R=0.218 \quad (7)$$

Table 1 lists the values of length ( $h_s$ ) and thickness ( $d_s$ ) of the 60 fir cones studied in detail. The length of the cones was in the range of 12.93 to 19.25 cm, with an average of 15.97 cm (standard deviation  $\pm 1.46$  cm), and the thickness from 3.75 cm to 5.07 cm, with an average of 4.34 ( $\pm 0.39$ ) cm.

The mass of closed fresh cones was an average of 109.73 g ( $\pm 23.72$  g) and ranged from 71.65 to 158.62 g (Table 1). The average initial water content of the cones was 112%, and their density was from 0.52  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  to 0.73  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , with an average of 0.63  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  ( $\pm 0.06 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

The cone stems obtained after the extraction process were on average 14.88 cm ( $\pm 1.42$ ) cm long and the thickness measured in the middle of the length was 0.64 cm ( $\pm 0.06$  cm), with the maximum thickness at the cone stalk – an average of 1.11 cm ( $\pm 0.21$  cm) (Table 2). There was no significant linear relationship between the length and thickness of the stem. Average stem density was 0.44  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  and was 0.19  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  lower than the density calculated for a closed cone.

### 3.2. Surface area and volume of closed cones and stems

A fourth degree polynomial was selected as an expression that reproduces the shape of cones well. This choice is justified by the high coefficient of determination, which ranged from 0.959 to 0.997, with an average of 0.981. The third degree polynomial showed a significantly lower coefficient, and the fifth one was comparable to the fourth degree (no significant difference).

The average (together with standard deviation), minimum and maximum values of the coefficients from  $As$  ( $At$ ) to  $Es$  ( $Et$ ) are provided in Tables 3 and 4. An example of the course of changes in the forming of the curve for cones and stems is shown in Figure 1, and below is their mathematical description (8) and (9).

Cone:

$$r_s = -0.00029 \cdot h_s^4 + 0.01031 \cdot h_s^3 - 0.12944 \cdot h_s^2 + 0.64571 \cdot h_s + 1.21638 \quad (8)$$

$$R = 0.993$$

**Table 1.** Parameters characterizing fir cones

Data	Mean	Min	Max	Range	Variance	Std. deviation	Coefficient of variation	Std. error	Skewness	Kurtosis
Length $h_s$ [cm]	15.97	12.93	19.25	6.31	2.12	1.46	9.11	0.27	0.26	-0.15
Thickness max $d_s$ [cm]	4.34	3.75	5.07	1.32	0.15	0.39	8.93	0.07	0.07	-1.17
Initial weight $m_{ss}$ [g]	109.73	71.65	158.62	86.97	562.80	23.72	21.62	0.58	-0.62	109.73
Density $\delta_s$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	0.63	0.52	0.73	0.20	0.00	0.06	9.23	0.20	-0.91	0.63
Number of scales $l$	184.13	140.00	229.00	89.00	406.33	20.16	10.95	0.44	0.45	184.13
Number of seeds $n$	268	195	357	170	1965.95	44	16.52	8.10	0.44	-0.37

**Table 2.** Parameters characterizing the stem of fir cones

Data	Mean	Min	Max	Range	Variance	Std. deviation	Coefficient of variation	Std. error	Skewness	Kurtosis
Length $h_t$ [cm]	14.88	11.14	17.33	6.19	2.01	1.42	10.21	0.26	0.49	-0.11
Thickness $d_t$ [cm]	0.64	0.48	0.72	0.24	0.004	0.06	9.84	0.01	-0.85	0.38
Thicknes [cm]	1.11	0.75	1.53	0.78	0.04	0.21	18.17	0.034	0.67	-0.18
Dry weight $m_t$ [g]	1.94	1.19	3.27	2.08	0.20	0.44	22.71	0.08	1.33	3.35
Density $\delta_t$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	0.44	0.28	0.78	0.50	0.01	0.10	21.86	0.02	1.51	4.56

Stem:

$$r_t = 0.00007 \cdot h_t^4 - 0.00288 \cdot h_t^3 + 0.03839 \cdot h_t^2 - 0.20675 \cdot h_t + 0.70108$$

$$R = 0.967 \quad (9)$$

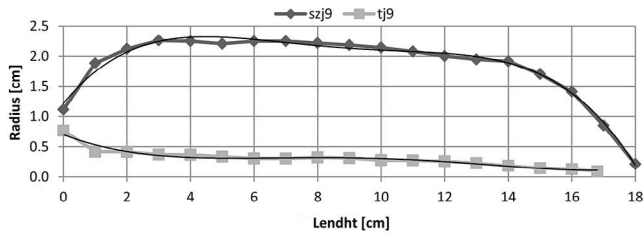
The determined equations forming individual cones allowed us to calculate the surface area  $S_{s_{obl}}$  and the volume  $V_{s_{obl}}$  (Table 3).

The high variability of the  $As$ ,  $Bs$ ,  $Cs$  and  $Es$  coefficients for individual cones means that despite a significant dependence for length, it is not possible to practically apply the equation to

calculate the volume and surface area of any one fir cone when only its basic size parameters are known. The  $Es$  coefficient did not exhibit a significant dependence on cone length, which was confirmed by Aniszewska and Błuszkowska (2016).

A statistical assessment of the coefficients of regression of the equations describing the shape of the stem  $At-Etd$  did not show any significant dependence between stem length and thickness.

The values of cone's surface area ( $S_{s_{obl}}$ ) calculated from equation 2 ranged from 134.18 cm<sup>2</sup> to 242.89 cm<sup>2</sup>, with an average of 180.30 cm<sup>2</sup> ( $\pm 24.01$  cm<sup>2</sup>), while the volume ( $V_{s_{obl}}$ ) cal-



**Figure 1.** Graph of an exemplary generatrix of fir cone and cone stem

culated according to equation 3 was from 108.77 cm<sup>3</sup> to 258.99 cm<sup>3</sup>, with an average of 175.70 cm<sup>3</sup>(±35.98cm<sup>3</sup>) (Table 3).

The values of cone’s surface area ( $S_{s_w}$ ) calculated according to the equations for the cylinder were from 158.86 cm<sup>2</sup> to 268.79 cm<sup>2</sup>, with an average of 217.13 cm<sup>2</sup>(±26.56 cm<sup>2</sup>), and the volume ( $V_{s_w}$ ) was from 155.23 cm<sup>3</sup> to 311.41 cm<sup>3</sup>, with an average of 236.67 cm<sup>3</sup>(±45.07 cm<sup>3</sup>) (Table 3).

The cone indicator 1  $ks_1$  value ranged from 0.65 to 0.89 with an average of 0.74 (±0.05), and cone indicator 2  $ks_2$

ranged from 0.65 to 0.93, with an average of 0.83 (±0.05). The use of averaged  $ks_1$  and  $ks_2$  indicators to calculate the volume and surface area of fir cones showed no significant differences between the values of  $V_{s_{obl}}$  and  $S_{s_{obl}}$ , which was confirmed by the t-test for dependent samples ( $p=0.817$  and  $p=0.970$ ) and the analysis of variance ( $p=0.950$ ;  $F=0.0039$  and  $p=0.989$ ,  $F=0.0002$ ).

The values of the surface area of the stem ( $St_{obl}$ ) calculated from equation 2 were from 17.61 cm<sup>2</sup> to 36.02 cm<sup>2</sup>, with an average of 26.46 cm<sup>2</sup> (± 4.66cm<sup>2</sup>) and the volume ( $Vt_{obl}$ ), according to equation 3 was from 2.40 cm<sup>3</sup> to 6.92 cm<sup>3</sup>, with an average of 4.51 cm<sup>3</sup>(± 1.11cm<sup>3</sup>) (Table 4). Using the similarity of the stem to the form of a cylinder, the average surface area is 27.81 cm<sup>2</sup> and the volume is 4.48 cm<sup>3</sup>. The t-test for dependent samples showed significant differences between  $St_{obl}$  and  $St_w$  ( $p = 0.043$ ), but indicated no differences between  $Vt_{obl}$  and  $Vt_w$  ( $p=0.855$ ). The stem constitutes an average of 2.59% (±0.52%) of the volume of a closed cone, it is shorter than the cone by an average of 1.09 (±0.51) cm and constitutes 3.87% (±0.67%) of its dry mass.

**Table 3.** Basic statistical values of polynomial, volume, surface area and indicators of cones

Data	Mean	Min	Max	Range	Variance	Std. deviation	Coefficient of variation	Std. error	Skewness	Kurtosis
$A_s$	-0.0006	-0.0013	-0.0003	0.0010	0	0.00023	-40.26	0.000042	-0.67	0.86
$B_s$	0.0182	0.0092	0.0325	0.0233	0	0.00586	32.17	0.001069	0.17	-0.46
$C_s$	-0.2082	-0.2996	-0.1239	0.1757	0.0030	0.05124	-24.61	0.009355	0.20	-1.17
$D_s$	0.9728	0.6457	1.2831	0.6374	0.0310	0.17577	18.07	0.032091	-0.11	-0.96
$E_s$	0.5998	0.3356	1.2164	0.8808	0.0290	0.17085	28.48	0.031193	1.88	5.17
Volume $V_{s_{obl}}$ [cm <sup>3</sup> ]	175.70	108.77	258.99	150.22	1294.73	35.98	20.48	6.57	0.29	-0.23
Surface area $S_{s_{obl}}$ [cm <sup>2</sup> ]	180.30	134.18	242.89	108.70	576.48	24.01	13.32	4.38	0.46	0.72
Volume $V_{s_w}$ [cm <sup>3</sup> ]	236.67	155.23	311.41	156.18	2030.97	45.07	19.04	8.23	0.02	-0.95
Surface area $S_{s_w}$ [cm <sup>2</sup> ]	217.13	158.86	268.79	109.93	705.59	26.56	12.23	4.85	-0.11	-0.11
Indicator $ks_1$	0.74	0.65	0.89	0.24	0.00	0.05	7.36	0.01	0.69	0.51
Indicator $ks_2$	0.83	0.65	0.93	0.29	0.00	0.05	6.10	0.01	-1.40	5.50

### 3.3. The extraction process of fir cones, extracting and evaluating the seeds

The total time of the extraction process of cones was 35 hours. The drying temperature was a maximum of 35°C, and the humidity inside the dryer decreased from 53% to 10%.

Figure 2 shows the change in water content and drying speed (dynamics) over time for a selected cone. The mathematical description of the course of the process is represented by the equations for water content ( $u$ ) and drying speed ( $du \cdot d\tau^{-1}$ ) of the cones over time, depicted in equations 4 and 6. An example of a model equation of  $u$  for a selected cone is provided below:

$$u = 1.038 \cdot e^{-0.080 \cdot \tau} + 0.084;$$

$$(dla u_o = 1.122 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}, u_k = 0.084 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1},$$

$$b = 0.080 \text{ 1} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (10)$$

$$du \cdot d\tau^{-1} = -0.083 \cdot e^{-0.080 \cdot \tau}; \quad (11)$$

and the linear form of the equation of the drying rate of the water content in a cone is:

$$du \cdot d\tau^{-1} = -0.080 \cdot (u - 0.084) \quad (12)$$

Table 5 presents the average, minimum and maximum values of specific parameters of the equations. The fir cones had an average initial water content of 1.127  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$  and a final content, according to the model, of 0.115  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ . Coefficient  $b$  was an average of 0.065  $\text{1} \cdot \text{h}^{-1}$ . A linear re-

lationship between coefficient  $b$  and cone thickness was determined ( $R=0.441$ ), but none was found between this coefficient and length. When selecting cones with similar properties of mass exchange, the thickness of cones should be used for their selection as a more reliable parameter than length, as it influences changes in coefficient  $b$ . We noticed that the higher the coefficient  $b$  value, the faster was the drying process (cones more intensely reduced their water content).

In most cases, the final actual water content did not equal the final model water content, the difference between them was at an average of 11% ( $\pm 5.6\%$ ). The t-test showed a significant difference between these two values ( $p < 0.05$ ).

Statistica 10 proposed another exponential equation (13) for the actual values of change in water content during drying (13). A graph describing the equation is provided in Figure 2a.

$$u = 1.187 \cdot e^{(-0.075 \cdot \tau)} \quad (13)$$

A significant linear relationship was established between the final  $u_k$  and initial  $u_o$  water content. When assessing the range of changes in cone water content for the entire process, that is, the difference between the initial and final content, we found that the highest percentage of cones (63.3%) ranged from 0.900 to 1.100  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ .

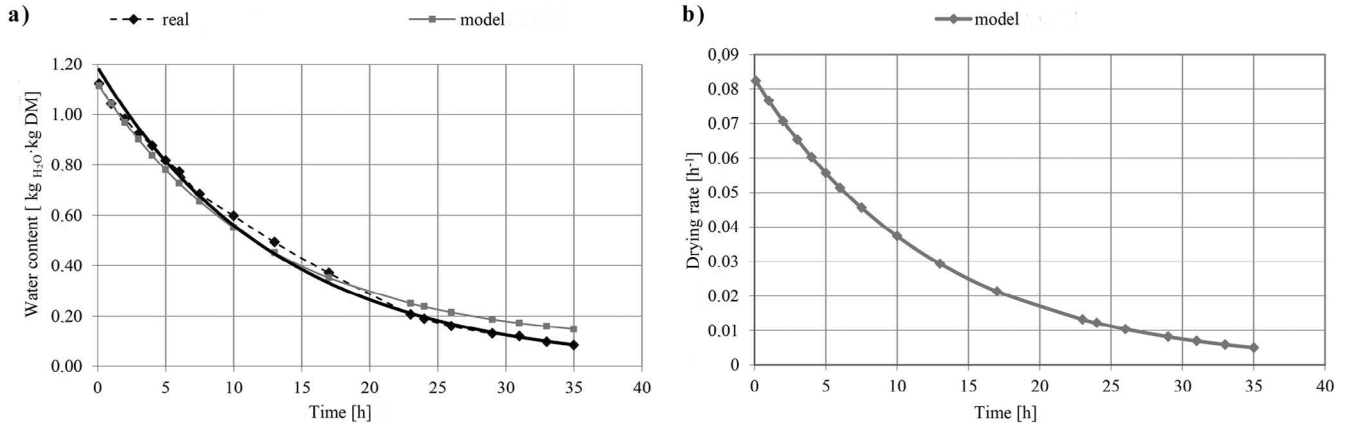
Figure 3 shows the change in water content during cone drying with an initial water content of 0.872 and 1.325  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$  and a final content of 0.049 and 0.185  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ .

**Table 4.** Basic statistical values of polynomial, volume, surface area and indicators of cone stems

Data	Mean	Min	Max	Range	Variance	Std. deviation	Coefficient of variation	Std. error	Skewness	Kurtosis
At	0.0001	-0.0002	0.0002	0.0004	0	0.0001	142.41	0.000014	-1.40	4.30
Bt	-0.0020	-0.0052	0.0054	0.0106	0	0.0022	-110.33	0.000395	1.22	3.28
Ct	0.0225	-0.0435	0.0535	0.0970	0	0.0206	91.78	0.003767	-0.96	2.04
Dt	-0.1102	-0.2350	0.1016	0.3367	0.006	0.0774	-70.21	0.014128	0.45	0.34
Et	0.5293	0.3708	0.7547	0.3839	0.009	0.0955	18.04	0.017436	0.67	-0.15
$Vt_{obl}$ [cm <sup>3</sup> ]	4.51	2.40	6.92	4.53	1.23	1.11	24.62	0.20	0.13	-0.30
$St_{obl}$ [cm <sup>2</sup> ]	26.46	17.61	36.02	18.40	21.72	4.66	17.62	0.85	0.11	-0.09
$Vt_w$ [cm <sup>3</sup> ]	4.48	2.25	5.75	3.50	0.80	0.89	19.96	0.16	-0.79	-0.06
$St_w$ [cm <sup>2</sup> ]	27.81	18.74	35.39	16.64	13.82	3.72	13.37	0.69	-0.53	0.42
$kt_1$	1.02	0.68	1.52	0.83	0.05	0.22	21.63	0.04	0.72	-0.21
$kt_2$	0.95	0.73	1.20	0.47	0.02	0.12	12.89	0.02	0.45	-0.26

respectively, as well as a coefficient  $b$  equal to  $0.084 \text{ h}^{-1}$  and  $0.075 \text{ h}^{-1}$ . During 35 h, enough time to obtain seeds, cone water content decreased by about 80% for the first drying curve (water content –  $0.08 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$ ) and by 115% for the second curve ( $1.15 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m}}^{-1}$ ). Cone drying speed, or the loss of water from cones, was decreasing from the beginning, which is characteristic of the so-called second drying period of solids as described in the literature (Pabis 1982).

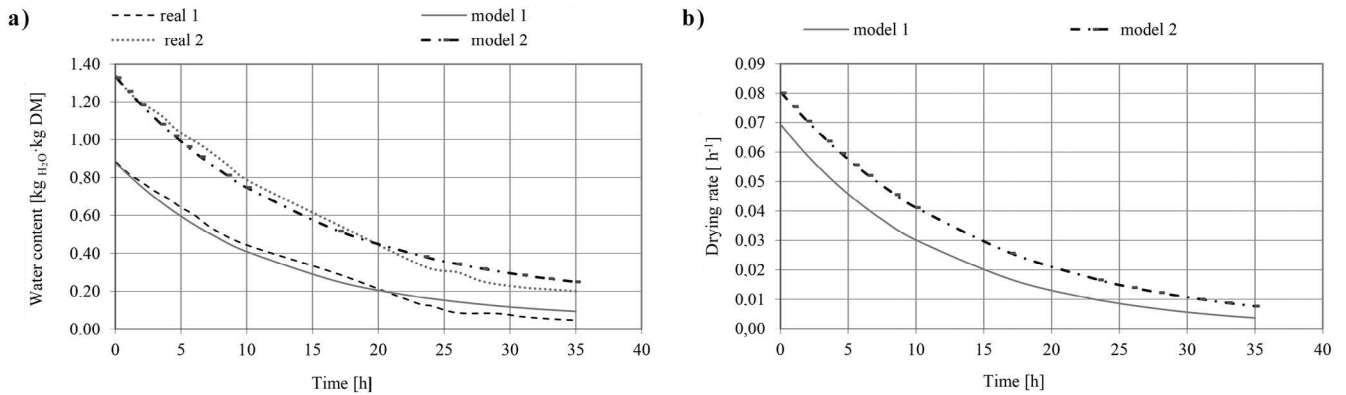
After the extraction process, the cones disintegrated into scales, seeds and stems. The number of scales in a cone was from 140 to 229, with an average of  $184 (\pm 20.15)$ , and the number of seeds was an average of  $268 (\pm 44)$  (Table 1). A significant linear relationship was found between the number of scales and the number of seeds obtained ( $R = 0.750$ ). The weight of harvested seeds from a cone was an average of 16.6 g, which shows that the weight of 1000 seeds is an average of 62 g.



**Figure 2.** Graphs: a – change in water content over time for selected cones (real, model, exponential), b – speed (dynamics) of drying

**Table 5.** Basic statistical values of the parameters of the equation for changing of the water content and the drying rate

Data	Mean	Min	Max	Range	Variance	Std. deviation	Coefficient of variation	Std. error	Skewness	Kurtosis
$u_o$	1.127	0.869	1.338	0.470	0.017	0.131	11.605	0.024	-0.221	-0.319
$u_k$	0.115	0.036	0.248	0.232	0.003	0.053	46.178	0.097	0.327	0.019
$b$	0.065	0.040	0.100	0.060	0.000	0.015	22.283	0.003	0.612	-0.300



**Figure 3.** Graphs: a – water content in time for cones with different water content (1 – street, 2 – smaller), real and modeled, b – drying rate

The evaluation of seed quality showed that after the drying process, 32% of the fir seeds germinated after 28 days, of which 21% germinated within 14 days of sowing. According to the standards, fir seeds are categorized to the first quality class when they reach 61% to 80% germination. The obtained result indicates that the tested seeds cannot be categorized to the first quality class. Therefore, in order to check the impact of the proposed extraction process on fir cones and the seeds obtained from them, a control test was conducted to assess the viability of the seeds obtained from cones not dried in the dryer. Similar viability results were obtained, as only 35% of seeds germinated within 28 days.

#### 4. Discussion

When comparing the results of the external parameters of the studied fir cones, we noted that they are within the ranges found by other authors. They most resembled the parameters of fir cones from Romania (Nanu 1977), which had a length of 7.0 to 19.5 cm, and a thickness of 2.9 to 4.6 cm. Similar results were also reported by Kočiová (1974), describing cones from Slovakia. In turn, the results of the mass of 1000 fir seeds exceeded the values described by Antosiewicz (1970), which averaged about 12 g.

Knowing the length and thickness of cones allows you to calculate the surface area and volume of closed cones. The proposed model, in the form of a fourth degree polynomial, served only to describe the shape of the cone and to calculate the surface area and volume of specific cones. An attempt to apply this polynomial to other cones from the batch, using the average values of the equation coefficients  $A_s$ ,  $B_s$ ,  $C_s$ ,  $D_s$ ,  $E_s$ , did not succeed because the results were significantly inflated. The second proposed method of calculating the surface area and volume of a fir cone based on the shape of a cylinder proved to be more useful. It is easily applied to cones from other batches by appropriately determining the coefficients (for the studied batch of cones, this was 0.74 for volume and 0.83 for surface area). In addition, it was determined that the pine cone stem constitutes approximately 2.6% of the volume of the cone, and its mass constitutes approx. 4% of the weight of a dry cone.

Similar research conducted for other provenances of silver fir or other species, that is, Scots pine and Norway spruce, determined the method of calculating surface area and volume using the shape of a cone (Gawart, Miklaszewicz 2000; Aniszewska 2001; Aniszewska, Błuszkowska 2016); however, a cylindrical shape provides better results.

The studied values of surface area and volume as well as the described changes in water content and drying speed curves can be used to develop and program thermal extraction processes in drying cabinets for commercial purposes in order to obtain good quality seeds.

The proposed conditions inside the drying chamber, that is, an air temperature of up to 35°C and the humidity in the last phase of drying of up to 10%, allow viable seeds to be obtained, as evidenced by the seed germination test. However, it is advisable to additionally check the quality of seeds using other methods, for example, cutting or dyeing the embryos in a tetryzoline solution. Fir seeds are very sensitive to changes in temperature and water content during extraction, preparation for storage and actual storage (Załęski et al. 2009). According to the information obtained from Stacja Oceny Nasion (Seed Quality Assessment Laboratory) in Sękocin, the seeds found to have high viability (up to 20%) by using the tetryzoline solution dyeing test often germinated at only a few percent in the germination test. According to Załęski (1995), the average viability of silver fir seeds in Poland, determined by the slicing test, is 43.3%. The low seed viability obtained may relate to the physical state and biochemical composition of the seeds themselves (Aniško et al. 2001), which in turn are affected by the stage of their maturity and atmospheric conditions prevailing at the time the seeds were forming and developing.

The research presented on the size parameters, mass, drying process, including changes in water content and quality assessment, can be treated as a pilot. Its results should be confirmed by conducting experiments on cones from various provenances and harvesting years.

#### 5. Conclusions

The shape of a silver fir cone is accurately described by a curve that is a fourth degree polynomial. However, due to the large differences in the averaged values of the polynomial and the actual values of cones, this description cannot be used to calculate the volume and surface area of any given cone, despite the significant dependence between the cone length and thickness (except for coefficient  $D$ ).

The shape of a cylinder may be used as a general calculation model describing the surface area and volume of silver fir cones. The volume values calculated using the equation for a cylinder should be multiplied for the tested batch of cones by a constant value of 0.74, and in the case of a surface area, by 0.83. Small changes in the size of these coefficients can be expected for other batches of cones.

The change in cone mass during the seed extraction process as a function of time is described by an exponential equation, in which the parameters are initial cone water content – an average of  $1.127 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$ , final water content –  $0.115 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{kg}_{\text{s.m.}}^{-1}$  and power series coefficient  $b$  equal to  $0.065 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ .

The final water content depends on the initial water content of the cone, and its value increases as with increase in initial water content. Cone characteristic indicator  $b$  depends

on the thickness of the cone and decreases as the thickness of the cone increases, which can be described with a linear regression equation.

The seeds obtained in the studied extraction process at a drying temperature of up to 35°C and humidity down to 10% did not reach the first grade of seed quality. A control test for assessing the viability of seeds of the same provenance that were not subjected to the extraction process gave similar results. Therefore, the use of an automated fir cone seed extraction process at the studied temperature and humidity conditions cannot be rejected.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Acknowledgment and source of funding

The research was financed from the funds of the Faculty of Production Engineering of the Warsaw University of Life Sciences. The research was conducted in the laboratory of the Department of Forest Mechanization.

## References

- Aniszewska M. 2001. Zmienność podstawowych parametrów szyszki świerka. *Sylwan* 145(6):87–93.
- Aniszewska M. 2008. Charakterystyka wielofazowego procesu wyluszczenia nasion modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill. na przykładzie wyluszczeni gospodarczej w Czarnej Białostockiej. *Leśne Prace Badawcze* 69(2): 155–163.
- Aniszewska M. 2012. Porównanie procesu wyluszczenia nasion sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z szyszek całych i pozbawionych trzpienia. *Leśne Prace Badawcze* 73(1): 65–72. DOI 10.2478/v10111-012-0007-3.
- Aniszewska M., Błuszkowska U. 2016. Variability of silver fir (*Abies alba* Mill.) cones – variability of cone parameters. *Leśne Prace Badawcze* 77(3): 221–229. DOI 10.1515/frp-2016-0024.
- Aniszewska M., Gendek A., Śliwińska J. 2017. Variability of silver fir (*Abies alba* Mill.) cones – variability of scale surface area. *Leśne Prace Badawcze* 78(1): 5–13. DOI 10.1515/frp-2017-0001.
- Aniśko E., Witkowska O., Załęski A. 2001. Ustalenie wilgotności nasion przeznaczonych do przechowywania (wartości graniczne), szczególnie jodły, jaworu, brzozy, olszy czarnej, lipy, jesionu i innych. Sprawozdanie naukowe IBL, 39 s.
- Antosiewicz Z. 1970. Nasiennictwo, w: Poradnik Leśnika (red. Kamiński E). SITLiD, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa, 306–330.
- Ballain D., Čabaravdić A. 2005. Među populaciji skavarijabilnostnekih morfoloških svojstava obične jele (*Abies alba* Mill.) iz središnje Bosne. *Rad. Šumar. Inst.* 40(1): 5–18.
- Barzdajn W. 2009. Adaptacja różnych pochodzeń jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) do warunków Sudetów. *Leśne Prace Badawcze* 70(1): 49–58. DOI 10.2478/v10111-009-0005-2.
- Bednarek T. 2002. Zmienność osobnicza jodły (*Abies alba* Mill.) w lasach zarządzanych przez Regionalną Dyрекcyję Lasów Państwowych we Wrocławiu. *Zeszyty Naukowe AR im. H. Kollątaja w Krakowie* 339: 181–195.
- Bis R., Dobrowolska D. 2012. Występowanie jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w Puszczy Hżeckiej. *Leśne Prace Badawcze* 73(4): 273–282. DOI 10.2478/v10111-012-0020-6.
- Boratyński A. 1983. Systematyka i geograficzne rozmieszczenie jodły, w: Białobok S. (red.) Jodła pospolita (*Abies alba* Mill.). PWN, Warszawa–Poznań, 41–86. ISBN 83-01-04028-9.
- Boncaldo E., Bruno G., Sicoli G., Tommasi F., Mastropasqua L. 2010. Germinability and fungal occurrence in seeds of *Abies alba* Mill. populations in southern Italy. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 144(3): 740–745. DOI 10.1080/11263501003755549.
- Czernik Z. 1993. Badania właściwości geometrycznych nasion jodły. *Sylwan* 8: 57–64.
- Gawart B., Mikłaszewicz M. 2000. Modele matematyczne kształtu szyszek sosny i świerka. *Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej* 2: 20–22.
- Gudecki A. 1966. Morfologija na semeno i na šiarkite na elata (*Abies alba* Mill.) odnacionalniot park „Risnak”. *Godišen Zbornik na Zemjodelsko-Šumarskiot Fakultetna Univerzitetot – Skopje* 19: 187–215.
- Gunia S., Simak M. 1968. Effect of damaging resin vesicles in the seed coat on the germination of silver fir (*Abies alba* Mill.) seeds, in: Proceedings of the International Symposium on Seed Physiology of Woody Plants. Kórnik, Poland, Institute of Dendrology and Kórnik Arboretum, Polish Academy of Sciences, 79–83.
- LBGK. 2007. Instrukcja gromadzenia i przechowywania zasobów genowych. Leśny Bank Genów Kostrzyca.
- Illoul-Hachi M., Derridj A., Fady B. 2015. Efficiency of seed production and cone size of *Abies numidica* De Lannoy in the plantation in Algeria. *International Journal of Research in Applied, Natural and Social Sciences* 3(7): 9–16.
- Kobliha J., Škorpík P., Stejskal J., Češka P. 2014. Hybridization results using the hybrid *Abies cilicica* × *Abies cephalonica*. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus* 13(4): 23–31.
- Kočiová M. 1974. Dedivost plodov jedle bielej (*Abies alba* Mill.) na Slovensku. *Acta Musei Silesiae, Series Dendrologia (Opava)* 23: 171–179.
- Kubiak M., Laurow Z. 1994. Surowiec drzewny. Fundacja, Rozwój SGGW, Warszawa. ISBN 83-86241-33-0.
- Nanu N. 1977. Contributii la biometriaconurilor de brad (*Abies alba* Mill.). *Revista Pădurilor* 92(3): 140–147.
- Norma branżowa BN-76/9211-02, Leśnictwo, Wydawnictwa Normalizacyjne.
- Pabis J. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów. Warszawa. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, 228 s. ISBN 83-09-00597-0.
- Politi P. I., Georghiou K., Arianoutsou M. 2011. Reproductive biology of *Abies cephalonica* Loudon in Mount Aenos National Park, Cephalonia, Greece. *Trees* 25: 655–668. DOI 10.1007/s00468-011-0542-1.
- Statistica 10. 2011. Start Soft. www.statsoft.com.

- Sugiero D. 2005. Jodła pospolita (*Abies alba* Mill.) w drzewostanach zespołu żyznej buczyny karpackiej (*Dentarioglandulosa-e-Fagetum*). *Sylvan* 149(11): 42–49.
- Suszka B. 1983. Rozmnażanie generatywne, w: Białobok S.(red). Jodła pospolita *Abies alba* Mill. PWN, Warszawa–Poznań, 566 s. ISBN 83-01-04028-9.
- Suszka B. 2000. Nowe technologie i techniki w nasiennictwie leśnym. Bogucki Wydawnictwo Naukowe S.C.,Warszawa, 269 s. ISBN 83-88163-14-0.
- Szeliński H., Bolibok L., Buraczyk W., Drozdowski S. 2011. Characteristics of Silver fir (*Abies alba* Mill.) in a provenance trial in Rogów. *Leśne Prace Badawcze* 72(3): 225–231. DOI 10.2478/v10111-011-0022-9.
- Tracz M., Barzdajn W. 2007. The morphological traits of cones and seeds of *Abies alba* in Middle Sudeten. *Dendrobiology* 58: 59–65.
- Tyszkiewicz S. 1949. Nasiennictwo Leśne. Instytut Badawczy Leśnictwa, Seria D. 2. 358.
- Załęski A. (red) 1995. Nasiennictwo leśnych drzew i krzewów iglastych. Oficyna Edytorska Wydawnictwo Świat. Warszawa, 180 s. ISBN 83-85597-27-1.
- Załęski A., Aniśko E., Konratowicz W. 2009. Zawartość wody w podsuszonych nasionach drzew leśnych a wilgotność względna suszonego powietrza. *Leśne Prace Badawcze* 70(2): 151–160.
- Załęski A., Aniśko E., Kantorowicz W. 2006. Zasady oceny nasion w Lasach Państwowych, w: Elementy genetyki i hodowli selekcyjnej drzew leśnych (red. J.Sabor). CILP, Warszawa, 317–326. ISBN 83-88478-21-4.

### Authors' contribution

M.A.– concept, literature review, methods, measurements, developing the results, statistical analysis, conclusions, writing, correcting; J.B.– writing, measurements, correcting, W.Z. – translating, correcting.