

MARZENA NIEMCZYK, ARKADIUSZ BRUCHWALD

Wzory do określania pierśnicowej liczby kształtu mieszańców selekcyjnych topoli*

Equations for diameter at the breast height form factor of poplar and its hybrids

ABSTRACT

Niemczyk M., Bruchwald A. 2017. Wzory do określania pierśnicowej liczby kształtu mieszańców selekcyjnych topoli. Sylwan 161 (5): 413-421.

Knowledge of diameter at the breast height (DBH), tree height and form factor allows to estimate tree volume, which is one of the most important measures in forestry. The paper presents empirical equations for the determination of DBH form factor of different species and hybrids of *Populus* sp. The study was set up on short-rotation plantation in Wichrowo Forest District (northern Poland). Four poplar hybrids at the age of six were taken into account: *P. × generosa × P. trichocarpa*, *P. trichocarpa*, *P. maximowiczii × P. trichocarpa*, *Populus × canadensis*. In total, 427 trees were felled and individually measured in one meter sections. The estimation equations are based on the relationships between form factor and one or some independent variables derived from diameter at breast height and height. We used determination coefficient as a goodness-of-fit measure. In addition, standard error of estimates from this dataset was calculated. The standard error values varied from 5.8 to 6.6% depending on the formulae and *Populus* hybrids. The equations proposed in this paper enable the determination of the discussed form factor for varied poplar cultivars and can be treated as a regional equations.

KEY WORDS

Populus, form factor, empirical equations

ADDRESSES

Marzena Niemczyk ⁽¹⁾ – e-mail: M.Niemczyk@ibles.waw.pl

Arkadiusz Bruchwald ⁽²⁾ – e-mail: A.Bruchwald@ibles.waw.pl

⁽¹⁾ Zakład Hodowli Lasu i Genetyki Drzew Leśnych, Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

⁽²⁾ Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi, Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

Wstęp

Wzrost wykorzystania biomasy drzewnej jako jednego z najważniejszych komponentów wśród odnawialnych źródeł energii daje Polsce możliwość wypełnienia dyrektywy unijnej 2009/28/WE, w której nasz kraj zobowiązuje się do uzyskania w 2020 roku co najmniej 15% energii ze źródeł

*Powierzchnia doświadczalna została założona w ramach trójstronnego porozumienia pomiędzy Instytutem Badawczym Leśnictwa, International Paper Kwidziń Sp. z o.o. i Państwowym Gospodarstwem Leśnym Lasy Państwowe. Pomiary terenowe zrealizowano w ramach projektu BLP 425 „Określenie możliwości produkcyjnych drewna do celów energetycznych i papierniczych w plantacjach topolowych o krótkim i średnim cyklu rotacji” finansowanego przez Generalną Dyрекcję Lasów Państwowych.

odnawialnych. Co więcej, produkcja biomasy drzewnej jest neutralna dla bilansu atmosferycznego CO₂ [Ranney i in. 1991] i może przyczynić się do mniejszego wykorzystania w energetyce nieodnawialnych kopalin. Dla naszego kraju ma ona jeszcze większe znaczenie, ponieważ jej wykorzystanie nie generuje dużych kosztów związanych z budową nowych instalacji potrzebnych do wykorzystania innych odnawialnych źródeł energii, takich jak farmy wiatrowe czy instalacje do produkcji energii z modułów fotowoltaicznych. Podaż drewna energetycznego na rynku krajowym jest jednak minimalna, ponieważ przy znaczącym postępie technologii przerobu drewna sektor drzewny jest w stanie wykorzystać niemal całe drewno trafiające do sprzedaży. Trudno jest zatem zaspokoić wzrastający popyt rynku na drewno energetyczne bez odpowiedniego zaplecza, m.in. w postaci plantacji drzew szybko rosnących.

Wśród gatunków szybko rosnących najwartościowsza w warunkach europejskich jest topola, która ze względu na wysokie zdolności fotosyntetyczne i produkcyjne, przejawiające się już we wczesnej młodości, uważana jest za najwłaściwszy gatunek do produkcji biomasy [Pontailier i in. 1997]. W Europie na plantacjach energetycznych uprawia się niektóre gatunki topoli oraz jej mieszańce (uzyskane w drodze selekcji) należące do 2 sekcji: topoli czarnych (s. *Aigeiros*) i topoli balsamicznych (s. *Tacamahaca*). Tego typu plantacje mogą być prowadzone w cyklach krótkich – 2-6-letnich, bądź w średnich, w których główny plon uzyskuje się po 8-15 latach. W warunkach klimatycznych Polski lepsze rezultaty uzyskuje się na plantacjach, gdzie drzewa mają nieco wydłużony cykl produkcyjny w stosunku do klasycznych cykli krótkich stosowanych w krajach południowoeuropejskich, np. w Grecji, Francji czy we Włoszech [Armstrong i in. 1999; Nassi o Di Nasso i in. 2010; Niemczyk i in. 2016].

Do szacowania produktywności drzew w plantacjach o cyklach 2- lub 3-letnich najczęściej stosuje się bezpośredni pomiar plonu masy drzew w stanie świeżym bądź suchym [Verwijst 1991; Pontailier i in. 1997]. Dla drzew uprawianych w dłuższych cyklach produkcyjnych możliwe jest obliczenie miąższości opisywanej jako iloczyn powierzchni przekroju poprzecznego drzewa na wysokości 1,3 m, jego wysokości i liczby kształtu. W praktyce leśnictwa do określania miąższości drzewa stojącego (i drzewostanu) stosuje się wzory empiryczne [Bruchwald 2000; Bruchwald i in. 2010], które wyparły tablice miąższości, m.in. Grundnera-Schwappacha [1906] i Radwańskiego [1955, 1957, 1963, 1974]. W Polsce wzory empiryczne pierśnicowych liczb kształtu opracowane zostały dotychczas dla sosny [Bruchwald, Rymer-Dudzińska 1998], świerka [Bruchwald, Wróblewski 1993], jodły [Bruchwald 1992], dębu [Bruchwald i in. 1994], buka [Dudzińska 2002, 2003], olszy [Dudzińska, Bruchwald 2003] i brzozy [Tomusiak 2003]. Dla innych gatunków drzew: osiki, grabu, topoli i lipy, opracowano wzory tymczasowe, wykorzystując istniejące tablice miąższości [Wróblewski, Zasada 2001].

Wzory empiryczne są stosowane w praktyce leśnictwa. Komplet takich wzorów znajduje się w pakiecie informatycznym ACER, służącym do przetwarzania danych w planowaniu szacunków brakarskich [Kłapeć 2002], a także w programach komputerowych przetwarzających dane uzyskane w okresowej i wielkopowierzchniowej metodzie inwentaryzacji lasu [Bruchwald 2000; Bruchwald, Zajączkowski 2002]. Wzory te są również elementem modeli wzrostu, w których prognozowany jest m.in. rozwój zasobów drzewnych [Bruchwald 2001; Bruchwald i in. 2010].

Celem badań było opracowanie wzorów empirycznych pierśnicowych liczb kształtu dla różnych mieszańców topoli na plantacjach o skróconych cyklach produkcyjnych, z przeznaczeniem na cele energetyczne.

Materiał i metody

W badaniach wykorzystano 4 krzyżówki między- i wewnątrzgatunkowe topoli z sekcji topoli czarnych (s. *Aigeiros*) i topoli balsamicznych (s. *Tacamahaca*), które reprezentowane są w doświad-

czeniu przez 8 kultywarów (odmian uprawnych). Zestaw krzyżówek reprezentujących doświadczenie zawierał jeden kultywar będący mieszańcem międzysekcyjnym:

– *P. × generosa* (krzyżówka *P. deltooides* i *P. trichocarpa*) × *P. trichocarpa* ('AF-8');

oraz 7 klonów stanowiących mieszańce wewnątrzsekcyjne (w ramach sekcji *Tacamahaca* lub *Aigeiros*):

– *P. trichocarpa* × *P. trichocarpa*, sekcja *Tacamahaca* (odmiana 'Fritzi Pauley');

– *P. maximoowiczii* × *P. trichocarpa*, sekcja *Tacamahaca* (odmiana 'Hybrida 275');

– *Populus × canadensis*, sekcja *Aigeiros* (odmiany: 'AF-2', 'Albelo', 'Degrosso', 'Polargo', 'Koster').

Bliższe szczegóły związane z testowanymi odmianami oraz uzyskiwanymi przez nie charakterystykami wzrostowymi zostały opisane w pracy Niemczyk i in. [2016].

Badania oparto na materiale empirycznym zebranym na plantacji doświadczalnej Instytutu Badawczego Leśnictwa położonej w Nadleśnictwie Wichrowo, leśnictwie Miłogórze, w oddz. 206d oraz 206f. Powierzchnię doświadczalną założono w kwietniu 2010 roku na gruncie porolnym, na siedlisku lasu świeżego. Doświadczenie zaprojektowano w układzie bloków kompletnie losowych w trzech powtórzeniach. Na każdym poletku posadzono 100 sadzonek danej odmiany (klonu) topoli. Od strony północnej, zachodniej i południowej utworzono pasy izolacyjne z sadzonek topoli niebiorących udziału w doświadczeniu.

Po sześciu latach ścięto 20% drzew (przedwiosnie 2016 roku), po 20 na każdym poletku – proporcjonalnie do odmiany i bloku. Do określenia miąższości drzew zastosowano wzór sekcyjny, przyjmując jako długość sekcji 1 metr. Grubości w środku każdej sekcji zaokrąglano do 1 mm, wysokość do 1 cm. Zebrany materiał empiryczny pochodził łącznie z 427 drzew.

W pierwszym etapie prac obliczeniowych ustalono dla każdego drzewa pierśnicową liczbę kształtu strzały w korze, która jest ilorzem miąższości strzały i objętości walca zbudowanego na pierśnicy i wysokości drzewa. Otrzymane liczby kształtu wykorzystano jako zmienne zależne do opracowania wzorów empirycznych.

Przy budowie funkcji regresji w pierwszej kolejności oceniono związek korelacyjny między pierśnicową liczbą kształtu i pierśnicą (d) oraz wysokością (h) drzewa. Parametry równań regresji estymowano metodą najmniejszych kwadratów, która oparta jest na minimalizacji sumy kwadratów odchyłek wartości zmiennej zależnej ($f_{1,3}$) od wartości przewidywanych przez model.

Ocena dopasowania opracowanych modeli została przeprowadzona poprzez sporządzenie wykresu dopasowania funkcji do danych rzeczywistych, obliczenie udziału wariancji wyjaśnionej przez model R^2 (współczynnik determinacji) oraz współczynnika R , który jest miarą mocy korelacji. Inne zastosowane w pracy miary zgodności modelu z danymi empirycznymi opierały się na wariancji składnika losowego, którego punktem wyjścia są tzw. reszty modelu. Reszty, czyli różnicę pomiędzy wynikami obserwowanymi (y) a estymowanymi (\hat{y}) (wyznaczonymi na podstawie modelu regresji) dla i -tej obserwacji, wyrażono wzorem:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i, \text{ gdzie } i = 1, 2, \dots, n$$

Na tej podstawie obliczono błąd średni estymacji (ME) zgodnie ze wzorem:

$$ME = \frac{\sum y_i - \hat{y}_i}{n}$$

gdzie:

n – liczba obserwacji

oraz błąd standardowy estymacji nazywany także odchyleniem standardowym reszt:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k}}$$

gdzie:

k – szacowana liczba parametrów równania.

Błąd standardowy estymacji jest powszechnie stosowaną miarą zgodności modelu z danymi empirycznymi [Szymaszal i in. 2001; Wątroba 2011]. Na jego podstawie obliczono współczynnik zmienności, który wyrażono w procentach:

$$W = \frac{SE}{\bar{y}} \cdot 100 \%$$

Dodatkowo zweryfikowano dopasowanie modelu do danych, przeprowadzając analizę wariancji w regresji. Dla każdej funkcji określono istotność oszacowanych parametrów oraz ich błędy standardowe.

Wyniki

Dla poszczególnych mieszańców topoli obliczono średnie wartości pierśnicy, wysokości, miąższości i pierśnicowej liczby kształtu (tab. 1). Najwyższe wartości wymienionych cech, poza liczbą kształtu, uzyskano dla *P. trichocarpa*, najniższe zaś dla *P. generosa* × *P. trichocarpa*. Dla tej ostatniej krzyżówki otrzymano największą wartość pierśnicowej liczby kształtu.

Miąższość strzały (V [m^3]) określana jest funkcją, w której obok mierzalnych cech, tj. pierśnicy i wysokości drzewa, zawarta jest pierśnicowa liczba kształtu:

$$v = \frac{\pi}{40000} \cdot d^2 \cdot h \cdot f_{1,3}$$

gdzie:

d – pierśnica drzewa [cm],

h – wysokość [m],

$f_{1,3}$ – pierśnicowa liczba kształtu.

Z przekształcenia wzoru na miąższość otrzymuje się wzór na pierśnicową liczbę kształtu. Wzory empiryczne pierśnicowej liczby kształtu dla poszczególnych mieszańców topoli poszukiwano z zestawu następujących funkcji:

$$f_{1,3} = \frac{1}{1 + \frac{1}{b_0 + b_1 \cdot d}} \quad [1]$$

$$f_{1,3} = b_0 + \frac{b_1}{d} \quad [2]$$

$$f_{1,3} = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot \frac{h}{d} \quad [3]$$

$$f_{1,3} = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot h + b_2 \cdot \frac{h}{d} \quad [4]$$

Dla każdej funkcji oszacowano wartości parametrów oraz ich średnie błędy. Zbadano również istotność współczynników osobno dla poszczególnych krzyżówek topoli oraz łącznie dla wszystkich drzew, niezależnie od przynależności gatunkowej i sekcyjnej. Parametry równań zestawiono w tabelach 2-5. Wyniki analizy wariancji oraz wartości prawdopodobieństwa (p) dla każdego

Tabela 1.

Średnia (M), odchylenie standardowe (SD) i błąd średni (SE) pierśnicy (d), wysokości (h), miąższości (V) i pierśnicowej liczby kształtu ($f_{1,3}$) dla poszczególnych mieszańców topoli po 6-latach wzrostu na plantacji energetycznej

Mean (M), standard deviation (SD) and standard error (SE) of breast height diameter (d), height (h), volume (V) and breast height diameter form factor ($f_{1,3}$) for analysed poplar hybrids after six years of growth on plantation

	n	d [cm]			h [m]			V [m ³]			f _{1,3}		
		M	SD	SE	M	SD	SE	M	SD	SE	M	SD	SE
<i>P. generosa</i> × <i>P. trichocarpa</i>	36	9,21	1,516	0,253	9,33	0,627	0,105	0,0316	0,0111	0,0018	0,4945	0,0435	0,0073
<i>P. trichocarpa</i>	56	12,69	1,813	0,242	13,20	1,261	0,169	0,0739	0,0232	0,0031	0,4323	0,0357	0,0048
<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	60	12,63	2,105	0,272	12,12	1,685	0,218	0,0652	0,0234	0,0030	0,4140	0,0425	0,0055
<i>P. × canadensis</i>	275	10,91	2,196	0,132	10,53	1,256	0,076	0,0478	0,0207	0,0012	0,4616	0,0407	0,0025
Łącznie Total	427	11,24	2,302	0,111	11,01	1,683	0,081	0,0523	0,0238	0,0012	0,4538	0,0458	0,0022

Tabela 2.

Ocena dopasowania modelu [1], parametry i ich ocena dla poszczególnych mieszańców topoli

Goodness of fit measures as well as parameters and their assessment for equation [1] for analysed poplar hybrids

	R ²	R	ME	SE	W	Parametr	SE	p	
Łącznie Total	49,3	0,7019	0,00002	0,0311	6,8	b ₀	1,3616	0,0281	<0,0001
						b ₁	-0,0467	0,0022	<0,0001
<i>P. generosa</i> × <i>P. trichocarpa</i>	26,7	0,5166	0,00001	0,0378	7,6	b ₀	1,5060	0,1587	<0,0001
						b ₁	-0,0570	0,0149	0,0005
<i>P. trichocarpa</i>	22,2	0,4713	0,00000	0,0320	7,4	b ₀	1,1273	0,1027	<0,0001
						b ₁	-0,0289	0,0067	0,0001
<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	57,1	0,7554	0,00004	0,0281	6,8	b ₀	1,2878	0,0725	<0,0001
						b ₁	-0,0456	0,0054	<0,0001
<i>P. × canadensis</i>	42,5	0,6521	0,00002	0,0309	6,7	b ₀	1,3112	0,0337	<0,0001
						b ₁	-0,0412	0,0029	<0,0001

R² – współczynnik determinacji [%], R – współczynnik korelacji, ME – błąd średni, SE – błąd standardowy, W – współczynnik zmienności [%], p – prawdopodobieństwo w teście istotności

R² – coefficient of determination [%], R – correlation coefficient, ME – mean error, SE – standard error, W – coefficient of variability [%], p – significance test p-value

równania regresji w każdym przypadku wykazały bardzo dobre dopasowanie funkcji do danych empirycznych (p<0,0001).

Dopasowanie wzorów było zróżnicowane i zależne od klonu. Dla wszystkich drzew traktowanych łącznie najlepsze dopasowanie stwierdzono dla funkcji 3 i 4, choć w przypadku funkcji 4 jeden z parametrów (b₁) jest nieistotny na poziomie α=0,05, stąd zaleca się stosowanie wzoru 3, który dla wszystkich gatunków i mieszańców topoli przyjmuje postać:

$$f_{1,3} = 0,5608 - 0,0127 \cdot d + 0,0360 \cdot \frac{h}{d}$$

Dla klonu *P. generosa* × *P. trichocarpa*, reprezentowanego przez odmianę 'AF-8', największy procent wariacji tłumaczony jest również przez wzory 3 i 4, choć z uwagi na brak istotności parametrów oszacowanych dla funkcji 4 (α=0,05) dobrym rozwiązaniem jest stosowanie wzoru 3, przyjmującego postać:

$$f_{1,3} = -0,2760 + 0,0239 \cdot d + 0,5335 \cdot \frac{h}{d}$$

Opracowane wzory charakteryzują się najniższym dopasowaniem dla *P. trichocarpa*, reprezentowanego na plantacji przez odmianę 'Fritzi Pauley'. Przeciętnie modele wyjaśniały zaledwie od 20,3 (funkcja 2) do 28% (funkcja 4) zmienności pierśnicowej liczby kształtu, co świadczy o raczej niskiej zdolności prognostycznej opracowanych funkcji tego mieszańca wewnątrzgatunkowego. Również obliczone współczynniki zmienności losowej były nieco większe w przypadku wspomnianej krzyżówki dla wszystkich opracowanych funkcji w porównaniu z innymi mieszańcami ocenianymi w doświadczeniu (7,2-7,5%). W przeciwieństwie do *P. trichocarpa* najlepsze charakterystyki dopasowania modelu opisującego pierśnicową liczbę kształtu stwierdzono dla najpopularniejszej w Polsce odmiany uprawowej topoli – 'Hybryda 275', będącej mieszańcem międzygatunkowym

Tabela 3.

Ocena dopasowania modelu [2], parametry i ich ocena dla poszczególnych mieszańców topoli
Goodness of fit measures as well as parameters and their assessment for equation [2] for analysed poplar hybrids

	R ²	R	ME	SE	W	Parametr	SE	p	
Łącznie Total	49,4	0,7029	-0,0000	0,0303	6,7	b ₀	0,3208	0,0067	<0,0001
						b ₁	1,4239	0,0699	<0,0001
<i>P. generosa</i> × <i>P. trichocarpa</i>	28,2	0,5313	0,0000	0,0374	7,6	b ₀	0,3546	0,0388	<0,0001
						b ₁	1,2541	0,3429	0,0009
<i>P. trichocarpa</i>	20,3	0,4502	-0,0000	0,0324	7,5	b ₀	0,3409	0,0249	<0,0001
						b ₁	1,1235	0,3033	0,0005
<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	68,4	0,8271	0,0000	0,0241	5,8	b ₀	0,2525	0,0148	<0,0001
						b ₁	1,9705	0,1759	<0,0001
<i>P.</i> × <i>canadensis</i>	44,1	0,6643	-0,0000	0,0305	6,6	b ₀	0,3489	0,0079	<0,0001
						b ₁	1,1727	0,0799	<0,0001

oznaczenia jak w tabeli 2; denotes as in table 2

Tabela 4.

Ocena dopasowania modelu [3], parametry i ich ocena dla poszczególnych mieszańców topoli
Goodness of fit measures as well as parameters and their assessment for equation [3] for analysed poplar hybrids

	R ²	R	ME	SE	W	Parametr	SE	p	
Łącznie Total	51,0	0,7140	0,000018	0,0293	6,5	b ₀	0,5608	0,0267	<0,0001
						b ₁	-0,0127	0,0010	<0,0001
						b ₂	0,0360	0,0177	0,0425
<i>P. generosa</i> × <i>P. trichocarpa</i>	47,2	0,6867	0,000011	0,0326	6,6	b ₀	-0,2760	0,2600	0,2961
						b ₁	0,0239	0,0116	0,0475
						b ₂	0,5335	0,1514	0,0013
<i>P. trichocarpa</i>	27,4	0,5237	0,000000	0,0310	7,2	b ₀	0,3586	0,1017	0,0009
						b ₁	-0,0036	0,0037	0,3358
						b ₂	0,1125	0,0577	0,0564
<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	62,9	0,7932	0,000043	0,0263	6,4	b ₀	0,4686	0,0698	<0,0001
						b ₁	-0,0127	0,0021	<0,0001
						b ₂	0,1096	0,0510	0,0359
<i>P.</i> × <i>canadensis</i>	47,4	0,6888	0,000018	0,0296	6,4	b ₀	0,4215	0,0399	<0,0001
						b ₁	-0,0065	0,0015	<0,0001
						b ₂	0,1121	0,0251	<0,0001

oznaczenia jak w tabeli 2; denotes as in table 2

Tabela 5.

Ocena dopasowania modelu [4], parametry i ich ocena dla poszczególnych mieszańców topoli
 Goodness of fit measures as well as parameters and their assessment for equation [4] for analysed poplar hybrids

	R ²	R	ME	SE	W	Parametr	SE	p	
Łącznie Total	51,3	0,7163	0,0000	0,0291	6,4	b ₀	0,4694	<0,0000	
						b ₁	-0,0036	0,0044	0,4066
						b ₂	-0,0090	0,0043	0,0357
						b ₃	0,1250	0,0449	0,0056
<i>P. generosa</i> × <i>P. trichocarpa</i>	47,6	0,6897	0,0000	0,0329	6,7	b ₀	-0,4344	0,4125	0,3002
						b ₁	0,0432	0,0404	0,2932
						b ₂	-0,0204	0,0409	0,6216
						b ₃	0,6992	0,3660	0,0651
<i>P. trichocarpa</i>	28,0	0,5287	-0,0000	0,0312	7,2	b ₀	0,4589	0,1919	0,0204
						b ₁	-0,0121	0,0142	0,4002
						b ₂	0,0079	0,0128	0,5392
						b ₃	0,0202	0,1602	0,9002
<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	66,3	0,8144	0,0000	0,0253	6,1	b ₀	0,1195	0,1613	0,4618
						b ₁	0,0200	0,0139	0,1555
						b ₂	-0,0328	0,0138	0,0208
						b ₃	0,4535	0,1526	0,0044
<i>P. × canadensis</i>	47,5	0,6892	0,0000	0,0296	6,4	b ₀	0,4024	0,0525	<0,0001
						b ₁	-0,0040	0,0046	0,3869
						b ₂	-0,0028	0,0050	0,5782
						b ₃	0,1337	0,0462	0,0042

oznaczenia jak w tabeli 2; denotes as in table 2

P. maximowiczii i *P. trichocarpa*. Spośród opracowanych wzorów najlepsze dopasowanie stwierdzono w przypadku wzoru 2, który tłumaczy wariancję badanej zmiennej w ponad 68% (R=0,83). Wzór empiryczny dla *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* przyjmuje postać:

$$f_{1,3} = 0,2525 + \frac{1,9705}{d}$$

Funkcjami, które w najlepszy sposób opisują pierścnicową liczbę kształtu w odniesieniu do mieszańców *P. × canadensis*, były wzory 3 i 4, ale z uwagi na brak istotności parametrów opracowanych dla funkcji 4, mimo nieco słabszego dopasowania (R=0,69) można rekomendować wzór 3, który przyjmuje postać:

$$f_{1,3} = 04215 + 0,0399 \cdot d + 0,0251 \cdot \frac{h}{d}$$

Dyskusja

Największą dokładnością oraz istotnością oszacowanych parametrów funkcji cechował się wzór 3, który może być stosowany dla mieszańców *P. generosa* × *P. trichocarpa* (odmiana 'AF-8') i *P. × canadensis* (odmiany: 'AF-2', 'Albelo', 'Degrosso', 'Polargo' i 'Koster'). Wzór ten można rekomendować także dla topoli wszystkich gatunków i jej mieszańców w plantacjach energetycznych. Dla najpopularniejszej w naszym kraju odmiany topoli *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* ('Hybrida 275') najlepsze dopasowanie uzyskano przy zastosowaniu wzoru 2. W przypadku odmiany 'Fritzi Pauley', która jest mieszańcem wewnątrzgatunkowym *P. trichocarpa*, opracowane funkcje, mimo istotnych statystycznie parametrów, charakteryzowały się najniższą jakością prognostyczną i w przy-

szości wskazana będzie modyfikacja parametrów opracowanych wzorów bądź stworzenie nowych funkcji aproksymujących pierśnicową liczbę kształtu na większym materiale empirycznym.

Dokładność opracowanych wzorów na pierśnicowe liczby kształtu mieszańców topoli jest nieco niższa niż w przypadku wzorów empirycznych opracowanych dla drzew leśnych [Bruchwald, Rymer-Dudzińska 1998]. Może się to wiązać ze stosunkowo młodym wiekiem i niskimi wartościami pierśnicy osiąganymi przez drzewa na plantacjach energetycznych. Tę tezę potwierdzają wyniki otrzymane przez Bruchwalda [1996] oraz Bruchwalda i Rymer-Dudzińską [1998], w których opracowane wzory na liczby kształtu dla sosny dawały największe błędy estymacji w przypadku drzew (i drzewostanów) o najmniejszych pierśnicach. Trudności określania miąższości drzew i innych cech na plantacjach topolowych w oparciu o stosunkowo niewielkie pierśnice drzew dostrzegają również inni autorzy [Pontailier i in. 1997].

Podsumowanie

Opracowane wzory empiryczne dla odmian topoli charakteryzują się błędami od 5,8% dla 'Hybrida 275' do 6,6% dla 'AF-8'. Wzory te mogą być wykorzystane do obliczania miąższości na plantacjach drzew szybko rosnących, w których uprawia się opisane w pracy odmiany uprawowe topoli. Zastosowanie wzorów można również rozszerzyć na odmiany, które nie były przez nas badane, ale są mieszańcami wymienionych w pracy gatunków, takich jak np. *Populus deltoides* × *Populus nigra* (czyli *P. × canadensis*) – z szeroko stosowanymi odmianami (kultywarami): 'AF-18', 'Robusta', 'Dorskamp', 'Vestern'. Opracowane wzory empiryczne należy traktować jako wzory regionalne, ze szczególnym zastosowaniem dla województwa warmińsko-mazurskiego. Zebrany materiał powinien być w przyszłości rozszerzony o inne mieszańce topoli i ich odmiany uprawne w pozostałych regionach kraju, będące w różnym wieku i zagospodarowane różnymi sposobami.

Podziękowania

Autorzy dziękują kolegom z Zakładu Hodowli Lasu i Genetyki Drzew Leśnych, w szczególności dr. inż. Tomaszowi Wojdzie, mgr. inż. Władysławowi Kantorowiczowi i mgr. inż. Szymonowi Krajewskiemu, za pomoc w realizacji badań terenowych.

Literatura

- Armstrong A., Johns C., Tubby I. 1999. Effects of spacing and cutting cycle on the yield of poplar grown as an energy crop. *Biomass and Bioenergy* 17: 305-314.
- Bruchwald A. 1992. Wzory empiryczne do określania miąższości drzewostanów jodlowych. *Sylwan* 136 (7): 17-23.
- Bruchwald A. 1996. New empirical formulae for determination of volume of Scots pine stands. *Folia Forestalia Polonica A* 38: 5-10.
- Bruchwald A. 2000. Wielkopowierzchniowa metoda określania miąższości obiektu leśnego oparta na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 144 (3): 5-17.
- Bruchwald A. 2001. Möglichkeiten der Anwendung von Wuchsmodellen in der Praxis der Forsteinrichtung. *Beiträge für Fortwirtschaft und Landschaftsökologie* 3: 118-122.
- Bruchwald A., Dudzińska M., Wirowski M. 1994. Wzory empiryczne do określania miąższości drzewostanów dębowych. *Sylwan* 138 (2): 5-11.
- Bruchwald A., Dmyterko E., Wojtan R. 2010. Wzory empiryczne do określania pierśnicowych liczb kształtu dla modrzewia. *Sylwan* 154 (10): 705-709.
- Bruchwald A., Rymer-Dudzińska T. 1998. Wzory empiryczne do określania pierśnicowej liczby kształtu strzał sosen w korze z uwzględnieniem krain przyrodniczo-leśnych. *Sylwan* 142 (8): 5-13.
- Bruchwald A., Wróblewski L. 1993. Wzory empiryczne do określania miąższości drzewostanów świerkowych. *Sylwan* 137 (9): 15-20.
- Bruchwald A., Zajączkowski S. 2002. Obrębowa metoda inwentaryzacji lasu oparta na losowaniu warstwowym. *Sylwan* 146 (10): 13-23.
- Dudzińska M. 2002. Wzory empiryczne do określania pierśnicowych liczb kształtu górskich drzewostanów bukowych. *Sylwan* 146 (8): 31-39.

- Dudzińska M. 2003. Wzory empiryczne do określania pierśnicowych liczb kształtu drzewostanów buka nizinnego. Sylwan 147 (1): 35-40.
- Dudzińska M., Bruchwald A. 2003. Wzory empiryczne pierśnicowych liczb kształtu drewna użytkowego dla olszy czarnej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn). Sylwan 147 (7): 3-6.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywę 2001/77/WE oraz 2003/30/WE. 2009. Dz. U. UE L 140.
- Grundner F., Schwappach A. 1906. Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. Berlin.
- Kłapeć B. 2002. Komputerowe wspomaganie budowy planu pozyskania drewna z zastosowaniem pakietu ACER. Wydawnictwo Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa.
- Nassi o Di Nasso N., Guidi W., Ragaglini G., Tozzini C., Bonari E. 2010. Biomass production and energy balance of a 12-year-old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. GCB Bioenergy 2: 89-97.
- Niemczyk M., Wojda T., Kaliszewski A. 2016. Biomass productivity of selected poplar (*Populus* spp.) cultivars in short rotations in northern Poland. New Zealand Journal of Forestry Science 46: 22.
- Pontailier J. Y., Ceulemans R., Guittet J., Mau F. 1997. Linear and non-linear functions of volume index to estimate woody biomass in high density young poplar stands. Ann Sci For 54: 335-345.
- Radwański B. 1955. Tablice miąższości i zbieżności dłużyc, kłód i wyrzynków strzały dla sosny. RNL, Warszawa.
- Radwański B. 1957. Tablice miąższości i zbieżności dłużyc, kłód i wyrzynków strzały dla świerka. RNL, Warszawa.
- Radwański B. 1963. Tablice miąższości i zbieżności dłużyc, kłód i wyrzynków strzały dla jodły. Prace IBL 251.
- Radwański B. 1974. Tablice miąższości i zbieżności dłużyc, kłód i wyrzynków strzały dla olszy. Prace IBL 469.
- Ranney J. W., Wright L. L., Mitchell C. P. 1991. Carbon storage and recycling in short-rotation energy crops. W: Mitchell C. P. [red.]. Bioenergy and the Greenhouse Effect. Nutek, Stockholm. 39-44.
- Szmyszał J., Gierek A., Piątkowski J. 2001. Nowoczesne metody estymacji niezawodności odlewów, na przykładzie stopu AlSi₁₇Cu₃Mg. Archiwum Odlewnictwa 1 (1/2): 189-200.
- Tomusiak R. 2003. A model percentage shares of fifteen sections in stem volume for birch stands. Paper collection of International Scientific Conference of PhD Students 'YOUTH SEEKS PROGRESS 2003'. 14-15 November. Lithuanian University of Agriculture.
- Verwijst T. 1991. Logarithmic transformations in biomass estimation procedures: violation of the linearity assumption in regression analysis. Biomass Bioenergy 1: 175-180.
- Wątroba J. 2011. Prosto o dopasowaniu prostych, czyli analiza regresji liniowej w praktyce. W: Analiza danych w programie STATISTICA – przegląd. Statsoft Polska. 31-44.
- Wróblewski L., Zasada M. 2001. Wzory do określania miąższości grubizny dla modrzewia, osiki, grabu, topoli i lipy. Sylwan 145 (11): 71-79.