

WOJCIECH OCHAŁ, MAREK PAJĄK, MARCIN PIETRZYKOWSKI

Struktura grubości wybranych drzewostanów sosnowych wzrastających na zrehabilitowanych dla leśnictwa obiektach pogórnictwa*

Diameter structure of selected pine stands growing on post-mining sites reclaimed for forestry

ABSTRACT

Ochał W., Pająk M., Pietrzykowski M. 2010. Struktura grubości wybranych drzewostanów sosnowych wzrastających na zrehabilitowanych dla leśnictwa obiektach pogórnictwa. Sylwan 154 (5): 323-332.

The paper presents the results of the research on tree diameter structure in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands growing on mine dumps and pits reclaimed for forestry. The diameter structure of stands was characterised using statistical concentration and dispersion measures and compared with five theoretical distributions: beta, gamma, logarithmic-normal, normal and Weibull's. The studies were conducted in eight pine stands in age classes I (below 20) and II (21-40) age classes growing on the rehabilitated areas of the Belchatów, Piaseczno, Szczakowa and Smolnica mines.

KEY WORDS

diameter structure, Scots pine, normal distribution, rehabilitated land, Poland

ADDRESSES

Wojciech Ochał ⁽¹⁾ – e-mail: rlochal@cyf-kr.edu.pl

Marek Pająk ⁽²⁾ – e-mail: rlpajak@cyf-kr.edu.pl

Marcin Pietrzykowski ⁽²⁾ – e-mail: rlpietrz@cyf-kr.edu.pl

⁽¹⁾ Katedra Dendrometrii; Uniwersytet Rolniczy; Al. 29-Listopada 46; 31-425 Kraków

⁽²⁾ Katedra Ekologii Lasu; Uniwersytet Rolniczy; Al. 29-Listopada 46; 31-425 Kraków

Wstęp

Wielkość produkcji zbiorowisk roślinnych wprowadzonych na tereny zdegradowane jest jednym z elementów oceny efektów rekultywacji leśnej. Ma ona znaczenie zarówno w aspekcie ekologicznym dla określenia produktywności ekosystemu, a ostatnio również ekonomicznym dla oceny potencjalnych możliwości produkcji biomasy stanowiącej biopaliwo [Bungart i in. 2000]. Ekosystemy powstające na terenach pogórnictwa mogą w skali lokalnej odgrywać znaczną rolę w zwiększeniu sekwestracji węgla w biomacie [Rodrigue i in. 2002].

Ocena wielkości produkcji zbiorowisk leśnych może być oparta na określeniu ich zasobów lub bieżącego przyrostu miąższości drzewostanów wzrastających w warunkach siedliskowych zrehabilitowanego obiektu pogórnictwa lub przemysłowego. Do oszacowania tych wielkości konieczna jest znajomość struktury grubości drzew, którą zazwyczaj określa się przez bezpośredni pomiar. Z kolei do prognozowania zmian zasobów leśnych wykorzystuje się modele wzrostu drzewostanów, których podstawowym elementem budowy są matematyczne opisy struktury grubości drzew [Bruchwald 1988]. Ze względu na duże znaczenie rozkładu grubości drzew,

* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy N 309 013 32/2076 w latach 2007-2009

od wielu lat poszukuje się matematycznej możliwości opisu tej cechy [Bailey, Dell 1973; Siekierski 1991; Merganic, Sterba 2006]. Do aproksymacji empirycznych rozkładów pierśnic wykorzystuje się funkcje gęstości rozkładów: normalnego, Weibulla, SB Jonsona, gamma, beta, logarytmiczno-normalnego czy wykładniczego [Zasada 1995, 2000; Nanang 1998; Rymer-Dudzińska, Dudzińska 1999, 2001; Orzeł, Rutkowska 2000; Zhang i Liu 2006; Palahi i in. 2007]. Duża elastyczność rozkładów Weibulla, beta i SB Jonsona jest powodem powszechnego ich stosowania do opisu struktury grubości drzewostanów zarówno o prostej, jak i złożonej budowie [Zhang i in. 2003; Merganic, Sterba 2006].

W Polsce badania zgodności empirycznych rozkładów pierśnic z rozkładami teoretycznymi prowadzone były w wielu drzewostanach gospodarczych, jak również w obiektach zbliżonych do naturalnych. Oceną takiej zgodności w drzewostanach sosnowych zajmowali się między innymi Bruchwald [1988], Siekierski [1992] oraz Orzeł i Rutkowska [2000]. Dla drzewostanów bukowych ocenę taką przeprowadziły Rymer-Dudzińska i Dudzińska [1999, 2001], a dla jodłowych i brzoźowych – Zasada [1995, 2000], zaś dla świerkowych – Siekierski [1992]. W zbiorowiskach zbliżonych do naturalnych studia nad wyborem optymalnego teoretycznego rozkładu do aproksymacji struktury grubości prowadzili Karczmarski [2005], Podlaski [2006] oraz Podlaski i Zasada [2008].

Wymienione wyżej analizy dotyczą drzewostanów wzrastających na siedliskach typowo leśnych. W ramach rekultywacji leśnej gatunki drzew wprowadzane są na siedliska charakteryzujące się odmiennymi właściwościami gleb [Pająk i in. 2004; Pietrzykowski 2005; Pietrzykowski 2006; Stolarska i in. 2006]. Ograniczony dostęp do zasobów wody oraz makro- i mikroelementów może wpływać na zaburzenia w procesie samożywienia drzewostanów [Pietrzykowski 2008], a w konsekwencji prowadzić to może do ukształtowania odmiennych struktur w porównaniu do drzewostanów rosnących na siedliskach typowo leśnych.

Prowadzona w Polsce od ponad 50 lat zorganizowana działalność rekultywacyjna [Krzaklewski 2001] dopiero obecnie pozwala miarodajnie oceniać zdolności przystosowawcze gatunków drzew leśnych do warunków siedliskowych zrekultywowanych obiektów pogórnich.

Celem pracy było określenie podstawowych parametrów struktury grubości drzew w drzewostanach sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) wzrastających w warunkach siedliskowych zwałowisk i wyrobisk pogórnich zrekultywowanych dla leśnictwa oraz ocena stopnia ich zgodności z wybranymi teoretycznymi funkcjami gęstości prawdopodobieństwa.

Charakterystyka terenu badań

Badania prowadzono w czterech zrekultywowanych obiektach pogórnich w Polsce: na wierzchowinie zwałowiska zewnętrznego nadkładu odkrywkowej kopalni węgla brunatnego „Bełchatów”, zwałowisku centralnym odpadów karbońskich kopalni węgla kamiennego „Smolnica”, wyrobisku kopalni piasków podsadzkowych „Szczakowa” i wierzchowinie zwałowiska zewnętrznego nadkładu kopalni siarki „Piaseczno”.

Zwałowisko zewnętrzne KWB „Bełchatów” położone jest w Polsce centralnej. Obiekt ma wysokość względną od 120 do 180 m i zajmuje obszar 1480 ha. Zbudowany jest głównie z przemieszanych czwartorzędowych utworów piaszczystych i gliniastych, a płatowo z trzeciorzędowych piasków zawęglonych [Krzaklewski i in. 1997]. Zabiegi rekultywacyjne na wierzchowinie zwałowiska obejmowały uprawę agrotechniczną, nawożenie NPK (w ilości N – 60, P – 70 i K – 60 kg/ha), wysiew nasion mieszanki traw i roślin motylkowych (60 kg/ha). Utwory kwaśne neutralizowano z zastosowaniem kredy jeziornej [Krzaklewski i in. 1997]. Następnie

prowadzono zalesienia, głównie sosną zwyczajną w udziale 50% i brzozą brodawkowatą (30%) oraz domieszkowo innymi gatunkami liściastymi. Sadzonki wysadzano w więźbie 0,7×1,5 m, stosowano głównie jednoroczny materiał sadzeniowy [Krzaklewski i in. 1997].

Zwałowisko centralne odpadów karbońskich „Smolnica” zlokalizowane jest na Górnym Śląsku. Obiekt stanowi nadpoziomowy zwal o powierzchni około 60 ha i kształcie wyrównanej wierzchowiny oraz łagodnie wyprofilowanych zboczach [Harabin 1978]. Składowane na zwałowisku odpady towarzyszące górnictwu węgla kamiennego to głównie łupki, mułowce i piaskowce karbońskie [Strzyszc 1978]. Na części zwałowiska (ok. 5,5 ha) zastosowano nawożenie mineralne, średnio w ilości około N – 100, P – 20, K – 20 kg/ha [Strzyszc i in. 1981]. Pozostałe tereny nie były nawożone. Z biegiem czasu na zwal wkraczała w drodze samosiewu sosna zwyczajna i aktualnie stanowi ona dominujący gatunek w drzewostanach go porastających [Stolarska i in. 2006].

Kopalnia piasków podsadzkowych „Szczakowa” położona jest w południowo-wschodniej części makroregionu Wyżyny Śląskiej, w obrębie Kotliny Przemyskiej, na terenie Wielkiej Pustyni Starczynowskiej. Utwory fluwioglacjalne zalegające w złożu to głównie piaski, a w mniejszym udziale żwiry, utwory pylaste i gliny. W wyniku eksploatacji piasku powstało wyrobisko o powierzchni ponad 2700 ha i głębokości od 5 do 25 m, które od końca lat pięćdziesiątych XX wieku było rekultywowane i zalesiane. Tok zabiegów rekultywacyjnych na badanych fragmentach wyrobiska obejmował dwie fazy: rekultywację techniczną (formowanie i wyrównanie rzeźby) i rekultywację biologiczną obejmującą humusowanie (średnio około 300 m³/ha), nawożenie mineralne (N – 140, P – 130, K – 150 kg/ha) i dwuletni cykl uprawy roślin motylkowatych. Powierzchnie zalesiano głównie jednoroczną sosną zwyczajną w więźbie 0,7×1,4 m [Pietrzykowski 2005].

Zwałowisko zewnętrzne po odkrywkowej kopalni siarki „Piaseczno” zlokalizowane jest w Polsce południowej, w dolinie Wisły. Obiekt ukształtowany w postaci stożka o powierzchni około 120 ha i wysokości względnej do 40 m. Zwałowisko zbudowane jest głównie z trzeciorzędowych ilów krakowieckich, mułowców warstw pektynowych i czwartorzędowych piasków luźnych. Na zwale wykonano uprawę agrotechniczną, wysiew mieszanki roślinności motylkowatej i traw oraz dwukrotne nawożenie mineralne (startowo i pogłównie), łącznie N – 78, P – 50, K – 60 kg/ha. Następnie wprowadzano zadrzewienia o zróżnicowanym składzie gatunkowym w zależności od funkcji i warunków mikrosiedliskowych.

Metodyka badań

W wymienionych obiektach do badań wybrano po dwa drzewostany sosnowe rosnące na utworach różniących się potencjalnie żyznością:

- wariant żyzny (w1) - utwory potencjalnie najżyźniejsze o najkorzystniejszym z możliwych na danym obiekcie uziarnieniu lub nawożone;
- wariant ubogi (w2) - utwory potencjalnie najuboższe na danym obiekcie, jałowe o najłżejszym składzie granulometrycznym, z przewagą utworów piaszczystych lub nienawożone.

W każdym z nich zlokalizowano cztery jednoarowe powierzchnie badawcze (kwadraty 10×10 m). Na powierzchniach tych przeprowadzono pomiar pierśnicy i wysokości wszystkich drzew. Strukturę grubości drzew scharakteryzowano statystycznymi miarami koncentracji i rozproszenia. Rozkłady empiryczne pierśnic drzew porównano z pięcioma rozkładami teoretycznymi: beta, gamma, logarytmiczno-normalnym, normalnym i Weibulla. Parametry kształtu i skali

poszczególnych rozkładów określono metodą największej wiarygodności za pomocą programu Statistica 8.0 [StatSoft, Inc. 2007]. Za granicę rozkładu beta przyjęto wartość 0 i dwukrotność maksymalnej pierśnicy stwierdzonej w próbie [Palahi 2007]. Badanie zgodności rozkładów empirycznych z wybranymi rozkładami teoretycznymi przeprowadzono testem Kołmogorowa-Smirnowa na poziomie istotności $\alpha=0,05$. Statystyka Dn Kołmogorowa-Smirnowa posłużyła także do wyboru najlepiej dopasowanego rozkładu teoretycznego. W tym celu, w każdym drzewostanie uszeregowano rozkłady według wzrastającej wartości statystyki Dn i przypisano im rangi R_{Dn} o wartościach od 1 do 5. Ostatecznie, biorąc pod uwagę wszystkie drzewostany, obliczono dla każdego rozkładu średnią wartość statystyki \bar{Dn} oraz średnią rangę \bar{R}_{Dn} . Stopień zgodności poszczególnych rozkładów teoretycznych z rozkładami empirycznymi oceniono ponadto obliczając pierwiastek średniego kwadratu błędów ($RMSE$) [Podlaski, Zasada 2008]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (n_i - \hat{n}_i)^2}{k}}$$

gdzie:

n_i, \hat{n}_i – to odpowiednio obserwowana i przewidywana liczba drzew w i -tej klasie grubości,
 k – liczba klas grubości.

W obrębie każdego drzewostanu uszeregowano rozkłady według wzrastającej wartości błędu $RMSE$ i przypisano im rangi R_{RMSE} o wartościach od 1 do 5. Na podstawie całej badanej grupy drzewostanów obliczono średnie wartości błędu \overline{RMSE} i średnie rangi \bar{R}_{RMSE} dla poszczególnych rozkładów teoretycznych. Wybierając rozkład najlepiej opisujący strukturę grubości brano pod uwagę liczbę drzewostanów, w których rozkład nie różnił się istotnie statystycznie od rozkładu empirycznego, średnią wartość statystyk Dn i $RMSE$ oraz średnie wartości rang \bar{R}_{Dn} i \bar{R}_{RMSE} .

Wyniki

Wiek badanych drzewostanów wynosił od 12 do 30 lat. Bonitacja mierzona wysokością górną drzewostanu w wieku 100 lat przyjmowała wartości z zakresu od 29,7 do 42,8 m. Znaczne różnice wieku, jak i bonitacji poszczególnych drzewostanów są przyczyną dużego zróżnicowania innych cechy taksacyjnych (tab. 1). Liczba drzew przypadających na jednostkę powierzchni zawierała się w przedziale od 1050 do 7500 szt./ha, a pole pierśnicowego przekroju od 4,11 do 36,64 m²/ha.

Statystyczne miary koncentracji i rozproszenia grubości drzew obliczono na podstawie pobranych prób i przedstawiono w tabeli 2. Średnia pierśnica w poszczególnych obiektach przyjmuje wartości od 2,59 cm do 18,52 cm, zaś zakres grubości stwierdzony dla pojedynczych drzew obejmuje wartości od 0,5 cm do 27,8 cm. Współczynnik zmienności pierśnicy w siedmiu drzewostanach przyjmuje wartości z zakresu od 20 do 30%, a w jednym znacznie przekracza granice tego przedziału wynosząc aż 47,2%. We wszystkich drzewostanach rozkłady pierśnic charakteryzują się asymetrią prawostronną. W dwóch jest ona nieznaczna (skośność 0,066 i 0,070), w pozostałych współczynnik asymetrii przyjmuje wartości od 0,185 do 0,558. Rozkłady pierśnic charakteryzują się różnym stopniem spłaszczenia. Wśród badanych drzewostanów są takie (4 obiekty), w których rozkłady pierśnic są bardziej spłaszczone w porównaniu do rozkładu normalnego (kurtoza od -0,617 do -0,142), zbliżone do rozkładu normalnego (1 obiekt, kurtoza = -0,001) i takie, w których koncentracja wartości wokół średniej jest większa w porównaniu do rozkładu normalnego (kurtoza od 0,272 do 1,269).

W większości drzewostanów nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic między empirycznymi rozkładami grubości a ich modelowymi przybliżeniami (tab. 3, ryc.). Biorąc pod

Tabela 1.

Wybrane cechy taksacyjne badanych drzewostanów
Selected taxation characteristics of the studied stands

| Drzewostan | Wiek [lata] | Dg [cm] | H _L [m] | N [szt./ha] | G [m ² /ha] | H ₁₀₀ [m] | B [m] |
|----------------|-------------|---------|--------------------|-------------|------------------------|----------------------|-------|
| Bełchatów – w1 | 17 | 5,6 | 5,7 | 7500 | 18,24 | 6,9 | 29,7 |
| Bełchatów – w2 | 12 | 2,9 | 3,3 | 6375 | 4,11 | 4,4 | 35,2 |
| Piaseczno – w1 | 30 | 19,1 | 16,2 | 1050 | 30,03 | 17,9 | 42,8 |
| Piaseczno – w2 | 30 | 15,8 | 15,4 | 1875 | 36,64 | 17,2 | 41,3 |
| Smolnica – w1 | 30 | 15,2 | 15,2 | 1500 | 27,14 | 17,2 | 41,3 |
| Smolnica – w2 | 30 | 13,8 | 12,3 | 1800 | 26,96 | 13,9 | 33,3 |
| Szczakowa – w1 | 21 | 11,3 | 10,5 | 2550 | 25,36 | 12,1 | 45,3 |
| Szczakowa – w2 | 23 | 9,3 | 9,3 | 4000 | 27,31 | 11,0 | 36,6 |

w1 – wariant żyzny; w2 – wariant ubogi
w1 – fertile variant; w2 – poor variant

Tabela 2.

Statystyczna charakterystyka grubości drzew wzrastających na rekultywowanych terenach pogórnicznych
Statistical characterisation of the diameter of trees growing on reclaimed post-mining lands

| Drzewostan | N [szt.] | Średnia [cm] | Min [cm] | Max [cm] | Odch. st. [cm] | Współ. zm. [%] | Skośność | Kurtოza |
|----------------|----------|--------------|----------|----------|----------------|----------------|----------|---------|
| Bełchatów – w1 | 300 | 5,33 | 1,50 | 9,50 | 1,59 | 29,9 | 0,070 | -0,313 |
| Bełchatów – w2 | 255 | 2,59 | 0,50 | 6,50 | 1,22 | 47,2 | 0,504 | -0,001 |
| Piaseczno – w1 | 42 | 18,52 | 9,10 | 27,85 | 4,66 | 25,2 | 0,066 | -0,617 |
| Piaseczno – w2 | 75 | 15,43 | 10,30 | 24,20 | 3,32 | 21,5 | 0,474 | -0,142 |
| Smolnica – w1 | 60 | 14,63 | 7,10 | 26,60 | 4,06 | 27,7 | 0,353 | 0,272 |
| Smolnica – w2 | 72 | 13,34 | 7,05 | 22,15 | 3,59 | 26,9 | 0,185 | -0,528 |
| Szczakowa – w1 | 102 | 11,00 | 6,10 | 19,75 | 2,36 | 21,4 | 0,474 | 1,269 |
| Szczakowa – w2 | 160 | 9,05 | 3,85 | 15,75 | 2,27 | 25,1 | 0,558 | 0,624 |

uwagę liczbę drzewostanów, w których dany rozkład nie różnił się od empirycznego, za najlepsze należy uznać rozkłady beta, normalny i Weibulla. W odniesieniu do tych rozkładów istotne różnice stwierdzono w jednym drzewostanie. Nieco gorsze okazały się rozkłady gamma i logarytmiczno-normalny, dla których istotne różnice stwierdzono w dwóch obiektach.

W całym zbiorze badanych drzewostanów najmniejszą średnią wartość statystyki D_n stwierdzono dla rozkładu beta (0,073), największą zaś – dla logarytmiczno-normalnego (0,091). Rozpatrując oddzielnie poszczególne drzewostany, w każdym z nich zaobserwowano inną kolejność pod względem dobroci dopasowania analizowanych modeli (tab. 3). Najczęściej jednak najlepszym rozwiązaniem modelowym był rozkład beta ($\bar{R}_{D_n}=2,00$), najgorszym zaś logarytmiczno-normalny ($\bar{R}_{D_n}=3,88$).

Drugim kryterium oceny stopnia dopasowania rozkładów teoretycznych do danych empirycznych była wielkość pierwiastka średniego kwadratu błędów $RMSE$ (tab. 4). Statystyka ta charakteryzuje przeciętną różnicę między liczebnością empiryczną i teoretyczną przypadającą na pojedynczą klasę grubości. W całym zbiorze analizowanych drzewostanów najmniejszą odchyłkę stwierdzono w przypadku rozkładu normalnego ($\overline{RMSE}=3,660$), nieco większą dla rozkładu Weibulla ($\overline{RMSE}=4,763$), a największą dla rozkładu logarytmiczno-normalnego ($\overline{RMSE}=7,564$). Rozkłady beta i gamma zajęły odpowiednio 3 i 4 miejsce z różnicą wynoszącą przeciętnie 5,176 i 5,889.

Tabela 3.

Wartości statystyk D_n oraz rang R_{D_n} w drzewostanach wzrastających na rekultywowanych terenach pogórczych

The values of D_n statistics and R_{D_n} ranks in the stands growing on reclaimed post-mining lands

| Rozkład | Drzewostan | | | | | | | | Średnia |
|-----------------|------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Bel_w1 | Bel_w2 | Pias_w1 | Pias_w2 | Smol_w1 | Smol_w2 | Szcz_w1 | Szcz_w2 | |
| D_n | | | | | | | | | |
| Beta | 0,076 | 0,102* | 0,064 | 0,078 | 0,066 | 0,062 | 0,079 | 0,061 | 0,073 |
| Gamma | 0,091* | 0,114* | 0,070 | 0,080 | 0,070 | 0,067 | 0,072 | 0,048 | 0,076 |
| Log-norm | 0,113* | 0,149* | 0,088 | 0,079 | 0,089 | 0,077 | 0,070 | 0,064 | 0,091 |
| Normalny | 0,068 | 0,121* | 0,075 | 0,076 | 0,087 | 0,058 | 0,088 | 0,076 | 0,081 |
| Weibulla | 0,077 | 0,091* | 0,076 | 0,087 | 0,097 | 0,060 | 0,114 | 0,093 | 0,087 |
| Ranga R_{D_n} | | | | | | | | | |
| Beta | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2,00 |
| Gamma | 4 | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2,75 |
| Log-norm | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 1 | 3 | 3,88 |
| Normalny | 1 | 4 | 3 | 1 | 3 | 1 | 4 | 4 | 2,63 |
| Weibulla | 3 | 1 | 4 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 3,75 |

Bel – Bełchatów; Pias – Piaseczno; Smol – Smolnica; Szcz – Szczakowa

* – hipotezę o zgodności z rozkładem teoretycznym odrzucono na poziomie istotności $\alpha=0,05$

* – hypothesis about agreement with theoretical distribution rejected at $\alpha=0,05$ significance level

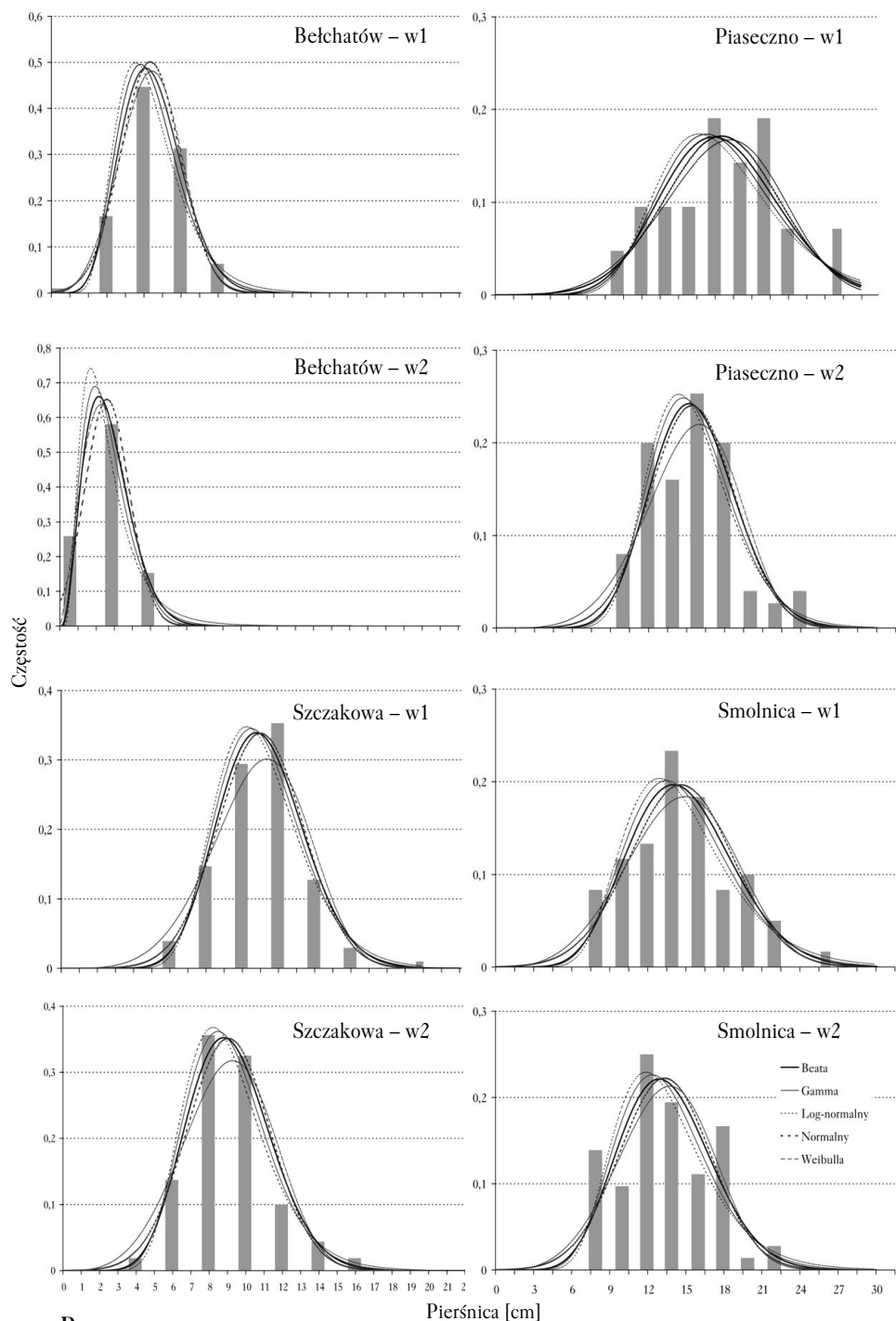
Tabela 4.

Pierwiastek średniego kwadratu błędów ($RMSE$) oraz wartości rang R_{RMSE}

Root mean square error ($RMSE$) and the values of R_{RMSE} ranks

| Rozkład | Drzewostan | | | | | | | | Średnia |
|------------------|------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Bel_w1 | Bel_w2 | Pias_w1 | Pias_w2 | Smol_w1 | Smol_w2 | Szcz_w1 | Szcz_w2 | |
| $RMSE$ | | | | | | | | | |
| Beta | 8,986 | 16,555 | 1,625 | 2,873 | 1,508 | 3,137 | 2,723 | 4,001 | 5,176 |
| Gamma | 11,735 | 18,981 | 1,749 | 2,983 | 1,592 | 3,281 | 3,113 | 3,675 | 5,889 |
| Log-norm | 15,488 | 26,550 | 1,893 | 3,153 | 1,817 | 3,523 | 3,795 | 4,289 | 7,564 |
| Normalny | 4,982 | 8,458 | 1,532 | 2,864 | 1,516 | 3,059 | 2,166 | 4,705 | 3,660 |
| Weibulla | 4,574 | 13,563 | 1,490 | 3,214 | 1,667 | 3,063 | 3,459 | 7,074 | 4,763 |
| Ranga R_{RMSE} | | | | | | | | | |
| Beta | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2,36 |
| Gamma | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3 | 1 | 3,38 |
| Log-norm | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4,63 |
| Normalny | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1,75 |
| Weibulla | 1 | 2 | 1 | 5 | 3 | 2 | 4 | 5 | 2,88 |

W poszczególnych drzewostanach, badane rozkłady teoretyczne zajmowały różne pozycje pod względem dobroci dopasowania do danych doświadczalnych. Najczęściej na pierwszym miejscu w rankingu rozkładów znajdował się rozkład normalny ($\bar{R}_{RMSE}=1,75$). Rozkład beta zajmował zwykle drugie lub trzecie miejsce ($\bar{R}_{RMSE}=2,36$). Rozkład Weibulla charakteryzuje się największą zmiennością pod względem zajmowanej pozycji. W zależności od drzewostanu był on najlepszym bądź najgorszym spośród analizowanych rozkładów. W ogólnej ocenie średnia wartość rangi \bar{R}_{RMSE} stawia go na trzecim miejscu ($\bar{R}_{RMSE}=2,88$). Rozkład gamma w większości drzewostanów zajmował pozycję czwartą ($\bar{R}_{RMSE}=3,38$), a logarytmiczno-normalny piątą ($\bar{R}_{RMSE}=4,63$).



Ryc.

Dopasowanie matematycznych funkcji do empirycznych rozkładów pierśnic w badanych drzewostanach
 Fitting of mathematical functions to the empirical dbh distributions in the studied stands

Ostateczną ocenę przydatności rozkładów teoretycznych do opisu struktury grubości drzewostanów sosnowych rosnących na utworach rekultywowanych przeprowadzono uwzględniając wszystkie wymienione wcześniej kryteria (tab. 5).

Sumaryczna ocena przydatności analizowanych rozkładów nie jest jednoznaczna, bowiem na pierwszym miejscu z identyczną liczbą punktów (8) znalazły się dwa rozkłady – normalny i beta. Rozkład beta był nieco lepszy od normalnego pod względem kryterium opartym na wielkości statystyki Dn , normalny z kolei przewagę uzyskał pod względem drugiego kryterium uwzględniającego wielkość pierwiastka z średniego kwadratu błędów $RMSE$. Kolejne miejsca zajęły rozkłady Weibulla i gamma ze zbliżoną sumą rang końcowych, wynoszącą odpowiednio 14 i 15. Zdecydowanie najgorszym rozkładem pod względem wszystkich omawianych kryteriów był rozkład logarytmiczno-normalny.

Dyskusja

Wyniki badań przeprowadzonych w obiektach górniczych poddanych rekultywacji leśnej zbliżone są do zaobserwowanych przez Orła i Rutkowską [2000] prawidłowości dotyczących rozkładów pierśnic w drzewostanach sosnowych wzrastających w różnych strefach przemysłowego uszkodzenia. W obu opracowaniach stwierdzono trudności w wyborze właściwej funkcji do aproksymacji rozkładu pierśnic drzew w drzewostanach najmłodszych – Ib i IIa klasa wieku. Z kolei w starszych drzewostanach wszystkie analizowane rozwiązania modelowe okazały się zgodne z empirycznymi rozkładami pierśnic. Zaobserwowane fakty potwierdzają także prace innych autorów [Siekierski 1992].

Spśród badanych teoretycznych funkcji najlepszymi pod względem dopasowania do danych empirycznych okazały się rozkłady beta i normalny. W opracowaniu Orła i Rutkowskiej [2000] pierwsze miejsce zajął rozkład normalny, zaś drugie – beta. Przyczyną różnic może być nieco inna metodyka wyboru najlepszego rozwiązania modelowego oraz przyjęcie przez Orła i Rutkowską [2000] węższych granic dla rozkładu beta, co być może spowodowało mniejszą elastyczność rozkładu, a w konsekwencji gorsze dopasowanie do danych empirycznych. Siekierski [1992] analizując rozkłady pierśnic w 21 drzewostanach sosnowych pochodzących z Borów Tucholskich za najlepsze rozwiązanie modelowe uznał rozkład Weibulla. Trudno jednak o obiektywne porównanie rezultatów badań, ponieważ w opracowaniu tym autor nie uwzględnił rozkładu normalnego.

Rozkłady beta i normalny można uznać za najlepsze rozwiązania umożliwiające matematyczny opis struktury grubości drzew w drzewostanach sosnowych I i II klasy wieku rosnących na siedliskach zrekultywowanych obiektów pogórniczych.

Tabela 5.

Ocena przydatności wybranych funkcji gęstości do opisu struktury grubości
Evaluation of the usefulness of the selected density functions for the description of diameter structure

| Rozkład | Wartości rang przyznanych ze względu na | | | | | Suma |
|----------|---|------------|----------------|--------|------------------|------|
| | Brak różnic | $\bar{D}n$ | \bar{R}_{Dn} | $RMSE$ | \bar{R}_{RMSE} | |
| Beta | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 8 |
| Gamma | 2 | 2 | 3 | 4 | 4 | 15 |
| Log-norm | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 22 |
| Normalny | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 8 |
| Weibulla | 1 | 4 | 4 | 2 | 3 | 14 |

Wnioski

- ✦ Rozkłady pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych I i II klasy wieku rosnących na utworach pogórnicznych zrehabilitowanych dla leśnictwa charakteryzują się na ogół dużą zgodnością z rozkładami beta, gamma, logarytmiczno-normalnym, normalnym i Weibulla.
- ✦ Spośród badanych teoretycznych rozkładów najlepszym rozwiązaniem do opisu struktury grubości analizowanych drzewostanów są rozkłady normalny i beta.
- ✦ Rozkład logarytmiczno-normalny okazał się najgorszym pod względem wszystkich analizowanych kryteriów. Rozkład ten nie powinien być stosowany do modelowania struktury grubości drzew w drzewostanach sosnowych rosnących na terenach zrehabilitowanych.

Literatura

- Bailey R. L., Dell T. R. 1973. Quantifying diameter distribution in even-aged stands. *Forest Sc.* 19 (2): 97-104.
- Bruchwald A. 1988. Simulation algorithm of the distribution of b.h. diameters of trees in pine stands. *Ann. Warsav. Agricult. Univ. – SGGW-AR. For. and Wood Technol.* 37: 91-95.
- Harabin Z. 1978. Zastosowanie zrzędów topolowych do przejściowego zagospodarowania zwałowisk towarzyszących górnictwu węgla kamiennego. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Zabrze.
- Harabin Z., Ordon S., Węgierek S. 1980. Wzrost i rozwój samosiewu sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na zwałowisku odpadów górnictwa węgla kamiennego „Smolnica”. *Archiwum Ochrony Środowiska* 2: 193-201.
- Karczmarek J. 2005. Struktura rozkładów pierśnic w naturalnych górnośląskich borach świerkowych Tatr i Beskidów Zachodnich w zależności od stadiów i faz rozwojowych lasu o charakterze pierwotnym. *Sylwan* 149 (3): 12-23.
- Krzaklewski W. 2001. Rekultywacja obszarów pogórnicznych i przemysłowych W: Kotarba M. [red.]. *Przemiany środowiska naturalnego a ekorozwój*. Wydawnictwo TBPS Geosfera, Kraków. 85-104.
- Krzaklewski W., Kowalik S., Wójcik J. 1997. Rekultywacja utworów toksycznie kwaśnych w górnictwie węgla brunatnego. Wyd. MONOS, Kraków.
- Merganič J., Sterba H. 2006. Characterisation of diameter distribution using the Weibull function: method of moments. *Eur J Forest Res* 125: 427-439.
- Nanang D. M. 1998. Suitability of the Normal, Log-normal and Weibull distributions for fitting diameter distributions of neem plantations in Northern Ghana. *Forest Ecology and Management* 103: 1-7.
- Orzeł S., Rutkowska L. 2000. Struktura grubości drzewostanów sosnowych wzrastających w różnych strefach przemysłowego uszkodzenia. *Sylwan* 144 (7): 55-63.
- Pajak M., Forgiel M., Krzaklewski W. 2004. Growth of trees used in reforestation of a northern slope of the external spoil bank of the “Bełchatów” Brown Coal Mine. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Series Forestry, Volume 7, Issue 2*.
- Palahi M., Pukkala T., Blasco E., Trasobares A. 2007. Comparison of beta, Johnson’s SB, Weibull and truncated Weibull functions for modeling the diameter distribution of forest stands in Catalonia (north-east of Spain). *Eur J Forest Res* 126: 563-571.
- Pietrzykowski M. 2005. Charakterystyka wybranych cech roślinności drzewiastej na terenach rekultywowanych oraz na powierzchniach pozostawionych procesowi sukcesji na przykładzie powierzchni badawczych na wyrobisku kopalni piasku „Szczakowa”. *Acta Agraria et Silvestria, series Silvestria*. 43: 1-26.
- Pietrzykowski M. 2006. Właściwości gleb powstających na rekultywowanych i pozostawionych sukcesji terenach wyrobiska po eksploatacji piasków podsadzkowych. *Roczniki Gleboznawcze*. Tom 57 (3/4): 97-105.
- Pietrzykowski M. 2008. Macronutrient accumulation and relationships in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem on reclaimed opencast lignite mine spoil heaps in central Poland. *Proceedings of 25th Annual Meeting of American Society of Mining and Reclamation (ASMR) and International Affiliation of Land Reclamationists (IALR), "New Opportunities to Apply Our Science", 25th Annual Meeting of American Society of Mining and Reclamation (ASMR) and 10th International Affiliation of Land Reclamationists (IALR), Richmond, Virginia – June 14 to 19, 2008*. 856-877.
- Podlaski R. 2006. Suitability of the selected statistical distributions for fitting diameter data in distinguished development stages and phases of near-natural mixed forests in the Świętokrzyski National Park (Poland). *Forest Ecology and Management* 236: 393-402.
- Podlaski R., Zasada M. 2008. Comparison of selected statistical distributions for modelling the diameter distributions in near-natural *Abies-Fagus* forests in the Świętokrzyski National Park (Poland). *Eur J Forest Res* 127: 455-463.
- Rymer-Dudzińska T., Dudzińska M. 1999. Analiza rozkładu pierśnic w drzewostanach bukowych. *Sylwan* 143 (8): 5-24.
- Rymer-Dudzińska T., Dudzińska M. 2001. Rozkład pierśnic drzew w nizinnych drzewostanach bukowych. *Sylwan* 145 (8): 13-22.

- Siekierski K. 1991. Three methods of estimation of the parameters in double normal distribution and their applicability to modeling tree diameter distributions. *Ann. Warsaw Agricult. Univ. – SGGW-AR. For. and Wood Technol.* 42: 13-17.
- Siekierski K. 1992. Evaluation of the goodness of fit of some statistical distributions to tree diameter distributions. *Ann. Warsaw Agricult. Univ. – SGGW-AR. For. and Wood Technol.* 43: 7-14.
- StatSoft, Inc. 2007. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0.
- Stolarska M., Stolarski R., Harabin Z., Krzaklewski W., Pietrzykowski M. 2006. Sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) z sukcesji na centralnym zwałowisku odpadów górnictwa węgla kamiennego. *Roczniki Gleboznawcze*. Tom 57 (1/2): 183-191.
- Strzyszczyński Z. 1978. Chemiczne przemiany utworów karbońskich w aspekcie biologicznej rekultywacji i zagospodarowania centralnych zwałowisk. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wydawnictwo PAN, Wrocław.
- Strzyszczyński Z., Krzaklewski W., Harabin Z. 1981. Wpływ nawożenia mineralnego na samorzutne zarastanie zwałowiska odpadów górnictwa węgla kamiennego „Smolnica” w toku jego leśnej rekultywacji. *Archiwum Ochrony Środowiska* 1: 161-173.
- Zasada M. 1995. Ocena zgodności rozkładów pierśnic w drzewostanach jodłowych z niektórymi rozkładami teoretycznymi. *Sylvan* 139 (12): 61-69.
- Zasada M. 2000. Ocena zgodności rozkładów pierśnic drzew drzewostanów brzoźowych z niektórymi rozkładami teoretycznymi. *Sylvan* 144 (5): 43-48.
- Zhang L., Liu C. 2006. Fitting irregular diameter distributions of forest stands by Weibull, modified Weibull, and mixture Weibull models. *J For Res* 11: 369-372.
- Zhang L., Packard K. C., Liu C. 2003. A comparison of estimation methods for fitting Weibull and Johnson's SB distributions to mixed spruce-fir stands in northeastern North America. *Can. J. For. Res.* 33: 1340-1347.

SUMMARY

Diameter structure of selected pine stands growing on post-mining sites reclaimed for forestry

The aim of the research was to determine the major parameters of tree diameter structure in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands growing on the mine dumps and post mining pits rehabilitated for forestry and assess the degree of their compliance with selected theoretical density functions.

The studies were conducted in the territory of four post-mining sites in Poland: Bełchatów lignite mine, Smolnica coal mine, Szczakowa filling sand mine and Piaseczno sulphur mine. In the research, two pine stands growing on reclaimed soils with varying fertility were selected from each of the aforementioned sites (tab. 1). In each stand four 1-are study plots were located on which diameters at breast height and heights of all trees were measured.

The diameter structure of trees was described on the basis of calculated statistical concentration and dispersal measures (tab. 2). The empirical dbh distributions were compared with five theoretical distributions: beta, gamma, logarithmic-normal, normal and Weibull's.

The assessment of the accuracy of fitting theoretical distributions to the empirical data was based on the number of stands, in which theoretical distributions did not differ significantly from empirical distributions according to the mean values of \bar{D}_n and \overline{RMSE} statistics as well as the mean values of \bar{R}_{Dn} and \bar{R}_{RMSE} ranks (tab. 5).

The normal and beta distributions were among those theoretical distributions that best fitted the empirical data, followed by Weibull's and gamma distributions. The logarithmic-normal distribution showed the lowest values for all the analysed criteria. This distribution should not be used for modelling tree diameter structure in the pine stands in age classes I and II growing on post-mining land.