

## ZASTOSOWANIE NAZIEMNEGO SKANERA LASEROWEGO DO OKREŚLENIA MIĄŻSZOŚCI DRZEW STOJĄCYCH W DRZEWOSTANIE PODOKAPOWYM

Andrzej Węgiel<sup>1</sup>✉, Sławomir Ociepka<sup>2</sup>, Agnieszka Błasiak<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Katedra Urządzania Lasu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
ul. Wojska Polskiego 71C, 60-625 Poznań

<sup>2</sup>Nadleśnictwo Torzym  
ul. Wodna 1, 66-235 Torzym

<sup>3</sup>Katedra Łowiectwa i Ochrony Lasu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
ul. Wojska Polskiego 71D, 60-625 Poznań

### ABSTRAKT

Celem pracy było określenie za pomocą naziemnego skanera laserowego miąższości siedmiu gatunków drzew: sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris*, modrzewia europejskiego *Larix decidua*, daglezi zielonej *Pseudotsuga menziesii*, dębu bezszypułkowego *Quercus petraea*, buka pospolitego *Fagus sylvatica*, klona jawora *Acer pseudoplatanus*, lipy drobnolistnej *Tilia cordata* oraz porównanie uzyskanych wyników z otrzymanymi za pomocą analiz alternatywnych – tablic miąższości i wzorów empirycznych. Pomiary przeprowadzono na powierzchni eksperymentalnej w Nadleśnictwie Zielonka. Obejmowała ona pola z 40-letnimi drzewostanami wymienionych gatunków rosnące pod okapem 160-letniego starodrzewu sosny zwyczajnej. Dla siedmiu analizowanych gatunków wykonano skany za pomocą skanera Faro LS 880. Na każdym z trzech poletek poddano analizie pięć drzew, mierząc ich średnice w odstępach jednometrowych oraz pierśnicę i wysokość. Łącznie pomiarem objęto 105 drzew. Miąższość drzew wszystkich analizowanych gatunków, określona sekcyjnie za pomocą skanera laserowego, była istotnie większa od miąższości określonej za pomocą tablic i wzorami empirycznymi.

**Słowa kluczowe:** LiDAR, pomiar drzew, tablice miąższości, wzory empiryczne

### WSTĘP

Skaning laserowy (LiDAR) należy do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych wykorzystujących do pomiaru promieniowanie, najczęściej z zakresu bliskiej podczerwieni. Zasilanie niezależnym źródłem energii zapewnia możliwość pomiarów również w nocy, przy braku światła słonecznego. Działanie skanera laserowego polega na pomiarze odległości od badanych obiektów (np. pnie drzew, gałęzie, liście). Realizowane jest to poprzez obliczanie czasu, który

upływa od momentu wysłania wiązki światła lasera do jej powrotu do detektora, po uprzednim odbiciu od powierzchni celu. Znana wartość prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej oraz zarejestrowany czas pozwalają na obliczenie odległości obiektu od skanera. Urządzenie to także bardzo precyzyjnie rejestruje kierunek, w jakim jest wysyłana wiązka lasera. Powyższe parametry pozwalają na jednoznaczne wyznaczenie współrzędnych pomierzonych punktów

✉wegiel@up.poznan.pl

w przestrzeni trójwymiarowej. Uzyskana chmura punktów 3D może służyć do budowania modeli i do precyzyjnego pomiaru zeskanowanych obiektów. Ze względu na pułap zbierania informacji, skaning laserowy dzieli się na: satelitarny, lotniczy oraz naziemny (Chirrek i in., 2007; Wężyk, 2006).

Naziemny skaning laserowy (*terrestrial laser scanning*, TLS), wprawdzie nie znalazł tak wielu zastosowań w leśnictwie jak skaning lotniczy, ale nabiera coraz większego znaczenia. Przeprowadzone dotychczas badania wskazują na duży potencjał tej metody przy zbieraniu informacji o lesie (Aschoff i in., 2004; Aschoff i Spiecker, 2004; Pfeifer i Winterhalder, 2004; Thies i Spiecker, 2004; Watt i Donoghue, 2005). W Polsce od kilkunastu lat także prowadzone są badania dotyczące zastosowań TLS w leśnictwie (Chirrek i in., 2007; Ratajczak i Wężyk, 2015; Wężyk i in., 2009; Wężyk i in., 2012; Wężyk i Sroga, 2010; Zasada i Sterenczak, 2013; Zawila-Niedźwiecki i in., 2007).

Skaner laserowy pozwala nie tylko na pomiar cech drzew standardowo określanych przy inwentaryzacji lasu, jak pierśnica (średnica na wysokości 130 cm) i wysokość (odległość między powierzchnią gruntu a najwyżej położonym jego punktem), ale także wielu innych, jak na przykład: wysokość podstawy korony, długość i zasięg korony, zbieżystość pnia, jego nachylenie oraz, co szczególnie istotne, średnice pnia na dowolnej wysokości (Chirrek i in., 2007; Zawila-Niedźwiecki i in., 2007). Dzięki temu jest możliwe bardzo dokładne określenie miąższości drzew stojących w sposób bezinwazyjny (Tompalski, 2009; Wężyk i in., 2009).

Dotychczas w praktyce gospodarstwa leśnego określano miąższość drzew na podstawie pomiarów dwóch parametrów – pierśnicy oraz wysokości, które przeliczano, dawniej z wykorzystaniem tablic, obecnie przede wszystkim na podstawie wzorów empirycznych (Bruchwald i in., 2010). Obydwie metody zostały opracowane na podstawie odpowiednio bogatych zbiorów danych i reprezentują wartości uśrednione dla całego kraju. Często zdarza się jednak, że uzyskane tymi metodami miąższości odbiegają od rzeczywistości, tj. pnie drzew okazują się na przykład bardziej pełne (mniej zbieżyste) niż ich wzorce (Socha, 2004; Socha i Kubik, 2005; Wężyk i Sroga, 2010). Zmienność ekotypowa w obrębie gatunku może być duża i kształtowana przez liczne czynniki

środowiska. Jednym z nich może być położenie drzew w dolnym piętrze, pod okapem drzewostanu.

W pracy przyjęto hipotezę, że miąższość drzew podokapowych, określona sekcyjnie za pomocą skanera laserowego, będzie się różniła od miąższości określonej za pomocą tablic i za pomocą wzorów empirycznych, ze względu na inny kształt pni drzew rosnących w dolnym piętrze drzewostanu.

Celem pracy było porównanie wartości miąższości wybranych gatunków drzew, rosnących pod okapem starodrzewu sosnowego, określonej sekcyjnie za pomocą naziemnego skanera laserowego, z wynikami określonymi za pomocą tablic miąższości oraz wzorów empirycznych. Pomiarami objęto siedem gatunków drzew: sosnę zwyczajną – *Pinus sylvestris* L., modrzew europejski – *Larix decidua* Mill., daglezień zieloną – *Pseudotsuga menziesii* Franko, dąb bezszypułkowy – *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., buka pospolitego – *Fagus sylvatica* L., klon jawor – *Acer pseudoplatanus* L. i lipę drobnolistną – *Tilia cordata* Mill.

## MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono na powierzchni doświadczalnej Katedry Urządzania Lasu Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, zlokalizowanej w oddziale 52 Nadleśnictwa Doświadczalnego Zielonka, Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Murowanej Goślinie. Powierzchnię doświadczalną stanowił drzewostan dwupiętrowy, występujący na siedlisku sklasyfikowanym jako LMśw (las mieszany świeży). Górne piętro tworzył starodrzew sosny zwyczajnej w wieku 160–180 lat. Dolnym piętrem był 40-letni drzewostan podzielony na 62 pola o wielkości od 0,06 do 0,12 ha (łącznie 1,97 ha). Na każdym polu występował jeden z siedmiu gatunków drzew (tab. 1). Szczegółowy opis doświadczenia oraz uzyskane dotąd wyniki przedstawiają prace następujących autorów: Zabielski (1978), Magnuski i Jaszczak (1993) oraz Miś i Pijański (1993).

Prace terenowe polegały na pomiarach drzew stojących za pomocą naziemnego skanera laserowego. Przeprowadzono je na wytypowanych 21 polach doświadczalnych (po trzy na każdy gatunek drzewa), na których wykonano jedno skanowanie za pomocą naziemnego skanera laserowego Faro LS 880. Skaner umiejscowiono w centrum każdego pola w taki

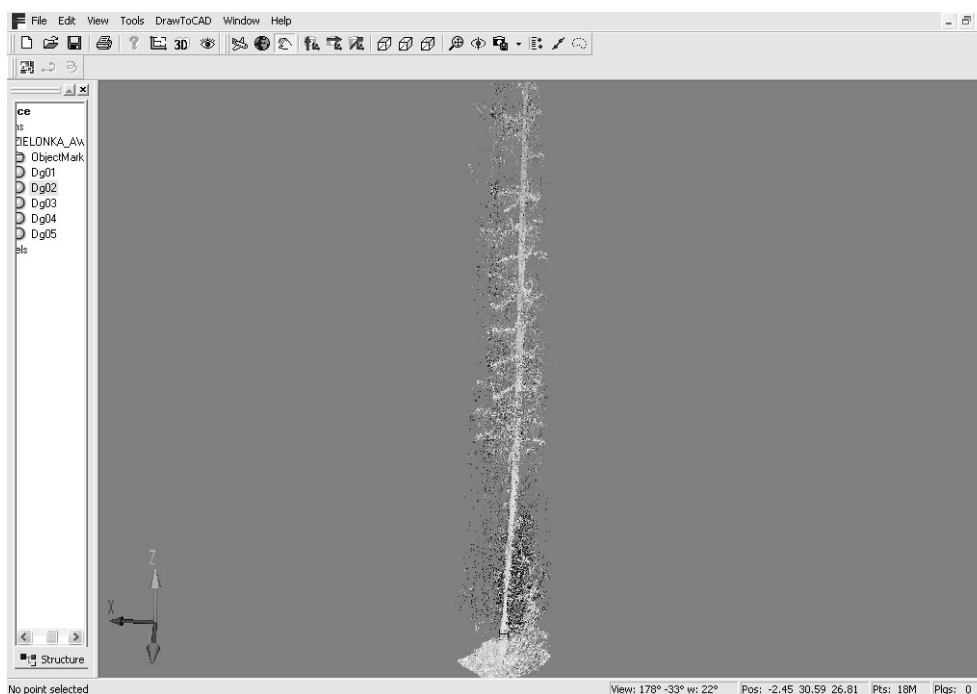
**Tabela 1.** Średnie pierśnice i wysokości ( $\pm$ odchylenia standardowe) analizowanych drzew  
**Table 1.** Mean diameters at breast height DBH ( $\pm$ SD) and tree heights ( $\pm$ SD) of sampled trees

Gatunek drzewa Tree species	Liczba drzew Number of trees	Pierśnica, cm DBH, cm	Wysokość, m Tree height, m
<i>Pinus sylvestris</i>	15	15,2 $\pm$ 3,0	13,4 $\pm$ 1,6
<i>Larix decidua</i>	15	18,8 $\pm$ 4,3	16,6 $\pm$ 1,9
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	15	20,4 $\pm$ 4,4	15,0 $\pm$ 1,7
<i>Quercus petraea</i>	15	13,1 $\pm$ 2,7	12,0 $\pm$ 1,4
<i>Fagus sylvatica</i>	15	15,4 $\pm$ 4,0	15,0 $\pm$ 1,7
<i>Tilia cordata</i>	15	14,3 $\pm$ 2,7	14,0 $\pm$ 1,3
<i>Acer pseudoplatanus</i>	15	16,3 $\pm$ 3,8	13,6 $\pm$ 1,8

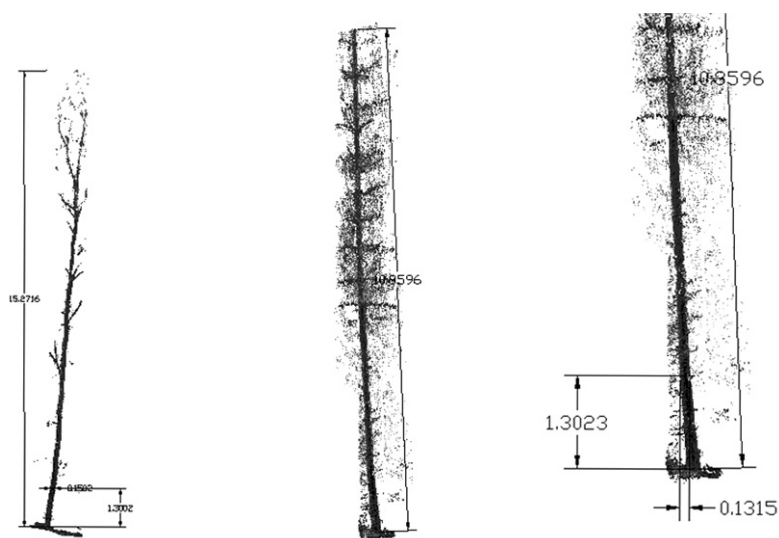
sposób, by było możliwe zbudowanie modelu 3D dla pięciu drzew zlokalizowanych w pobliżu.

Uzyskana surowa chmura punktów została prze-filtrowana, aby wyeliminować fałszywe dane powstałe w wyniku dwuznaczności i rozbieżność wiązki

laserowej. Za pomocą narzędzi selekcji i obróbki programu FARO Scene 4.1 (rys. 1), na każdym skanie wytypowano i wyseparowano po pięć drzew. W ten sposób dla każdego z siedmiu analizowanych gatunków uzyskano po 15 modeli pojedynczych drzew.



**Rys. 1.** Chmura punktów pojedynczego drzewa wyseparowana w programie FARO Scene  
**Fig. 1.** The point cloud of a single tree separated by FARO Scene software



**Rys. 2.** Pomiar parametrów drzew w programie Auto CAD  
**Fig. 2.** Measurement of tree parameters in Auto CAD software

Utworzone modele drzew wyeksportowano do programu Auto CAD 2006 (rys. 2). Za jego pomocą zmierzono średnice pni wszystkich drzew w odstopniowaniu co 1 m oraz pierśnice i wysokość drzewa, z dokładnością do 1 mm. Na podstawie tych pomiarów obliczono miąższość grubizny poszczególnych drzew, jako sumę objętości kolejnych wałków, aż do średnicy 7 cm w cieńszym końcu. Pomierzone pierśnice i wysokości (tab. 1) wykorzystano do obliczenia miąższości metodami tradycyjnymi – na podstawie tablic miąższości oraz z wykorzystaniem wzorów empirycznych. Nie wykonywano dodatkowych pomiarów tych parametrów bezpośrednio na powierzchni doświadczalnej, ponieważ wyniki otrzymane za pomocą skanera charakteryzują się wystarczającą dokładnością (Tompalski, 2009; Ratajczak i Wężyk, 2015), ponadto zostały wykonane w taki sam sposób, jak sekcyjne pomiary średnic. Różnice w metodzie zbioru danych w terenie mogłyby zwiększyć rozbieżność w wynikach dla poszczególnych metod określania miąższości (Wężyk i in., 2009).

Zastosowano tablice miąższości drzew stojących (Czuraj, 1991). Dla rodzajów drzew nieuwzględnionych w zestawieniach przyjęto tablice dla rodzajów najbardziej podobnych pod względem kształtu pnia (tab. 2). Aby uzyskać większą dokładność, wykorzystano podwójną interpolację (dla pierśnicy

i wysokości) na podstawie odczytanych wartości sąsiednich (niższej i wyższej).

Do określenia miąższości na podstawie wzorów empirycznych zastosowano modele opracowane dla Polski, dostępne w literaturze (Bruchwald, 1992; Bruchwald i in., 1994; 2010; Bruchwald i Rymer-Dudzińska, 1998; Dudzińska, 2003). Dla rodzajów drzew, dla których brak było takich wzorów wykorzystano równania przygotowane dla rodzajów gatunków najbardziej podobnych (tab. 2).

Ostatecznie dla każdego ze 105 pomierzonych drzew uzyskano po trzy miąższości grubizny, obliczone różnymi metodami: 1) na podstawie pomiarów sekcyjnych z chmury punktów ze skanowania laserowego, 2) na podstawie tablic miąższości, 3) na podstawie wzorów empirycznych.

Do sprawdzenia różnic pomiędzy miąższościami drzew określonymi trzema metodami wykorzystano analizę statystyczną. Ponieważ dane nie miały rozkładu normalnego, zostały przekształcone z wykorzystaniem transformacji Bliss'a. Następnie na przetransformowanych danych wykonano analizę wariancji dla miąższości obliczonych trzema metodami. Wyniki testu F policzono z poprawką Greenhouse'a-Geissera. Ponieważ analizie podlegały powtarzane pomiary dla tych samych drzew (były szacowane wyłącznie efekty wewnątrzobiektywne), nie wykonywano testów

**Tabela 2.** Źródło danych oraz rodzaj drzewa wykorzystany do obliczania miąższości drzew za pomocą tablic miąższości i za pomocą wzorów empirycznych

**Table 2.** Data sources and tree genus used in calculations of tree volume using volume tables and empirical equations

Gatunek drzewa Tree species	Tablice miąższości Volume tables	Wzory empiryczne Empirical equations
<i>Pinus sylvestris</i>	Sosna – <i>Pinus</i> (Czuraj, 1991)	Sosna – <i>Pinus</i> (Bruchwald i Rymer-Dudzińska, 1998)
<i>Larix decidua</i>	Modrzew – <i>Larix</i> (Czuraj, 1991)	Modrzew – <i>Larix</i> (Bruchwald i in., 2010)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Jodła – <i>Abies</i> (Czuraj, 1991)	Jodła – <i>Abies</i> (Bruchwald, 1992)
<i>Quercus petraea</i>	Dąb – <i>Quercus</i> (Czuraj, 1991)	Dąb – <i>Quercus</i> (Bruchwald i in., 1994)
<i>Fagus sylvatica</i>	Buk – <i>Fagus</i> (Czuraj, 1991)	Buk – <i>Fagus</i> (Dudzińska, 2003)
<i>Tilia cordata</i>	Lipa – <i>Tilia</i> (Czuraj, 1991)	Dąb – <i>Quercus</i> (Bruchwald i in., 1994)
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Dąb – <i>Quercus</i> (Czuraj, 1991)	Dąb – <i>Quercus</i> (Bruchwald i in., 1994)

post-hoc. Uzyskane średnie miąższości drzew porównano metodą LSD (szacowania średnich brzegowych). Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem programu statystycznego JMP 10.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

## WYNIKI

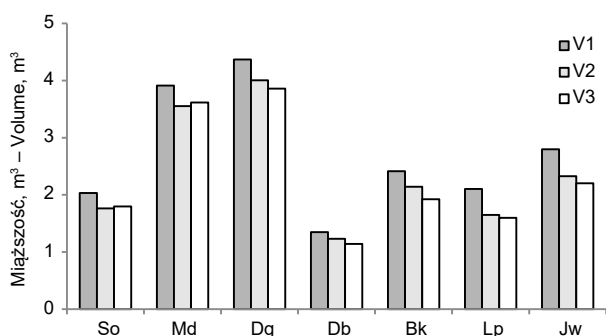
Miąższość pojedynczych drzew siedmiu gatunków została określona trzema metodami (tab. 3). Średnia miąższość określona za pomocą skanera laserowego

**Tabela 3.** Średnie miąższości drzew ( $\pm$ odchylenie standardowe), określone za pomocą skanera laserowego (V1), tablic miąższości (V2) oraz wzorów empirycznych (V3)

**Table 3.** Mean tree volume ( $\pm$ SD) determined by: LiDAR measurement (V1), volume tables (V2) and empirical equations (V3)

Gatunek drzewa Tree species	V1, m <sup>3</sup>	V2, m <sup>3</sup>	V3, m <sup>3</sup>
<i>Pinus sylvestris</i>	0,14 $\pm$ 0,08a	0,12 $\pm$ 0,07b	0,12 $\pm$ 0,07b
<i>Larix decidua</i>	0,26 $\pm$ 0,14a	0,24 $\pm$ 0,11b	0,24 $\pm$ 0,12b
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,29 $\pm$ 0,15a	0,27 $\pm$ 0,13b	0,26 $\pm$ 0,01ab
<i>Quercus petraea</i>	0,09 $\pm$ 0,04a	0,08 $\pm$ 0,05b	0,08 $\pm$ 0,04c
<i>Fagus sylvatica</i>	0,16 $\pm$ 0,10a	0,14 $\pm$ 0,08b	0,13 $\pm$ 0,08c
<i>Tilia cordata</i>	0,14 $\pm$ 0,05a	0,11 $\pm$ 0,04b	0,11 $\pm$ 0,05b
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,19 $\pm$ 0,11a	0,16 $\pm$ 0,10b	0,15 $\pm$ 0,09c

Różne litery oznaczają różnice istotne statystycznie ( $p < 0,05$ ).  
Different letters indicate statistically significant differences ( $p < 0,05$ ).



**Rys. 3.** Sumaryczna miąższość analizowanych drzew ( $N = 15$ ) określona za pomocą skanera laserowego (V1), tablic miąższości (V2) oraz wzorów empirycznych (V3). Gatunki drzew: *Pinus sylvestris* (So), *Larix decidua* (Md), *Pseudotsuga menziesii* (Dg), *Quercus petraea* (Db), *Fagus sylvatica* (Bk), *Tilia cordata* (Lp) i *Acer pseudoplatanus* (Jw)

**Fig. 3.** Total volume of sampled trees ( $N = 15$ ) determined by: LiDAR measurement (V1), volume tables (V2) and empirical equations (V3). Tree species: *Pinus sylvestris* (So), *Larix decidua* (Md), *Pseudotsuga menziesii* (Dg), *Quercus petraea* (Db), *Fagus sylvatica* (Bk), *Tilia cordata* (Lp) and *Acer pseudoplatanus* (Jw)

(V1) wynosiła od  $0,09 \text{ m}^3$  dla dębu do  $0,29 \text{ m}^3$  dla daglezi, wyznaczona z wykorzystaniem tablic (V2) sięgała od  $0,08 \text{ m}^3$  dla dębu do  $0,27 \text{ m}^3$  dla daglezi, a ustalona wzorami empirycznymi (V3) równała się od  $0,08 \text{ m}^3$  dla dębu do  $0,26 \text{ m}^3$  dla daglezi (tab. 3).

Różnice między miąższościami sekcijnymi określonymi za pomocą skanera (V1) a miąższościami tabelarycznymi (V2) były istotne statystycznie dla wszystkich siedmiu gatunków, a różnice między miąższościami sekcijnymi (V1) a miąższościami określonymi ze wzorów (V3) były istotne dla sześciu gatunków (oprócz daglezi). Różnice między miąższościami tabelarycznymi (V2) a określonymi ze wzorów empirycznych (V3) były istotne tylko dla trzech gatunków: dębu, buka i jawora (tab. 3).

Sumaryczna miąższość 15 analizowanych drzew, określona sekcyjnie za pomocą skanera laserowego, dla wszystkich gatunków była większa niż ustalona dwoma pozostałymi sposobami (rys. 3).

## DYSKUSJA

Uzyskane wyniki pokazują, że w badanych drzewostanach podokapowych miąższość określona sekcyjnie

za pomocą skanera laserowego dla wszystkich gatunków była istotnie wyższa niż określona dwoma pozostałymi sposobami. Określanie miąższości drzew za pomocą tablic i za pomocą wzorów empirycznych jest oparte na dwóch pomierzonych cechach drzew: pierśnicy i wysokości. Na dokładność uzyskanych wyników znacząco wpływa kształt drzew, szczególnie ich tzw. pełność. Ponieważ są to metody uniwersalne dla całego kraju i wszystkich typów lasów, z konieczności muszą opierać się na wartościach uśrednionych, szczególnie dobrze pasujących do drzew rosnących w warunkach typowych. Nie jest możliwe opracowanie tablic czy wzorów, które będą oparte na podstawowych cechach dendrometrycznych i jednocześnie będą się charakteryzowały dużą dokładnością w każdym warunkach (Socha, 2003). Jak wynika z dotychczasowych badań, kształt strzał drzew leśnych jest zróżnicowany w zależności od warunków wzrostu drzewostanów i jest nieco inny w terenach górskich oraz na nizinach. Zależny jest również od wieku i od wymiarów drzew (Niemczyk i Bruchwald, 2017; Socha, 2004; Socha i Kubik, 2005).

Uzyskane w pracy rezultaty potwierdziły przyjętą hipotezę, że ze względu na inne warunki wzrostu, sekcyjny pomiar miąższości drzew podokapowych dał inny wynik niż określanie miąższości metodami z wykorzystaniem pomiaru pierśnicy i wysokości. W podobnych badaniach wykonanych dla sosny zwyczajnej Wężyk i in. (2009) wykazali, że miąższość określona sekcyjnie za pomocą naziemnego skanera laserowego różniła się od tej określonej za pomocą tablic i wzorów empirycznych. Natomiast Wężyk i Sroga (2010), porównując różne metody określania miąższości, zaobserwowali dla sosny zwyczajnej stałe różnice, na poziomie  $-8\%$ , pomiędzy wynikami ze skanowania a tablicami.

Stwierdzone w niniejszej pracy różnice między wynikami uzyskanymi różnymi sposobami nie mogły wynikać z błędów pomiarowych, ponieważ wszystkie średnice drzew (w tym pierśnica) były mierzone w ten sam sposób, w programie komputerowym na chmurze punktów reprezentujących drzewo. Pomiar pierśnicy i wysokości metodami tradycyjnymi mógłby spowodować większe różnice wynikające z różnej dokładności tych metod (Ratajczak i Wężyk, 2015; Wężyk i in., 2009; Wężyk i Sroga, 2010).

Rozwiązaniem opisanego problemu określania miąższości, wynikającego ze zmienności kształtu

drzew rosnących w różnych warunkach, może być powszechne zastosowanie w inwentaryzacji lasu skanerów laserowych i pomiar większej liczby średnic drzewa niż tylko pierśnica (Socha i Kubik, 2005; Wężyk i Sroga, 2010). Dodatkowo będzie konieczne opracowanie dopasowanych do tej metody wzorów empirycznych opartych na dwóch lub więcej średnicach drzewa, pomierzone na różnych wysokościach. Po zastosowaniu pełnej automatyzacji metody można jednocześnie skrócić czasu pomiarów oraz zwiększyć dokładności określania miąższości drzew.

## PIŚMIENNICTWO

- Aschoff, T., Spiecker, H. (2004). Algorithms for the automatic detection of trees in laser-scanner data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 36(8/W2), 71–75.
- Aschoff, T., Thies, M., Spiecker, H. (2004). Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 35(5), 237–241.
- Bruchwald, A. (1992). Wzory empiryczne do określania miąższości drzewostanów jodłowych [Empirical formulas to calculate volume of fir stands]. *Sylvan*, 136(7), 17–23.
- Bruchwald, A., Dmyterko, E., Wojtan, R. (2010). Wzory empiryczne do określania pierśnicowych liczb kształtu dla modrzewia [Empirical equations to calculate dbh form factors for larch]. *Sylvan*, 154(10), 705–709.
- Bruchwald, A., Dudzińska, M., Wirowski, M. (1994). Wzory empiryczne do określania miąższości drzewostanów dębowych [Empirical formulas to calculate volume of oak stands]. *Sylvan*, 138(2), 5–11.
- Bruchwald, A., Rymer-Dudzińska, T. (1998). Wzory empiryczne do określania pierśnicowej liczby kształtu strzał sosen w korze z uwzględnieniem krain przyrodniczo-leśnych [Empirical formulas to calculate breast height form factor outside bark in pine depending on natural forest regions]. *Sylvan*, 142(8), 5–13.
- Chirrek, M., Strzeliński, P., Wencel, A., Zasada, M., Zawila-Niedźwiecki, T. (2007). Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w inwentaryzacji lasu [The use of terrestrial laser scanning technology in forest inventory]. *Rocz. Geomat.*, 5(5), 19–24.
- Czuraj, M. (1991). Tablice miąższości kłód odziomkowych i drzew stojących [Volume tables for butt end longs and standing trees]. Warszawa: PWRiL.
- Dudzińska, M. (2003). Wzory empiryczne do określania pierśnicowych liczb kształtu drzewostanów buka nizinnego [Empirical equations to calculate dbh form factors for lowland beech stands]. *Sylvan*, 147(1), 35–40.
- Magnuski, K., Jaszczak, R. (1993). Ocena wzrostu i jakości różnych gatunków drzew pod okapem przebudowanego starodrzewu sosnowego [Assessment of growth and quality of various tree species under the canopy of a converted old pine stand]. *Pr. Kom. Nauk Roln. Kom. Nauk Leśn. PTPN*, 76, 79–83.
- Miś, R., Pijański, J. (1993). Wzrost i jakość podsadzeń modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) w przebudowanym drzewostanie sosnowym w Nadleśnictwie Doświadczalnym Zielonka [Growth and quality of European larch (*Larix decidua* Mill.) seedlings in converted pine stand in the Zielonka Experimental Forest District]. *Pr. Kom. Nauk Roln. Kom. Nauk Leśn. PTPN*, 76, 93–97.
- Niemczyk, M., Bruchwald, A. (2017). Wzory do określania pierśnicowej liczby kształtu mieszańców selekcyjnych topoli [Equations to calculate dbh form factor of poplar and its hybrids]. *Sylvan*, 161(5), 413–421.
- Pfeifer, N., Winterhalder, D. (2004). Modelling of tree cross sections from terrestrial laser-scanning data with free-form curves. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 36(2), 76–81.
- Ratajczak, M., Wężyk, P. (2015). Automatyczne określanie średnicy pnia, podstawy korony oraz wysokości sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na podstawie analiz chmur punktów 3D pochodzących z wielostanowiskowego naziemnego skanowania laserowego [Automatic determination of trunk diameter, crown base and height of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) based on analysis of 3D point clouds gathered from multistation terrestrial laser scanning]. *Arch. Fotogram. Kartogr. Teledet.*, 27, 123–138.
- Socha, J. (2003). Ocena dokładności wybranych sposobów określania miąższości drzew stojących w górskich drzewostanach świerkowych [Accuracy assessment of selected methods to determine standing tree volume in mountain spruce stands]. *Sylvan*, 143(4), 78–86.
- Socha, J. (2004). Zastosowanie trygonometrycznego modelu zbieżystości do określania kształtu strzał świerka [The use of a trigonometric taper model to determine stem shape in spruce]. *Sylvan*, 148(4), 3–4.
- Socha, J., Kubik, I. (2005). Model zbieżystości strzał dla górskich drzewostanów świerkowych średnich klas wieku [A taper model for mountain spruce stands in medium age classes]. *Sylvan*, 149(1), 42–52.

- Thies, M., Spiecker, H. (2004). Evaluation and future prospects of terrestrial laser-scanning for standardized forest inventories. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 36(8/W2), 192–197.
- Tompalski, P. (2009). Naziemny skaning laserowy w inwentaryzacji zieleni miejskiej na przykładzie Plant w Krakowie [Terrestrial laser scanning for an urban green inventory based on the Planty in Kraków]. *Arch. Fotogram. Kartogr. Teledet.*, 20, 421–431.
- Watt, P. J., Donoghue, D. N. M. (2005). Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *Int. J. Remote Sens.*, 26(7), 1437–1446.
- Wężyk, P. (2006). Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie [Introduction to laser scanning technology in forestry]. *Rocz. Geomat.*, 4(4), 119–132.
- Wężyk, P., Sroga, R. (2010). Naziemny skaning laserowy w inwentaryzacji miąższości drzewostanów sosnowych [Terrestrial laser scanning in the inventory of Scots pine stand volume]. *Rocz. Geomat.*, 8(7), 63–71.
- Wężyk, P., Sroga, R., Szwed, P., Szostak, M., Tompalski, P., Kozioł, K. (2009). Wykorzystanie technologii naziemnego skaningu laserowego w określaniu wybranych cech drzew i drzewostanów [The application of terrestrial laser scanning to determine selected characteristics of trees and forest stands]. *Arch. Fotogram. Kartogr. Teledet.*, 19, 447–457.
- Wężyk, P., Szostak, M., Tompalski, P. (2012). Określenie biomasy sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Puszczy Niepołomickiej na podstawie przestrzennego rozkładu chmury punktów naziemnego skaningu laserowego [Biomass of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Niepołomice forest based on terrestrial laser scanning data. A case study]. *Rocz. Geomat.*, 10(5), 79–89.
- Zabiński, B. (1978). Odnowienia podokapowe sosny, dębu, buka, dąglezji, modrzewia, lipy i jaworu w drzewostanie sosnowym VII klasy wieku na przykładzie Nadleśnictwa Doświadczalnego Zielonka [Regeneration of pine, oak, beech, Douglas fir, larch, lime and sycamore under the canopy of a pine stand of 7th age class in the Zielonka Experimental Forest District]. *Rocz. AR Pozn.*, 54, 149–161.
- Zasada, M., Sterenczak, K. (2013). Dokładność określenia wybranych parametrów rozkładów pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych za pomocą naziemnego skanowania laserowego [Accuracy of determination of selected dbh distributions in Scots pine stands using terrestrial laser scanning]. *Sylvan*, 157(12), 883–891.
- Zawiła-Niedźwiecki, T., Strzeliński, P., Wencel, A., Chirrek, M. (2007). Laserowy skaner naziemny w badaniach ekosystemów leśnych [Terrestrial laser scanner in forest ecosystems surveys]. W: B. Medyńska-Gulij, L. Kaczmarek (red.), *Informacja geograficzna w kształtowaniu i ochronie środowiska przyrodniczego* (s. 197–207). Poznań: Bogucki Wyd. Nauk.

## USE OF TERRESTRIAL LASER SCANNER TO DETERMINE VOLUME OF TREES GROWING UNDER CANOPY

### ABSTRACT

The aim of the study was to determine, with the use of a terrestrial laser scanner, volume of 7 tree species: Scots pine *Pinus sylvestris*, European larch *Larix decidua*, Douglas fir *Pseudotsuga menziesii*, Sessile oak *Quercus petraea*, Common beech *Fagus sylvatica*, Sycamore maple *Acer pseudoplatanus* and Small-leaved lime *Tilia cordata*. The results were compared with the volume determined using volume tables and empirical equations. The measurements were taken on an experimental plot in the Zielonka Forest District. The experimental forest encompasses sample plots of 40-year old stands of the 7 analysed species growing under the canopy of 160-year old Scots pines. For the 7 examined species scans on 3 plots were made with the use of Faro LS 880. On every plot 5 model trees were analysed based on measurements of their diameters in one-meter intervals as well as DBH and tree height. The measurements were taken using FARO Scene and AutoCAD software. In total 105 trees were measured. Volume data obtained with a laser scanner for the analyzed species were lower in value than the volume obtained using volume tables or empirical equations.

**Keywords:** LiDAR, tree measurement, tree volume, volume tables, empirical equations