

# OCENA WŁAŚCIWOŚCI DREWNA BRZOSOWEGO ZA POMOCĄ SPEKTROSKOPII NIR I SILVI SCAN DLA PRÓBEK Z POLSKI, USA I SMOLEŃSKA

Chris J. Cieszewski

## Abstract

*This study describes comparative analysis of wood properties, such as density, MOE (modulus of elasticity), and MFA (micro fibril angle) measured with the state of the art technologies on various birch samples from Poland and Smolensk to accurately estimate wood properties for the Smolensk birch branch sample. In this study we estimate the theoretical values of the oven dried wood quality parameters and their relation to height and radial location in the tree trunk for the Smolensk Birch. We compare the estimated parameters with the corresponding oven dried wood quality parameters of other auxiliary samples of silver birch (*Betula pendula* Roth) from Poland and tabular data for Polish, Finish, and American birch species. Then we compare the green wood parameters for the derived Smolensk birch against the standard utility wood poles parameters in the USA, and identify environmental adjustments necessary for a realistic and accurate representation of the final Smolensk birch wood parameters. The final results of this study demonstrate that in principle the Smolensk birch wood quality parameters are not significantly different from the well documented in the literature yellow birch (*Betula alleghaniensis*) and Polish silver birch wood quality parameters. As such these parameters for green wood are generally weaker than the wood quality parameters for the standard American wood poles made of southern pines. However, given the necessary wood quality parameter reductions because of an excessive number of branches in the Smolensk birch, its parameters may be considered to be much weaker than the regular ANSI (American National Standards Institute) standards American wood poles*

**Keywords** - green wood, SilviScan, Smolensk birch, Smolensk crash, wood properties.

## Streszczenie

*W referacie przedstawiono wyniki analizy porównawczej właściwości drewna takich jak gęstość MOE (współczynnik sprężystości) i MFA (kąt nachylenia mikrowłókien), określanych nowoczesnymi metodami na różnych próbkach brzozy z Polski i Smoleńska w celu dokładnego oszacowania właściwości próbek gałęzi brzozy ze Smoleńska. W badaniu tym szacujemy wartości teoretyczne parametrów próbek z drewna suszonego w suszarni i ich zależność od wysokości i usytuowania radialnego w pniu drzewa brzozy smoleńskiej. Oszacowane parametry porównujemy z odpowiednimi parametrami jakości drewna suszonego uzyskanymi z badań innych dodatkowych próbek brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth) z Polski i z danych tabelarycznych dla polskich, fińskich i amerykańskich gatunków brzozy. Następnie porównujemy parametry drewna świeżego z parametrami drewna okrągłego w USA i identyfikujemy dostosowania środowiskowe niezbędne do rzeczywistego i dokładnego przedstawienia ostatecznych wartości parametrów drewna z brzozy smoleńskiej. Ostateczne wyniki badań wykazują, że parametry jakości brzozy smoleńskiej w*

*zasadzie nie różnią się znacząco od dobrze udokumentowanych w literaturze parametrów brzozy żółtej (*Betula alleghaniensis*) i polskiej brzozy brodawkowatej. Parametry jakości świeżego drewna są jednak ogólnie słabsze niż parametry jakości drewna okrągłego przed przetarciem, z amerykańskich sosen południowych. Jednakże, biorąc pod uwagę niezbędne redukcje parametrów jakości drewna z powodu zbyt dużej liczby odgałęzień w brzozy smoleńskiej, jej parametry jakości mogą być uważane za znacznie słabsze niż dla drewna okrągłego wg norm amerykańskich ANSI (American National Standard).*

**Słowa kluczowe** – brzoza smoleńska, drewno świeże, katastrofa smoleńska, SilviScan, właściwości drewna.

## 1. WPROWADZENIE

Gęstość drewna (powietrzno suchego) określa stosunek ciężaru drewna do jego objętości po suszeniu w suszarni [1] i stanowi oszacowanie ilości pustych komórek w danej objętości drewna. Jest ona istotną właściwością drewna z uwagi na silną korelację z jego wytrzymałością. Gęstość w stanie powietrzno suchym, kąt nachylenia mikrowłókien (MFA) i współczynnik sprężystości (MOE) są istotnymi właściwościami do oceny przydatności drewna do różnych zastosowań konstrukcyjnych. Kąt nachylenia mikrowłókien (MFA) jest kątem między mikrowłóknami w warstwie ściany komórki z jej osią podłużną. [1]. MFA ma duży wpływ na sztywność, wytrzymałość i stabilność wymiarową oraz jest istotnym wyznacznikiem jakości drewna przetartego [2]. MOE wyznacza sztywność materiału i wyraża stosunek naprężenia do okształcenia. Gęstość, MFA i MOE określają konstrukcyjną jakość drewna uzyskanego z pnia drzewa.

Obecnie, do pomiaru właściwości drewna stosowane są metody nieniszczące, takie jak spektroskopia w podczerwieni (NIR), proces SilviScan, który wykorzystuje dyfrakcję i absorpcję promieni rentgenowskich i system analizy Image. Pomimo, że nie zapewniają bezpośredniego pomiaru właściwości drewna, są one coraz częściej stosowane gdyż pozwalają na szybką i nieniszczącą ocenę właściwości drewna, a ich wyniki w mniejszym stopniu zależą od przygotowania próbek, niż przy metodach wcześniej stosowanych [3; 4, 5]. W niniejszym referacie przedstawiono analizę porównawczą właściwości drewna (gęstość, MOE i MFA) określaną za pomocą SilviScan i NIR na próbkach z brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth) pobranej z rejonu Mińska Mazowieckiego (centralna Polska) i Smoleńska (Republika Rosyjska). Próbkę brzozy smoleńskiej pochodzą z tego samego drzewa, z którym rzekomo zderzył się samolot Polskich Sił Powietrznych Tu-

154, zniszczony 10 kwietnia 2010 r. w pobliżu lotniska smoleńskiego. Porównaliśmy wyniki pomiarów tej próbki z wynikami na próbkach z brzozy brodawkowatej pobranymi w Polsce, z wynikami i istniejącymi danymi tabelarycznymi dla polskich, fińskich i handlowych amerykańskich gatunków brzozy.

Właściwości drewna, takie jak MOE (współczynnik sprężystości), MFA (kąt nachylenia mikrowłókien) i gęstość są ilościowymi parametrami jakości drewna, niezbędnymi do oceny mechanicznego zniszczenia konstrukcji z drewna (lub drzew) poddanych siłom zewnętrznym, takim jak siły od wiatru, śniegu i zderzeń z innymi obiektami oraz do oszacowania zniszczeń uderzającego obiektu. Aktualnie dostępnymi metodami do oceny różnych właściwości drewna są spektroskopia NIR (promieniowanie podczerwone) oraz SilviScan (wykorzystanie dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego, absorpcji promieniowania rentgenowskiego oraz analizy obrazu), pozwalające na szybkie bardzo dokładne pomiary na małych próbkach materiałów. Metody te stosujemy do oceny parametrów jakości drewna na podstawie próbek z gałęzi brzozy smoleńskiej, której parametry jakości są nieznane, w sytuacji kiedy nie ma możliwości uzyskania próbek w wymaganym czasie. Brzoza ta jest przedmiotem wielu naukowych dociekań, wymagających znajomości parametrów jakości drewna do obliczeń inżynierskich i symulacji komputerowych. Naukowa dyskusja na ten temat została zainspirowana hipotezą o rzekomym zderzeniu z tą brzozą samolotu TU-154 w dniu 10 kwietnia 2010 r., powodującym jego katastrofalne zniszczenie.

Do oceny parametrów jakości drewna z brzozy smoleńskiej przyjęliśmy dane z próbki pobranej z gałęzi analizowanego drzewa, z innych próbek brodawkowatej brzozy z terenu Polski oraz z danych tabelarycznych innych brzozy. Próbka z gałęzi brzozy smoleńskiej została pobrana przez niezależnego polskiego dziennikarza. W czasie wizyty na miejscu tragedii w dniu 13 kwietnia 2010 r. (3 dni po wypadku) odciał on próbki z gałęzi brzozy smoleńskiej, a następnie przekazał je Przewodniczącemu Komitetu Organizacyjnego Konferencji Smoleńskiej. (patrz [www.smolenskrash.com](http://www.smolenskrash.com)). Ponieważ nikt inny nie pobrał próbek drewna w czasie wypadku, próbka analizowana w badaniu jest jedyną dotychczas znaną próbką brzozy smoleńskiej. Od czasu wypadku właściwości drewna w analizowanej brzozie uległy pogorszeniu na skutek niszczącego działania grzybów. Trudno więc oczekiwać, że obecnie pobrane próbki mogłyby wskazywać na właściwości drewna w czasie analizowanego wydarzenia.

Oprócz wspomnianej próbki z brzozy smoleńskiej analizowaliśmy próbki, jakie dla celów niniejszego opracowania przekazała grupa polskich naukowców dendrologów. Próbki te zostały pobrane z pni drzew brzozy brodawkowatej z rejonu Mińska (Polska), które rosły w podobnych warunkach jak w rejonie Smoleńska.

W naszej analizie właściwości drewna koncentrujemy się głównie na gęstości drewna, MOE i MFA różnych próbek drewna brzozy za pomocą spektroskopii NIR i SilviScan. Następnie porównujemy te parametry z opublikowanymi parametrami innych gatunków północno amerykańskich, tak aby na tej podstawie korzystając z opublikowanych tablic określić inne interesujące właściwości drewna.

Głównym celem niniejszego badania było ustalenie na podstawie analizy danych z literatury parametrów jakości

drewna powietrzno suchego i ich rzeczywistych przedziałów ufności dla drzewa z brzozy smoleńskiej i jej prawdopodobnej zależności od wysokości i usytuowania radialnego. Postanowiliśmy sprawdzić, czy parametry jakości brzozy smoleńskiej były znacząco różne niż parametry jakości brzozy brodawkowatej. Najbardziej pożądanym wynikiem było określenie czy oszacowania parametrów jakości brzozy smoleńskiej w stanie powietrzno suchym mogłyby być zadowalająco dopasowane do parametrów jakości drzewa któregośkolwiek z amerykańskich znanych i udokumentowanych gatunków drzewa. Pozytywny wynik takiego dopasowania umożliwiłby ustalenie wszystkich innych właściwości mechanicznych drzewa z brzozy smoleńskiej, których nie ustalono w naszych badaniach.

Drugim celem niniejszego badania było porównanie na podstawie przeglądu literatury ocenionych parametrów jakości drzewa z brzozy smoleńskiej z parametrami jakości amerykańskiego normowego drewna okrągłego głównie z sosen południowych. W tym zakresie celem badania była: ocena ogólnie oczekiwanych parametrów jakości drewna okrągłego oraz porównanie ocenionych właściwości z wcześniej określonymi parametrami jakości drzewa świeżego z brzozy smoleńskiej.

Trzecim celem badania była identyfikacja istotnych czynników środowiskowych, które powinny być uwzględniane przed oszacowaniem ostatecznych parametrów jakości brzozy smoleńskiej.

Podstawowy materiał badawczy dla przeprowadzonych badań stanowiły próbki drewna. Wszelkie dane wykorzystywane później w analizie są w istocie wyprowadzone wg wybranych metod oceny materiału podstawowego. W związku z tym najpierw opisujemy materiał podstawowy, a potem metody oceny razem z uzyskanymi za ich pomocą danymi. Następnie, w rozdziale 4. zatytułowanym *Wyniki badań i ich dyskusja*, omawiamy wyniki porównań, związane z nimi implikacje oraz ich znaczenie. Ostatecznie, na końcu niniejszego referatu podajemy główne wnioski wynikające z badania i zalecenia co do dalszych analiz.

## 2. MATERIAŁY

W niniejszym opracowaniu wykorzystano:

- 1) wyniki badań próbki gałęzi z brzozy smoleńskiej z Republiki Rosyjskiej i analizy próbek z pnia brzozy brodawkowatej z Polski,
- 2) przegląd literatury dotyczącej parametrów jakości różnych gatunków drewna i norm produkcji drewna okrągłego,
- 3) fotografie brzozy smoleńskiej i ustalone na ich podstawie charakterystyki proporcji powierzchni sęków i liczby odgałęzień koron oraz
- 4) doświadczenie zawodowe ekspertów zaangażowanych w niniejszym badaniu.

**Ad. 1.** Podstawowe pomiary jakości drewna w niniejszym badaniu zostały uzyskane z gałęzi o średnicy 5 cm i długości około 30 cm, odciętej z brzozy smoleńskiej. Próbka gałęzi została pobrana z podstawy drzewa trzy dni po wypadku (13 kwietnia 2010 r.) a następnie suszona i przechowywana w warunkach domowych.

Do analizy drewna pnia została wybrana pewna liczba drzew z gatunku brzozy brodawkowatej rosnących w pobliżu Mińska w Polsce. Krążki o grubości 5 cm zostały

pobrane z różnych poziomów (0, 0,5, 1,3, 1,5 m i w odstępnie 1 m do czubka) ze ściętych drzew. Do analizy został także wybrany jeden kompletny zestaw dysków z pojedynczego drzewa i kawałek pnia wybrany losowo ze zbioru próbek z wielu drzew. Wszystkie próbki były sprawdzane przez ekspertów od jakości drewna pod względem anomalii takich jak zgnilizna drewna, uszkodzenia przez owady lub grzyby lub jakiegokolwiek fizyczne lub chemiczne uszkodzenia, przed poddaniem ich dalszym przygotowaniom do badań w USDA Forest Service Wood Quality (Rys. 1). W próbkach, które mogłyby wykazywać nawet niewielkie ślady uszkodzenia, były odcinane zabarwione powierzchnie, tak aby do badań trafiły tylko zdrowe i nieuszkodzone części drewna.



**Rys. 1.** Próbki drewna brzozy. Przygotowanie oraz sześć próbek wybranych do analizy i kalibracji przyrządów.



**Rys. 2.** Próbki z gałęzi brzozy 01 – 04 wycięte z jednego drzewa polskiego, 05 – z drugiego polskiego drzewa, 06 z gałęzi brzozy smoleńskiej.

Próbka z gałęzi brzozy smoleńskiej została podzielona na pięć segmentów. Z każdego segmentu została odcięta jedna próbka, która następnie została wysuszona w suszarni i poddana pomiarom gęstości. Z dwóch gałęzi brzozy przygotowano krążki pobrane na wysokości odpowiednio 0,

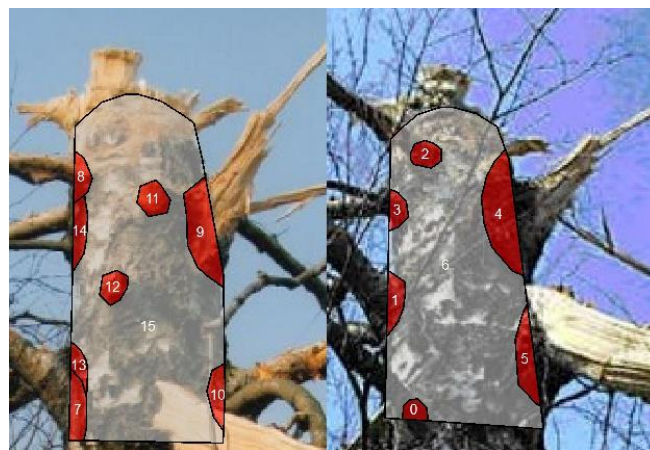
1,3, 6,5 oraz 10,5 m i z każdego krążka wycięto bloczki o przekroju 2x2 cm (licząc w kierunku obwodowym i radialnym) o długości zależnej od promienia krążka. Z bloczków zostały wycięte promieniowe listwy o przekroju 2 mm x 7 mm (licząc odpowiednio w kierunku promieniowym i obwodowym) o długości zależnej od promienia krążka (Rys. 2).

Następnie wybrano sześć próbek (cztery z jednego, jedną z innych brzozy srebrnych i jedną z brzozy smoleńskiej), które przesłano do FP Innovations Facilities w Vancouver, B.C., Canada, w celu przeprowadzenia analizy SilviScan, podczas gdy inne próbki zostały przekazane do laboratorium pomiaru jakości drewna WSFNR, University of Georgia.

**Ad. 2.** W literaturze dostępne są liczne materiały do porównania parametrów jakości różnych rodzajów drewna - zarówno dla różnych gatunków brzozy jak też innych rodzajów drewna. Badania dotyczące zmienności właściwości drewna brzozy są nieliczne, ale kilka gatunków brzozy jest dobrze udokumentowanych oraz istnieje dużo publikowanych informacji o właściwościach południowych sosen wykorzystywanych jako główny materiał do produkcji drewna okrągłego. Dane dotyczące gatunków brzozy, wykorzystane w niniejszym opracowaniu zostały podane wg [6, 7]. Podane w tej publikacji średnie wartości parametrów najważniejszych handlowych gatunków brzozy są przedstawione w Tab. 1.

**Tab. 1.** Główne właściwości jakości drewna z gatunków komercyjnych.

Brzoza	Wilgotność	Gęstość charakterystyczna	MOR (MPa)	MOE (GPa)
Papierówka	świeża	480	44	8.1
	12%	550	85	11
Cukrowa	świeża	600	65	11.4
	12%	650	117	15
Żółta	świeża	550	57	10.3
	12%	620	114	13.9



**Rys. 3.** Punkt złamania brzozy smoleńskiej sfotografowany przez różnych fotografów 11 i 13 kwietnia 2010 r. (Czerwone wieloboki wyznaczają sęki a białe określają obszary rozważanych części pnia.).

Dane dotyczące właściwości i norm produkcji drewna okrągłego znaleźć można w licznych publikacjach [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Dobre podsumowanie można znaleźć w pracy [28].

**Ad. 3.** Spośród wielu dostępnych fotografii brzozy smoleńskiej do niniejszego badania zostały wzięte dwie ze strony internetowej Konferencji Smoleńskiej <http://smolenscrash.com>. Wybrane fotografie (Rys. 3) były wykonane 11 i 13 kwietnia 2010 r. przez dwóch różnych

fotografów. Fotografie były wykorzystane do określenia obszaru rdzeni w pobliżu punktu złamania. Obszary sęków były podzielone w ArcGIS i ponumerowane. Na Rys. 3 zostały one oznaczone na czerwono. Rysunek ten był wykorzystany do obliczeń pól wszystkich wieloboków.

### 3. METODY I DANE

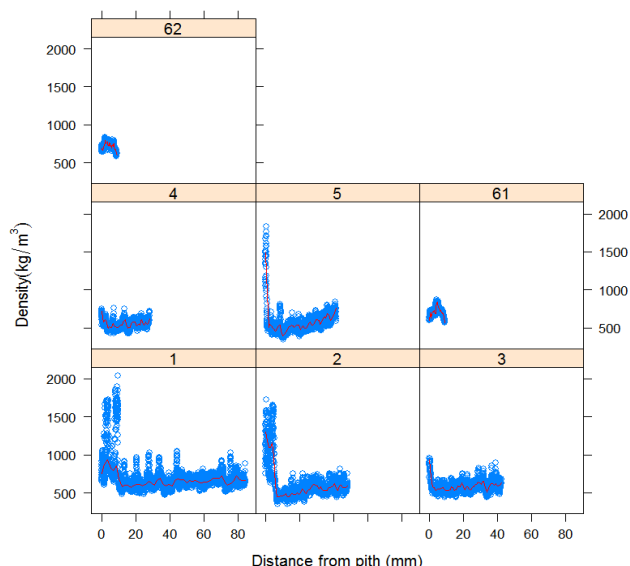
#### 3.1. Analiza i pomiary wg SilviScan

Do pomiarów właściwości drewna na próbkach z wycinanych promieniowo listew zastosowano metodę SilviScan [29, 30]. Wszystkie pomiary były wykonane w kontrolowanym środowisku (wilgotność względna 40%, temperatura 20°C, tj. równoważne 7,7% MC). Gęstość była mierzona w odstępach 25  $\mu\text{m}$  za pomocą densytometrii rentgenowskiej. MFA mierzono stosując skanowanie za pomocą dyfraktometrii rentgenowskiej w odstępach 5 mm. Oszacowanie MOE (przy tej samej rozdzielczości jak MFA) uzyskano poprzez połączenie informacji Dss i Icv [31], gdzie Icv jest odchyleniem standardowym intensywności azymutalnego profilu dyfrakcji. Dane spektralne w przedziałach 5 mm od rdzenia do kory z próbek wykorzystywanych do analizy SilviScan były również określane za pomocą spektrometru skaningowego FOSS NIR System Inc. Model 5000. Próbkki były przetrzymywane w komorze z przekryciem dla zapewnienia stałej wilgotności [5]. Widma były określane w odstępach 2 nm w zakresie długości fali 1100–2500 nm. Dane określające właściwości drewna wg SilviScan i odpowiadające dane spektralne wg analizy NIR były wykorzystane do kalibracji gęstości, MFA i MOE za pomocą metody regresji wg metody najmniejszych kwadratów (PLS) z segmentami cztero-krzyżowej walidacji (tj. 25 procent danych było włączonych w każdym segmencie walidacji za pomocą systematycznego procesu wyboru). Kalibracje właściwości drewna były określane za pomocą programu Unscrambler Software (Version 9.2) i drugiej pochodnej widma (do konwersji były wykorzystane lewe i prawe 4 nm szczeliny).

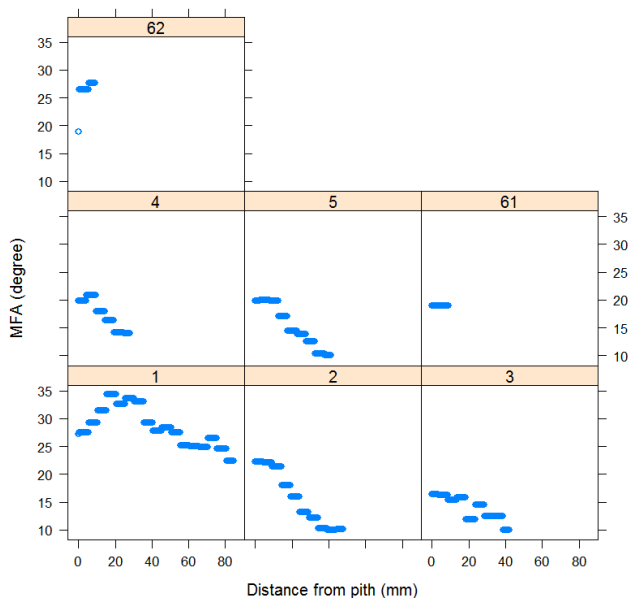
Z dodatkowych krążków pobranych z drzewa, zostały wycięte promieniste przekroje od rdzenia do kory 1,27 cm x 1,27 cm, suszone w piecu do zawartości wilgoci 8% i sklezione. Cienkie promieniowe listwy o grubości około 0,0629 cala (1,6 mm) były wycinane z tych przekrojów za pomocą piły obrotowej z podwójnym ostrzem w laboratorium oceny właściwości drewna United States Department of Agriculture-Forest Service (USDA-FS), Athens, Georgia. Dane widmowe NIR określono z radialnej powierzchni na tych próbkach w przedziałach 5 mm od rdzenia do kory. Określone wyżej kalibracje dla gęstości, MFA i MOE zostały wykorzystane do określenia przewidywanej wartości tych właściwości w dodatkowych próbkach w przedziałach 5 mm.

Uzyskane wartości zostały wykorzystane do identyfikacji zmian właściwości drewna brzożowego, porównania właściwości z gałęzi i pnia drzewa oraz do kalibracji sprzętu do pomiarów na innych próbkach. Wykresy wyników z pomiarów SilviScan ilustrują Rys. 4 - Rys. 6.

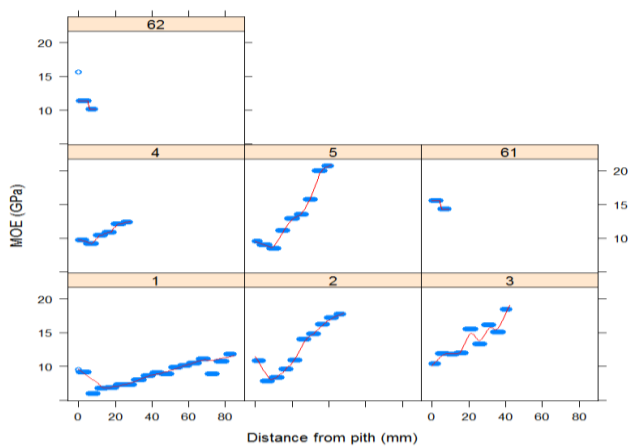
W celu zbadania zmian wzorców gęstości w przekroju poprzecznym pnia wartości gęstości przewidujemy na podstawie danych wg SilviScan za pomocą dopasowanych modeli regresji dla każdej właściwości mierzonej na próbkach wg analizy SilviScan (Rys. 7 - Rys. 9). Modele regresji i ich wykresy prognozy zostały wykorzystane do



Rys. 4. Wyniki pomiarów gęstości wg SilviScan wykorzystane w niniejszym opracowaniu.

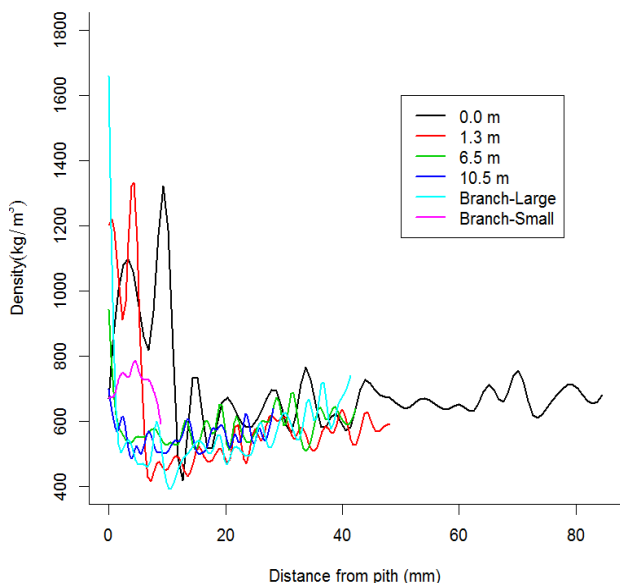


Rys. 5. Kąty nachylenia mikrowłókien wg SilviScan wykorzystane w niniejszym opracowaniu.



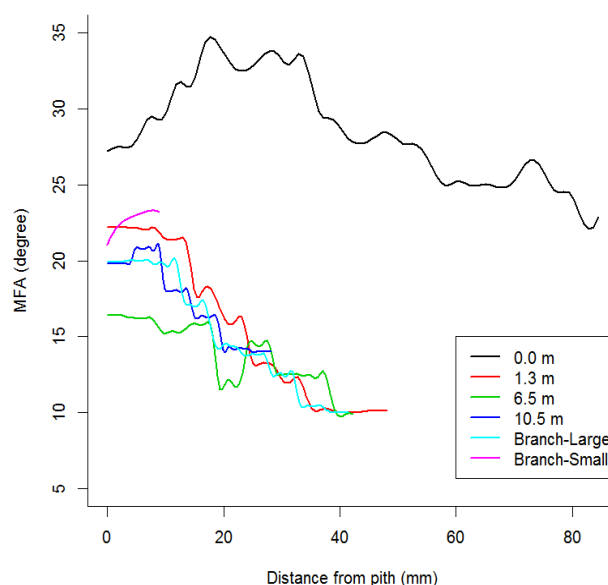
Rys. 6. Moduł sprężystości wg SilviScan wykorzystane w niniejszym opracowaniu.

analizy wizualnej rozważanych charakterystyk parametrów i wzorców drewna.

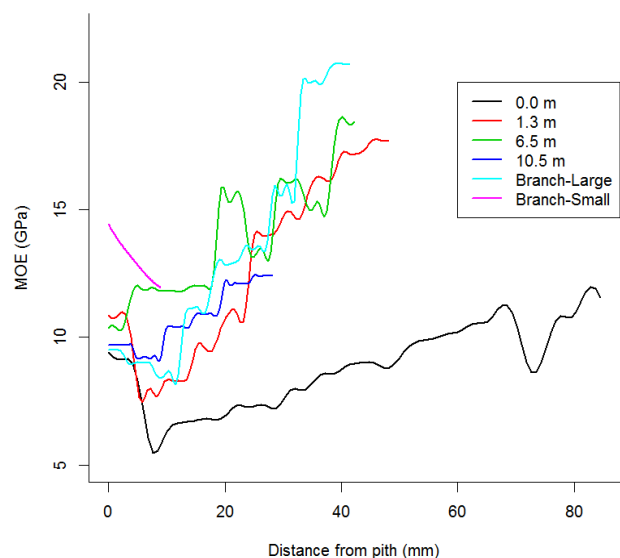


Rys. 7. Wartości przewidywanych gęstości wg modeli regresji dopasowanych do danych SilviScan.

zastosowaliśmy inną metodę niezmienną z uwagi na miejsca usytuowania podpróbek.



Rys. 9. Wartości przewidywanych MFA wg modeli regresji dopasowanych do danych SilviScan.



Rys. 8. Wartości przewidywanych MOE wg modeli regresji dopasowanych do danych SilviScan.

### 3.2. Zmienność i metody oceny gęstości brzozy smoleńskiej

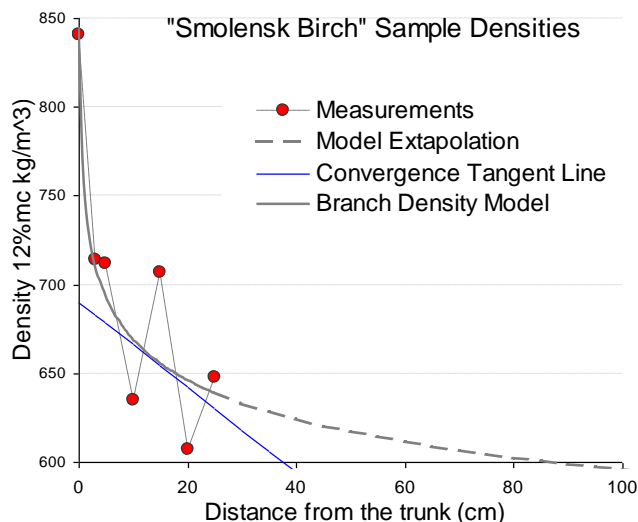
Po przekazaniu pierwszych krążków z gałęzi brzozy smoleńskiej do analizy SilviScan, w celu uzyskania wzorcowych próbek gęstości drewna, MOE i MFA do kalibracji sprzętu pomiarowego, przystąpiliśmy do określenia gęstości średniej, która mogła być uzyskana na podstawie badania próbki z gałęzi brzozy. Wartość średnia gęstości była określana dwoma różnymi sposobami. Najpierw gęstość była mierzona metodą usunięcia wody po uprzednim osuszeniu podpróbki z segmentów gałęzi brzozy w piecu, a średnia gęstość była obliczana jako średnia arytmetyczna z wyłączeniem najmniejszych i największych wyników. Jednakże, ponieważ metoda ta daje różne średnie w zależności od miejsc z których podpróbki są wybierane,

Tab. 2. Pomiary gęstości w różnych punktach gałęzi brzozy

Odległość od podstawy gałęzi (mm)	Gęstość (kg / m <sup>3</sup> )
0	840,9
3	713,8
5	711,5
10	635,0
15	707,1
20	465,7
25	648,0

W metodzie drugiej zakłada się, że część gałęzi przyległej do głównego pnia ma prawdopodobnie znacznie wyższą gęstość niż pień drzewa, z powodu wzrostu gałęzi do pnia w postaci sęków i obecności drewna potencjalnie ściskanego u podstawy gałęzi oraz z uwagi na prawdopodobnie mniejszą gęstość gałęzi poza pniem drzewa na skutek zwiększających się proporcji świeżego drewna. Tak więc najbardziej właściwą wartością odpowiadającą gęstości pnia drzewa jest prawdopodobnie wartość wokół punktu zbieżności krzywej zmieniającej się z pionowo asymptotycznego trendu dla drewna ściskanego do poziomo asymptotycznych trendów dla świeżego drewna (por. Rys. 10). Wybrana w ten sposób wartość byłaby prawdopodobnie niezmienna przy różnych uzasadnionych wyborach podpróbek, ponieważ punkt zbieżności modeli matematycznych dopasowany do danych jest prawdopodobnie bardzo zależny od różnych wyborów punktów podpróbek wykorzystanych do określenia asymptotycznych trendów. Stosownie do tego wykorzystaliśmy podejście, które wydawało się być najbardziej pewne przy założeniu odpowiedniości modelu matematycznego zbieżności gęstości od górnej granicy gęstości sęków do dolnej granicy gęstości gałęzi.

Po oszacowaniu wartości oczekiwanej gęstości pnia drzewa z pomiarów gałęzi następnym krokiem było oszacowanie racjonalnie uzasadnionej zmienności parametrów jakości drewna wokół wartości średniej. Przy małej liczbie próby uzyskane z wycięcia z gałęzi smoleńskiej o dużej wartości gęstości u podstawy gałęzi brzozy z maksimum  $841 \text{ kg/m}^3$  i małej wartości na drugim końcu gałęzi ( $466 \text{ kg/m}^3$ ), odchylenie standardowe byłoby nierealistycznie wysokie ( $114 \text{ kg/m}^3$ ), co byłoby bez znaczenia dla porównania średniej gęstości gałęzi ze średnią z innej próby. Z drugiej strony zmienione dane (ze zredukowaną wagą wartości skrajnych) wykorzystane do dopasowania modelu wykazują odchylenie standardowe  $77 \text{ kg/m}^3$ , które było jeszcze za duże dla realistycznego porównania różnych średnich. Obliczenie odchylenia standardowego z pomiarów na próbkach z gałęzi brzozy z wyłączeniem największych i najmniejszych danych, pozostawiało tylko pięć punktów pomiarowych, z których dwa były zlokalizowane w tych samych punktach gałęzi. W związku z tym odchylenie standardowe równe  $38 \text{ kg/m}^3$  prawdopodobnie byłoby zaniżone. Bardziej poprawne - po odrzuceniu jednego z bliskich punktów - było równe  $40 \text{ kg/m}^3$ .



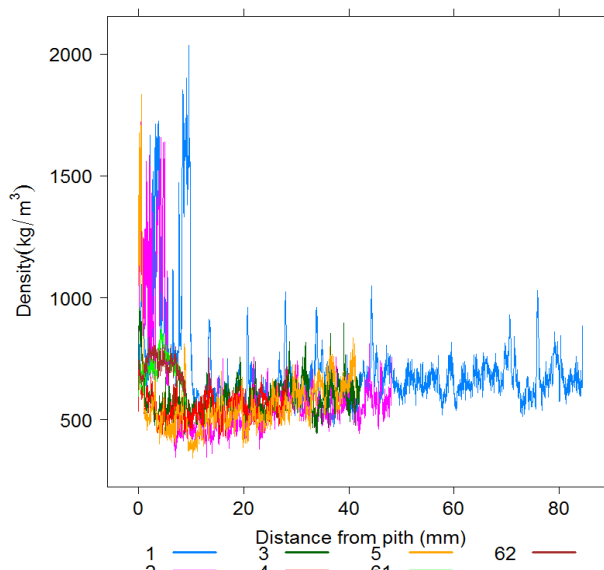
Rys. 10. Model zależności między pomiarami gęstości brzozy smoleńskiej i odległości pomiaru od podstawy gałęzi.

Z podanych wyżej powodów oszacowaliśmy rzeczywistą zmienność z większej liczby pomiarów SilviScan, które były reprezentatywne dla zmienności zarówno na próbkach wyciętych przy umiejscowieniu na wysokościach i radialnie (Rys. 11). Zbadaliśmy zmienność pomiarów SilviScan na krążkach z gałęzi brzozy jak również pomiarów na próbkach z innych krążków z trzonu, tak aby porównanie średnich między próbkami z gałęzi i innymi próbkami brzozy było bardziej pewne. Częściowe podsumowanie danych statystycznych wg SilviScan, wykorzystanych w niniejszym zadaniu, zawiera Tab. 3.

### 3.3. Regresja półparametryczna

W celu porównania gęstości drewna na próbkach z gałęzi i z pnia drzewa, wykorzystaliśmy regresję półparametryczną, która uwzględnia nieliniowy trend zależności właściwości drewna na odcinku od rdzenia do kory stosując specjalny przypadek ciągłej regresji i zawierającą czynnik parametryczny uwzględniający różnice wartości średnich w próbie. Przed wykorzystaniem tego

podejścia przeprowadziliśmy analizę rozpoznawczą poprzez dopasowanie ciągłego modelu regresji dla każdego oddzielnego pomiaru wysokość/próbka. Metoda analizy regresji została zastosowana do wyjaśnienia nieliniowego trendu zmienności właściwości drewna - w naszym przypadku gęstości w stanie powietrzno-suchym, kąta odchylenia mikrowłókien i sztywności. Za pomocą półparametrycznego modelu zmienności można modelować nieliniowe zależności bez jakichkolwiek ograniczeń parametrycznych. Korzyść wynikająca z jej stosowania polega na tym, że modele mogą być formułowane w postaci mieszanego modelu liniowego [32], pozwalającego na stosowanie oceny i dedukcyjnych narzędzi dostępnych w metodologii modeli mieszanych.



Rys. 11. Ocena rzeczywistej zmienności gęstości brzozy smoleńskiej.

Jednym z analizowanych w niniejszym badaniu problemów było ustalenie czy trend zmian właściwości drewna wraz z odległością od kory dla próbki pobranej z gałęzi znacząco różni się od podobnego trendu zmian na próbkach pobranych z pnia drzewa smoleńskiego. Dla zbadania tej zależności porównaliśmy trend zmian występujący na gałęzi z brzozy smoleńskiej z trendami występującymi przy próbkach pobranych z innych drzew.

## 4. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

### 4.1. Uwagi ogólne

Niektóre wyniki badań istotne dla uzyskania bardziej szczegółowych danych do analizy zostały podane powyżej wraz z metodą. W tym rozdziale analizujemy i interpretujemy wyniki końcowe. Najpierw dyskutujemy ocenę gęstości gałęzi brzozy smoleńskiej i jej zmienność, ażeby znaleźć porównywalne gatunki dobrze udokumentowane w literaturze. Następnie dyskutujemy wyniki analizy wartości średnich i zmienność parametrów charakteryzujących brzozę brodawkowatą i jej drewno, tak aby obserwowane wzorce mogły podbudować nieco skromne dane o brzozie smoleńskiej. Przewodnią zasadą na tym etapie analizy jest stwierdzenie, że jeśli dwa gatunki brzozy mają podobne parametry jakości, wtedy zachodzi prawdopodobieństwo, że mają one także podobny wzór

zmian właściwości próbek pobieranych od rdzenia do kory i z różnych wysokości drzewa. Następnie znajdujemy odpowiedni gatunek brzoź dobrze udokumentowanych w literaturze i porównujemy z normowymi charakterystykami drewna okrągłego. Na końcu przedstawiamy dyskusję na temat innych koniecznych korekt w celu najbardziej dokładnej oceny właściwości brzozy smoleńskiej wraz z porównaniem właściwości drewna z gałęzi brzozy smoleńskiej z oczekiwanymi parametrami normowymi amerykańskiego drewna okrągłego.

#### 4.2. Oszacowanie gęstości brzozy smoleńskiej i analiza danych wg SilviScan

Wyniki oszacowania wartości średnich gęstości drewna wg dwóch metod omówionych w p. 3.1 są podobne. Pierwsza metoda badania w stanie powietrzno-suchym próbek uzyskanych z segmentowanych gałęzi, wg której średnia gęstość była mierzona metodą usunięcia wody jako średnia arytmetyczna wszystkich wyników, wykazała, że wartości średnie mieszczą się w granicach od 630 do 675 kg/m<sup>3</sup> w zależności od tego czy uwzględniano, czy pomijano wartości ekstremalne oraz w zależności od tego, czy w badaniu uwzględniano tylko podpróbki o wymiarach od 5 do 25 cm, czy też uwzględniano w obliczeniach wszystkie podpróbki.

Druga metoda badania za pomocą modelowania matematycznego wykazała średnie wartości gęstości od 625 do 665 kg/m<sup>3</sup> w zależności od włączenia najniższych pomiarów (466 kg/m<sup>3</sup>) w regresji, która uwzględnia niektóre charakterystyki skrajne. Pomiar gęstości próbek były wykorzystane do dopasowania odwrotnej funkcji półnasyconia interpretowanej jako styczna linia zbieżności, która najbardziej prawdopodobnie przedstawia wartość podobną do gęstości pnia drzewa. Model końcowy został dopasowany do danych z przeliczoną wartością najniższego pomiaru jako średniej wartości z pomiarów poprzednich i jej wartości własnej, które zmieniły jego wartość z 666 kg/m<sup>3</sup> do 610 kg/m<sup>3</sup>. Ostateczne dopasowanie wykazało 80% R<sup>2</sup>, a punkt styczny konwersji modeli odpowiadał gęstości 655 kg/m<sup>3</sup> dobrze odpowiadającej zakresowi wartości oczekiwanych. Model opisujący zmieniającą się gęstość gałęzi brzozy z odległością od podstawy gałęzi był odwrotną funkcją wykładniczą w postaci:

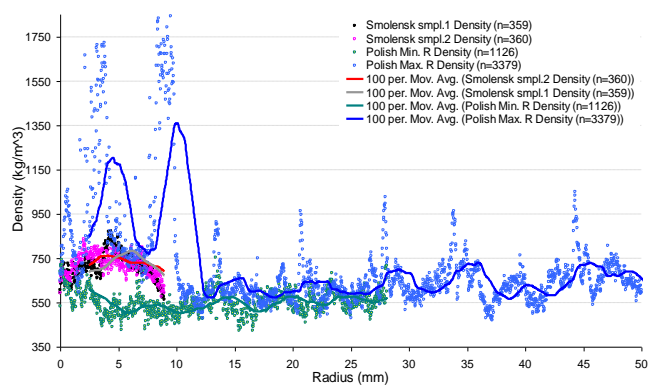
$$D = 751.94r^{-0.0506},$$

gdzie  $D$  jest gęstością, a  $r$  odległością punktu pomiaru od podstawy gałęzi.

Następnym etapem w analizie gęstości danych z gałęzi smoleńskiej była ocena zmienności. Dane dotyczące gęstości podpróbek z gałęzi wykazały odchylenie standardowe 114 kg/m<sup>3</sup> z wartością średnią około 650 kg/m<sup>3</sup> nie różniącą się znacząco od jakichkolwiek gatunków drzew w szerokim zakresie od 300 do 1000 kg/m<sup>3</sup>. Różne opcje obliczania odchylenia standardowego były wspomniane wcześniej, ale najbardziej odpowiednie okazało się być stosowanie bezpośredniej analizy danych SilviScan dla tej gałęzi. Otrzymaliśmy łącznie 719 pomiarów gęstości z jednej podpróbki gałęzi. Nie było to dosyć dużo do oceny gęstości średniej na podstawie próbki gałęzi, ale wystarczające do określonej z 719 pomiarów potencjalnej zmienności średniej gęstości gałęzi. Gęstość z 719 pomiarów mieściła się w przedziale od 563 do 973 kg/m<sup>3</sup> przy odchyleniu standardowym 54,25 kg/m<sup>3</sup>, które wydaje się być bardzo rozsądne biorąc pod uwagę wszystkie inne analizy i porównania przeprowadzone na tych danych.

Przyjmując dla oszacowanej średniej 655 kg/m<sup>3</sup> przedział ufności 99,5% mieściłaby się ona w przedziale od 563 do 873 kg/m<sup>3</sup>, który mógłby łatwo zawierać wartości odpowiadające każdej brzozie podanej w Tab. 1, pomimo że brzoza papierówka byłaby tylko marginalnie odpowiednia. Zarówno brzoza cukrowa (*Betula lenta*) jak też i brzoza żółta (*Betula alleghaniensis*) mają gęstości niemal perfekcyjnie dopasowane odpowiednio 650 kg/m<sup>3</sup> i 620 kg/m<sup>3</sup>, ale ponieważ średnia wartość MOE brzozy smoleńskiej wynosiła 12,61 GPa, brzoza żółta jest najwyraźniej bliższa i wykazuje niemal perfekcyjne dopasowanie do gęstości i MOE brzozy smoleńskiej.

Również brzoza brodawkowata [33] z 681 kg/m<sup>3</sup> jest bliska pod względem gęstości i mogła by również być substytutem. Ponadto, biorąc pod uwagę dyskutowane wartości statystyczne i ilustrację danych na Rys. 12, uzasadnione jest również założenie, że brzoza srebrna (silver birch) z centralnej Polski, jak wskazano w pracy [33], ma charakterystyki gęstości podobne do brzozy smoleńskiej. Oba te gatunki – zarówno brzoza żółta jak i brodawkowata – mają podobne charakterystyki gęstości do brzozy smoleńskiej, ale ponieważ brzoza żółta ma bliższe właściwości i jest lepiej udokumentowana, zaakceptowaliśmy ją jako substytut drzewa brzozy smoleńskiej pod względem charakterystyki drewna.



Rys. 12. Dane SilviScan dla brzozy smoleńskiej i dla górnych i dolnych gęstości z krążków pobranych w rejonie Mińska.

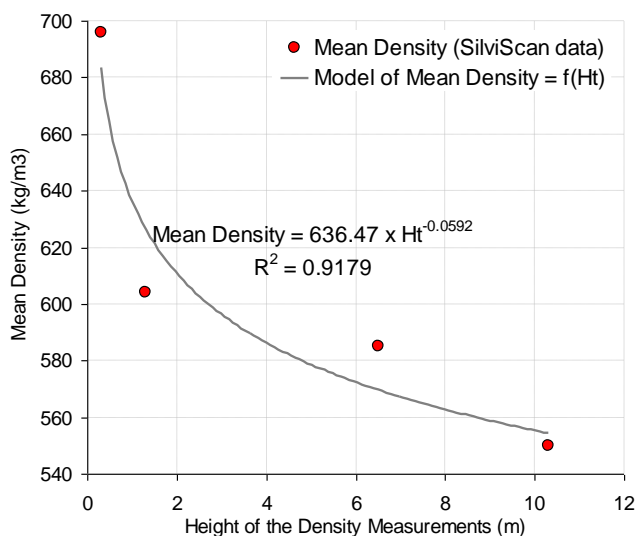
#### 4.3. Analiza danych SilviScan i gęstości w funkcji wysokości drzewa modelujące zmiany gęstości od rdzenia do kory

Gęstość większości gatunków drzew, zmniejsza się od podstawy pnia do czubka i była określana dla gatunków brzozy takich jak fińska brzoza omszona i brzoza brodawkowata, [34, 35].

Zmniejszanie się gęstości z wysokością drzewa było także zaobserwowane w niniejszym badaniu na podstawie danych SilviScan w przedziale od około 700 kg/m<sup>3</sup> do 550 kg/m<sup>3</sup> dla drzewa suchego (12% wilgotności) - por. Tab. 4 - a nawet mniej w wyższych częściach drzewa nie mierzonych za pomocą SilviScan. Zależność między średnią gęstością i wysokością drzewa była modelowana przy zastosowaniu części danych SilviScan uzyskanych z pojedynczego drzewa. (Rys. 13).

Wartość średnia gęstości brzozy smoleńskiej została oszacowana jako 655 kg/m<sup>3</sup>, a średnia ważona gęstość próbek gałęzi brzozy brodawkowatej pobranych w dwóch istotnych niższych przekrojach drzewa ( Tab. 4) wynosiła 662 kg/m<sup>3</sup>. Z podanej wcześniej zmienności pomiarów brzozy (odchylenie standardowe 54 kg/m<sup>3</sup>) wnioskujemy, że

oba rozważane gatunki mają podobne średnie (Tab. 4), które nie są od siebie istotnie różne (w sensie statystycznym). Następnie, ponieważ smoleńska gałąź brzozy została pozyskana w lesie na niskiej wysokości (która mogła być łatwo osiągnięta przez osobę), jej pomiary prawdopodobnie wykazały znacznie wyższą gęstość niż mogła być oczekiwana w hipotetycznym miejscu złamania drzewa na wysokości około 5 do 7 m [36]. Mając dowód, że gęstość drewna z brzozy smoleńskiej ma podobne charakterystyki do próbek z brzozy brodawkowatej oraz, że gałąź została pobrana w pobliżu podstawy drzewa, szacuje się, że średnia gęstość drewna suchego w brzozie smoleńskiej na wysokości 5 do 7 m [36], na podstawie modelu ukazanego na Rys. 13, interpolacji krzywej na tym rysunku i wartości wskazanych w Tab. 3, wynosi około 580 kg/m<sup>3</sup>.



Rys. 13. Model gęstości średniej w funkcji wysokości ustalony na podstawie danych SilviScan dla brzozy brodawkowatej.

Zmieniająca się gęstość od rdzenia do kory jest inną ogólną charakterystyką zmienności wewnątrz drzewa. Heräjärvi stwierdził [34] znaczną zmienność radialną (różnice od rdzenia do kory, 40-80 kg/m<sup>3</sup>) i mniejszą zmienność pionową (różnice 20-40 kg/m<sup>3</sup>) w gęstości wewnątrz fińskich drzew brzozowych. W innych badaniach, Heräjärvi ustalił [37] statyczne właściwości na zginanie fińskiej brzozy brodawkowatej oraz podał średnie wartości MOE jako 14,5 GPa dla brzozy omszonej i 13,2 GPa dla brzozy brodawkowatej. Heräjärvi także wykazał [38], że zarówno MOE zwiększało się od rdzenia do kory i zmniejszały się od podstawy do szczytu drzewa. Na próbkach analizowanych w niniejszym badaniu stwierdziliśmy, że szczególnie u podstawy drzewa i przy małych wysokościach gęstość była skrajnie wysoka w pobliżu rdzenia, ale szybko opadała w odległości kilku cm od szczytu, a następnie nieznacznie zwiększała się w kierunku kory (patrz Rys. 12). Ekstremalnie duże gęstości nie występowały na wyższych wysokościach drzew, a gęstość umiarkowanie zmniejszała się od rdzenia do kory. Obserwowane zwiększanie się gęstości zmieniało się z wysokością i mieściło się w przedziale od około 30 do 150 kg/m<sup>3</sup> różnicy, która jest podobna w wielkości do obniżenia się gęstości z wysokością próbek analizowanych wg SilviScan.

Tab. 3: Wyniki części pomiarów SilviScan krążków uzyskanych z różnych wysokości polskiej brzozy brodawkowatej z okolic Mińska.

Parametry statystyczne	Z pomiarów			Przyjęte w modelu		
	Gęstość (kg/m <sup>3</sup> )	MFA (Deg)	MOE (GPa)	Gęstość (kg/m <sup>3</sup> )	MFA (Deg)	MOE (GPa)
<b>No 1; Wysokość od podstawy ok. 0,3 m; n=3379</b>						
Średnia	696,0	28,5	8,8	665,8	27,0	9,6
Minimalna	471,0	22,4	5,9			
Maksymalna	2036,0	34,3	11,8			
Odchylenie standardowe	191,1	3,4	1,6			
<b>No 2; Wysokość =1,3m; n=1926</b>						
Średnia	603,7	15,5	12,7	562,8	12,9	14,5
Minimalna	346,0	10,0	7,8			
Maksymalna	1723,0	22,2	17,7			
Odchylenie standardowe	219,9	4,8	3,5			
<b>No 3; Wysokość = 6,5m; n=1688</b>						
Średnia	585,1	13,9	13,8	591,5	12,9	15,0
Minimalna	438,0	9,9	10,4			
Maksymalna	960,0	16,4	18,4			
Odchylenie standardowe	69,8	2,1	2,3			
<b>No 4; Wysokość = 10,3m; n=1126</b>						
Średnia	550,7	17,3	10,7	552,9	15,9	11,3
Minimalna	423,0	14,0	9,2			
Maksymalna	756,0	20,8	12,4			
Odchylenie standardowe	52,4	2,6	1,1			

Tab. 4. Wartości średnie gęstości i współczynnika sprężystości określone na próbkach z brzozy smoleńskiej, brzozy brodawkowatej i publikowane wartości amerykańskiej brzozy żółtej.

Gatunki brzozy/ właściwość drewna	Gęstość			MOE		
	min, 95% CI	średnia	max, 95% CI	min, 95% CI	średnia	Max, 95% CI
Brzoza smoleńska (12 % H <sub>2</sub> O)	547	655	764	8,3	12,6	16,9
Brzoza żółta (12 % H <sub>2</sub> O)		620			13,9	
Brzoza brodawkowata (12 % H <sub>2</sub> O)		630			12,1	

MFA przyjmowały małe wartości w pobliżu środka, a potem wzrastały aż do 10 mm od rdzenia. MOE przyjmował wysokie wartości w pobliżu rdzenia, które zmniejszały się natychmiast, a potem zwiększały się jako wysoce zależne zarówno od gęstości jak też MFA (SilviScan określa MOE na podstawie gęstości i MFA).

Podobny wzorzec, jak profile pnia drzewa i zmienność właściwości drewna od rdzenia do kory jest widoczny zarówno na małych jak i dużych gałęziach analizowanych w niniejszym badaniu. Duże gałęzie wykazują podobny profil właściwości drewna jak próbki z pnia drzewa, jeśli średnica próbek jest porównywalna z dyskami pobranymi z wyższych części drzewa. Gałąź z brzozy smoleńskiej wykazała gęstość, która wzrastała, a potem malała. Kąty nachylenia mikrowłókien MFA rosną, a współczynniki sprężystości MOE maleją, co częściowo może wynikać z faktu, że podpróbki z gałęzi pobraliśmy z punktu leżącego



zbyt blisko pnia, czyli z pewną ilością drewna ściskanego przy podstawie osadzenia gałęzi.

#### 4.4. Wyniki regresji półparametrycznej z wykorzystaniem danych SilviScan

W regresji półparametrycznej do analizy każdej właściwości stosujemy część nieparametryczną, która określa nieliniowy trend zmienności właściwości od rdzenia do kory za pomocą modelu ciągłego. Część parametryczna jest stosowana do testowania różnicy między grupami (dwie grupy, które stanowiły próbki z gałęzi brzozy smoleńskiej uważanej jako jedna grupa i próbka z polskiej brzozy z rejonu Mińska Mazowieckiego jako innej grupy).

**Tab. 5. Wyniki regresji semiparametrycznej z danych SilviScan z gałęzi brzozy smoleńskiej i brzozy brodawkowatej z rejonu Mińska.**

Statystyki/ Parametry regresji	Parameter lub ocena współczyn- nika (Coef)	Błąd standardowy oceny parametru (SE)	Stosunek t (Coef/SE)	Istotność statystyczna (Wartość p)
Gęstość				
Rzędna początkowa	-701,8	6602	-0,1063	0,9153
Nachylenie	0,3817	8,588	0,04445	0,9645
Kąt nachylenia mikrowłókien				
Rzędna początkowa	15,8	37,79	0,4182	0,6758
Nachylenie	1,175	0,3656	3,214	0,0013
Sztynność				
Rzędna początkowa	5,498	41,58	0,1322	0,8948
Nachylenie	3,052	0,154	19,82	0

Wyniki regresji półparametrycznej nie wykazały znaczących różnic między gęstościami porównywanych dwóch grup (Tab. 5). Było kilka różnic między MFA i sztywnością tych dwóch grup, które były oczekiwane, gdyż próbki jednej grupy były uzyskane z pnia drzewa, a drugiej z gałęzi, które wykazują bardziej elastyczne właściwości drewna.

#### 4.5. Parametry jakości drewna brzozy smoleńskiej versus parametry jakości drewna okrągłego

Analizowane wyżej parametry brzozy smoleńskiej są odpowiednie dla drewna osuszonego w suszarni (wilgotność 12%). Były to parametry teoretyczne stosowane do dokładnego opisu jakości drewna danej próbki i wiarygodnych porównań różnych próbek. Parametry drewna suchego nie są jednak bezpośrednio stosowane do określenia wytrzymałości tego drzewa w czasie rzekomej kolizji 10 kwietnia 2010 r. W czasie kolizji drzewo było żywe i dlatego wszystkie parametry opisujące właściwości tego drzewa wymagają konwersji do wartości odpowiadającej drewnu świeżemu. Bardzo pomocne do tego celu jest wykorzystanie namiastki brzozy smoleńskiej w postaci dobrze udokumentowanej w literaturze brzozy żółtej, której wszystkie parametry są dostępne w tablicach (Tab. 1). W związku z tym oceniamy średnią gęstość drewna świeżego z brzozy smoleńskiej, kiedy była ona żywa, jako równą wartości teoretycznej 550 kg/m<sup>3</sup>. Wartość ta wymaga dostosowania z uwzględnieniem stosownych czynników fizycznych i środowiskowych oraz podlega dyskutowanej wcześniej zmienności i zależności funkcyjnej od wysokości drzewa i odległości od jego rdzenia.

Amerykańskie drewno okrągłe produkowane zgodnie z normami ANSI jest dobrze opisane w literaturze we wszystkich aspektach jego specyfikacji i wymiarów [9, 23,

25, 28], wbudowania i właściwości mechanicznych [13, 15, 18, 20, 21, 22] oraz norm produkcji i praktyki wykonawczej [16, 19]. Większość normowego drewna okrągłego produkowana jest z sosen południowych, które obejmują sosnę *loblolly* (*pinus taeda* L.), sosnę długoiglastą (*pinus palustris*), sosnę krótkoiglastą (*pinus echinata*) i drobnicę sosnową (*pinus elliotii* engelm.). Gatunki te mają także dobrze udokumentowane właściwości drewna, które są tutaj wymienione w Tab. 6 (i w Tab. 1) łącznie z drewnem z brzozy cukrowej i żółtej. Jak wykazano w tej tablicy, wartości średnie właściwości drewna suchego z sosny południowej są ogólnie wyższe niż drewna świeżego zarówno z brzozy cukrowej jak też brzozy żółtej. Różnice w wartościach parametrów drewna byłyby nawet większe, jeśli byłyby dostosowane do wysokości drzewa, w sytuacji w której właściwości brzozy są rozpatrywane na wysokości kilku metrów, a sosny bliżej ziemi.

#### 4.6. Fizyczne i środowiskowe dostosowania właściwości brzozy smoleńskiej

Wcześniej dyskutowane wyniki naszych analiz potwierdziły, że gęstość próbki brzozy smoleńskiej określona różnymi sposobami wykazała parametry jakości drewna podobne lub nieistotnie różne od próbek brzozy brodawkowatej i od tabelarycznych wartości polskiej brzozy brodawkowatej i amerykańskiej brzozy żółtej.

Ogólnie, nośność konstrukcji z drewna jest skorelowana z jego gęstością, tj. masą na jednostkę objętości czystego drewna. Właściwości przypisane tarcicy czasami zależą od szybkości wzrostu i stosunku drewna późniejszego do wczesnego, który w dużym stopniu określa gęstość drewna. Z tego powodu proporcje wczesnego do późniejszego drewna uważane są często za parametry kwalifikujące do wyboru próbek drewna do pomiarów jego gęstości i jako parametry reprezentatywne dla danych gatunków. W związku z tym przy wyborze tarcicy często eliminuje się elementy drewna, które wykazują wyjątkowo wysoką proporcję drewna wczesnego oznaczającą niską gęstość drewna.

Obecność sęków powoduje tworzenie się w przekrojach włókien o stromym nachyleniu, które mają największy wpływ na wytrzymałość na rozciąganie, podczas gdy przy zginaniu wpływ ten może zależeć od tego czy sęki usytuowane są po stronie naprężeń rozciągających, czy też ściskających. Zwichrowanie włókien jest największe dookoła sęka podwójnie splecionego lub częściowo zrosniętego o równoważnym rozmiarze i z tego powodu gałęzie mają znaczący wpływ na wytrzymałość pnia drzewa na działanie sił prostopadłych. Obecność sęków ma znaczący wpływ na właściwości wytrzymałościowe, które zależą od stosunku powierzchni sęków do całkowitej powierzchni rozważanej części drzewa oraz miejsc występowania naprężeń. Sęki wewnątrz rozważanej części tarcicy nie są bardzo istotne, ale jakiejkolwiek sęki okółkowe występujące na pniu drzewa powodują istotne osłabienia pnia. Dlatego największą uwagę należy zwrócić na sęki, które usytuowane są na zewnętrznych częściach konstrukcji.

W przemyśle drzewnym sęki eliminowane są w procesie produkcji klejonych elementów konstrukcyjnych. [8, 12], które nie są ciągle jak w ciętej tarcicy konstrukcyjnej, ale wolne od sęków. Na podstawie wyznaczonych powierzchni sęka i okółka na dwóch fotografiach brzozy smoleńskiej (Rys. 3) obliczyliśmy powierzchnie sęków (Tabl. 7) na każdej fotografii i ustaliliśmy w ten sposób, że powierzchnie

sęków wynoszą w każdym przypadku około 18%, co oznacza znaczną redukcję wytrzymałości pnia w stosunku do oszacowanej pierwotnie wartości teoretycznej.

**Tab. 6. Właściwości wytrzymałościowe niektórych komercyjnie ważnych drzew rosnących w Stanach Zjednoczonych.**

Nazwa gatunku	Wilgotność (zawartość wody %)	Gęstość (kg/m <sup>3</sup> )	Wytrzymałość (kPa)	Współczynnik sprężystości (MPa)	Praca przy maksymalnym obciążeniu (kJ/m <sup>3</sup> )	Zginanie przy uderzeniu (mm)	Ściskanie prostopadłe do włókien (kPa)	Ściskanie równoległe do włókien (kPa)	Ścinanie równoległe do włókien (kPa)	Rozciąganie prostopadłe do włókien (kPa)	Twardość boczna (N)
<b>Brzoza</b>											
Cukrowa	12	650	117,0	15,0	124	1190	58,9	7,4	15,4	6,6	6,5
Żółta	12	620	114,0	13,9	143	1400	56,3	6,7	13,0	6,3	5,6
Cukrowa	świeża	600	65,0	11,4	108	1220	25,8	3,2	8,5	3,0	4,3
Żółta	świeża	550	57,0	10,3	111	1220	23,3	3,0	7,7	3,0	3,6
<b>Sosna</b>											
Loblolly <sup>1)</sup>	12	510	88,0	12,3	72	760	49,2	5,4	9,6	3,2	3,1
Długolistna	12	590	100,0	13,7	81	860	58,4	6,6	10,4	3,2	3,9
Krótkolistna	12	510	90,0	12,1	76	840	50,1	5,7	9,6	3,2	3,1
Drobnica	12	590	112,0	13,7	91	—	56,1	7,0	11,6	—	—
Średnia wartość	12	550	97,5	12,95	80	820	53,45	6,175	10,30	3,2	3,367
Stosunek (średnia wartość dla sosny)/(wartość dla brzozy żółtej)											
	12	100%	171%	126%	72%	67%	229%	206%	134%	107%	94%

<sup>1)</sup> nazwa kilku gatunków sosny amerykańskiej

**Tab. 7. Oszacowanie względnej powierzchni sęków na pniu brzozy smoleńskiej na podstawie dwóch fotografii przedstawionych na Rys. 3 wykonanych pod nieco różnymi kątami.**

Wielokąt	Fotografia lewa		Fotografia prawa	
	Okółki [%]	Czyste [%]	Okółki [%]	Czyste [%]
1	73,6	26,4	37,6	62,4
2	71,7	28,3	36,6	63,4
3	67,4	32,6	33,4	66,6
4	60,7	39,3	26,9	73,1
5	29,0	71,0	13,6	86,4
6	12,6	87,4	12,9	87,1
7	24,6	75,4	13,1	86,9
8	29,9	70,1	14,0	86,0
9	21,2	78,8	12,1	87,9
10	7,0	93,0	3,2	96,8
11	6,8	93,2	0,0	100,0
12	14,7	85,3	0,0	100,0
13	13,6	86,4	0,0	100,0
14	3,3	96,7	6,3	93,7
15	0,0	100,0	36,9	63,1
16	25,8	74,2	59,8	40,2
17	39,2	60,8	72,9	27,1
18	52,0	48,0	82,4	17,6
19	58,2	41,8	84,1	15,9
20	61,7	38,3	85,0	15,0
21	63,5	36,5	85,0	15,0
<b>Średnio</b>	<b>35,1</b>	<b>64,9</b>	<b>34,1</b>	<b>65,9</b>

## 5. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I ZALECENIA

Pierwszy cel badania dotyczył właściwości drewna, takich jak gęstość, MOE (współczynnik sprężystości), i MFA (kąt nachylenia mikrowłókien), które są miarami ilościowymi jakości drewna, niezbędnymi do oceny mechanicznej odporności na zniszczenie konstrukcji z drewna (lub drzew) w następstwie kolizji z innymi obiektami i do oceny zniszczenia kolidujących obiektów. Aktualnie dostępnymi nowoczesnymi metodami badań do

oceny różnych właściwości drewna są spektrografia NIR (promieniowanie podczerwone) i SilviScan (wykorzystanie dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego, absorpcji promieniowania rentgenowskiego oraz analizy obrazu). Niniejsze badanie przedstawia analizę porównawczą właściwości drewna (gęstość, MOE i MFA) mierzonych za pomocą nowoczesnych metod na próbkach z różnych brzozy ze Smoleńska w Rosji i z Polski do dokładnej oceny właściwości drewna z drzewa, z którym rzekomo zderzył się polski samolot Tu-154 10 kwietnia 2010 r.. Próbkę drzewa analizowane w niniejszej analizie zawierały próbki z pnia drzewa, krążki z gałęzi brzozy z Polski i próbki pobrane dokładnie z drzewa, z którym rzekomo zderzył się samolot. Parametry oszacowane w niniejszym badaniu są ekwiwalentne do parametrów drewna świeżego amerykańskiej brzozy żółtej

Drugim celem badania był przegląd i porównanie najbardziej odpowiednich danych z dostępnej literatury na temat standardowego drewna okrągłego nieprzetartego. Analizujemy normy produkcji drewna okrągłego, ich oczekiwane parametry jakości i ich właściwości fizyczne szacowane jako średnie z dominujących grup gatunków stosowanych do produkcji drewna okrągłego. Parametry te są odpowiednie dla porównania właściwości drewna okrągłego nieprzetartego z oszacowanymi właściwościami świeżego drewna z brzozy smoleńskiej. W wyniku badania stwierdzono, że teoretycznie oszacowane parametry jakości drewna świeżego z brzozy smoleńskiej były niższe niż parametry jakości standardowego amerykańskiego drewna okrągłego pochodzącego przeważnie z sosen południowych.

Trzeci cel niniejszego badania dotyczył rzeczywistego dostosowania parametrów jakości drewna z brzozy smoleńskiej, które wymagają korekty z uwagi na wpływ czynników fizycznych i środowiskowych wpływających na przyrost drzewa, konstrukcję i jego właściwości mechaniczne. Ważnymi elementami wpływającymi na

właściwości mechaniczne drewna są okółki/sęki, warunki wzrostu, takie jak liczba drzew na jednostkę powierzchni, redukcja gęstości drewna z wysokością drzew, wewnętrzny rozkład drewna, owocujące grzyby i inne defekty, które mogą być istotne dla analizowanego obiektu. W przypadku analizowanej brzozy smoleńskiej identyfikujemy najbardziej istotne dostosowania z włączeniem korekty z uwagi na dużą liczbę gałęzi/sęków i korektę z uwagi na warunki wzrostu, które przy szybszym wzroście powodują typowo niższą gęstość drewna. Z przedstawionych analiz wynika wniosek, że rzeczywiste wartości parametrów jakości brzozy smoleńskiej były znacznie niższe niż teoretyczne odpowiedniki ustalone w początkowej części niniejszego badania. Tak więc wartości parametrów jakości brzozy smoleńskiej powinny być znacznie niższe niż parametry drewna świeżego z amerykańskiej brzozy żółtej i w konsekwencji znacznie niższe niż dla drewna suchego z amerykańskiego drewna okrągłego produkowanego przeważnie z południowych sosen.

Wyniki niniejszego badania wykazują, że parametry jakości drewna z brzozy smoleńskiej nie różnią się znacząco od dobrze udokumentowanych parametrów jakości amerykańskiej brzozy żółtej. Po dostosowaniach z uwagi na warunki środowiskowe wzrostu (otwarte warunki wzrostu i duża liczba sęków), ostateczna ocena parametrów jakości brzozy smoleńskiej wskazuje na niższe wartości. Oszacowane tutaj parametry jakości drewna podane w Tab. 1 oraz pomiary właściwości drewna z brzozy smoleńskiej pozwalają uznać właściwości brzozy smoleńskiej na poziomie właściwości brzozy żółtej i byłoby rozważnie zastosować do symulacji kolizji brzozy smoleńskiej z samolotem konserwatywne parametry brzozy żółtej dla drewna świeżego. Dlatego też do analizy mającej na celu symulacyjne odtworzenie rzeczywistych warunków zderzenia samolotu TU-154 z brzozą smoleńską zalecamy stosowanie wyprowadzonych tutaj parametrów.

## 6. PODZIĘKOWANIA

Niniejszy referat został napisany w języku angielskim. Autor jest bardzo wdzięczny prof. Pawlikowskiemu i dr. Nożyńskiemu z ITB za przetłumaczenie tego referatu na język polski.

Niezależne podziękowania składa autor emerytowanemu niezależnemu dziennikarzowi panu doktorowi Janowi Gruszyńskiemu, który zabezpieczył próbkę gałęzi z brzozy smoleńskiej oraz pani Ewie Skomorowskiej za udostępnienie próbki drewna do analizy.

Autor i jego współpracownicy pragną także przekazać wyrazy wdzięczności grupie polskich biometryków, którzy pomogli w dostarczeniu próbek z brzozy brodawkowatej.

Niniejsze badanie było sponsorowane przez W.B. Warnell School of Forestry and Natural Resources, University of Georgia, Athens, GA, USA.

Powyższy tekst stanowi fragment większego dokumentu, który została złożony do publikacji w czasopiśmie *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)* [36], którego autorami są CI. Cieszewski, F. Antony, P. Bettinger, J. Dahlen, R.C. Lowe, M. Strub.

## Literatura cytowana

- [1] Megraw, R.A. 1985. *Wood quality factors in loblolly pine*. TAPPI Press, Atlanta, GA.
- [2] MacDonald, E., and Hubert, J. 2002. *A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce*. *Forestry* 75(2): 107-138.
- [3] Evans, R., Ilic, J. 2001. *Rapid prediction of wood stiffness from microfibril, angle and density*. *Forest Products Journal* 51(3): 53-57.
- [4] Schimleck, L.R., Evans, R., Ilic, J., and Matheson, A.C. 2002. *Estimation of wood stiffness of increment cores by near-infrared spectroscopy*. *Canadian Journal of Forest Research* 32(1): 129-135.
- [5] Schimleck, L.R., Evans, R., Jones, P.D., Daniels, R.F., Peter, G.F., and Clark, A. 2005. *Estimation of microfibril angle and stiffness by near infrared spectroscopy using sample sets having limited wood density variation*. *IAWA Journal* 26(2): 175-187.
- [6] FPL (Forest Products Laboratory). 1999. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p
- [7] FPL. 2010. *Wood handbook - Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL–GTR–190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 508 p.
- [8] AITC (American Institute of Timber Construction). 1993. *Standard specification for glued laminated timber of softwood species*. AITC-117-93-Design. AITC, Englewood, CO.
- [9] ANSI (American National Standards Institute). 1992. *Wood poles, specifications, and dimensions*. ANSI 05.1. ANSI, New York.
- [10] ANSI. 1993. *National electric safety code*. ANSI C2. ANSI, New York.
- [11] ANSI. 1995. *Solid sawn-wood cross arms and braces—specifications and dimensions*. ANSI 05.3. ANSI, New York.
- [12] ANSI. 1996. *Structural glued laminated timber for utility structures*. ANSI 05.2. ANSI, New York.
- [13] ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 1996. *Design properties of round, sawn, and laminated preservative-treated construction poles*. ASAE EP388, Agricultural Engineers Handbook. ASAE, St. Joseph, MI.
- [14] ASTM (American Society for Testing and Materials). 1996a. *Standard methods for establishing design stresses for round timber piles*. Vol. 4.09, ASTM D2899. ASTM, West Conshohocken, PA
- [15] ASTM. 1996b. *Standard specification and methods for establishing recommended design stresses for round timber construction poles*. Vol 4.09, ASTM D3200. ASTM, West Conshohocken, PA.
- [16] ASTM. 1996c. *Standard practice for preservative treatment of utility poles by the thermal process*. ASTM D4064. ASTM, West Conshohocken, PA
- [17] ASTM. 1996d. *Standard specifications for round timber piles*. Vol 4.09, ASTM D25-91. ASTM, West Conshohocken, PA.

- [18]ASTM. 1996e. *Standard test methods of static tests of wood poles*. Vol 4.09, ASTM D1036-96. ASTM, West Conshohocken, PA
- [19]AWPA (American Wood Preservers' Association). 1997. *Poles-Preservative treatment by pressure process*. AWPA C4-89. AWPA, Stevensville, MD.
- [20]Bodig, J., R. Anthony. 1992. *A strength grading concept for wood utility poles*. In Proceedings of international conference on wood poles and piles, April 1992
- [21]EPRI (Electric Power Research Institute). 1985. *Wood pole properties. Vol. 1. Background and southern pine data*. EPRI EL-4109 Project 1352-2. Research Institute of Colorado, Ft. Collins, CO.
- [22]EPRI. 1986. *Wood pole properties: Vol. 2. Douglas-fir data. Vol. 3. Western red cedar data and size effect*. EPRI EL-4109 Project 1352-2. Research Institute of Colorado, Ft. Collins, CO.
- [23]Kressbach, J.N., L.R. Gjovik, and R.W. Wolfe. 1996. *Metrification of pole standard*. In Proceedings of second southeastern pole conference, Forest Products Society, Madison, WI.
- [24]Micklewright, J.T. 1992. *Wood preservation statistics, 1990: A report to the wood-preserving industry in the United States*. American Wood-Preservers' Association, Woodstock, MD.
- [25]REA (Rural Electrician Administration). 1982. *REA specifications for wood poles, stubs, and anchor logs*. REA Bull. 44(2):345D351,
- [26]Wood, L.W. and L.J. Markwardt. 1965. *Derivation of fiber stresses from strength values of wood poles*. FPL Res. Pap. FPL-39. USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., Madison, WI.
- [27]Wood, L.W., E.C.O. Erickson, and A.W. Dohr, 1960. *Strength and related properties of wood poles. Final report, ASTM wood pole research program*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [28]Wolfe, R., Moody, R. 1997. *Standard specifications for wood poles*. In Morrell, J.J. (Editor). 1997. 1997 Utility Pole Structures Conference Trade Show. November 6-7, 1997, Nugget Hotel, Reno / Sparks, Nevada.
- [29]Evans, R. 1999. *A variance approach to the x-ray diffractometric estimation of microfibril angle in wood*. Appita Journal 52(4):283-294.
- [30] Evans, R., G. Downes, D. Menz, and S. Stringer. 1995. Rapid measurement of variation in tracheid transverse dimensions in a radiata pine tree. Appita Journal. 48(2):134-138.
- [31]Evans R. 2006. *Wood stiffness by X-ray diffractometry. In Characterization of the cellulosic cell wall*. Edited by Stokke, D. D. and Groom, L. H. Blackwell Publishing, Ames: Iowa State University Press, Iowa. pp. 138-146.
- [32]Ngo L, Wand MP. 2004. Smoothing with Mixed Model Software. Journal of Statistical Software, 9(1): 1-54.
- [33] Lachowicz H. 2010. Wybrane wskaźniki jakości technicznej drewna brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth.) w północno-wschodniej Polsce. Leśne Prace Badawcze 71 (2): 135-147.
- [34]Heräjärvi, H. 2004a. *Variation of Basic Density and Brinell Hardness Within Mature Finnish Betula Pendula and B. Pubescens Stems*. Wood and Fiber Science 36(2): 216-227.
- [35]Repola, J. 2006. *Models for vertical wood density of Scots pine, Norway Spruce, and Birch stems and their application to determine average wood density*. Silva Fennica. 40 (4): 673-685.
- [36] Cieszewski, CJ, F Antony, P Bettinger, J Dahlen, RC Lowe, M Strub. 2013. Wood quality assessment of tree trunk from the tree branch sample and auxiliary data based on NIR spectroscopy and SilviScan. Math. Comput. For. Nat.-Res. Sci. In Review.
- [37]Heräjärvi, H. 2004b. *Static bending properties of Finnish birch wood*. Wood Science and Technology 37(6): 523-530.
- [38] Heräjärvi, H. 2004b. *Static bending properties of Finnish birch wood*. Wood Science and Technology 37(6): 523-530.