

EMILIA WYSOCKA-FIJOEK, STANISŁAW ZAJĄC

## Metody optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanów z punktu widzenia wiązania węgla\*

Optimization methods of the rotation age from the point of view of carbon sequestration

### ABSTRACT

Wysocka-Fijorek E., Zajac S. 2016. Metody optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanów z punktu widzenia wiązania węgla. Sylwan 160 (9): 720-729.

The determination of the age at which a stand reaches harvest maturity is one of the most important decision-making problems in the forest management. The method of determining the rotation age depends primarily on the objectives and management practices (e.g. timber production, carbon sequestration), which determine the optimal age of trees for felling. The paper includes the methodological basis of optimization of the rotation age of stands due to the maximization of the accumulation of carbon in the aboveground woody biomass of forest trees. The research method involves two variants of calculating the optimal rotation age: grouping the stands by site class (W-1) and grouping the stands by management method (W-2). For each of the variants four data processing methods were used to optimize the rotation age of stands: allometric formulas (I-1), formulas for the calculation of the aboveground woody biomass (I-2), information on wood density (I-3), and IPCC method (I-4). The study assumes that the optimal rotation age from the point of view of maximizing the rate of carbon accumulation is when the value of increment in the average aboveground woody biomass production  $S(t)/t$  equals to the value of the current increment in this biomass production –  $\Delta S$ . At this age, the standing volume  $R(t)$  and the volume of carbon stored in the growing stock  $W_w$  was calculated. The optimization method is analogous in all variants and approaches. The proposed method of optimizing the felling age of stands is illustrated on the example of Scots pine stands in 1<sup>st</sup> site class (variant W-1, approach I-4). The 2014 data from the Information System of the State Forests were used for the calculations. The results (fig.) indicate that due to the maximization of the rate of carbon accumulation, the optimum rotation age for the Scots pine in 1<sup>st</sup> site class is 56 years. At that age the stand was characterized by the standing volume  $R(t)$  of about 305 m<sup>3</sup>/ha. The total carbon accumulation  $S(t)$  before this age was 85 t/ha.

### KEY WORDS

rotation age, optimization methods, carbon dioxide accumulation, timber production

### ADDRESSES

Emilia Wysocka-Fijorek – e-mail: e.wysocka-fijorek@ibles.waw.pl

Stanisław Zajac – e-mail: s.zajac@ibles.waw.pl

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

\*Praca powstała w ramach tematu „Optymalizacja użytkowania oraz zasobności drzewostanów z punktu widzenia dochodowej funkcji produkcji drewna oraz kumulacji węgla” zleconego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych.

## Wstęp

Wielkość zapasu drzewostanów, a zarazem ilość zmagazynowanego w nim węgla, ulega zmianom w czasie w zależności od bieżącego przyrostu miąższości i rozmiaru użytkowania. Istnieje określona granica, tj. maksymalny poziom każdego rodzaju zasobów odnawialnych, w tym także drzewostanów, który nie może przekraczać potencjalnych możliwości ekosystemu. Jest to immanentna cecha zasobów odnawialnych, świadcząca o tym, że człowiek może użytkować tylko to, co przyrasta, i przy zachowaniu warunków racjonalnego gospodarowania. Wówczas wielkość danego zasobu zostanie odnowiona, co z kolei umożliwi ponowne pozyskanie, po którym znowu nastąpi jego odnowienie itd. Jeśli nie będzie zmian innych warunków (np. wewnątrz danego ekosystemu), istnieją podstawy do stwierdzenia, że proces użytkowania określonego zasobu odnawialnego może być kontynuowany przez wiele okresów. W praktyce potencjalne możliwości nadmiernego użytkowania zasobów odnawialnych są jednak znaczne. Z pewnością zjawisko takie może wystąpić, gdy wielkość określonego rodzaju zasobów osiągnie krytycznie niski poziom, na skutek np. nadmiernego użytkowania lub z innych powodów, czasami niezwiązanych bezpośrednio z ich użytkowaniem (np. zniszczenie środowiska).

Znajomość wielkości i wartości węgla związanego w biomase drzew i jego „uwalniania” w wyniku użytkowania jest jedną z podstawowych informacji niezbędnych w rachunku optymalizacyjnym ekonomicznego wieku dojrzałości rębnej drzewostanu. W rachunku tym konieczne jest przede wszystkim określenie ilości i wartości przyrostu miąższości oraz zmian zasobności w wyniku użytkowania drzewostanu, czyli z punktu widzenia produkcyjnej funkcji lasu. Ilość i wartość wiązania węgla jest ważnym elementem tego rachunku. Pełny rachunek optymalizacyjny powinien zatem uwzględniać łącznie produkcję drewna i wiązanie węgla.

Istotnym problemem gospodarczym jest określenie optymalnego wieku dojrzałości rębnej drzewostanu, w którym osiągnięty zostanie maksymalny poziom zysku, będącego funkcją wartości bieżącego przyrostu miąższości i wiązania węgla. Faustmann [1849], analizując proces produkcji leśnej, uwzględniał jedynie wartość drewna. Z kolei Samuelson [1976] problem optymalizacji gospodarki leśnej przedstawił w postaci matematycznego rozwinięcia koncepcji Faustmanna. O krok dalej poszedł Hartman [1976], rozszerzając model gospodarki leśnej przez włączenie do niego dodatkowego elementu, tj. wartości siedlisk dzikich zwierząt. Badania wielkości wiązania węgla w drzewostanach w zależności od ich wieku i składu gatunkowego prowadzono w niektórych krajach Europy i Ameryki [Chladna 2007; Yemsahanov i in. 2007; Thore 2009]. W Niemczech przeprowadzono badania dotyczące zdolności wiązania węgla przez różne gatunki drzew leśnych [Schöne, Schulte 1999]. Węgiel wiązany jest również w wyrobach drewnopochodnych. Zagadnienie to zbadano we Włoszech na przykładzie budynków z drewna [Gasser 2007]. W Polsce problematyką wiązania węgla w lesie zajmowali się m.in. Wójcik [2005, 2007a, b], Brzeziecki [2008], a także Strzeleński i in. [2007]. Badania zawartości węgla w glebie leśnej prowadzili również Dowydenko [2002] oraz Dobrowolska i in. [2012].

Zagadnieniem stosunkowo mało rozpoznanym zarówno w Polsce, jak i na świecie jest kwestia jednoczesnego, pożądanego z punktu widzenia gospodarki leśnej, możliwie wysokiego (optymalnego) poziomu zasobności drzewostanów i wielkości skumulowanego węgla. Obydwa wskaźniki mają zasadniczy wpływ na efektywność ekonomiczną gospodarki leśnej, determinowaną wartością sprzedanego drewna oraz skumulowanego węgla, zwłaszcza po zaistnieniu realnych możliwości handlu pozwoleniami na emisję. Tymczasem prace badawcze realizowane w kraju oraz za granicą dotyczą oddzielnie wielkości produkcji leśnej i optymalnego wieku dojrzałości rębnej drzewostanów (optymalizacji użytkowania drzewostanów) bądź rozmiaru wiązania węgla w biomase drzewnej.

Próbkę zbudowania modeli optymalizacyjnych funkcji produkcji leśnej lub wiązania węgla podjęto m.in. w Polsce i w Hiszpanii. Pierwszy przykład dotyczy modelowania wartości produkcji leśnej w drzewostanach sosnowych i świerkowych oraz wpływu wieku rębności na sytuację finansową gospodarki leśnej [Klocek, Zając 2005; Piekutin, Skręta 2012; Klocek, Piekutin 2015]. Drugi natomiast – zawartości węgla na przykładzie drzewostanów sosnowych [Goetz i in. 2010]. Nieliczne badania ekonometrycznego modelowania regulacji wielkości zapasu i ekonomicznego wieku rębności, łączącego dwa aspekty: produkcję drewna i wiązanie węgla w drewnie, wykonano na przykładzie lasów tropikalnych [Olschewski i in. 2005, 2010]. Wyniki tych badań nie są miarodajne dla drzewostanów w umiarkowanej strefie klimatycznej, ze względu na bardzo różniące się w nich warunki produkcji leśnej, a zwłaszcza długość jej cyklu oraz możliwość stosowania w rachunku optymalizacyjnym stopy procentowej.

Celem artykułu jest analiza metod określania ilości wiązanego węgla w zdrewniałej części nadziemnej drzew, a także ocena przydatności tych metod w rachunku optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanu uwzględniającego produkcję drewna i wiązanie węgla. W artykule przedstawiono również metodykę pozyskiwania, przygotowywania oraz przetwarzania danych empirycznych w rachunku optymalizacyjnym.

## Materiał i metody

Nadziemna biomasa zdrewniała drzew leśnych (grubizna i drobnica) jest jednym z podstawowych rezerwuarów zmagazynowanego węgla. Jest też najdokładniej scharakteryzowana i możliwa do ilościowego i wartościowego ocenienia w porównaniu z innymi elementami biomasy (liście, kora, drobne gałązki, pnie i korzenie) oraz węglem zawartym w ściocie i glebie leśnej [Asante i in. 2011]. Ponadto nadziemna biomasa zdrewniała może zostać pozyskana i wywieziona z lasu podczas prowadzenia gospodarki leśnej. Surowiec drzewny podlega następnie dalszemu przetworzeniu lub spalaniu, co nie jest objęte cyklem produkcji leśnej. Dlatego analiza obiegu węgla w przyrodzie, w tym ocena wielkości jego magazynowania i uwalniania z nadziemnej biomasy zdrewniałej drzew, jest właściwym elementem rachunku optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanów [Dawar, Cannell 1992].

W przyjętej metodyce optymalizacyjnej założono, że liście, igły oraz podziemna biomasa drzew – pniaki wraz z korzeniami – pozostają w lesie po wykonaniu zabiegów gospodarczych. Drewno będące tzw. drobnicą może być pozyskane i wywiezione z lasu, w związku z czym zostało ujęte w funkcji optymalizacji użytkowania opartej na maksymalizacji wiązania węgla w biomase nadziemnej. W analizie i ocenie wielkości wiązania węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej zastosowano cztery podejścia:

- I-1 – z wykorzystaniem wzorów allometrycznych opracowanych przez Jagodzińskiego [2011],
- I-2 – z wykorzystaniem wzorów służących do obliczania całkowitej nadziemnej biomasy części zdrewniałej (Total Aboveground Woody Biomass – ABW),
- I-3 – na podstawie gęstości drewna (Global Wood Density – GWD),
- I-4 – z wykorzystaniem metody przyjętej przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC).

Ocena wielkości (miąższości) nadziemnej biomasy zdrewniałej drzew odbywa się za pomocą dwóch sposobów. Pierwszy uwzględnia zależność biomasy od pierśnicy i/lub wysokości, a drugi wielkość biomasy w kontekście zasobności (miąższości grubizny) [Somogyi i in. 2006; Zasada i in. 2008; Jabłoński, Budniak 2014]. W metodyce określania wielkości wiązania węgla w drzewostanach (grupach drzewostanów) przyjęto założenie, że podstawowym źródłem danych liczbowych

będzie System Informatyczny Lasów Państwowych (SILP). Zbiory danych otrzymano z zastosowaniem dwóch sposobów (wariantów) grupowania:

- W-1 – według gatunku panującego, przedziału wiekowego (10-letnie podklasy wieku) i klasy bonitacji,
- W-2 – według gatunku panującego, przedziału wiekowego (10-letnie podklasy wieku) i sposobu zagospodarowania.

W obu wariantach pobrano z bazy SILP dane dotyczące powierzchni, zapasu, pierśnicy, wysokości oraz miąższości pozyskanego drewna. Wielkość zasobów drzewnych przedstawiono według stanu na 1 stycznia, natomiast pozyskanie (sprzedaż drewna) według stanu na 31 grudnia. Wielkość powierzchni podano w hektarach, z dokładnością do 1 ara, natomiast miąższość w m<sup>3</sup>.

Wariant W-1 polegał na grupowaniu drzewostanów według klas bonitacji, zgodnie z opisem gatunku panującego w SILP, a wariant W-2 na grupowaniu według sposobów zagospodarowania. Sposób zagospodarowania został przypisany na podstawie typu siedliskowego lasu i gatunku panującego. W celu przyjęcia sposobu zagospodarowania dla danych w skali kraju utworzono zestawienie, w którym dla typów siedliskowych lasu (TSL) i krain przyrodniczo-leśnych (KPL) przypisano najbardziej prawdopodobny sposób zagospodarowania, bazując na wiedzy eksperckiej oraz danych z SILP dotyczących wskazówek gospodarczych. Jeżeli do jednego TSL, KPL i gatunku panującego przypisane były dwa sposoby zagospodarowania (np. III/I), wówczas pierwszy został przyjęty dla 60% przypadków, a drugi dla 40%. W analizie brano pod uwagę gatunek drzewa, który był gatunkiem panującym w danym wydzieleniu z udziałem 8, 9 lub 10. Zbiór danych ograniczono do gospodarstw wielofunkcyjnych: zrębowego (GZ), przerębowo-zrębowego (GPZ), przerębowego (GP) i ochronnego (O). Wyłączono gospodarstwo specjalne (S) ze względu na indywidualne podejście do użytkowania oraz prowadzenia drzewostanów.

Na podstawie danych dotyczących zasobności drzewostanów w poszczególnych podklasach wieku opracowano równania trendu (wielomiany), które stanowiły podstawę do wyliczenia wyrównanej pierśnicy dla każdej podklasy wieku. Dopiero tak przygotowane dane zostały wykorzystane do dalszych obliczeń. Zarówno dla wysokości, jak i pierśnicy określona została mediana [Lehtonen i in. 2004]. Przyjęcie w obliczeniach mediany, a nie średniej arytmetycznej, wynika m.in. z tego, że jest ona bardziej przydatna do oceny zjawisk skrajnych. Pierśnicę oraz wysokość obliczono z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Na podstawie danych wejściowych (median wysokości i pierśnicy) drzewostanów w poszczególnych podklasach wieku opracowano równania trendu (wielomiany), które stanowiły podstawę do wyliczenia wyrównanej wysokości oraz pierśnicy każdej podklasy wieku. Ustalone w ten sposób parametry zostały wykorzystane do dalszych obliczeń.

Na podstawie danych dotyczących zapasu i powierzchni drzewostanów w poszczególnych podklasach wieku obliczono zasobność drzewostanów w podklasach wieku – jako iloraz zapasu i powierzchni drzewostanów w podklasie wieku. Istotnym elementem modelu optymalizacji ilości wiążanego węgla jest określenie udziału drobnicy w zdrewniałej biomase drzewnej (w wariancie uwzględniającym przeliczniki gęstości drewna – I-3). W celu określenia udziału drobnicy w miąższości w zdrewniałej biomase nadziemnej drzew wykorzystano informacje zawarte w tablicach Szymkiewicza [2001].

Na podstawie danych dotyczących zasobności oraz udziału drobnicy w grubości drzewostanów w poszczególnych podklasach wieku opracowano równania trendu (wielomiany), które stanowiły podstawę do wyliczenia wyrównanej zasobności brutto dla każdej podklasy wieku (wykorzystane w wariancie I-3). Dopiero tak wyliczone zasobności zostały wykorzystane do dalszych

obliczeń. Dane te posłużyły również do wyliczenia wyrównanej zasobności brutto dla każdej podklasy wieku w wariantach I-1, I-2 (z wykorzystaniem wzorów allometrycznych i metody ABW) oraz w wariancie I-4.

Drewno zgrupowano według gatunków panujących w klasach wieku, w których zostało pozyskane. Dane o pozyskaniu ustalono na podstawie SILP poszczególnych nadleśnictw. Użytkowanie przedębne obejmuje dane dotyczące wielkości użytkowania zrealizowanego (z wyłączeniem użytkowania rębnego, uwzględniano natomiast użytkowanie przygodne). W modelach optymalizacji ilości związanego węgla struktura sortymentowa nie ma znaczenia. W przypadku drewna innego gatunku jego pozyskaną miąższość przypisywano do analizowanego gatunku panującego. Następnie miąższość kory określono na podstawie procentu udziału kory w stosunku do miąższości drewna wraz z korą (brutto) ustalonej na podstawie przeliczników [Szymkiewicz 2001]. Po dodaniu tak ustalonej miąższości kory do wielkości pozyskania netto drzewostanów wyliczono rozmiar pozyskania brutto. Analogicznie jak w przypadku zasobności określono intensywność użytkowania w odniesieniu do jednostki powierzchni. Na podstawie danych dotyczących rozmiaru pozyskania w poszczególnych podklasach wieku opracowano równania linii trendu (wielomiany), które stanowiły podstawę do wyliczenia wyrównanego pozyskania przedębego brutto dla każdej podklasy wieku.

Przyjęto następujące metody obliczeń:

1. Wzory allometryczne (podejście I-1). W podejściu tym analizę wiązania węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej przeprowadzono z wykorzystaniem wzorów allometrycznych Jagodzińskiego [2011], których ogólna postać jest następująca:

$$Y = a \cdot d^b \quad [1]$$

gdzie:

$Y$  – węgiel związany w nadziemnej biomase zdrewniałej drzewa o przeciętnych wymiarach,  
 $d$  – pierśnica w podklasie wieku,  
 $a$  – współczynnik 1 (dla sosny: 0,05430435689521),  
 $b$  – współczynnik 2 (dla sosny: 2,34426396472848).

2. Metoda według całkowitej biomasy części nadziemnej (podejście I-2). W podejściu tym wykorzystano dostępne w literaturze wzory określające tę cechę. Parametry zbiorczych równań służących do obliczania nadziemnej biomasy zdrewniałej sosny mają następującą postać [Zianis i in. 2005; Gasparini i in. 2006]:

$$ABW = a + b \cdot d^2 \cdot h \quad [2]$$

gdzie:

$ABW$  – całkowita biomasa zdrewniała części nadziemnej,  
 $h$  – wysokość w podklasie wieku,  
 $d$  – pierśnica w podklasie wieku,  
 $a$  – współczynnik 3 (dla sosny: 2,7081),  
 $b$  – współczynnik 4 (dla sosny: 0,023724).

Wzór ogólny dla poszczególnych gatunków drzew ma różną postać.

Ilość związanego węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej drzewa liczona jest za pomocą wzoru:

$$Y = ABW \cdot CF \quad [3]$$

gdzie:

$CF$  – frakcja węgla – współczynnik udziału węgla w biomase (dla drewna iglastego i liściastego: 0,5).

W podejściu wykorzystującym wzory allometryczne dotyczące pojedynczego drzewa konieczne jest obliczenie miąższości drzewa przeciętnego. Miąższość drzewa wyliczono za pomocą wzoru [Bruchwald, Rymer-Dudzińska 1988]:

$$V_g = \frac{\Pi}{40000} \cdot d^2 \cdot h \cdot f_g \quad [4]$$

gdzie:

$f_g$  – pierśnicowa liczba kształtu grubizny.

W celu określenia pierśnicowej liczby kształtu grubizny drzewa ( $f_g$ ) stosowany jest wzór:

$$f_g = f_1 \cdot s \quad [5]$$

gdzie:

$f_1$  – pierśnicowa liczba kształtu strzały w korze,

$s$  – iloraz miąższości grubizny drzewa i miąższości strzały w korze.

Pierśnicowa liczba kształtu strzały sosny określana jest wzorami [Bruchwald 1996]:

$$f_1 = \frac{1}{1 + \left( \frac{d}{1,2895 + 0,90645 \cdot d} \right)^4} \quad [6]$$

$$s = \left( \frac{d - 6}{0,2834 + 0,988 \cdot (d - 6)} \right)^4 \quad [7]$$

Zastosowanie wzorów allometrycznych wymaga oszacowania liczby drzew w drzewostanie. Na podstawie zasobności w podklasie wieku oraz przeciętnych parametrów drzewa w wydzieleniu oszacowano liczbę drzew w podklasie wieku za pomocą wzoru:

$$L_d = \left( \frac{d \cdot R(t)}{V_g} \right) / d \quad [8]$$

gdzie:

$L_d$  – liczba drzew w podklasie wieku [szt./ha],

$R(t)$  – zasobność (bez drobnicy) w podklasie wieku [ $\text{m}^3/\text{ha}$ ],

$V_g$  – miąższość grubizny przeciętnego drzewa w podklasie wieku [ $\text{m}^3$ ],

$d$  – pierśnica w podklasie wieku [cm].

Ilość węgla związanego w drewnie w podklasie wieku wyrażana jest wzorem:

$$Y_w = Y \cdot L_d \quad [9]$$

3. Charakterystyka metody określania zmian zasobów węgla w rezerwuarze nadziemnej biomasy zdrewniałej (podejście I-3). Dla określenia zasobów węgla w danym czasie wykorzystana została następująca formuła:

$$Y_w = R(t) \cdot G \cdot CF \quad [10]$$

gdzie:

$R(t)$  – średnia zasobność wraz z drobnicą w korze [ $\text{m}^3/\text{ha}$ ],

$G$  – średnia gęstość drewna [ $\text{t}/\text{m}^3$ ] – wskaźniki gęstości drewna suchego zgromadzone w bazie Global Wood Density Database (GWD) [Chave i in. 2009; Zanne 2009] (dla sosny:  $0,42189 \text{ t}/\text{m}^3$ ).

4. Metoda kalkulacji ilości węgla związanego w zdrewniałej biomase nadziemnej stosowana przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (podejście I-4). Metoda ta wykorzystuje wskaźniki stosowane aktualnie w charakterystyce obiegu węgla w ekosystemie leśnym i jego alokacji w drzewostanie (biomasie drzewnej) w celu określania ilości pochłaniania  $\text{CO}_2$  i została przyjęta przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami na potrzeby raportowania magazynowanego węgla w lasach.

Dla określenia zasobów węgla w danym czasie wykorzystana została następująca formuła [Krajowy... 2014]:

$$Y_w = R(t) \cdot D \cdot BEF_2 \cdot CF \quad [11]$$

gdzie:

$R(t)$  – zasobność (bez drobnicy) w podklasie wieku [ $\text{m}^3/\text{ha}$ ],

$D$  – średnia gęstość drewna ( $0,43 \text{ t}/\text{m}^3$ ),

$BEF_2$  – współczynnik ekspansji (1,4).

## Wyniki

Podstawowym źródłem danych liczbowych dotyczących wielkości związanego w drzewostanie węgla (zmian zasobności w wyniku przyrostu miąższości i użytkowania) jest SILP. Ze względów praktycznych najbardziej przydatnym sposobem oceny wielkości związanego przez drzewostan węgla w optymalizacji wieku rębności drzewostanu jest więc metoda z wykorzystaniem podejścia I-4. Do ustalenia funkcji wiązania węgla, z uwagi na uwzględnienie użytkowania przedrębnego, konieczne jest określenie sumy ilości węgla związanego w drzewostanie na pniu (zasobności w danym wieku  $t$ ) –  $Y_w R(t)$  i ilości związanego węgla w drewnie pozyskanym w użytkowaniu przedrębnym do wieku  $t$  –  $Y_w \Sigma P(t)$ :

$$S(t) = Y_w R(t) + Y_w \Sigma P(t) \quad [12]$$

gdzie:

$Y_w R(t)$  – ilość węgla związanego w zapasie rosnącym,

$Y_w \Sigma P(t)$  – ilość węgla związanego w użytkowaniu przedrębnym.

Optymalny wiek wyrębu drzewostanu z punktu widzenia maksymalizacji tempa wiązania  $\text{CO}_2$  przypada w momencie, w którym zrównuje się wartość przyrostu przeciętnego produkcji oraz przyrostu bieżącego produkcji:

$$S(t)/(t) = \Delta S(t) \quad [13]$$

gdzie:

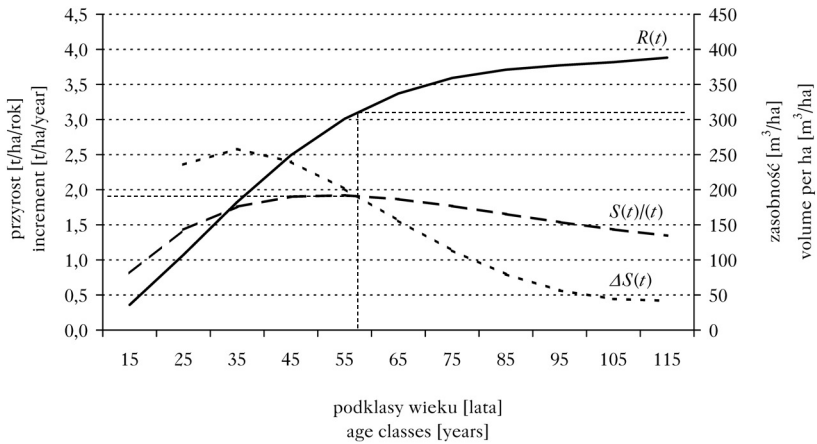
$S(t)/(t)$  – przyrost przeciętny produkcji,

$\Delta S(t)$  – przyrost bieżący produkcji.

W wieku zrównania się wielkości  $S(t)/(t)$  oraz  $\Delta S(t)$  określana jest zasobność  $R(t)$  oraz wartość węgla związanego w zapasie rosnącym  $W_w$  (ryc.).

Zaproponowana metoda optymalizacji wieku wyrębu drzewostanów jest przedstawiona na przykładzie drzewostanów sosnowych I klasy bonitacji w Lasach Państwowych na podstawie danych SILP z 2014 roku, w którym wykorzystano wariant W-1 oraz metodę IPCC (podejście I-4). We wszystkich pozostałych wariantach i podejściach metoda optymalizacji jest analogiczna.

Na podstawie przedstawionego przykładu (ryc.) można stwierdzić, że dla drzewostanów sosnowych I klasy bonitacji, ze względu na maksymalizację tempa wiązania węgla, optymalnym wiekiem wyrębu drzewostanu jest 56 lat. W tym wieku drzewostan przeciętnie będzie charakteryzował się zasobnością  $R(t)$  około  $305 \text{ m}^3/\text{ha}$ , a sumaryczna wielkość związanego węgla  $S(t)$  do tego wieku będzie wynosiła  $85 \text{ t}/\text{ha}$ .



### Ryc.

Schemat optymalizacji wiązania węgla dla drzewostanu sosnowego I klasy bonitacji (podejście I-4)

Optimization of the carbon sequestration for Scots pine stand of, 1<sup>st</sup> site class (approach I-4)

$R(t)$  – zasobność;  $S(t)/(t)$  – przeciętny przyrost produkcji;  $\Delta S(t)$  – bieżący przyrost produkcji

$R(t)$  – standing volume;  $S(t)/(t)$  – average increment;  $\Delta S(t)$  – current increment

## Dyskusja

Zaprezentowanie różnych podejść do optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanów w kontekście maksymalizacji wiązania węgla w zdrewniałej biomase nadziemnej drzew miało na celu przedstawienie możliwych do zastosowania metod kalkulacji i ich przydatności w praktyce. Wybór odpowiedniej metody zależy od dostępności danych oraz przyjętych założeń rachunku optymalizacyjnego [Holtmark 2013]. Istotne znaczenie ma także skala wykonywanej kalkulacji [Jabłoński, Budniak 2014]. Inne podejście można stosować, chcąc oszacować ilość węgla związanego w jednym drzewie, a inne w drzewostanie czy grupie drzewostanów.

Istotnym problemem, który należało rozwiązać, był sposób ujęcia w rachunku optymalizacyjnym drewna pozyskanego w użytkowaniu przedrębny. W przypadku stosowania metody optymalizacji wieku dojrzałości rębnej do oszacowania wiązania węgla w drzewostanach i wpływu użytkowania na wynik kalkulacji tego wieku przygotowano dane dotyczące zrealizowanego pozyskania drewna. Przy stosowaniu metody optymalizacji np. w procesie planowania urzędzeniowego, jako pomocnego elementu przy wyborze odpowiedniego etatu, planowane pozyskanie należałoby wyznaczyć poprzez wyliczenie dla poszczególnych nadleśnictw (wydzierzeń) wskaźników użytkowania przedrębny według gatunków panujących i klas wieku. Wskaźniki te określa się na podstawie danych urzędzeniowych. Miąższość klas wieku i gatunków panujących oraz miąższość użytkowania przedrębny należy ustalić według wskazówek gospodarczych. Miąższość planowanego pozyskania przedrębny podlega wyrównaniu do przyjętych etatów brutto. Wskaźniki wyznaczane są jako iloraz planowanego użytkowania przedrębny oraz miąższości danego gatunku panującego i klasy wieku.

Poza metodami optymalizacji prowadzenia gospodarki leśnej na gruntach już zalesionych należy rozważyć inne warianty. Jedną z możliwości zwiększania pochłaniania dwutlenku węgla jest zalesianie. Ponadto zalesianie przyczynia się również do minimalizowania regionalnych problemów środowiskowych, jak degradacja gleby i pustynnienie [Olschewski i in. 2005]. Poza korzyściami wynikającymi z pochłaniania węgla przez lasy oraz grunty zalesione należy zwrócić uwagę na wzrastające znaczenie środowiskowych funkcji lasów [Olschewski i in. 2010].



Dotychczas podejmowano próby optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanów z punktu widzenia wiązania węgla. Model opracowany przez Hartmana został wykorzystany m.in. przez van Kootena i in. [1995] do oceny wpływu cen węgla na optymalny wiek wyrębu lasów w zachodniej Kanadzie. Autorzy ci nie analizowali zmian węgla zgromadzonego w martwej materii organicznej oraz w glebie [Asante i in. 2011]. Z kolei Holtsmark i in. [2013] podjęli polemikę z rezultatami badań Asante in. [2011] oraz Asante i Armstronga [2012], dowodząc (przeciwnie niż wymienieni autorzy), że początkowy zapas martwej materii organicznej i wyrobów z drewna nie ma znaczenia w odniesieniu do optymalnego wieku wyrębu drzewostanów. Asante i in. [2011] oraz Asante i Armstrong [2012] stwierdzili, że włączenie martwej materii organicznej prowadzi do obniżenia optymalnego wieku wyrębu. Natomiast Holtsmark i in. [2013] sformułowali wniosek przeciwny, ponieważ martwa materia organiczna rozpatrywana jest w nieskończonej perspektywie czasowej.

## Podsumowanie

Kluczowe znaczenie podczas szacowania ilości wiązanego węgla w zdrewniałej biomacie naziemnej ma jednostka podstawowa, dla której wykonywana jest analiza. Konieczne jest dobranie najlepszej metody do posiadanych danych oraz celu kalkulacji. Metody oparte ma miąższości drzewostanów lub ich grup powinny być stosowane podczas kalkulacji wiązanego węgla na dużych powierzchniach leśnych. W przypadku analizy ilości wiązanego węgla w pojedynczych drzewach możliwe jest wykorzystanie zarówno metod opartych na miąższości drzewa, jak i na jego pierśnicy. Ze względu na dostępność danych oraz wzorów umożliwiających uzyskanie dokładnych wyników bardziej odpowiednie wydają się być metody obliczania ilości wiązanego węgla oparte na gęstości drewna.

## Literatura

- Asante P., Armstrong G. W. 2012. Optimal forest harvests age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: a comparative analysis. *Journal of Forest Economics* 18 (2): 145-156. DOI: 10.1016/j.jfe.2011.12.002.
- Asante P., Armstrong G. W., Adamowicz W. L. 2011. Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision: A dynamic programming approach considering biomass and dead organic matter. *Journal of Forest Economics* 17 (1): 3-17.
- Bruchwald A. 1996. New Empirical Formulae for Determination of Volume of scot Pine Stands. *Fol. For. Pol. S. A* 38: 5-10.
- Bruchwald A., Rymer-Dudzińska T. 1988. Empirical equations for determining timber volume of stem on stump for pine. *Ann. Warsaw Agric. Univ. – SGGW-AR, For. and Wood Technol.* 36: 51-55.
- Brzeziecki B. 2008. Możliwości wykorzystania modeli matematycznych do analizy wpływu zmian klimatu na lasy oraz bilansu węgla w ekosystemach leśnych. W: *Udział leśnictwa w łagodzeniu zmian klimatycznych wywołanych efektem cieplarnianym*. Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Leśnictwa i Drzewnictwa. 29-39.
- Chave J., Coomes D. A., Jansen S., Lewis S. L., Swenson N. G., Zanne A. E. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12 (4): 351-366. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Chladna Z. 2007. Determination of optimal rotation period under stochastic wood and carbon prices. *Forest Policy and Economics* 9 (8): 23-29. DOI: 10.1016/j.forpol.2006.09.005.
- Dawar R. C., Cannell M. G. R. 1992. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. *Tree Physiology* 11: 49-71.
- Dobrowolska D., Brzeziecki B., Szwagrzyk J., Głaz J., Rykowski K., Jaworski T., Sierota Z., Szczygieł R. 2012. Zmiany klimatyczne a ekosystemy leśne: zasoby węgla w lasach Polski oraz kierunki adaptacji gospodarki leśnej. Zadanie 1: Strategia adaptacji lasów i gospodarki leśnej do zmian klimatycznych. Zadanie 2: Ocena wielkości zmian zasobów węgla w biomacie drzewnej w lasach Polski. Synteza. IBL, Warszawa.
- Dowdydenko N. 2002. Zawartość węgla w glebach wybranych drzewostanów sosnowych i świerkowych na gruntach porolnych. Maszynopis. Praca doktorska. IBL, Warszawa.
- Faustmann M. 1849. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. Reprinted in 1995. *Journal of Forest Economics* 1: 7-44.
- Gasparini P., Nocetti M., Tabacchi G., Tosi V. 2006. Biomass equations and data for forest stands and shrublands of the Eastern Alps. Manuscript.

- Gasser M. 2007. Akzente setzen. Märkte beachten. Forstzeitung 4: 17-25.
- Goetz R. U., Hritonenko N., Mur R., Xabadia R., Yatsenko Y. 2010. Forest management and carbon sequestration in size-structured forests: the case of *Pinus sylvestris* in Spain. Forest Science 56 (3): 242-256.
- Hartman R. 1976. The harvesting decision when a standing forest has value. Economic Inquiry 14 (1): 52-58.
- Holtmark B. 2013. Boreal forest management and its effect on atmospheric CO<sub>2</sub>. Ecological Modelling 248 (10): 130-134. DOI :10.1016/j.ecolmodel.2012.10.006.
- Holtmark B., Hoel M., Holtmark K. 2013. Optimal harvest age considering multiple carbon pools – A comment. Journal of Forest Economics 19 (1): 87-95. DOI: 10.1016/j.jfe.2012.09.002.
- Jabłoński M., Budniak P. 2014. Szacowanie nadziemnej biomasy drzewnej lasów w Polsce na potrzeby sprawozdawczości EKG/FAO i UNFCCC. Leś. Pr. Bad. 75 (3): 277-289. DOI: 10.2478/frp-2014-0027.
- Jagodziński A. M. 2011. Raport końcowy z realizacji tematu badawczego: „Bilans węgla w biomase drzew głównych gatunków lasotwórczych Polski”. Część III B. Wyniki – Retencja węgla w biomase drzew i drzewostanów. Kórnik.
- Klocek A., Piekutin J. 2015. Wiek rębności w lesie normalnym i lesie celowym. Sylwan 159 (12): 971-988.
- Klocek A., Zajac S. 2005. Ekonomiczny wiek dojrzałości rębnej drzewostanów sosnowych i świerkowych oraz jego wpływ na sytuację finansową gospodarki leśnej. Dokumentacja naukowa BLP-243. Warszawa.
- van Kooten G. C., Binkley C. S., Delcourt G. 1995. Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. Am. J. Agric. Econ. 77 (2): 365-374.
- Krajowy Raport Inwentaryzacyjny. 2014. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2012. Raport wykonany na potrzeby Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz Protokołu z Kioto. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa.
- Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management 188 (1-3): 211-224. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.008.
- Olschewski R., Benítez P. C., de Koning G. H. J., Schlichterd T. 2005. How attractive are forest carbon sinks? Economic insights into supply and demand of Certified Emission Reductions. Journal of Forest Economics 11 (2): 77-94. DOI: 10.1016/j.jfe.2005.04.001.
- Olschewski R., Klein A. M., Tschardtke T. 2010. Economic trade-offs between carbon sequestration, timber production, and crop pollination in tropical forested landscapes. Ecological Complexity 7 (3): 314-319. DOI: 10.1016/j.ecocom.2010.01.002.
- Piekutin J., Skreta M. 2012. Ekonomiczny wiek rębności drzewostanów sosnowych. Sylwan 156 (10): 741-749.
- Samuelson P. A. 1976. Economics of forestry in an evolving society Econ. Inq. 14: 466-492.
- Schöne D., Schulte A. 1999. Forstwirtschaft nach Kyoto: Ansätze zur Quantifizierung und betrieblichen Nutzung von Kohlenstoffsenken. Forstarchiv 70: 167-176.
- Somogyi Z., Cienciala E., Mäkipää R., Muukkonen P., Lehtonen A., Weiss P. 2006. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. Eur. J. Forest. Res. 126: 197-207. DOI: 10.1007/s10342-006-0125-7.
- Strzeliński P., Wencel A., Zawila-Niedzwiecki T., Zasada M., Jagodziński A., Chirrek M. 2007. Wybrane zdalne metody szacowania biomasy roślinnej w ekosystemach leśnych jako podstawa systemu raportowania bilansu węgla. Roczniki Geomatyki 5 (4): 7-16.
- Szymkiewicz B. 2011. Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów. PWRiL, Warszawa.
- Thore C. 2009. Ansprüche an den Wald-Zielkonflikte aus gesamtwirtschaftlicher Sicht. Waldstrategie 2020. Berlin.
- Wójcik J. 2005. Zasoby węgla organicznego w glebach leśnych. W: Rola lasów i gospodarki leśnej w kształtowaniu bilansu CO<sub>2</sub> w Polsce – studium pilotażowe. IBL, Warszawa. 41-45.
- Wójcik J. 2007a. Gleby leśne jako pochłaniacz CO<sub>2</sub> w kontekście raportowania do Protokołu z Kioto. W: Problematyka roli lasów i gospodarki leśnej w wiązaniu atmosferycznego CO<sub>2</sub> i w bilansie węgla. Postępy Techniki w Leśnictwie 98: 35-38.
- Wójcik J. 2007b. Zasoby węgla organicznego w glebach leśnych i ich zmiany. Problemy metodyczne i wiarygodność danych w aspekcie raportowania do Protokołu z Kioto. Konferencja naukowa „Rola lasów i gospodarki leśnej w kształtowaniu bilansu węgla w ekosystemach leśnych w Polsce”. IBL, CILP, Warszawa. 85-99.
- Yemsahanov D., McKenney D., Fraléigh S., D'Eon S. 2007. An integrated spatial assessment of the investment potential of three species in southern Ontario, Canada inclusive of carbon benefits. Forest Policy and Economics 10 (1-2): 36-47. DOI: 10.1016/j.forpol.2007.03.001.
- Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilie J., Jansen S., Lewis S. L., Miller R. B., Swenson N. G., Wiemann M. C., Chave J. 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository. <http://dx.doi.org/10.5061/dryad.234>
- Zasada M., Bronisz K., Bijak S., Wojtan R., Tomusiak R., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L. 2008. Wzory empiryczne do określania suchej biomasy nadziemnej części drzew i ich komponentów. Sylwan 152 (3): 27-39.
- Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. 2005. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. Silva Fennica 4.