

KAROL ZABORSKI, JAN BANAŚ

Optymalizacja rozmiaru użytkowania rębnego metodą programowania liniowego

Harvest volume optimization with linear programming

ABSTRACT

Zaborski K., Banaś J. 2020. Optymalizacja rozmiaru użytkowania rębnego metodą programowania liniowego. Sylwan 164 (3): 187-195. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020010>.

The paper presents a linear programming method of harvest volume determination including calculations of net present value (NPV) of standing timber. NPV was computed taking into account the costs of harvesting and skidding and a discount rate of 2.5%. Harvest volume was determined for three 10-year management periods according to the following four scenarios: (1) Vol_max – timber volume maximization within constraints concerning harvest area (4 ha), cutting interval (5 year), felling a maximum of two adjacent cutting plots over a 10-year period, combined harvest area per decade (a quarter of the total area of near-mature, mature, and overmature stands), and minimum stand age (starting with near-mature stands); (2) RA – as in the Vol_max scenario plus the harvest area per decade should be smaller than or equal to the regulated area; (3) NPV_max – NPV maximization while respecting all constraints from the Vol_max scenario; and (4) IUL – pursuant to the Instrukcja... [2012]. Calculations included allowable cuts by maturity for mature stands (the last age class) and near-mature and mature stands (two last age classes), as well as the allowable cut for mean age equalization. Subsequently, the optimum allowable cut was determined and particular stands were designated for felling, starting with the oldest ones, and taking into consideration spatial layout. An optimization case study was done for the Seredzice forest unit designated for clearcutting, consisting of pine stands or stands with a predominance of Scots pine growing on coniferous and mixed coniferous habitat types with a total area of 813.20 ha in the Marcule Forest District (C Poland). The total harvest volume determined using linear programming for a 30-year period was 81.17, 74.70, and 80.84 thousand m³ in the Vol_max, RA, and NPV_max scenarios, respectively, which was greater by 29%, 19%, and 28% than in the IUL scenario (62.95 thousand m³). The total NPV of stands designated for harvesting in the 30-year period was 9423, 8824, and 9483 thousand PLN for the Vol_max, RA, and NPV_max scenarios, respectively, as compared to 7492 thousand PLN in the IUL scenario. The simultaneous determination of harvest volume for several management periods by analyzing the parameters of individual stands and selecting the optimum harvest period for them makes it possible to better exploit the production potential of the forest and increase both the volume and value of the harvested timber over a long time horizon.

KEY WORDS

linear programming, harvest planning, net present value, stand scheduling

ADDRESSES

Karol Zaborski ⁽¹⁾

Jan Banaś ⁽²⁾ – e-mail: rlbanas@cyf-kr.edu.pl

⁽¹⁾ Nadleśnictwo Marcule; Marcule 1, 27-100 Hża⁽²⁾ Katedra Zarządzania Zasobami Leśnymi, Uniwersytet Rolniczy; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

Wstęp

Programowanie liniowe to ogólne określenie zestawu metod, które mogą być wykorzystywane do optymalizacji wyboru określonego celu w świetle ograniczeń nałożonych na działania związane z zarządzaniem środowiskiem lub innymi utrudnieniami [Bettinger i in. 2017]. Zastosowanie programowania liniowego pozwala na sformułowanie określonych ograniczeń, będących m.in. skutkiem dostępnych możliwości finansowych, zasobów personelu (pracowników), dostępności urządzeń czy określonego arealu gruntów, a także innych, wynikających z różnych ustaw prawa krajowego czy lokalnego [Buongiorno, Gilles 2003].

Model programowania liniowego składa się z funkcji celu, pewnych ograniczeń (nierówności) oraz zmiennych decyzyjnych [Wojda 2015]. Kluczowe jest założenie, że wszystkie relacje potrzebne do wyboru odpowiedniego planu działania muszą być policzalne (tzn. można im przypisać pewną wartość liczbową) oraz wszystkie powiązania (relacje) w modelu są liniowe (są funkcjami liniowymi). Rozwiązaniem określonego celu (problemu) przy zastosowaniu programowania liniowego jest ilościowa ocena proponowanych rozwiązań wynikająca z podjęcia określonych decyzji i przyjętych założeń (ograniczeń) na etapie zarządzania (planowania) [Bettinger i in. 2017].

Metody programowania liniowego obecnie szeroko wykorzystuje się do optymalizacji w wielu obszarach i są one kluczowe w badaniach operacyjnych [Hillier, Lieberman 2010; Kaspar i in. 2013]. Pierwsze możliwości zastosowania programowania liniowego w planach zarządzania zasobami naturalnymi opisano w literaturze naukowej w latach 60. XX wieku [Curtis 1962]. Programowanie takie było wykorzystywane do rozwiązywania problemów związanych z opracowaniem planów cięć już od lat 70. [Johnson i in. 1977].

Pomimo tego, że zastosowanie programowania matematycznego, w tym liniowego, zostało w zarządzaniu lasu wprowadzone na szeroką skalę w wielu krajach, w Polsce do tej pory nie podjęto próby jego zastosowania jako narzędzia w procesie optymalizacji wyboru drzewostanów do wycięcia. Przy urządzaniu lasów w Polsce podstawą określania dojrzałości drzewostanów do wycięcia była dojrzałość techniczna. Wiek wyznaczający tę dojrzałość służył do określenia wielkości etatu i był podstawą regulacji ładu czasowego. Brak powszechnie akceptowanej jednej metody ustalania dojrzałości drzewostanów do wycięcia wskazuje, że jest to ciągle niezamknięty obszar badań leśnych – tych związanych z zarządzaniem lasu. Jest to także problem o charakterze praktycznym, bowiem od wielu dziesięcioleci, ustalając kolejność wycięcia dla drzewostanów, władze leśne kierują się bardziej intuicją niż rezultatami badań z wykorzystaniem danych empirycznych [Bednarski, Miścicki 2016]. W lasach gospodarczych wycięcie drzewostanu powinno nastąpić w momencie, w którym wartość surowca drzewnego uzyskana z jego sprzedaży będzie jak największa (maksymalna). Z drugiej jednak strony należy przestrzegać pewnych określonych założeń wynikających z szeroko pojętych kryteriów ekologicznych i aktów prawnych odnoszących się do prowadzenia trwałej i zrównoważonej gospodarki leśnej [Maruśák 2007].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metody określenia rozmiaru użytkowania rębnego z wykorzystaniem programowania liniowego, przy uwzględnieniu niezbędnych ograniczeń, dotyczących m.in. wieku, wielkości i przestrzennego położenia drzewostanów. Ponadto przedstawiona zostanie metoda planowania i optymalizacji rozmiaru użytkowania rębnego w oparciu o wartość netto (NPV) drzew na pniu w trzech kolejnych 10-letnich okresach planowania gospodarczego i jej wpływ na rozkład klas wieku drzewostanów będących przedmiotem regulacji.

Wykonana zostanie również analiza porównawcza wartości drzewostanów na pniu podlegających wycięciu wyznaczonych z użyciem programowania liniowego w porównaniu z metodą wyznaczenia drzewostanów zgodnie z obowiązującą Instrukcją... [2012].

Materiał i metody

Materiał badawczy stanowią trzy grupy danych. Pierwsza to opisy taksacyjne drzewostanów leśnictwa Seredzice w Nadleśnictwie Marcule według stanu na 1 stycznia 2018 roku wynikające z PUL na lata 2015-2024. Obszar objęty regulacją, nazywany w dalszej części pracy gospodarstwem zrębowym Seredzice, obejmował drzewostany sosnowe i z przewagą sosny wzrastające na siedliskach borów i borów mieszanych o sumarycznej powierzchni 813,20 ha. Drugą grupę stanowiły ceny oraz miąższość sprzedanego surowca drzewnego w Nadleśnictwie Marcule w latach 2009-2018 według gatunków i sortymentów. Średnią cenę danego gatunku i sortymentu (grupy sortymentów) obliczono jako średnią ważoną miąższością sprzedanego sortymentu. Szczegółowe ceny drewna według gatunków podano w pracy Banasia i in. [2019]. Trzecią grupę stanowiły średnie koszty pozyskania oraz zrywki drewna w Nadleśnictwie Marcule w latach 2009-2018. Ceny drewna oraz koszty zrywki i pozyskania wykorzystano do obliczenia wartości netto (NPV) surowca drzewnego na pniu dla poszczególnych drzewostanów.

W przedstawianym sposobie określania rozmiaru użytkowania metodą programowania liniowego za cel optymalizacji przyjęto maksymalizację miąższości lub wartości pozyskania drewna w trzech 10-letnich okresach planistycznych, przy respektowaniu aktualnych ograniczeń prawnych związanych z użytkowaniem rębym drzewostanów.

Funkcję celu zdefiniowano następująco [Maruśák, Kaspar 2015]:

$$\max W = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^3 V_{ip} \cdot x_{ip} \quad [1]$$

gdzie:

V_{ip} – miąższość lub wartość i -tego drzewostanu w okresie p ,

x_{ip} – zmienna decyzyjna przyjmująca wartości: 1 – jeżeli drzewostan i jest wyznaczony do wycięcia w okresie p ; 0 – jeżeli drzewostan i nie jest wyznaczony do wycięcia.

Przyjęto następujące założenia ograniczające powierzchnię drzewostanów wyznaczanych do wyrębu:

1. Każdy drzewostan (działka zrębowa) (x) może podlegać wycięciu tylko raz w ciągu trzech kolejnych okresów planowania [Kaspar i in. 2015]:

$$\sum_{p=1}^3 x_p \leq 1 \quad [2]$$

2. Łączna wielkość powierzchni zrębów drzewostanów sąsiadujących nie może w danym okresie przekraczać 8 ha (maksymalna wielkość zrębu 4 ha i maksymalnie 2 nawroty cięć w ciągu 10 lat):

$$\sum_{i=1}^k a_i x_i \leq 8 \quad [3]$$

gdzie:

$a_1, a_2 \dots a_i$ – powierzchnia drzewostanów sąsiadujących ze sobą,

k – liczba drzewostanów sąsiadujących.

3. Maksymalna łączna powierzchnia drzewostanów planowana do wycięcia w okresie p (A_p) nie może przekraczać $1/4$ sumy powierzchni drzewostanów bliskorębnych, rębnych i przeszlorębnych (R_p) (jest to etat powierzchniowy z dwóch ostatnich klas wieku według Instrukcji... [2012]):

$$A_p \leq 0,25 \cdot R_p \quad [4]$$

4. Powierzchnia wyrównana drzewostanów w klasach wieku (RA) jest określona formułą [Maruśák 2007]:

$$RA = \frac{A}{r} \cdot m \quad [5]$$

gdzie:

- A – powierzchnia gospodarstwa,
- r – kolej rębny dla gospodarstwa (przyjęto 100 lat dla wieku rębności sosny 100 lat),
- m – szerokość klasy wieku (10 lat).

Termin „wartość bieżąca” używany jest dla określenia wartości (w obecnej wartości pieniądza) dla przyszłych strumieni korzyści (dochodów) i kosztów. Dochody i koszty, które powiązane są z przyszłością, są dyskontowane do ich wartości bieżącej (obecnej), aby odzwierciedlić zmianę wartości pieniądza w czasie. Określona kwota obecnie ma wartość większą niż w przyszłości. Wynika to z faktu, że kwotę tę można zainwestować (np. poprzez założenie lokaty bankowej) i w określonym czasie w przyszłości otrzymać z tego tytułu dodatkowy dochód. W niniejszej pracy wartość bieżąca netto (NPV) każdego drzewostanu (W_i) wyrażona w złotych obliczona została według następującego wzoru [European... 2002; Bettinger i in. 2017]:

$$W_i = \sum_{t=1}^T \frac{V_i \cdot C_i - K_i}{(1+r)^t} \quad [6]$$

gdzie:

- V_i – sumaryczna miąższość i -tego drzewostanu do wycięcia przypadająca na 1 ha,
- C_i – cena 1 m³ drewna,
- K_i – koszt ścinki i zrywki drewna w drzewostanie i w okresie t ,
- r – przyjęta wielkość stopy dyskontowej (2,5%),
- t – środek każdego 10-letniego okresu planowania,
- T – horyzont czasu.

Wartość bieżąca netto (NPV) surowca drzewnego na pniu została obliczona z uwzględnieniem kosztów pozyskania i zrywki drewna dla stopy dyskontowej na poziomie 2,5% [Grege-Staltmane, Tuherm 2010; Adamowicz 2018a, b] W celu przeprowadzenia obliczeń korzystano z oprogramowania typu free software: LPSolve IDE-5.5.2.5 oraz Gurobi 8.1.1.

Przyjęte warianty obejmowały następujące założenia:

Wariant 1 (Vol_max) – maksymalizacja miąższości pozyskanego surowca drzewnego w trzech 10-letnich okresach gospodarczych, przy uwzględnieniu obowiązujących ograniczeń dotyczących: wielkości zrębu (4 ha), nawrotu cięć (5 lat – maksymalnie 2 sąsiadujące działki zrębowe w 10-letnim okresie), łącznej powierzchni cięć ($1/4$ sumy powierzchni drzewostanów bliskorębnych, rębnych i przeszłorębnych), minimalnego wieku drzewostanu (od drzewostanów bliskorębnych).

Wariant 2 (RA) – uwzględnia wszystkie ograniczenia określone w wariantcie 1 oraz dodatkowo zakłada, że łączna powierzchnia cięć w danym dziesięcioleciu (etat powierzchniowy) nie może przekroczyć powierzchni wyrównanej (określonej wzorem 5).

Wariant 3 (NPV_max) – maksymalizacja wartości pozyskanego surowca drzewnego (NPV określony wzorem 6 przy stopie dyskontowej 2,5%) w trzech 10-letnich okresach gospodarczych, przy uwzględnieniu wszystkich ograniczeń określonych dla wariantu 1.

Wariant 4 (IUL) – zgodnie z obowiązującymi obecnie zasadami określonymi w Instrukcji... [2012]. Obliczono etat dojrzałości z drzewostanów rębnych (ostatniej klasy wieku), bliskorębnych i rębnych (dwóch ostatnich klas wieku), etat zrównania średniego wieku, wybrano etat optymalny oraz wyznaczono poszczególne drzewostany do wycięcia, poczynając od najstarszych, z uwzględnieniem ładu przestrzennego.

Wyniki

Wielkość użytkowania rębego określoną według metody obecnie stosowanej w praktyce przedstawiono w tabeli 1. Największe wartości (od 21,73 do 27,85 tys. m³ w kolejnych dziesięcioleciach) osiągają etaty zrównania średniego wieku, co wynika z dużego udziału w gospodarstwie Sereczyce drzewostanów młodych (ryc. 1 T1).

W pierwszym okresie za etat optymalny został przyjęty etat dojrzałości z drzewostanów bliskorębnych i rębnych (ED2), na poziomie 15,37 tys. m³/10 lat oraz 54,43 ha/10 lat. W drugim okresie znaczna powierzchnia drzewostanów (100,74 ha) przeszła do grupy rębnych (z 8 do 9 klasy wieku) i jednocześnie znacznie mniej drzewostanów (58,40 ha) przeszło do grupy bliskorębnych (z 6 do 7 klasy wieku) (ryc. 1 T2). Jako etat optymalny w drugim okresie został wybrany etat dojrzałości z drzewostanów rębnych na poziomie 22,22 m³ oraz 69,48 ha. W trzecim okresie wzrósł znacznie udział drzewostanów bliskorębnych, spowodowany przejściem 120,25 ha drzewostanów z 6 do 7 klasy wieku (ryc. 1 T3), co zadecydowało o przyjęciu etatu z drzewostanów bliskorębnych i rębnych jako optymalnego na poziomie 25,36 tys. m³ oraz 68,46 ha.

Wielkość użytkowania rębego określona metodą programowania liniowego (PL) we wszystkich okresach była większa od wartości określonych zgodnie z Instrukcją... [2012] (tab. 2). W wariantcie 1 (Vol_max) rozmiar użytkowania łącznie w trzech dziesięcioleciach wyniósł 81,17 tys. m³ i był wyższy o 29% od rozmiaru użytkowania określonego według metody IUL dla tego okresu (62,95 tys. m³).

W wariantcie 2 (RA) wielkość użytkowania wyznaczono na poziomach 16,01, 24,98 oraz 33,80 tys. m³, odpowiednio w 1, 2 i 3 okresie. Założenie, że łączna powierzchnia cięć (zrębów) w danym dziesięcioleciu nie może przekroczyć powierzchni wyrównanej (81,20 ha), nie wpłynęło istotnie na poziom użytkowania w 1 i 2 okresie, gdyż powierzchnia drzewostanów spełniająca warunki do wycięcia była mniejsza od powierzchni wyrównanej. W trzecim dziesięcioleciu, pomimo większego zbioru drzewostanów możliwych do wycięcia, wielkość etatu została ograniczona do powierzchni wyrównanej.

Tabela 1.

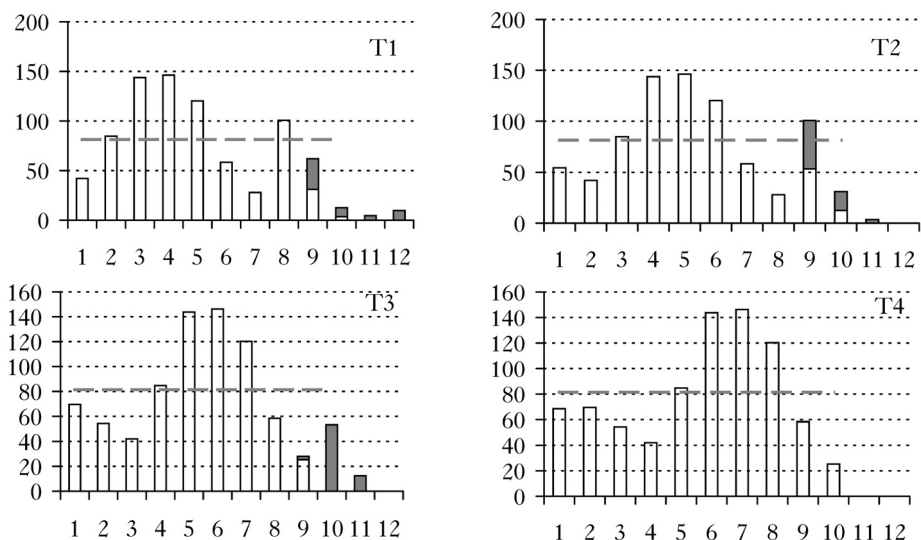
Miąszościowy (V [tys. m³/10 lat]) i powierzchniowy (A [ha/10 lat]) rozmiar użytkowania rębego określony według metody stosowanej w praktyce [Instrukcja... 2012] w gospodarstwie zrębowym Sereczyce w 10-letnich okresach planowania (T1-T3)

Volume (V [x1000 m³/10 years]) and area (A [ha/10 years]) of final harvest calculated according to the Instrukcja... [2012] in the Sereczyce forest unit in 10-years planning periods (T1-T3)

	V-ED1	V-ED2	V-EZ	A-ED1	A-ED2	A-EZ
T1	13,02	15,37*	21,73	44,50	54,43*	73,92
T2	22,22*	18,11	25,09	69,48*	56,33	73,46
T3	17,99	25,36*	27,85	47,60	68,46*	74,88

ED1 – etat z drzewostanów rębnych, ED2 – etat z drzewostanów bliskorębnych i rębnych, EZ – etat zrównania średniego wieku; * etat optymalny

ED1 – yield from mature stands, ED2 – yield from mature and near-mature stands, EZ – yield from mean age equalization; *optimal yield



Ryc. 1.

Rozkład powierzchni [ha] (białe słupki) drzewostanów w 10-letnich klasach wieku (1-12) wraz z drzewostanami planowanymi do wycięcia według metody stosowanej w praktyce [Instrukcja... 2012] (ciemne słupki) w gospodarstwie zrębowym Seredzice w kolejnych 10-letnich okresach planowania (T1-T4)

Distribution of real stands area [ha] (white bars) in 10-years age classes (1-12) and area of stands designated to harvest according to the Instrukcja... [2012] (dark bars) in the Seredzice forest unit in consecutive 10-years planning periods (T1-T4)

linia przerywana – powierzchnia wyrównana
dashed line – regulated area

Tabela 2.

Rozmiar [tys. m³] użytkowania rębego według trzech wariantów metody programowania liniowego w gospodarstwie zrębowym Seredzice w 10-letnich okresach planowania (T1-T3)

Final harvest [$\times 1000$ m³] calculated according to three management scenarios of linear programming for the Seredzice forest unit in 10-years planning periods (T1-T3)

	Vol_max	RA	NPV_max
T1	15,77 (3)	16,01 (4)	17,47 (14)
T2	24,7 (11)	24,89 (12)	24,15 (9)
T3	40,7 (60)	33,8 (33)	39,22 (55)
Razem			
In total	81,17 (29)	74,7 (19)	80,84 (28)

Vol_max – maksymalizacja miąższości planowanej do pozyskania, RA – maksymalizacja miąższości planowanej do pozyskania i dodatkowo powierzchnia cięć \leq powierzchni wyrównanej klas wieku, NPV_max – maksymalizacja wartości bieżącej drewna planowanego do pozyskania. W nawiasach różnica [%] miąższości drewna planowanego do pozyskania w wariantcie w stosunku do Instrukcji... [2012]

Vol_max – timber volume maximization, RA – timber volume maximization and the harvest area per decade should be smaller than or equal to the regulated area, NPV_max – timber value maximization. Difference [%] between linear programming scenario and Instrukcja... [2012] scenario in brackets

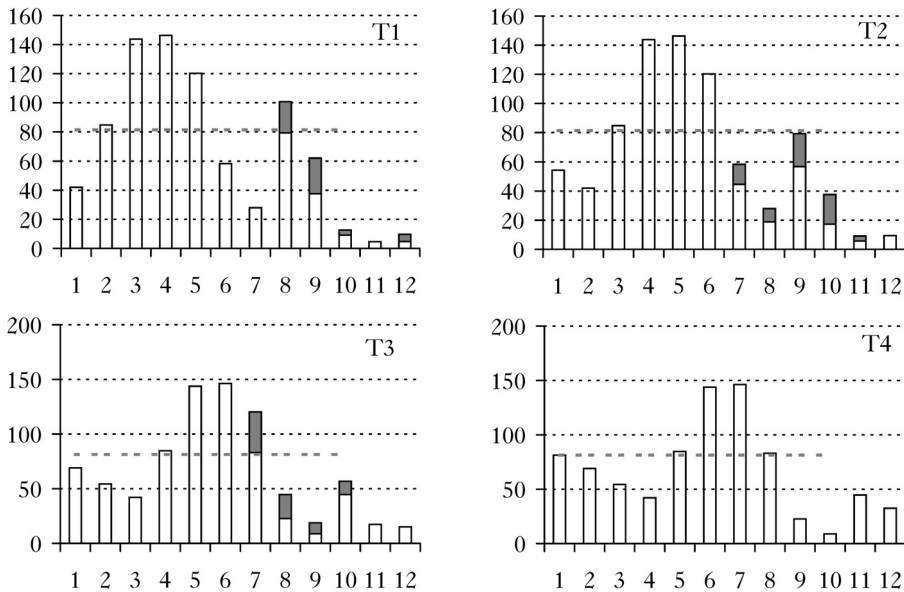
W wariantcie 3 (NPV_max) rozmiar użytkowania w kolejnych dziesięcioleciach określono na poziomach 17,47, 24,15 oraz 39,22 tys. m³. Maksymalizacja wartości bieżącej drewna sprzyjała wyznaczaniu do wyrębu drzewostanów we wcześniejszych okresach, gdyż w miarę upływu czasu wartość bieżąca drewna zmniejszała się o stopę dyskontową (2,5%). Na kolejność wyboru drzewostanu do wyrębu (w którym dziesięcioleciu) istotny wpływ miała wartość surowca drzewnego oraz wielkość przyrostu bieżącego miąższości kształtująca bezpośrednio przyrost wartości, jeżeli drzewostan pozostał na kolejne dziesięciolecie.

Większy rozmiar użytkowania określony metodą PL wynika między innymi z odmiennego algorytmu wyznaczania drzewostanów do wycięcia. W metodzie IUL drzewostany wyznaczane są dla dziesięcioletniego okresu, począwszy od najstarszych aż do wyczerpania etatu określonego dla tego dziesięciolecia, bez sprawdzenia, czy taki wybór jest korzystny dla kilku okresów traktowanych razem i czy nie ograniczy znacznie możliwości pozyskania w kolejnych okresach. W metodzie PL drzewostany wyznaczane są symultanicznie (jednocześnie) dla kilku (w niniejszej pracy trzech) okresów i zawsze z całego zbioru drzewostanów możliwych do wycięcia, co umożliwia pozostawienie części drzewostanów rębnych (o wysokim przyroście) na kolejne dziesięciolecie oraz wyznaczenie do wycięcia części drzewostanów bliskorębnych o niskiej dynamice przyrostu. Udział drzewostanów rębnych (powyżej 80 lat) na początku czwartego dziesięciolecia określony metodą IUL wyniósł 83,73 ha (ryc. 1 T4), a metodą PL w wariancie 2 108,62 ha (ryc. 2 T4).

Wartość bieżąca surowca drzewnego (NPV) wyznaczonego do pozyskania podano w tabeli 3. Wartość surowca łącznie dla 30-letniego okresu w wariantach PL wynosi od 8824 tys. zł (wariant 2) do 9483 tys. zł (wariant 3) i jest wyższa od wartości surowca wyznaczonego według IUL (7492 tys. zł).

Dyskusja

Stosowany obecnie system regulacji rozmiaru użytkowania w lasach gospodarczych polega na wyborze etatu optymalnego spośród etatów dojrzałości opartych na wieku rębności oraz etatu



Ryc. 2.

Rozkład powierzchni [ha] (białe słupki) drzewostanów w 10-letnich klasach wieku (1-12) wraz z drzewostanami planowanymi do wycięcia według metody programowania liniowego w wariancie powierzchni wyrównanej (ciemne słupki) w gospodarstwie zrębowym Seredzice w kolejnych 10-letnich okresach planowania (T1-T4)

Distribution of real stands area [ha] (white bars) in 10-years age classes (1-12) and area of stands designated to harvest according to scenario regulated area of linear programming method (dark bars) in the Seredzice forest unit in consecutive 10-years planning periods (T1-T4)

linia przerywana – powierzchnia wyrównana
dashed line – regulated area

Tabela 3.

Wartość bieżąca surowca drzewnego (NPV [tys. zł]) planowana do pozyskania w cięciach rębnych według poszczególnych wariantów w gospodarstwie zrębowym Seredzice w 10-letnich okresach planowania (T1-T3)
 Net present value of timber (NPV [$\times 1000$ PLN]) planned for harvest according to different scenarios in the Seredzice forest unit in 10-years planning periods (T1-T3)

	Vol_max	RA	NPV_max	Instrukcja... [2012]
T1	2483 (7)	2521 (8)	2747 (18)	2327
T2	3036 (11)	3061 (12)	2969 (9)	2731
T3	3904 (60)	3242 (33)	3767 (55)	2434
Razem In total	9423 (26)	8824 (18)	9483 (27)	7492

objaśnienia jak w tabeli 2; denotes as in table 2

zrównania średniego wieku, zakładającego, że średni wiek gospodarstwa po okresie realizacji (wykonania) etatu pozostanie na tym samym poziomie. Wielkość etatu bezpośrednio zależy od udziału oraz relacji pomiędzy powierzchnią i zapasem drzewostanów: rębnych, bliskorębnych oraz przedrębnych.

W metodzie programowania liniowego w pierwszym etapie definiowana jest funkcja celu, a następnie w procesie optymalizacji poszukiwane jest rozwiązanie, dla którego funkcja celu osiąga największe z możliwych wartości przy przyjętych ograniczeniach [Garcia 1990; Galatsidas i in. 2013]. W niniejszej pracy funkcją celu jest łączna miąższość lub wartość drewna planowana do pozyskania w trzech dziesięcioletnich okresach gospodarczych. Wynikiem optymalizacji jest określenie maksymalnego (przy przyjętych ograniczeniach) poziomu użytkowania oraz wskazanie (dla kolejnych okresów gospodarczych), w których drzewostanach (lub części drzewostanu) powinno być prowadzone pozyskanie drewna. W trakcie procesu optymalizacji uwzględniane zostały zarówno indywidualne cechy poszczególnych drzewostanów (wiek, skład gatunkowy, zasobność, przyrost oraz zmiana wartości surowca drzewnego w czasie), jak i wzajemne położenie względem sąsiadujących drzewostanów.

Drzewostany leśnictwa Seredzice cechuje nierównomierny rozkład w klasach wieku – występuje przewaga (w porównaniu z rozkładem normalnym) drzewostanów w wieku 21-50 lat oraz 71-80 lat. W polskich lasach na ogół przeważają drzewostany w wieku 41-80 lat (według raportu o stanie lasów za 2018 rok). Określanie etatu rębnego metodami dojrzałości oraz zrównania średniego wieku będzie powodowało znaczne fluktuacje poziomu użytkowania w kolejnych okresach gospodarczych i przeniesienie nierównomiernego rozkładu klas wieku na kolejne dziesięciolecia.

Zastosowanie programowania liniowego w optymalizacji naboru drzewostanów do wyřębu cechujących się złożoną strukturą gatunkową i przestrzenną może być nieco ograniczone. Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się jednak znaczny rozwój i zastosowanie modeli optymalizacyjnych wykorzystujących m.in. programowanie liniowe [Hoganson, Meyer 2015]. Obecny poziom rozwoju nauki i poszczególnych technologii pozwala na uwzględnienie wielu ograniczeń związanych z pełnieniem przez lasy wielu funkcji pozaprodukcyjnych [Nelson 2003; Menzel i in. 2012].

Wnioski

✚ W gospodarstwach o nierównomiernym rozkładzie drzewostanów w klasach wieku określanie etatu rębego metodami dojrzałości i zrównania średniego wieku powoduje znaczne wahania wielkości etatu i utrwała nierównomierną strukturę wiekową drzewostanów.

- ✦ W lasach gospodarczych stosowanie wieku rębności jako głównego kryterium decydującego o wielkości użytkowania oraz schematyczne wyznaczanie drzewostanów do wycięcia na podstawie ich wieku nie pozwala na pełne wykorzystanie potencjału produkcyjnego indywidualnych drzewostanów.
- ✦ W programowaniu liniowym każdy drzewostan traktowany jest indywidualnie, co pozwala na pozostawianie drzewostanów rębnych o dużym potencjale produkcyjnym na kolejny okres gospodarczy oraz wcześniejsze usuwanie drzewostanów o niskim przyroście, zagrożonych rozpadem i deprecjacją surowca drzewnego.
- ✦ Planowanie rozmiaru użytkowania dla kilku okresów gospodarczych symultanicznie, poprzez analizowanie cech indywidualnych drzewostanów i wybranie optymalnego okresu pozyskania dla poszczególnych drzewostanów, pozwala na zwiększenie zarówno rozmiaru, jak i wartości pozyskiwanego drewna w dłuższym horyzoncie czasu.
- ✦ Wykorzystanie programowania liniowego jako pomocznego narzędzia decyzyjnego w zarządzaniu lasów w Polsce wydaje się być godne zainteresowania.

Literatura

- Adamowicz K. 2018a. A review of selected methods to determine the economic value of forest: Polish research. Chapter 4: 72-85.
- Adamowicz K. 2018b. The unresolved problem of determining the forest interest rate. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry* 60 (2): 122-130.
- Banaś J., Kożuch A., Zaborski K. 2019. Zastosowanie dekompozycji szeregów czasowych do analizy wahań podaży i cen drewna na przykładzie Nadleśnictwa Marcule. *Sylvan* 163 (10): 820-829. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2019064>.
- Bednarski K., Miścicki S. 2016. Kolej rębny drzewostanów sosnowych według kryteriów ekonomicznych. *Sylvan* 160 (3): 197-206. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2015095>.
- Bettinger P., Boston K., Siry J. P., Grebner D. L. 2017. *Forest Management and Planning*. Academic Press.
- Buongiorno J., Gilless J. 2003. *Decision Methods for Forest Resource Management*. Academic Press.
- Curtis F. H. 1962. Linear programming in forestry. *Journal of Forestry* 60 (9): 611-616.
- European Framework for integrated environmental and economic accounting for forests. 2002. IEEAF. Annex 3 – valuation methods.
- Galatsidas S., Petridis K., Arabatzis G., Kondos K. 2013. Forest production management and harvesting scheduling using dynamic Linear Programming (LP) models. *ELSEVIER Procedia Technology* 8: 349-354.
- Garcia O. 1990. Linear programming and related approaches in forest planning. *New Zeland Journal of Forestry Science* 20 (3): 307-331.
- Grege-Staltmane E., Tuherm H. 2010. Importance of discount rate in Latvian Forest Valuation. *Baltic Forestry* 16 (2): 303-311.
- Hillier F. S., Lieberman G. J. 2010. *Introduction to operations research*. 9th ed. McGraw-Hill, New York.
- Hoganson H. M., Meyer N. G. 2015. Constrained Optimization for Addressing Forest-Wide Timber Production. *Curr Forestry Rep* 1: 33-43. DOI: 10.1007/s40725-015-0004-x.
- Instrukcja zarządzania lasu. 2012. PGL LP, CILP, Warszawa.
- Johnson K. N., Scheurman H. L. 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives-Discussion and synthesis. *Forest Science Monograph*. 18-31.
- Kaspar J., Maruśák R., Hlavaty R. 2015. Aforest planning Approach with respect to the creation of overmature reservedareas in managed forests. *Forests* 6: 328-343. DOI: 3390/f6020328.
- Kaspar J., Maruśák R., Vopěnka P. 2013. Comparison of two alternative optimization techniques for spatial harvest planning. *Scientia Agriculturae Bohemica* 44: 90-96.
- Maruśák R. 2007. Alternative harvest scheduling for final cut with respect to silvicultural requirements. *Forestry Journal* 53: 117-127.
- Maruśák R., Kaspar J. 2015. Spatially-constrained harvest scheduling with respect to environmental requirements and silvicultural system. *Forestry Journal* 61: 71-77.
- Menzel S., Buchecker M., Nordström E. 2012. Decision support systems in forest management: requirements from a participatory planning perspective. *European Journal of Forest Research*. 131: 1367-1379.
- Nelson J. 2003. Forest-level models and challenges for their successful application. *Canadian Journal of Forest Research*. 33 (3): 422-429.
- Wojda A. P. 2015. Elementy programowania liniowego i metod sieciowych. Wydawnictwa AGH, Kraków.