

Antoni KORCYL*, Kamil CZAJKA*

OPTYMALIZACJA PROCESÓW LOGISTYCZNYCH W GOSPODARCE LEŚNEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono model matematyczny problemu optymalizacji pozyskiwania drewna oraz jego transportu. Kryterium wyboru właściwych decyzji jest maksymalizacja wartości wyciętego drewna, pomniejszona o koszty budowy niezbędnych dróg transportowych w przyjętym horyzoncie planowania

1. WPROWADZENIE

Gospodarka leśna jest ważną dziedziną przemysłu w wielu krajach. Pod pojęciem gospodarki leśnej należy rozumieć działalność związaną z opieką nad lasem i jego ochroną, użytkowaniem, utrzymaniem i powiększaniem jego zasobów. Gospodarowanie poza aspektami typowo związanymi z drzewostanem i jego pozyskiwaniem i odnową jest związane ze zwierzyną leśną, runem leśnym, roślinami leczniczymi oraz realizacją pozaprodukcyjnych funkcji lasu, związanych z ochroną powietrza, wód i gleby [5]. Podstawową dziedziną gospodarczego wykorzystania lasu przez człowieka jest jego utrzymywanie, kształtowanie, odtwarzanie i doskonalenie w celu utrzymywania bazy produkcyjnej. W Polsce podstawowym zadaniem leśnictwa jest zwiększenie powierzchni leśnej z jednoczesnym dążeniem do zapewnienia lasom trwałości i wysokiej produktywności.

2. PROBLEM PLANOWANIA WYRĘBU

Planowanie wyrębu lasu jest jednym z podstawowych problemów logistycznych realizowanych w ramach operacyjnego zarządzania ilością drzewostanu oraz transportem pozyskanego drewna. W dobie powszechnej informatyzacji i postępu technicznego nowoczesne narzędzia zaczynają być stosowane w gospodarce leśnej. Istotnym narzędziem stosowanym w planowaniu są modele matematyczne, które mogą mieć zastosowanie do problemów związanych z pozyskiwaniem drewna i jego transportem, kształtowaniem i odtwarzaniem drzewostanu. Modele te zawierają elementy matematycznych problemów lokalizacyjnych [2,4], których zastosowanie ma na celu efektywne ekonomicznie planowanie podejmowanych działań. Są one problemami o *NP* – trudnej złożoności obliczeniowej oraz wymagają aktualnych danych przestrzennych dotyczących drzewostanu, sposobów jego eksploatacji oraz transportu. W problemie planowania pozyskiwania drewna teren, który jest przeznaczony do wyrębu dzielony jest na jednostki lub bloki, które wzajemnie grupami przylegają do siebie.

Modele planowania wycinki budowane są w taki sposób, aby możliwy był wybór właściwej strategii działania zapewniającej produkcję w długim horyzoncie czasu realizowaną na dużych obszarach. Ich zastosowanie jest oparte na danych związanych z terenem, jego przestrzenną konfiguracją, rodzajem drzewostanu oraz innymi elementami odnoszącymi się

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania

do rozpatrywanego obszaru związanymi z pozostałymi aspektami gospodarki leśnej. Bez wyznaczenia szczegółów przestrzennych niemożliwe jest utrzymanie odpowiednich warunków środowiskowych.

Podstawowym kryterium optymalizacji w planowaniu wycięcia jest maksymalizacja wartości wyciętego drewna. Zmienną decyzyjną modelu jest określenie, ze zdefiniowanego zbioru obszarów, momentu, w którym poszczególne obszary będą wycinane. Zbiór obszarów, określanych jako obszary przeznaczone do czystego cięcia (wycinanie wszystkich drzew na danym terenie), są zbiorami ograniczonymi ze względu na konieczność eliminacji negatywnego wpływu na środowisko naturalne poprzez wzrost erozji gleby, czy negatywne odczucia wizualne. Jednocześnie definicja jednakowych obszarów pod względem powierzchni pozwala na zapewnienie tzw. ograniczenia nie rujnującego planów, którego istotą jest zapewnienie wycinki w danym okresie takiego samego obszaru, co w okresie poprzednim.

Modele posiadają szereg ograniczeń do których zalicza się:

- Zakaz równoczesnego wycięcia sąsiadujących ze sobą obszarów ;
- Czas i koszt budowy dróg transportowych zapewniających dostęp do planowanych w danym okresie czasu obszarów do wycięcia;

3. MODEL OPTIMALIZACYJNY PLANOWANIA WYCIECIA

Podstawowym problemem decyzyjnym w ramach planowania wycięcia lasu jest określenie, które obszary w założonym horyzoncie planowania winny być wycinane oraz określenie, które połączenia drogowe (umożliwiające wycięcie danego bloku oraz transport pozyskanego drewna), w którym okresie planistycznym winny zostać wybudowane oraz jaki sposób wycięcia w danym obszarze powinien być prowadzony. Kryterium optymalizacji jest maksymalizacja łącznej wartości wyciętego drewna, w rozpatrywanym horyzoncie planowania pomniejszona o koszty budowy niezbędnych połączeń drogowych. Do optymalizacji problemu decyzyjnego, dotyczącego planowania wycięcia możliwe jest zastosowanie zmodyfikowanego modelu zaproponowanego przez [2], opisanego oznaczeniami przedstawionymi w tabelicy nr 1

Tabela 1. Oznaczenia zbiorów, parametrów i zmiennych decyzyjnych

M_j – zbiór połączeń drogowych, które muszą zostać zbudowane aby uzyskać połączenie j ;
S_i – zbiór połączeń drogowych, które mogą być użyte do komunikacji z obszarem i ;
N_i – zbiór obszarów przyległych do obszaru i ;
w_{it} – aktualna wartość wyciętego drewna z obszaru i w okresie t ;
wr_{it} – nie zdyskontowany przychód uzyskany w wyniku wycięcia obszaru i w okresie t ;

Tablica 1.cd. Oznaczenia zbiorów, parametrów i zmiennych decyzyjnych

v_{it} – wielkość obszaru i wycinanego w okresie t ;
c_{jt} – zdyskontowany koszt budowy połączenia drogowego j w okresie t ;
cr_{jt} – nie zdyskontowany koszt budowy połączenia drogowego j w okresie t ;
ck_{ik} - koszt prowadzenia wycinki metodą k na obszarze i w okresie t
g_t – górny limit wyřębu w okresie t ;
l_t – dolny limit wyřębu w okresie t ;
dr_t – dolny limit nie zdyskontowanych przychodów uzyskanych w okresie t ;
p – długość okresu ochronnego;
n_i – współczynnik konieczny do narzucania ograniczeń wokół obszaru i ;
$x_{it} = \begin{cases} 1, \text{jeżeli obszar } i \text{ wycinany jest w okresie } t \\ 0, \text{inaczej} \end{cases}$
$r_{jt} = \begin{cases} 1, \text{jeżeli droga } j \text{ jest budowana w okresie } t \\ 0, \text{inaczej} \end{cases}$
$y_{itk} = \begin{cases} 1, \text{jeżeli w obszarze } i \text{ w okresie } t \text{ stosowany jest sposób wycinania } k \\ 0, \text{inaczej} \end{cases}$

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2]

Zapis matematyczny funkcji celu modelu optymalizacyjnego ma postać:

$$\max Z = \sum_i \sum_t w_{it} x_{it} - \sum_j \sum_t c_{jt} r_{jt} - \sum_i \sum_k \sum_t ck_{ik} y_{itk} \quad (1)$$

przy ograniczeniach:

- obszar wycinany jest jednokrotnie w przyjętym horyzoncie planowania od $t - p$ do $t + p$:

$$\sum_{l=t-p}^{t+p} x_{il} \leq 1 \quad \forall i, t \in [p+1, T-p] \quad (2)$$

- droga budowana jest jednokrotnie w przyjętym horyzoncie planowania:

$$\sum_t r_{jt} \leq 1 \quad \forall j \quad (3)$$

- droga j nie może zostać zbudowana jeżeli droga poprzedzająca ją \hat{j} nie została zbudowana:

$$r_{jt} \leq \sum_{l=1}^t r_{\hat{j}l} \quad \forall t; j, \hat{j} \in M_j \quad (4)$$

- brak możliwości wyřębu sąsiadujących obszarów w okresie planistycznym t :

$$n_i x_{it} + \sum_{i \in N_i} x_{it} \leq n_i \quad \forall i, t \quad (5)$$

5. brak możliwości wycięcia obszaru i , dla którego nie zbudowano połączenia drogowego j :

$$x_{it} \leq \sum_{j \in S_i} \sum_{l=1}^t r_{jl} \quad \forall i, t \quad (6)$$

6. zapewnienie narzuconych ilościowych limitów wycięcia w okresie planistycznym t :

$$d_t \leq \sum_i v_{it} x_{it} \leq g_t \quad \forall t \quad (7)$$

7. zapewnienie minimalnej wartości nie zdyskontowanych przychodów ze sprzedaży wyciętego drewna pomniejszone nie zdyskontowane koszty budowy dróg:

$$\sum_i w r_{it} x_{it} - \sum_j c r_{jt} r_{jt} \geq d r_t \quad \forall t \quad (8)$$

8. zapewnienie kompatybilności sposobu wycięcia z obszarem pozyskania drewna:

$$x_{it} \leq y_{itk} \quad \forall i, t, k \quad (9)$$

9. zapewnienie binarności zmiennych decyzyjnych:

$$x_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (10)$$

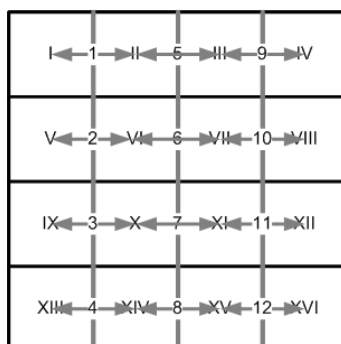
$$r_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j, t \quad (11)$$

$$y_{itk} \in \{0,1\} \quad \forall i, t, k \quad (12)$$

W odniesieniu do modelu zaproponowanego przez [2] zmodyfikowana została funkcja celu, która uwzględnia koszty wynikające z zastosowania określonej metody wycięcia drzewostanu na danym obszarze. Dodatkowo zmodyfikowano ograniczenie dotyczące braku możliwości przeprowadzenia wycięcia z obszaru, do którego nie zbudowano połączenia drogowego w okresie planistycznym. Proponowana modyfikacja wynika ze sposobu zdefiniowania zbioru połączeń drogowych dla każdego obszaru, które mogą zostać wykorzystane do komunikacji z danym obszarem. Każdy obszar posiada określoną ilość alternatywnych połączeń drogowych, które różnią się między sobą kosztem budowy. W przypadku zastosowania modelu pierwotnego, którego istotą jest to, że dla każdego obszaru, w każdym okresie planowania oraz dla każdego alternatywnego połączenia drogowego sprawdzane jest czy do momentu podjęcia decyzji o wycięciu konieczne połączenia drogowe zostały zbudowane. Zapis pierwotny ograniczenia powoduje, że w przypadku podjęcia decyzji o wycięciu obszaru, dla którego istnieją alternatywne połączenia drogowe, wszystkie będą musiały zostać zbudowane do momentu okresu planowania, w którym decyzja ta jest realizowana. Zaproponowane ograniczenie (6) narzuca, że w przypadku podjęcia decyzji o wycięciu obszaru, co najmniej jedno z alternatywnych połączeń zostało wcześniej wybudowane.

4. PRZYKŁADOWA SYMULACJA KOMPUTEROWA

W celu weryfikacji zaproponowanego modelu optymalizacyjnego planowania wycięcia przeprowadzono symulację procesu decyzyjnego. Podana analizie powierzchnia lasu przeznaczona do wycięcia wynosząca 1600 hektarów została podzielona na 16 jednakowych obszarów, każdy o powierzchni 100 hektarów. Zdefiniowano zbiór dróg tworzących połączenia drogowe umożliwiające wycięcie poszczególnych obszarów (rys. 1).



Rys. 1. Podział terenu na obszary i możliwe połączenia drogowe

Źródło: opracowanie własne

Przyjęty horyzont planowania wycinki obejmował 6 kwartałów, przy czym w każdym kwartale z uwagi na aspekty ekologiczne, czy aspekty związane z ochroną środowiska, jak utrzymanie przyjaznych warunków środowiskowych, aspekty związane z różną gęstością zalesienia w wyznaczonych blokach oraz aspekty ekonomiczne, jak zmienność popytu na drewno można wycinać inną ilość drewna, rozumianą jako możliwą do wyrębu powierzchnię obszaru. Ponadto nałożone zostało ograniczenie na brak możliwości wycinki w dwóch bezpośrednio następujących po sobie okresach oraz ograniczenie zakazu wycinki przyległych bloków. Ograniczenia te oznaczają, że w przypadku podjęcia decyzji o wycince określonej ilości drewna z danego obszaru nie można dokonywać wycinki z tego obszaru przez jeden kwartał, zarówno poprzedzający okres wycinki, jak również następujący po nim. Jeśli w danym kwartale podjęta zostanie decyzja o wycince danego obszaru to obszary przyległe do niego nie mogą być wycinane w tym samym kwartale. Możliwą maksymalną ilość wycinanego drewna w poszczególnych obszarach i okresach planistycznych przedstawiono w tabelicy nr 2. Na podstawie analiz rynku i cen drewna oszacowano i wyznaczono prognozę przychodów w poszczególnych okresach planistycznych możliwych do uzyskania z wycinki poszczególnych obszarów, przedstawioną w tabelicy nr 3 oraz wyznaczono ich aktualną wartość na pierwszy okres planistyczny przy założonej 6% stopie dyskontowej.

Tabela 2. Maksymalna ilość drewna możliwa do wycięci w okresie t [ha]

Obszar	Kwartał					
	1	2	3	4	5	6
I	20	13	17	17	18	15
II	15	13	14	13	18	27
III	15	13	20	21	22	9
IV	11	21	17	18	21	12
V	22	20	19	8	9	22
VI	20	20	20	15	15	10
VII	15	15	30	10	10	20
VIII	19	20	21	20	20	0
IX	11	15	17	30	11	16
X	18	19	20	21	9	13
XI	5	5	5	25	30	30
XII	11	20	13	17	19	20
XIII	15	15	15	25	15	15
XIV	7	13	13	23	22	22
XV	40	10	12	13	10	15
XVI	25	20	23	14	10	8

Źródło: opracowanie własne

Tablica 3. Przychód możliwy do uzyskania z wycinki drewna [tys. zł]

Obszar	Kwartał					
	1	2	3	4	5	6
I	2002,2	1411,3	1534,3	1700,8	2001,4	1504,5
II	1672,4	1301,4	1450,5	1054,6	2110,5	3008,7
III	1750,4	1303,4	2025,7	2150,5	2300	1034,8
IV	1023,5	2125,3	1850,8	1900,5	2000	1053,7
V	2325,3	2100	2012,4	1050,5	1200,2	2400
VI	2011,2	2000,4	2012,3	1508,7	1501,9	1012,3
VII	1312,4	1250,5	2700,9	1123,5	1001,1	1751,1
VIII	2012,5	2156,7	2202,3	1950,6	2125,2	0
IX	1300	1413,5	1515,6	3102,5	1200,3	1600,7
X	2000,2	1914,6	2109,1	2103,4	1412,3	1350,9
XI	1002,4	1102,8	1000,3	2575,6	2706,7	2600,9
XII	4987,7	1511,1	1012,3	1211,1	1000,2	1700,8
XIII	2925,3	2350,6	2300	1525,6	1200,7	1125,7
XIV	712,3	1100,5	1200,3	2550,4	2550,5	2258,9
XV	918,9	1725,2	1050,5	1475,7	1825,5	2018,5
XVI	1251,4	1300	1350,8	2501,8	1451,7	1351,1

Źródło: opracowanie własne

Tablica 4. Koszt budowy [tys. zł] połączeń drogowych w poszczególnych okresach

Droga	Kwartał					
	1	2	3	4	5	6
1	133,5	123,8	117,8	123,5	122,7	123,5
2	113,4	113,5	117,5	117,5	98,7	90,3
3	123,4	128,9	112,5	137,6	93,5	120,1
4	100,2	98,9	89,7	99,9	112,8	98,7
5	78,6	72,3	83,3	101,4	98,6	78,6
6	75,4	68,3	77,4	81,2	84,4	76,7
7	68,5	78,8	76,5	89,7	77,6	71,3
8	101,4	112,4	130,2	123,4	101,4	103,2
9	100,3	98,7	94,7	82,3	101,1	112,9
10	113,4	123,2	121,1	120,3	120,3	132,2
11	117,8	121,3	122,5	116,5	101,3	112,2
12	123,4	101,4	127,8	125,4	123,4	122,2

Źródło: opracowanie własne

Ze względu na ograniczenia związane z aspektami ochrony środowiska czy prognozowane zmiany popytu oraz ograniczenia wycinki, z uwagi na posiadane zasoby rzeczowe, w szczególności w postaci specjalistycznych maszyn i urządzeń oraz zasoby

osobowe, w szczególności w postaci wykwalifikowanych pracowników w połączeniu z ograniczonymi zdolnościami transportowymi wycinanego drewna określono minimalną i maksymalną ilość wycięcia w poszczególnych okresach planistycznych, przedstawioną w tabeli nr 5. Natomiast w wyniku przeprowadzenia analizy finansowej oraz analizy rentowności prowadzenia wycinki wyznaczono minimalną łączną wysokość nie zdyskontowanych przychodów jakie należy uzyskać w poszczególnych okresach planistycznych, przedstawioną w tabeli nr 5.

Tablica 5. Dolny i górny limit wycięcia [ha] i minimalna wartość przychodów [tys. zł] w poszczególnych okresach planistycznych

Kwartał	Limit dolny	Limit górny	Przychód
1	70	100	8500
2	60	100	6200
3	80	120	7800
4	60	100	7300
5	60	90	7800
6	30	50	5000

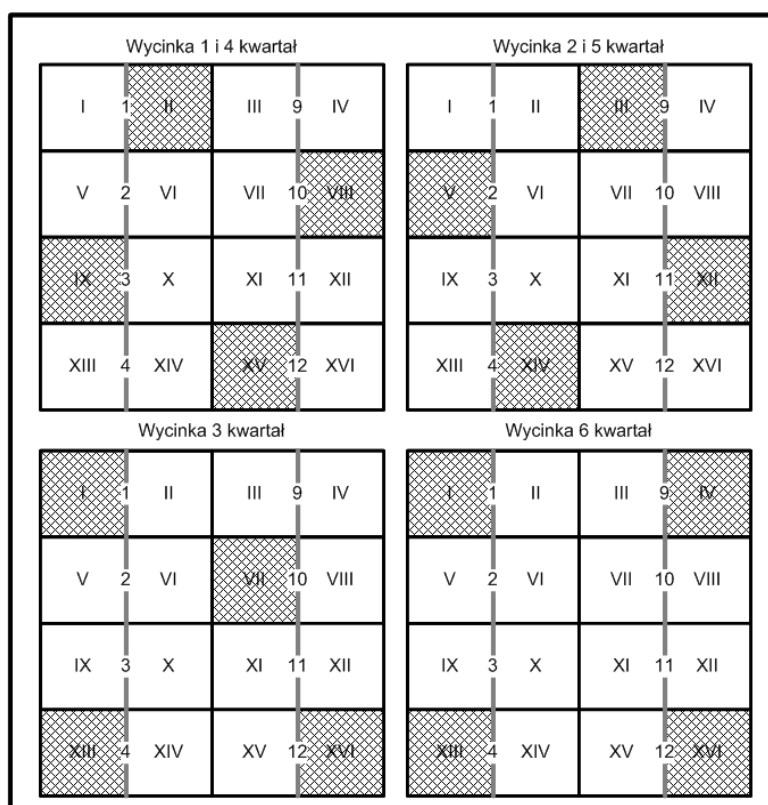
Źródło: opracowanie własne

W celu rozwiązania problemu decyzyjnego wykorzystano najpopularniejszy komputerowy język modelowania zadań programowania matematycznego AMPL - *A Modeling Language for Mathematical Programming* [3] oraz oprogramowanie służące do rozwiązywania tego typu problemów programowania liniowego – *GNU Linear Programming Kit* (GLPK). W otrzymanym rozwiązaniu optymalnym (rys. 2) należy zbudować połączenia drogowe: 1, 2, 3, 4 oraz 9, 10, 11, 12, przy czym wszystkie muszą zostać wybudowane w pierwszym okresie planistycznym. W pierwszym kwartale wycinane są bloki: II, VIII, IX i XV. W drugim kwartale wycinane są bloki: III, V, XIV i XII. W trzecim kwartale wycinane są bloki: I, VII, XIII i XVI. W czwartym kwartale wycinane są te same bloki co w pierwszym, a w piątym te same bloki co w drugim. W szóstym kwartale wycinane są bloki I, IV, XII oraz XVI. Cała wycinka przyniesie zdyskontowany przychód całkowity pomniejszony o zdyskontowany całkowity koszt budowy koniecznych połączeń drogowych w wysokości 38089, 4 tys. zł.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje komputerowe wykazały, że zaproponowany model planowania procesu pozyskiwania drewna (wycinki) może być pomocnym narzędziem wspomagania podejmowania decyzji. Złożoność obliczeniowa rozpatrywanego problemu nie jest czynnikiem wpływającym na decyzję o kolejności wycinanych obszarów (bloków) jak i budowy odpowiednich dróg niezbędnych do transportu pozyskanego surowca.

Symulacje komputerowe przeprowadzone w oparciu o dane generowane losowo powinny być w przyszłości zweryfikowane o dane rzeczywiste. Dalsze prace nad modelem powinny być skierowane na uwzględnienie w nim różnorodności terenu (jego rzeźba), która ma wpływ na wykorzystywany system transportu a co za tym idzie koszty pozyskania drewna.



Rys. 2. Rozwiązanie optymalne planowania wycinki
 Źródło: opracowanie własne

LITERATURA

- [1] Budnick F.S., McLeavey D., Mojena R.: *Principles of Operations Research for Management*. IRWIN, Homewood, Illinois, 1988.
- [2] Church R.L., Murray A.T., Weintraub A., *Locational issues in forest management*, *Location Science* 6, 1998, s. 137 – 153.
- [3] Fourer R., : *AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming*, Boyd&Fraser Publishing Company, 1993.
- [4] Harkness J., ReVelle Ch.: *Facility location with increasing production costs*. *European Journal of Operational Research*, vol. 145(2003), s. 1-13, Elsevier.
- [5] Hraba R., Pokorny J., : *Przewodnik po lasach*, Wyd. PWN, Warszawa 1996,
- [6] Jakubczyk Z.: *Teoretyczne podstawy gospodarowania zasobami naturalnymi /w:/ Fiedor B. (red), Podstawy ekonomii środowiska i zasobów naturalnych*, Wyd. C. H. Beck, Warszawa 2002, s. 51-53
- [7] Klose A., Drexl A.: *Facility location models for distribution system design*, *European Journal of Operational Research* , vol. 162(2005), s. 4-29, Elsevier

OPTIMIZATION OF LOGISTICS PROCESSES IN FOREST ADMINISTRATION

Abstract

The optimization of wood gaining and transportation mathematical model is presented in this paper. Decisions based on maximization of the value of wood decreased of the costs of transportation network which is necessary to build and cost of wood gaining.