

BRONISŁAW KŁAPEĆ, WIKTOR TRACZ, KRZYSZTOF JANE CZKO

Optymalizacja przewozów drewna nabywanego w jednostkach Lasów Państwowych

Optimization of the transportation of wood purchased in the State Forests units

ABSTRACT

Kłapeć B., Tracz W., Janeczko K. 2017. Optymalizacja przewozów drewna nabywanego w jednostkach Lasów Państwowych. Sylwan 161 (10): 842-850.

Since many years much attention has been paid to the rationality of wood transportation criteria due to the realization of social objectives. Identification and elimination of unnecessary haulage can reduce the total cost of transport and contribute to reducing fuel consumption, carbon dioxide emissions and accident risk. This paper concerns decision support for the allocation of available wood as a lot of irrationality of the existing wood transport operations has been observed. The aim of the study was to develop and test the method of optimizing the allocation of wood available in forest districts for selected groups of customers from over the country, taking into account the criterion of export distance (geography of purchase). The scale of the effects of applying the proposed optimization method is also presented. Data on sales of medium size S2A Scots pine wood in 2015 was used. A model of a two-dimensional transport task was built in order to optimize wood allocation. The road distance between the points where the wood was loaded and the points where it is processed was determined using the transportation network and network analysis performed in ArcGIS software. Linear programming was used to develop a software to support the allocation of wood to a group of selected customers nationwide. It was assumed that the benefits of optimization would be shared by whole group and not just by each customer individually. Changing existing supply locations can significantly shorten the average transportation distances up to 31% for particular customers (tab. 2), while for the whole group of analysed customers the reduction amounted to 14%. As a result of the proposed method, the transportation work would be reduced by 65 mio m³, which would reduce the average distance of timber exports by 15 km. This allows shortening of over 174 thousand of truckloads. The savings from the shortage of truckloads will amount to over 1.1 mio l of diesel fuel, which is worth about 5 mio PLN (1.18 mio €).

KEY WORDS

timber transportation, criterion of export distance, network analysis, linear programming, decision support

ADDRESSES

Bronisław Kłapeć ⁽¹⁾ – e-mail: bronislaw.klapec@wl.sggw.pl

Wiktor Tracz ⁽²⁾ – e-mail: wiktortracz@wl.sggw.pl

Krzysztof Janeczko ⁽¹⁾ – e-mail: krzysztof.janeczko@wl.sggw.pl

¹⁾ Katedra Urządzenia Lasu i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

²⁾ Samodzielny Zakład Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Wstęp

Transport jest jedną z najważniejszych funkcji logistycznych w łańcuchu leśno-drzewnym, wymagającą ścisłego współdziałania oferujących surowiec drzewny i nabywców. Wydawać by się mogło, że w sytuacji, gdy Lasy Państwowe (LP) prowadzą sprzedaż drewna na warunkach *loco las*, zagadnienie to może interesować wyłącznie nabywców drewna. Warto jednak zauważyć, że nabywcy – dążąc do minimalizacji kosztów zaopatrzenia – wykazują zróżnicowane zainteresowanie ofertami poszczególnych nadleśnictw, w zależności od wysokości kosztów, jakie ponoszą na zakup surowca. Składają się na nie głównie ceny surowca oraz koszty jego transportu. Zmiany wartości tych składników mogą prowadzić do wzrostu lub spadku zainteresowania nabywców surowcem w konkretnej jednostce LP. Jednak ekonomiczne aspekty zagadnienia, istotne zarówno dla sprzedających, jak i nabywców [Hirsch, Gronalt 2013], to niejedyny czynnik brany pod uwagę przez obie strony. Od wielu lat coraz większą uwagę zwraca się na kryteria racjonalności przewozów nabywanego drewna ze względu na realizację celów społecznych. Określenie i eliminacja zbędnych przewozów drewna mogą zmniejszyć całkowite koszty transportu [Rix 2014], a także przyczynić się do redukcji zużycia paliwa [Kanzian 2009], emisji dwutlenku węgla i ryzyka wypadków. Aby to osiągnąć, w wielu krajach organizacją przewozów drewna dla grup nabywców zajmują się wyspecjalizowane agencje logistyczne lub same Lasy Państwowe. Rzadko odnotowuje się współpracę między dwoma albo więcej nabywcami drewna działającymi na tym samym terenie, chociaż zainteresowanie kolektywnym planowaniem zaopatrzenia jest duże. Jednym z problemów w tym obszarze jest ustalenie metod podziału korzyści ze wspólnych przedsięwzięć. Dlatego coraz częściej opracowuje się metody oraz buduje systemy służące wspomaganie decyzji w zakresie planowania przewozów surowca drzewnego. Na przykład lepsze planowanie w ośmiu szwedzkich spółkach leśnych zmniejszyło koszty o około 5% w ramach każdej z nich, a współpraca między nimi dała dalsze 9% oszczędności [Frisk i in. 2010]. W sytuacji gdy grupy nabywców same nie są w stanie zorganizować kolektywnego zaopatrzenia minimalizującego koszty, aktywna rola przypada sprzedającym. Przykładem mogą być Lasy Państwowe Bawarii [Smaltschinski i in. 2011].

Wychodząc naprzeciw m.in. potrzebom racjonalizacji transportu drewna, dokonano bardzo istotnych zmian procedur sprzedaży drewna przez PGL Lasy Państwowe [Zarządzenie... 2016]. W nowej regulacji przewidziano, że do procedur przetargowych włączona będzie racjonalizacja dystrybucji surowca drzewnego na terenie kraju. Takie działanie ma zoptymalizować proces realizacji przewozów drewna do nabywców, przynosząc korzyści w postaci niższych kosztów transportu, zużycia paliwa czy emisji dwutlenku węgla. Nowym kryterium oceny ofert nabywców rynku podstawowego jest tzw. kryterium geografii zakupu. O tym, ile surowca od danego nadleśnictwa faktycznie kupi klient, decyduje ocena złożonej przez niego oferty. W świetle wspomnianego zarządzenia ocena ta opiera się na trzech kryteriach: cenie (waga 65%), tzw. zwyczaju kupieckim, czyli historii dotychczasowych zakupów (waga 25%), oraz odległości kupca od nadleśnictwa, w którym zamierza on zakupić drewno (10%). Trzecie kryterium oceny ofert ma zachęcić przedsiębiorców do dokonywania zakupów w pierwszej kolejności w najbliższych im nadleśnictwach (co ma także wspierać lokalny rozwój gospodarczy) oraz do racjonalizowania tras przejazdu i kosztów przy transporcie drewna (co z kolei ma korzystnie wpłynąć na ogólny stan dróg leśnych i gminnych). Funkcjonujący portal leśno-drzewny pozwala przedsiębiorcom na bieżąco dokonywać symulacji transportowych, które pokażą im, gdzie, za ile i jaką masę surowca mogą nabyć na optymalnych dla nich warunkach.

Zagadnienie transportowe określające kierunki (skąd i dokąd) wywozu drewna to jeden z problemów decyzyjnych, które można rozwiązać przy zastosowaniu metod optymalizacyjnych. W pracy przedstawiono metodę, którą można wykorzystać do wspomagania przydziału dostępnego w nadleśnictwach surowca drzewnego dla nabywców w skali kraju, przy minimalizacji zbędnych przewozów (kryterium geografii zakupu). Praca wykazuje rozmiar zbędnych przewozów drewna oraz skalę efektów zastosowania zaproponowanej metody optymalizacyjnej, czyli zmniejszenie odległości przewozowej, zużytego paliwa i emisji spalin.

Material i metody

W badaniach wykorzystano udostępnione przez Lasy Państwowe dane dotyczące sprzedaży drewna w 2015 roku. Analizom poddano sprzedaż drewna sosnowego średniowymiarowego grupy S2A, przeznaczonego do przerobu przemysłowego. W badanym okresie sprzedaż drewna sosnowego sięgnęła 23,3 mln m³, a udział drewna S2A stanowił 34% i wynosił 7,9 mln m³. Wybór tego sortymentu do badań uzasadniają stosunkowo duże odległości jego przewozu w skali kraju, co wynika ze znacznej koncentracji dużych zakładów przerobu drewna w północnej części Polski.

Wśród ponad 4 tys. nabywców drewna sosnowego S2A można wyróżnić trzy podgrupy, w zależności od miąższości zakupionego drewna sosnowego S2A w 2015 roku:

- 1) 17 nabywców zakupiło od 100 tys. do 1 mln m³,
- 2) 30 nabywców zakupiło od 10 tys. do 100 tys. m³,
- 3) 305 nabywców zakupiło od 1 tys. do 10 tys. m³.

Pozostali nabywcy zakupili mniej niż 1 tys. m³ i z reguły korzystali z rynku lokalnego. Niniejsze opracowanie skupia się na optymalizacji przewozów realizowanych na rzecz pierwszej grupy. Wśród jej nabywców są odbiorcy zagraniczni oraz pośrednicy w handlu drewnem, co stwarza trudność w ustaleniu faktycznego miejsca przerobu surowca, a tym samym określenia odległości wywozu z jednostek LP. Po weryfikacji danych do dalszych prac przyjęto grupę 10 nabywców (ich nazwy i dane adresowe zostały zastrzeżone), dla których udało się określić faktyczne miejsce przerobu surowca na terenie kraju. W 2015 roku skala zakupów dokonywanych w nadleśnictwach była bardzo zróżnicowana i zawierała się w przedziale od 25 m³ do 50 467 m³. Grupa 10 nabywców zakupiła średnio w jednym nadleśnictwie 11 262 m³ drewna sosnowego S2A (tab. 1).

Tabela 1.

Ilość zakupionego drewna (V [m³]), liczba sprzedawców (N) oraz najmniejsza (min), największa (max) i średnia (mean) odległość przewozu (L [km]) dla poszczególnych nabywców (1-10) drewna sosnowego S2A
Amount of purchased wood (V [m³]), number of sellers (N) as well as minimal (min), maximal (max) and mean (mean) transportation distance (L [km]) for individual customers (1-10) of S2A pine wood

	V	N	Lmin	Lmax	Lmean
1	137 456	63	14	321	66
2	330 792	98	16	684	105
3	352 939	125	14	323	132
4	940 989	118	12	302	121
5	227 007	68	7	302	131
6	686 344	126	15	331	78
7	932 888	178	16	538	132
8	207 088	37	11	184	75
9	155 166	48	22	329	68
10	376 591	96	14	306	86
Razem Total	4 347 260	386	7	684	108

Druga grupa danych o nabywcach dotyczyła odległości, na jaką zakupione drewno zostało przewiezione z lasu do miejsca przerobu. Dokładne określenie tej odległości było trudne ze względu na brak danych o odcinkach sieci drogowej, po których realizowano przewozy. Dlatego w niniejszej pracy odległość tę oszacowano za pomocą zbudowanej sieci transportowej. Najpierw, wykorzystując technologię Systemów Informacji Przestrzennej (SIP), utworzono model krajowej sieci drogowej. Wykorzystana w badaniu sieć transportowa składała się z następujących elementów:

- 1) krajowa sieć dróg,
- 2) lokalizacja miejsca załadunku drewna na samochód (dla każdego nadleśnictwa przyjęto jeden punkt),
- 3) lokalizacja miejsc przerobu drewna (dla każdego nabywcy określono jeden punkt).

Lokalizacja miejsc przerobu drewna została utworzona na podstawie danych adresowych zakładów przetwórczych poszczególnych odbiorców. Lokalizacja miejsca załadunku drewna została zdefiniowana jako środek geometryczny (centroida) kompleksów leśnych znajdujących się na obszarze poszczególnych nadleśnictw. Ze względu na takie przybliżenie lokalizacji miejsca załadunku drewna utworzone zostały tzw. łączniki – proste odcinki łączące punkty prezentujące lokalizację załadunku drewna z najbliższym odcinkiem sieci dróg krajowych.

Odległość drogową między punktami załadunku drewna a punktami przerobu drewna wyznaczono przy wykorzystaniu analizy sieciowej wykonywanej w SIP. Do obliczenia macierzy odległości wykorzystano moduł Network Analyst programu ArcGIS. Zastosowano w nim algorytm Dijkstry, który poszukuje najkrótszej odległości między zdefiniowanymi węzłami nieukierunkowanego grafu o nieujemnych wagach krawędzi [Dijkstra 1959]. Grafem w tym przypadku jest sieć dróg – odcinki dróg między skrzyżowaniami stanowią krawędzie grafu, a skrzyżowania są jego węzłami.

Optymalizacja powiązań surowcowych jednostek LP z przemysłem drzewnym wymaga przygotowania danych niezbędnych do sformułowania odpowiedniego modelu matematycznego, który stanowi opis najważniejszych elementów zagadnienia decyzyjnego. W konstrukcji modelu wyodrębnia się elementy, których wartości są znane lub są przyjęte z określonym prawdopodobieństwem, a także wielkości nieznanne (zmiennne decyzyjne), których poszukiwanie stanowi istotę rachunku optymalizacji. Pomiędzy wielkościami znanymi i nieznanymi zachodzą określone relacje, które można wyrazić w postaci modelu. Postać modelu matematycznego zależy od charakteru zależności występujących w modelowanym procesie, a także od rodzaju metody pozwalającej na skuteczne jego rozwiązanie. Od wielu lat szerokie zastosowanie znajdują metody programowania liniowego (PL), wykorzystywane również w leśnictwie polskim [Jabłoński, Stempski 2016]. Ich rozpowszechnienie wynika z możliwości konstrukcji bardzo rozbudowanych modeli i – co nie mniej ważne – z istnienia efektywnych algorytmów rozwiązujących, dostępnych w postaci gotowych programów komputerowych. Przedstawiony dalej model ukierunkowany jest na wykorzystanie wspomnianej klasy metod PL.

Aby zoptymalizować przewozy w skali kraju, opracowano program komputerowy (przy wykorzystaniu metody PL), który pozwala obliczyć, skąd i dokąd powinno być przewożone drewno. Założeniem rachunku jest to, że korzyści odnoszone z optymalizacji nie będą dotyczyć w równym stopniu każdego nabywcy, lecz ich całej zbiorowości (organizacji). Dla matematycznego opisu zoptymalizowanych przewozów surowca zbudowano model dwuwymiarowego zadania transportowego, którego elementy można opisać następująco:

$$\sum_{i,j} X_{ij} = a_i$$

$$\sum_{i,j} X_{ij} \leq b_j$$

$$\sum_{i,j} K_{ij} X_{ij} \rightarrow \min$$

gdzie:

- X_{ij} – masa drewna do przewozu pomiędzy nadleśnictwem a nabywcą [m^3],
- a_i – łączna oferta sprzedaży i -tego nadleśnictwa [m^3],
- b_j – łączna oferta zakupu j -tego nabywcy [m^3],
- K_{ij} – odległość [km] lub koszt [$\text{zł}/\text{m}^3$] przewozu pomiędzy nadleśnictwem a nabywcą.

Zadanie transportowe jest zbilansowane, gdy całkowita podaż drewna jest równa całkowitemu popytowi. W przeciwnym przypadku dodawany jest jeszcze jeden sprzedający bądź nabywca, którego podaż bądź popyt umożliwiają zbilansowanie się zadania. Jest on wprowadzony jako wirtualny uczestnik rachunku jedynie dla celów modelowania rozwiązania i nie posiada udziału w wartości minimalnego kosztu transportu (koszty przewozu równe 0).

W pracy, ze względu na nieliniową zależność kosztów transportu od odległości, jako kryterium celu przyjęto minimum tzw. pracy przewozowej, która jest wyrażona iloczynem masy przewożonego drewna i odległości [m^3km]. Ponieważ poszczególni nabywcy zaopatrują się w drewno różnych gatunków, o różnych parametrach jakościowych i wymiarowych, dla każdej tzw. grupy handlowo-gatunkowej (GHG) drewna należy zbudować i rozwiązać odrębne zadanie transportowe. Kolejnym etapem jest dobór algorytmu, który pozwoli rozwiązywać dwuwymiarowe zagadnienie transportowe.

Celem efektywnego rozwiązania zadań transportowych został opracowany w języku C++ odpowiedni program komputerowy (solver). Zastosowaną procedurę algorytmu transportowego można podzielić na następujące fundamentalne części:

- 1) poszukiwanie bazowego rozwiązania dopuszczalnego problemu,
- 2) sprawdzenie optymalności znalezionej rozwiązania,
- 3) jeśli rozwiązanie nie jest optymalne, to iteracyjne poszukiwanie kolejnego rozwiązania lepszego niż poprzednie – aż do osiągnięcia rozwiązania optymalnego.

W algorytmie transportowym kolejne iteracje rozwiązania realizowane są w tablicy transportowej, która przechowuje początkowo pierwsze bazowe rozwiązanie dopuszczalne problemu oraz kolejne przybliżenia rozwiązania optymalnego (w przypadku gdy pierwsze rozwiązanie nie jest optymalne). Celem znalezienia pierwszego rozwiązania bazowego w algorytmie zaimplementowana została metoda kąta północno-zachodniego, zaś do ustalania współczynników optymalności – metoda potencjałów [Kłapeć, Marszałkiewicz 1982].

Wyniki

Przeprowadzona optymalizacja przewozów drewna sosnowego S2A zakupionego w 2015 roku przez nabywców badanej grupy wykazała znaczne różnice w stosunku do przewozów zrealizowanych (tab. 2). W przypadku optymalizacji każdy z 10 nabywców uzyskałby oszczędności w zakresie ponoszonych kosztów zaopatrzenia w drewno. Jeśli przyjąć, że praca przewozowa jest odzwierciedleniem tych kosztów, to skala oszczędności zawiera się w przedziale od 3 do 31%. Średnio dla całej grupy 10 nabywców praca przewozowa zmniejszyłaby się o 14%. W średnich odległościach przewozu efekty optymalizacji wyraża skrócenie tras o 15 km – ze 108 km do 93 km.

Tabela 2.

Ilość przewiezonego drewna (V [m^3]), praca przewozowa (W [m^3km]) i średnia odległość (L [km]) dla przewozów zrealizowanych (r) i zoptymalizowanych (opt) oraz różnica ($d=(Lr-Lopt)/Lr$ [%]) w średniej odległości dla poszczególnych nabywców (1-10)

Amount of transported wood (V [m^3]), transportation work (W [m^3km]) and mean distance (L [km]) for realised (r) and optimized (opt) transportations as well as difference ($d=(Lr-Lopt)/Lr$ [%]) in mean distance for individual customers (1-10)

	V	Wr	Lr	Wopt	Lopt	d
1	137 456	9 048 876	66	7 983 892	58	12
2	330 792	34 883 318	105	24 220 064	73	31
3	352 939	46 633 095	132	42 376 306	120	9
4	940 989	114 057 791	121	102 093 139	108	10
5	227 007	29 734 511	131	28 610 316	126	4
6	686 344	53 548 281	78	42 172 413	61	21
7	932 888	122 770 290	132	100 788 487	108	18
8	207 088	15 473 268	75	14 780 255	71	4
9	155 166	10 608 844	68	9 266 906	60	13
10	376 591	32 290 678	86	31 276 887	83	3
Razem Total	4 347 260	469 048 952	108	403 568 665	93	14

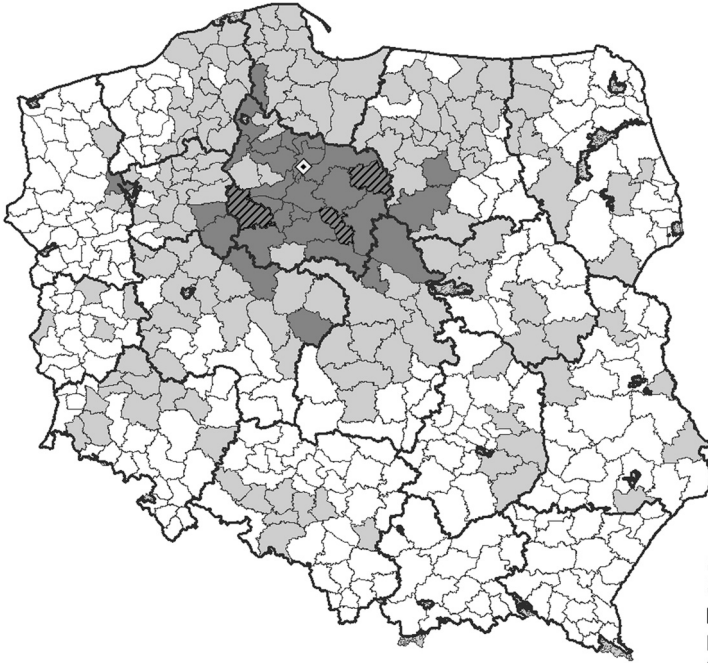
Nabywca nr 7 zaopatrywał się w aż 178 nadleśnictwach rozproszonych po całym kraju (ryc. 1a), o czym świadczą odległości przewozu pomiędzy 16 a 538 km (średnio 132 km). Po optymalizacji baza zaopatrzenia w drewno przestrzennie koncentruje się wokół miejsca przerobu (ryc. 1b), co prowadzi do skrócenia średniej odległości przewozu o 24 km. Efekt oszczędności wynoszący 18% jest możliwy do uzyskania, mimo że w optymalizacji łącznej z bazy zaopatrzeniowej nabywcy nr 7 korzystają również inni nabywcy z sąsiedztwa.

Dyskusja

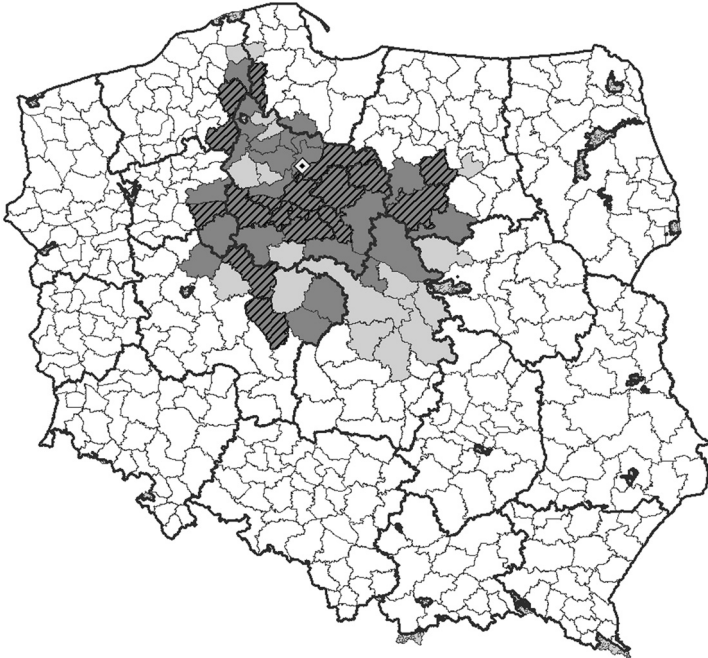
Wyniki niniejszej pracy potwierdzają dużą efektywność optymalizacji przewozów drewna, o czym donoszą liczne publikacje krajowe i zagraniczne. Na przykład Lückge i Weber [1997], przy optymalizacji przewozu 3,12 mln m^3 drewna różnych gatunków, odnotowali oszczędności w pracy przewozowej od 11 do 17%. Z kolei Poudžiunas i in. [2004] opisali redukcję kosztów przewozu wynoszącą 7-16%, przy czym wyższą redukcję stwierdzono przy wydłużeniu okresu planistycznego, co wiąże się z większym rozmiarem zadań transportowych (większa liczba punktów dostawy i odbioru). Wysoką efektywność potwierdza też wspomniany przykład z lasów niemieckich [Smaltschinski i in. 2011], gdzie przy przewozie 2,9 mln m^3 drewna sosnowego i świerkowego w wyniku optymalizacji powiązań jednostek z nabywcami drewna uzyskano skrócenie tras przewozowych o 11,9%.

Efekty optymalizacji można wyrazić skróceniem odległości wywozu lub zmniejszeniem pracy przewozowej. Uzyskana w niniejszej pracy różnica pracy przewozowej, wynosząca 65 mln m^3km , oznacza skrócenie średniej odległości wywozu drewna o 15 km. To pozwala wyrazić badane efekty optymalizacji także innymi parametrami. Zakładając, że średnia ładowność samochodu wywozowego wynosi 25 m^3 , przy przewozie 4,35 mln m^3 oznacza to ponad 174 tys.jazd ładownych. Skrócenie tych jazd o 15 km oznacza skrócenie tras jazd samochodów z ładunkiem po drogach łącznie o 2,6 mln kilometrów, co przyczynia się do zmniejszenia natężenia ruchu. Z kolei przyjmując, że samochód wywożący drewno spala około 0,45 litra oleju napędowego na 1 km jazdy [Porter 2012], oszczędności ze skrócenia jazd ładownych wyniosą ponad 1,1 mln

a)



b)



Sprzedaż
Sale [m³]

20 001-40 000

10 001-20 000

0-10 000

◇ odbiorca
customer 7

□ granice
borders of RDLP

■ parki narodowe
national parks

0 100 km

Ryc. 1.

Sprzedaż drewna sosnowego S2A przez nadleśnictwa do odbiorcy nr 7 bez optymalizacji (a) i po zastosowaniu optymalizacji przydziału drewna (b)

Sales of wood by forest districts to the customer No. 7 without optimizing (a) and after applying the optimization of S2A pine wood allocation (b)

litrów oleju napędowego, o wartości około 5 mln zł. W wyniku zmniejszonego zużycia paliwa skala redukcji emisji CO₂ wyniesie około 3 tys. ton. Skalę tych oszczędności, obejmujących tylko jazdy ładowne, należałoby podwoić, zważywszy na jazdy puste, których udział w transporcie drewna z lasu przekracza 50%. Zatem istnieją znaczne możliwości zwiększenia efektywności wywozu drewna, przy jednoczesnym zmniejszeniu negatywnego wpływu transportu na środowisko.

Wykorzystany w pracy model sieci transportowej może być ulepszony. Zamiast wykorzystania centroidy kompleksów leśnych znajdujących się na obszarze poszczególnych nadleśnictw jako lokalizacji miejsca załadunku drewna, można wykorzystać centroidę kompleksów leśnych w granicach poszczególnych leśnictw. Przybliżone szacunki (wykonane dla kilku nadleśnictw z różnych RDLP) pozwalają mówić o średniej odległości rzędu 7-9 km między centroidą kompleksów leśnych nadleśnictwa a centroidami kompleksów leśnych leśnictw należących do nadleśnictwa. Przy wdrożeniu przedstawionej metodyki optymalizacji w Lasach Państwowych dąży się do uszczegółowienia lokalizacji drewna właśnie przynajmniej do szczebla leśnictwa. Należy jednak pamiętać, że przy zwielokrotnieniu rozmiarów zadania transportowego (kilka tysięcy leśnictw i setki nabywców) pojawia się bariera czasu niezbędnego do wyznaczania długości dużej liczby potencjalnych tras między leśnictwami a nabywcami w skali kraju. W tej sytuacji redukcję liczby realnych tras zadania transportowego można uzyskać, ograniczając ich maksymalną długość na przykład do 300 km, a na trasy dłuższe przyjmując jednakowy wysoki parametr o charakterze restrykcyjnym [Kłapeć i in. 2008].

Warto dodać, że istotnym walorem zastosowania modelowania matematycznego wspomaganego komputerowo jest możliwość operowania wygodnym narzędziem symulacji przestrzennych, które wskaże, jak przesuną się bazy zaopatrzenia surowcowego poszczególnych nabywców w przypadku pojawienia się na rynku drewna nowego znaczącego podmiotu.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę optymalizacyjną, która wspomaga przydział dostępnego w nadleśnictwach surowca drzewnego do sprzedaży dla nabywców w skali kraju, przy uwzględnieniu kryterium odległości wywozu (geografii zakupu). Do weryfikacji metody wykorzystano dane dotyczące sprzedaży drewna w 2015 roku. Analizom poddano sprzedaż 4,35 mln m³ drewna sosnowego średniowymiarowego grupy S2A, przeznaczonego do przerobu przemysłowego, zakupionego przez grupę 10 największych nabywców w 386 nadleśnictwach. Wyniki pracy wykazały znaczny rozmiar zbędnych przewozów drewna, których można uniknąć dzięki zastosowaniu zaproponowanej metody optymalizacyjnej.

Praca dowiodła, że gdyby zmieniono dotychczasowe miejsca zaopatrzenia zgodnie z wynikami rachunku optymalizacji, można znacznie skrócić średnie odległości przewożonego drewna dla analizowanej grupy nabywców. Łącznie cała grupa 10 nabywców drewna uzyskałaby zmniejszenie nakładów pracy przewozowej o 14%. W przeliczeniu na średnią długość jazd ładownych oznacza to skrócenie o 15 km, co prowadzi do skrócenia tras jazd samochodów z ładunkiem po drogach łącznie o 2,6 mln kilometrów. W konsekwencji oszczędności ze skrócenia jazd ładownych wyniosłyby ponad 1,1 mln litrów oleju napędowego, o wartości około 5 mln zł. W wyniku zmniejszonego zużycia paliwa skala redukcji emisji CO₂ wyniosłaby około 3 tys. ton. Dodatkowe uwzględnienie w rachunku jazd pustych podwoiłoby wykazane oszczędności.

Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają zasadność działań w kierunku wykorzystania przedstawionej metody optymalizacyjnej w procedurze stosowanej w LP do ustalania optymalnego przydziału drewna przeznaczonego do sprzedaży dla poszczególnych nabywców, która została wprowadzona Zarządzeniem... [2016].

Literatura

- Dijkstra E. 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1 (1): 269-271.
- Frisk M., Göthe-Lundgren M., Jörnsten K., Rönnqvist M. 2010. Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research* 205: 448-458.
- Hirsch P., Gronalt M. 2013. The timber transport order smoothing problem as part of the three-stage planning approach for round timber transport. *Journal of Applied Operational Research* 5 (2): 70-81.
- Jabłoński K., Stempki W. 2016. Zastosowanie programowania liniowego do optymalizacji zrywki drewna w trzebieżach. *Sylvan* 160 (1): 3-10.
- Kanzian Ch. 2009. Regional Energy Wood Logistics-Optimizing Local Fuel Supply. *Silva Fennica* 43 (1).
- Kłapeć B., Bruchwald A., Mozgawa J., Stępień E., Porter B., Gruchała A., Janeczko K., Parzych S., Piekutin J., Tracz W. 2008. Dokumentacja końcowa z realizacji tematu „Prognozowanie możliwości pozyskania sortymentów drewna okrągłego i kształtowanie zasad jego sprzedaży, uwarunkowane zmianami na rynku drzewnym”. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa. https://tbr.lasy.gov.pl/apex/f?p=102:3::NO::P3_TEMAT:3354
- Kłapeć B., Marszałkiewicz T. 1982. *Metody programowania optymalnego w leśnictwie*. PWRiL, Warszawa.
- Lückge F., Weber H. 1997. Ökonomische und ökologische Optimierung von Rundholztransporten – dargestellt am Beispiel der Holzvermarktung der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz im Forstwirtschaftsjahr 1994. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 1 (169): 1-4.
- Porter B. 2012. Analiza efektywności wywozu drewna. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 1.
- Poudžiunas M., Rönnqvist M., Fjeld D. 2004. The potential of improvement for tactical planning of roundwood transport in Lithuanian State Forest Enterprises. *Baltic Forestry* 10 (1): 79-88.
- Rix J. 2014. Transportation optimization in tactical and operational wood procurement planning. PhD thesis. École Polytechnique de Montréal.
- Smaltschinski Th., Müller M., Becker G. 2011. Distributionslogistik der Bayerischen Staatsforsten für Rundholz. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (3/4): 53-59.
- Zarządzenie nr 46 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z dnia 24 października 2016 r. w sprawie sprzedaży drewna prowadzonej przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe. 2016. ZM.800.2.2016.