

KRZYSZTOF JABŁOŃSKI, WŁODZIMIERZ STEMPSKI

Zastosowanie programowania liniowego do optymalizacji zrywki drewna w trzebieżach

Application of the linear programming to optimizing wood extraction in thinnings

ABSTRACT

Jabłoński K., Stempski W. 2016. Zastosowanie programowania liniowego do optymalizacji zrywki drewna w trzebieżach. Sylwan 160 (1): 3-10.

Improvement cuttings conducted simultaneously on a few closely located areas, often face problems about how to prepare places that would serve as temporary landings for the harvested wood. This results from insufficient wood storing space in the forest and limited accessibility of the road network to wood hauling trucks, and leads to solutions, suggesting where small landings at tree-stand edge must be established, often in places rather distant from the thinning plots. When the wood is harvested on several thinning plots and should be transported to several small landings, a problem appears, where (i.e. to which landing) should the wood from a particular thinning plot be sent. The paper presents a model to solve this problem using the simplex algorithm, which is used in linear programming, a method applied in operations research. The wood was sourced from 15 thinning plots and 11 wood landings were located. In the model, the objective function presented total transportation work, to be spent on the wood extraction. The objective function was minimized. The problem was set up on the Excel spreadsheet and then resolved with the solver application. The model enabled to direct the harvested wood from different thinning plots to different landings in an optimal way. The results enabled to design the optimal wood extraction routes and to determine the allowable changes in the amounts of wood harvested from each thinning plot, which would not change the optimal solution. The model enabled also to calculate the minimum amount of transportation work, which would be spent during the optimized transportation of wood from particular thinning plots to particular wood landings.

KEY WORDS

linear programming, simplex algorithm, wood extraction

ADDRESSES

Krzysztof Jabłoński – e-mail: jabkrys@up.poznan.pl

Włodzimierz Stempski – e-mail: stempski@up.poznan.pl

Katedra Techniki Leśnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; ul. Wojska Polskiego 71c, 60-625 Poznań

Wstęp

Prace z zakresu pozyskiwania i zrywki drewna w trzebieżach napotykają często na problemy związane z wyborem miejsca do tymczasowego składowania zerwanego surowca drzewnego. Zdarza się bowiem, że teren jest trudno dostępny dla taboru wywozowego i miejsca składowania surowca należy wówczas wybierać w dość znacznym oddaleniu od powierzchni, na których prowadzono cięcia, co wydłuża odległość zrywki. W przypadku istnienia wielu potencjalnych

miejsce składowania i prowadzenia cięć jednocześnie na wielu powierzchniach zachodzi potrzeba podejmowania decyzji, do których składnic należy zrywać sortymenty pozyskane z poszczególnych powierzchni (lub ich części). Rozwiązywaniu tego typu problemów służą badania operacyjne, stanowiące duży dział matematyki, znajdujący również zastosowanie w leśnictwie [Kangas i in. 2008]. Wśród wielu algorytmów wspomagających podejmowanie decyzji – poczynając od zagadnień wielokryterialnych, przez programowanie wypukłe, sieciowe i dynamiczne, do programowania liniowego i zagadnienia transportowego – do bezpośredniego zastosowania w rozwiązywaniu problemów z zakresu zrywki drewna służą te ostatnie. Literatura z tego zakresu [Botwin 1970; Novotny 1976; Kłapeć, Marszałkiewicz 1979; Guzik 1999; Trzaskalik 2008] umożliwia nie tylko zapoznanie się z odpowiednimi algorytmami i ich zastosowaniem w leśnictwie, ale także pozwala na wykorzystanie standardowego oprogramowania użytkowego [Harrison i in. 2002]. Należy stwierdzić, że zastosowanie badań operacyjnych w leśnictwie koncentruje się głównie w obszarach dotyczących regulacji użytkowania lasu [Kangas i in. 2008] i podejmowania decyzji w warunkach istnienia wielu kryteriów oraz wynikającej z tego konieczności optymalizacji więcej niż jednego z nich [Kangas, Kangas 2005; Mendoza, Martins 2006]. Zagadnienia związane z optymalizacją doboru procesów technologicznych pozyskiwania i zrywki drewna na poziomie drzewostanu znajdują się nieco na uboczu, ale obecne są w literaturze przedmiotu [Acar, Eker 2002; Jabłoński 2006; Janeček i in. 2006]. W zakresie badań operacyjnych nad transportem drewna znacznie częściej spotyka się prace zawierające modele optymalizacji wywozu [Forsberg i in. 2005]. Na uwagę zasługują potencjalne możliwości praktycznego zastosowania algorytmów obliczeniowych służących do rozwiązywania zagadnień związanych z problematyką wyboru miejsc składowania surowca drzewnego pozyskiwanego równocześnie na kilku lub kilkunastu powierzchniach, dążące do minimalizacji kosztów pracy transportowej lub chociażby odległości zrywki. W pracy podjęto próbę zastosowania algorytmu simplex do rozwiązania tego problemu, mając nadzieję, że z czasem podobne obliczenia optymalizacyjne zostaną uznane przez praktykę leśną za przydatne i znajdą zastosowanie przy wyborze kierunków zrywki drewna do dostępnych miejsc jego składowania.

Celem badań była optymalizacja zrywki drewna z wielu powierzchni, na których prowadzono cięcia trzebieżowe. Optymalizacja ta polegała na wyborze takich miejsc składowania surowca, do których należy zrywać drewno z poszczególnych powierzchni trzebieżowych, aby całkowita wielkość pracy transportowej była minimalna.

Materiał i metody

Badania zostały przeprowadzone w styczniu 2015 roku na terenie Nadleśnictwa Oborniki (RDLP w Poznaniu). Ich przedmiotem była organizacja zrywki drewna z kilkunastu powierzchni położonych na terenie dwóch sąsiadujących ze sobą oddziałów (tab. 1). Zgodnie z modelem organizacji pozyskiwania drewna stosowanym na terenie tego nadleśnictwa wszystkie cięcia, w tym trzebieżowe, koncentruje się w czasie i przestrzeni. Prowadzi to do sytuacji, w której w krótkim okresie pozyskuje się drewno na wielu położonych blisko siebie powierzchniach trzebieżowych. Taka sytuacja była przedmiotem badań – surowiec zrywany był z 15 powierzchni położonych w 8 pododdziałach wchodzących w skład 2 oddziałów (721 i 722). Na powierzchniach trzebieżowych występowała sosna w wieku od 47 do 76 lat rosnąca na siedliskach LMw i BMw, o pierśnicy powyżej 20 cm. Wskutek znacznego uwilgotnienia siedlisk drogi biegnące bezpośrednio przy powierzchniach trzebieżowych były w zasadzie niedostępne dla ciężkiego taboru wywozowego, stąd nie można było zlokalizować tam składnic, do których mogłoby trafić drewno.

Prace terenowe polegały na wyborze i określeniu pojemności potencjalnych miejsc składowania przewidzianego do pozyskania i zrywki drewna. Miejsca te znajdowały się przy drogach leśnych dostępnych dla taboru wywozowego, a ich wyboru dokonano wspólnie z miejscowym leśniczym. Wyróżniono 11 tymczasowych miejsc składowania surowca (L1, ..., L11 – ryc.) i określono ich pojemności. Ustalenie prawdopodobnych tras zrywki drewna przeprowadzono w następstwie szczegółowego rozeznania sytuacji w terenie.

Niektóre pododdziały, z uwagi na ich nieregularny kształt, zostały podzielone na kilka części, z których drewno ciężyło ku różnym miejscom składowania. Podział wydzieleni wykonano w taki sposób, aby maksymalnie ograniczać zrywkę wewnątrz drzewostanu. Częściom tym nadano kolejne numery, przez co oznaczenia pododdziałów, w których one wystąpiły, zawierają numer oddziału, literę oznaczającą pododdział oraz cyfrę oznaczającą wyróżnioną część pododdziału (strefę ciążenia).

W oparciu o plany cięć ustalono ilości drewna, które będą zrywane z poszczególnych powierzchni (całych pododdziałów lub ich części) (tab. 1), oraz założono, że drewno to będzie pozyskane bez podziału na sortymenty. Całkowita ilość surowca drzewnego przeznaczanego do zrywki była równa 1282 m^3 , zaś całkowita pojemność miejsc składowania, do których można by go zerwać, wynosiła 2893 m^3 . Wyróżnione składnice cechowały się zróżnicowaną pojemnością – od 149 do 476 m^3 .

Mając do rozdysponowania surowiec drzewny z 15 powierzchni, który może być zerwany do 11 potencjalnych miejsc składowania, dokonano pomiaru odległości od środka każdej powierzchni trzebieżowej do środka każdego z potencjalnie dostępnych miejsc składowania. Pomiaru tego dokonano, posługując się mapą numeryczną wydzieleni, w których prowadzono badania.

Opisany powyżej problem sformułowano w postaci dwuwymiarowego modelu transportowego, w którym wyróżniono funkcję celu (FC), zmienne decyzyjne, warunki ograniczające (bilan-



Ryc.

Powierzchnie trzebieżowe i planowane składnice drewna
Thinning areas and planned wood landings

Tabela 1.

Gatunek i jego wiek [lata], typ siedliskowy lasu (TSL), pierśnica (D [cm]), wysokość (H [m]), powierzchnia (A [ha]) i ilość drewna do pozyskania (V [m³]) na powierzchniach trzebieżowych

Species and its age [years] (gatunek), habitat type (TSL; LMw – wet mixed deciduous, BMw – wet mixed coniferous), breast height diameter (D [cm]), height (H [m]), area (A [ha]) and amount of timber for harvest (V [m³]) on thinning plots

| | Gatunek | TSL | D | H | A | V |
|--------|---------|-----|----|----|------|-----|
| 721b | So 76 | LMw | 28 | 25 | 5,01 | 150 |
| 721f-1 | So 47 | LMw | 21 | 21 | 6,00 | 151 |
| 721f-2 | | | | | 0,69 | 17 |
| 721h | So 68 | BMw | 29 | 26 | 2,55 | 80 |
| 721i | So 55 | LMw | 25 | 23 | 4,16 | 125 |
| 721j-1 | So 55 | BMw | 24 | 22 | 2,65 | 106 |
| 721j-2 | | | | | 0,61 | 25 |
| 722b-1 | So 61 | LMw | 24 | 24 | 3,97 | 126 |
| 722b-2 | | | | | 3,98 | 126 |
| 722b-3 | | | | | 5,63 | 178 |
| 722b-4 | | | | | 2,03 | 64 |
| 722b-5 | | | | | 1,32 | 42 |
| 722b-6 | | | | | 0,82 | 26 |
| 722d | So 48 | LMw | 24 | 23 | 1,12 | 26 |
| 722i | So 47 | BMw | 21 | 21 | 1,35 | 40 |

sowe) oraz warunki brzegowe. Funkcja celu stanowiła sumę iloczynów ilości drewna do zrywki z poszczególnych powierzchni i odległości zrywki do poszczególnych miejsc składowania. Funkcja celu była minimalizowana pracą transportową. Miała ona następującą postać:

$$FC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

gdzie:

- c_{ij} – odległość i -tej powierzchni trzebieżowej do j -tego miejsca składowania surowca,
- x_{ij} – zmienna decyzyjna oznaczająca ilość drewna przewidzianą do zerwania z i -tej powierzchni trzebieżowej do j -tego miejsca składowania,
- m – liczba powierzchni trzebieżowych (15),
- n – liczba potencjalnych miejsc składowania surowca (11).

Warunki ograniczające (bilansowe) modelu podzielono na dwie grupy. Pierwsza z grup opisuje ilości drewna do zerwania z poszczególnych powierzchni trzebieżowych:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

gdzie:

- a_i – określa ilość drewna do zerwania z i -tej powierzchni trzebieżowej do wszystkich potencjalnych miejsc składowania surowca.

Druga grupa warunków bilansowych opisuje ilości drewna możliwe do zmagazynowania na poszczególnych zidentyfikowanych w terenie miejscach składowania surowca:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n$$

gdzie:

- b_{ij} – określa ilości drewna przeznaczone do zerwania do j -tego miejsca składowania (od L1 do L11), pochodzącego z powierzchni trzebieżowych od 1 do 15.

Warunki brzegowe modelu określają konieczną nieujemność zmiennych decyzyjnych ($x_{ij} \geq 0$). Sformułowany model jest modelem otwartym, ponieważ całkowita ilość drewna przeznaczona do zerwania z wszystkich powierzchni trzebieżowych jest mniejsza od całkowitej pojemności wszystkich miejsc składowania:

$$\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j$$

Rozwiązanie optymalne przedstawionego powyżej modelu transportowego uzyskano za pomocą algorytmu simpleks, a obliczenia wykonano w aplikacji Excel, posługując się zawartym w niej narzędziem Solver. Pozwoliło to na wygenerowanie raportu wrażliwości. Raport ten zawiera informacje o dopuszczalnych wielkościach spadku lub wzrostu ilości drewna do zerwania z danej powierzchni trzebieżowej, niepowodujących zmian w rozwiązaniu optymalnym, tzn. optymalnym przydzieleniu ilości drewna do zerwania z poszczególnych powierzchni do określonych składnic. Raport zawiera również informacje o cenach dualnych zmian ilości drewna do zrywki. Cena dualna, wyrażona w jednostkach pracy transportowej na 1 m³ surowca drzewnego, określa w tym wypadku, o ile zwiększy się lub zmniejszy wartość funkcji celu, tj. całkowita ilość pracy transportowej, jeśli ilość drewna do zrywki z danej powierzchni wzrośnie lub zmniejszy się o jedną jednostkę [Reeb, Leavengood 2000]. Informacje te są o tyle istotne, że po przeprowadzeniu prac pozyskaniowych może się okazać, że rzeczywiste ilości drewna przeznaczonego do zrywki różnią się od wielkości oszacowanych przed przystąpieniem do wykonania trzebieży.

Wyniki

Zbrane dane pozwoliły na ustalenie przewidywanych ilości drewna z poszczególnych powierzchni trzebieżowych (poszczególnych całych pododdziałów lub ich części), odległości tych powierzchni do potencjalnych miejsc składowania drewna oraz spodziewanych nakładów pracy transportowej. Odległości pomiędzy środkami powierzchni trzebieżowych a poszczególnymi składnicami cechowały się dużym zróżnicowaniem – współczynnik zmienności wynosił 45%. Wahały się one od 50 do 2500 m, przy przeciętnej wartości wynoszącej 1015 m (tab. 2).

Nie wszystkie miejsca składowania zostały wykorzystane w pełni, a niektóre były w całości niewykorzystane (tab. 2). Spośród 11 wyróżnionych potencjalnych miejsc składowania surowca, do których algorytm kierował pozyskane w ramach trzebieży drewno, w 5 przypadkach średnia odległość zrywki przekraczała 1100 m. Były to składnice najbardziej odległe od powierzchni trze-

Tabela 2.

Pojemność (C), średnia odległość zrywki (L) i wykorzystanie (W) składnic drewna
Capacity (C), mean extraction distance (L) and use (W) of wood landings

| | C [m ³] | L [m] | W [m ³] | W [%] |
|-----|---------------------|-------|---------------------|-------|
| L1 | 179 | 775 | 179 | 100 |
| L2 | 149 | 810 | 129 | 87 |
| L3 | 357 | 912 | 126 | 35 |
| L4 | 179 | 907 | 99 | 55 |
| L5 | 149 | 854 | 149 | 100 |
| L6 | 238 | 738 | 238 | 100 |
| L7 | 476 | 1273 | 0 | 0 |
| L8 | 238 | 1337 | 0 | 0 |
| L9 | 423 | 1158 | 362 | 86 |
| L10 | 357 | 1227 | 0 | 0 |
| L11 | 149 | 1173 | 0 | 0 |

bieżowych. W toku prowadzonych obliczeń optymalizacyjnych okazało się, że 4 składnice (L7, L8, L10 i L11) będą w całości niewykorzystane, tzn. nie będzie do nich kierowany surowiec. Składnica L9, dla której średnia odległość od powierzchni trzebieżowych wynosiła 1158 m, zostanie wykorzystana w 86%. Spośród pozostałych 6 bliżej położonych składnic (L1-L6) 3 zostaną w pełni wykorzystane, a pozostałe 3 tylko częściowo (35-87%). Takie wykorzystanie dostępnych składnic drewna było możliwe z uwagi na fakt, że całkowita pojemność dostępnych składnic (2893 m³), mimo że część z nich była położona stosunkowo daleko od powierzchni, na których prowadzono cięcia, znacznie przekraczała przewidywaną do pozyskania całkowitą miąższość surowca drzewnego (1282 m³). Gdyby zadanie było typu zamkniętego, tzn. ilość pozyskanego i przewidywanego do zrywki drewna byłaby równa pojemności składnic, wszystkie one musiałyby być wykorzystane w 100%.

Do składnicy L1 należy zerwać cały surowiec z powierzchni 721i (125 m³) oraz 721f-2 (17 m³), a także 37 m³ drewna z powierzchni 722b-1. Reszta surowca z powierzchni 722b-1 (89 m³) powinna trafić do składnicy L2, do której skierować należy także cały surowiec drzewny pozyskany na powierzchni 722i (40 m³). Do składnicy L3 trafi cały surowiec z powierzchni 722b-2 (126 m³), a do składnicy L4 – cały surowiec z powierzchni 722b-4 (64 m³) oraz 35 m³ z powierzchni 722b-5. Do składnicy L5 zerwać należy 142 m³ surowca pozyskanego na powierzchni 722b-3 oraz 7 m³ z powierzchni 722b-5, a do składnicy L6 – resztę surowca z powierzchni 722b-3 (36 m³) oraz całość pozyskanego drewna z powierzchni 721b (150 m³), 722b-6 (26 m³) oraz 722d (26 m³). Z kolei do składnicy L9 zerwać należy całość drewna pozyskanego na powierzchniach 721f-1, 721h, 721j-1 oraz 721j-2, odpowiednio 151, 80, 106 i 25 m³. Całkowita ilość pracy transportowej, która zostanie wykonana przy przeprowadzeniu zoptymalizowanej zrywki, wynosić będzie 627 284,8 m³ · m (lub m⁴).

W tabeli 3 przedstawiono wyniki uzyskane w raporcie wrażliwości wygenerowanym w trakcie rozwiązywania problemu. Jak pokazują wielkości dopuszczalnego spadku lub wzrostu ilości drewna pozyskanego na poszczególnych powierzchniach trzebieżowych, możliwe są pewne wahania.

Tabela 3.

Cena dualna (Cd [m³·m/m³]), przewidywana ilość drewna do zrywki (Vest [m³]) oraz jej dopuszczalny spadek i wzrost (odpowiednio DS i DW [m³]) w analizie wrażliwości uzyskanego rozwiązania

Dual price (Cd [m³·m/m³]), estimated amount of wood to be extracted (Vest [m³]) and its allowable decrease and increase (DS and DW [m³] respectively) in the solution sensitivity analysis

| | Cd | Vest | DS | DW |
|--------|-----|------|-----|-----|
| 721b | 660 | 150 | 35 | 7 |
| 721f-1 | 710 | 151 | 151 | 61 |
| 721f-2 | 677 | 17 | 17 | 19 |
| 721h | 460 | 80 | 80 | 61 |
| 721i | 830 | 125 | 89 | 19 |
| 721j-1 | 600 | 106 | 106 | 61 |
| 721j-2 | 345 | 25 | 25 | 61 |
| 722b-1 | 765 | 126 | 89 | 19 |
| 722b-2 | 295 | 126 | 126 | 231 |
| 722b-3 | 390 | 178 | 35 | 7 |
| 722b-4 | 190 | 64 | 64 | 79 |
| 722b-5 | 135 | 42 | 35 | 79 |
| 722b-6 | 650 | 26 | 26 | 7 |
| 722d | 690 | 26 | 26 | 7 |
| 722i | 50 | 40 | 40 | 19 |

Wygenerowane rozwiązanie optymalne, przydzielające drewno z poszczególnych powierzchni do poszczególnych składnic, zostanie zachowane, jeśli się np. okaże, że na powierzchni nr 1 (721b) ilość drewna, którą pozyskano, jest mniejsza (ale tylko o maksymalnie 35 m^3) lub większa (ale tylko o maksymalnie 7 m^3). Przy wzroście ilości drewna o 1 m^3 wartość całkowitej pracy transportowej zwiększyłaby się o $660 \text{ m}^3 \cdot \text{m}$. Uzyskane rozwiązanie optymalne ustalające, do których składnic powinien być zrywany surowiec z poszczególnych powierzchni, nie zmieniłoby się, ale oczywiście zmieniłaby się ilość drewna kierowanego do danej składnicy, ponieważ doszłoby do zmiany zasobu (ilości drewna) określonego w danym warunku ograniczającym.

Dla większości powierzchni (10 spośród 15) możliwy jest nieco większy spadek ilości drewna niż jej wzrost, przy czym dopuszczalny spadek może co najwyżej sięgnąć całkowitej ilości drewna. W takim przypadku ilość drewna przeznaczonego do zerwania wynosiłaby oczywiście zero. Informacje mówiące o wielkościach dopuszczalnego spadku i wzrostu stanowią pewne ułatwienie dla organizatora lub wykonawcy pracy, bowiem można się spodziewać, że faktycznie pozyskane ilości drewna na poszczególnych powierzchniach trzebieżowych będą nieco inne od ilości oszacowanych przed wykonaniem zabiegu. Wzrost lub spadek ilości drewna (oczywiście w granicach dopuszczalności), mimo że nie spowoduje zmian w strukturze rozwiązania problemu (drewno z określonych powierzchni do określonych składnic), to zmieni jednak wielkość obliczonej pracy transportowej o wartość ceny dualnej (zawartej w tabeli 3) pomnożonej przez wzrost lub spadek ilości drewna na powierzchni. Jest to o tyle istotne, że wykonawca prac zrywkowych może być wynagradzany na podstawie ilości wykonanej pracy transportowej.

Dyskusja

Planowanie operacji transportu drewna jest często dzielone na planowanie strategiczne, taktyczne i operacyjne [Frisk i in. 2010]. Zaprezentowany w pracy model rozwiązywania problemu transportowego w zakresie zrywki drewna należy do grupy modeli taktycznych, optymalizujących działania na poziomie drzewostanów, „w skali mikro”. Zaprezentowany model rozwiązania problemu posiada duże znaczenie praktyczne także dzięki temu, że umożliwia dokonanie obliczeń za pomocą ogólnie dostępnego oprogramowania komputerowego pozwalającego na rozwiązywanie problemów przy użyciu algorytmu simplex. W literaturze przedmiotu traktującej o zagadnieniach transportu drewna najczęściej przedstawia się przykłady optymalizacji przewozów od kilku dostawców surowca drzewnego do kilku odbiorców [Kłapeć, Marszałkiewicz 1979; Harrison i in. 2002], przy czym opracowania te mają często charakter szkoleniowy. Zaprezentowany w niniejszej pracy model optymalizacji zrywki drewna ze stosunkowo niewielkiego obszaru wpisuje się w grupę takich właśnie opracowań, stawiających sobie za cel szersze wprowadzenie do literatury naukowej z zakresu leśnictwa problematyki określanej mianem badań operacyjnych. Wykorzystywanie rachunku z zakresu badań operacyjnych, minimalizującego np. wielkość pracy transportowej lub kosztów pracy, może przyczynić się do wzrostu efektywności pracy i stąd zasługuje na upowszechnienie.

W przedstawionych badaniach posłużono się algorytmem simplex, dostępnym w ramach aplikacji Excel. W literaturze przedmiotu spotyka się także inne algorytmy stosowane do rozwiązywania problemów transportowych, jak np. metoda kąta północno-zachodniego, metoda potencjałów [Reeb, Leavengood 2002; Trzaskalik 2008] lub metoda minimów przekątnych (diagonal minima method) [Somani, Somani 2014], a także specjalnie opracowane aplikacje do rozwiązywania problemów transportowych [Stojanovic i in. 2014]. Metody te, mimo że jak twierdzą ich twórcy, są mniej pracochłonne niż metoda simplex, wymagają stosowania specjalistycznego oprogramowania, nie zawsze powszechnie dostępnego. Przy zastosowaniu elektronicznej techniki

obliczeniowej pracochłonność poszczególnych metod rachunkowych traci na znaczeniu, a algorytm simplex, m.in. dzięki temu, że można go zastosować przy użyciu powszechnie dostępnej aplikacji Excel, może być bardzo przydatnym narzędziem.

Podsumowanie

Zaproponowany model optymalizacji zrywki drewna, polegający na przydzielaniu drewna z określonych powierzchni trzebieżowych do poszczególnych miejsc składowania, spełnił swój cel i pozwolił na optymalne zaplanowanie prac zrywkowych, zmniejszając do minimum ilość wydatkowanej pracy transportowej. Modelowanie zrywki drewna jest istotne w sytuacjach, w których występuje problem z wyborem miejsc składowania surowca drzewnego, wynikający z małej dostępności terenu, rozdrobnienia bądź oddalenia miejsc składowania od drzewostanów, w których prowadzone są prace trzebieżowe. Obliczenia wykonane przy użyciu ogólnie dostępnego oprogramowania komputerowego pozwalają na szerokie zastosowanie przedstawionego modelu optymalizacyjnego w praktyce, a efektem jego wykorzystania jest zoptymalizowanie odległości zrywki.

Literatura

- Acar H. H., Eker M. 2002. An assessment on the utility of GIS – based decision mechanism in the wood procurement process. Proceedings of International symposium on GIS, September 23-26, Istanbul, Turkey (http://www.fig.net/com_3_istanbul/PDF/M.Eker.pdf, dostęp: marzec 2015).
- Botwin M. 1970. Metody matematyczne w leśnictwie. PWRiL, Warszawa.
- Forsberg M., Frisk M., Rönnqvist M. 2005. FlowOpt – A decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. *International Journal of Forest Engineering* 16: 101-114.
- Frisk M., Göthe-Lundgren M., Jörnsten K., Rönnqvist M. 2010. Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research* 205: 448-458.
- Guzik B. [red.]. 1999. Ekonometria i badania operacyjne. Uzupełnienia z badań operacyjnych. Wyd. Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań.
- Harrison S., Herbohn J., Mangaoang E., Vanclay J. 2002. Socio-economic Research Methods in Forestry: A Training Manual. Cooperative Research Centre for Tropical Rainforest Ecology and Management. Rainforest CRC, Cairns.
- Jabłoński K. 2006. Optymalizacja sposobów realizacji procesu technologicznego pozyskiwania i zrywki drewna na określonym obszarze leśnym. *Rozprawy Naukowe* 378. Wyd. AR im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.
- Janeček A., Rutkowski K., Adamovsky R. 2006. Optymalizacja procesu zrywki drewna w aspekcie skażenia środowiska naturalnego. *Inżynieria Rolnicza* 6: 147-154.
- Kangas J., Kangas A. 2005. Multiple criteria decision support in forest management – Fundamentals of the approach, methods applied, and experiences gained. *Forest Ecology and Management* 207: 133-143.
- Kangas A., Kangas J., Kurttila M. 2008. Decision Support for Forest Management. Springer, New York.
- Kłapeć B., Marszałkiewicz T. 1979. Metody programowania optymalnego w leśnictwie. PWN, Warszawa.
- Mendoza G. A., Martins H. 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management* 230: 1-22.
- Novotny M. [red.]. 1976. Optymalizacja decyzji w gospodarstwie leśnym. PWRiL, Warszawa.
- Reeb J., Leavengood S. 2000. Using duality and sensitivity analysis to interpret linear programming solutions. Tom 8744z EM. Wyd. Oregon State University. Extension Service.
- Reeb J., Leavengood S. 2002. Transportation problem: a special case for linear programming problems. Tom 8779z EM. Wyd. Oregon State University. Extension Service.
- Somani C., Somani P. 2014. The new way of finding minimum transportation cost diagonal minima method. *Sch. J. Arts. Humanit. Soc. Sci.* 2 (1): 48-51.
- Stojanović V., Stojanović L., Božinović M. 2014. Software application of solving the transportation problem. 23rd International Conference ERK 2014, At Portoroz. Volume B: 23-26.
- Trzaskalik T. 2008. Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem. PWE, Warszawa.