

## PLANOWANIE PRZEWOZÓW Z UWZGLĘDNIENIEM KILKU GAŁĘZI TRANSPORTU

W pracy zaproponowano heurystyczny algorytm wyznaczania minimalnych względnych kosztów transportu, z uwzględnieniem kilku gałęzi transportu, do przewozu danego typu ładunku pomiędzy dwoma zadanymi punktami sieci transportowej, przy zadanych kosztach operacji ładunkowych. Algorytm ten pozwala na jednoczesne określenie wielkości przewozów dla poszczególnych gałęzi transportu oraz wyznacza tabelę korespondencji ładunków.

### WSTĘP

Szeroki wachlarz zagadnień ekonomicznych zawsze stanowi kluczowy problem w perspektywnym planowaniu przewozów w rejonie sieci transportowej. Podstawowa trudność w określaniu zależności techniczno- ekonomicznych związana jest z uwzględnieniem wszystkich czynników wpływających na przydział pracy przewozowej, takich jak:

- istnienie różnych gałęzi transportu,
- istnienie różnych rodzajów ładunków,
- sezonowości pracy niektórych gałęzi transportu,
- różnego poziomu rozwoju poszczególnych gałęzi transportu.

Współczesna literatura transportowa nie zawiera opracowań dotyczących modeli planowania zależności transportowo-ekonomicznych z jednoczesnym przydziałem wielkości przewozów poszczególnym gałęziom transportu. Dotychczas planowanie przewozów prowadzone jest oddzielnie dla każdej gałęzi transportu. W jego procesie przydział wielkości przewozów poszczególnym gałęziom transportu, w analizowanym rejonie sieci transportowej, dokonuje się za pomocą prognozowanych modeli regresji. Takie podejście po pierwsze – wyklucza wzajemną zamienialność gałęzi transportu, po drugie – daje rozwiązanie eksperckie, tj. opiera się na danych retrospektywnych, po trzecie – nie wykorzystuje metod optymalizacyjnych, matematyczno-ekonomicznych.

W niniejszej pracy zaproponowano jednoczesne określenie wielkości przewozów dla poszczególnych gałęzi transportu i tabelę korespondencji ładunków. Główne problemy badawcze zostały sprowadzone do określenia:

- względnych kosztów transportu, z uwzględnieniem kilku gałęzi transportu, do przewozu danego typu ładunku pomiędzy dwoma zadanymi punktami sieci transportowej, przy zadanych kosztach operacji ładunkowych,
- rozwiązania zagadnienia transportowego,
- macierzy korespondencji dla każdego typu ładunku i każdej gałęzi transportu.

Bazę metodologiczną rozwiązania powyższych problemów stanowiły modele zagadnienia transportowego oraz modele zagadnienia przydziału.

Zagadnienia przydziału, w odróżnieniu od zagadnienia transportowego pozwala uwzględnić zamienialność produktów i można je wykorzystać do określenia macierzy korespondencji ładunków pomiędzy nadawcami i odbiorcami przy wzajemnej wymienialności rodzajów ładunków.

Zagadnienie transportowe pozwala określić macierz korespondencji ładunków jednorodnych.

### 1. ALGORYTM WYZNACZANIA MINIMALNYCH WZGLĘDNYCH KOSZTÓW TRANSPORTU

Informacją wejściową, niezbędną do rozwiązania obu zagadnień jest wielkość nadania i odbioru, względne koszty przewozu jednostki ładunku pomiędzy każdym nadawcą i odbiorcą, współczynniki wzajemnej wymienialności ładunków.

Względne koszty przewozu jednostki ładunku zależą od organizacji procesu przewozowego w danej gałęzi transportu.

Sezonowość funkcjonowania niektórych gałęzi transportu (śródlądowy, morski) oraz sezonowość produkcji niektórych rodzajów ładunków (produkty rolnicze) narzuca konieczność wykonywania obliczeń dla różnego okresu czasu. Poziom rozwoju każdej gałęzi transportu uwzględniony został w rozwiązaniu zagadnienia transportowego z ograniczoną zdolnością przepustową.

Podział zadania na dwa etapy – określenie względnych kosztów transportu i rozwiązanie zagadnienia transportowego – wynika z wielkości rejonu sieci transportowej (mnogość, węzłów, punktów i dróg). Przy mniejszych rozmiarach zadania wystarczy rozwiązać zagadnienie transportowe z punktami przejściowymi, w których brak jest nadania i odbioru danego rodzaju ładunku.

Niech rejon sieci transportowej będzie zadany grafem  $G(V, m)$ , gdzie:  $V$  – zbiór wierzchołków sieci,  $M = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup \dots \cup M_p$ ,  $M_i = \leq V \times V$  – zbiór łuków  $i$ -tej gałęzi transportu pomiędzy wierzchołkami  $V$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ .

Dla każdego  $l_{\mu}^i \in M_i$  znana jest  $r_{\mu}^i$  – długość (km) łuku. Dla każdego typu ładunku  $k$ ,  $k \in K$  i każdego rodzaju transportu  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$  znane są koszty przewozu jednostki  $k$ -tego rodzaju ładunku  $i$ -tą gałęzią transportu zadane funkcją  $t$  i  $k(r)$  zależną odległości  $r$ .

Znane są również koszty załadunku jednostki  $k$ -tego typu ładunku na  $i$ -tą gałąź transportu w punkcie  $x \in V - p_{kx}^i$  i analogicznie wyładunku -  $Q_{kx}^i$ .

Oznaczmy przez  $D(x_1, x_2)$  – zbiór dróg acyklicznych z początkiem w punkcie  $x_1$  i końcem w punkcie  $x_2$ ,  $x_1 \in V$ ,  $x_2 \in V$   $d(x_1, x_2) \in D(x_1, x_2)$  – element tego zbioru opisany wektorem  $(j_0, j_1, \dots, j_d, l_{\mu_{j_0}^{m_1}}^{m_1}, \dots, l_{\mu_{j_d}^{m_d}}^{m_d})$ , gdzie:  $j_r$  – wierzchołek drogi,  $j_0 = x_1$ ,  $j_d = x_2$  i  $l_{\mu_{j_{\beta-1}}^{m_{\beta}}}^{m_{\beta}} = (j_{\beta-1}, j_{\beta})$  – łuk łączący wierzchołki  $j_{\beta-1}$  i  $j_{\beta}$ ,  $\beta = 1, 2, \dots, d$ .

Względne koszty transportu  $Z_k(x_1, x_2)$  jednostki  $k$ -tego typu ładunku z punktu  $x_1$  do punktu  $x_2$ ,  $x_1 \in V$ ,  $x_2 \in V$  określa zależność [3]:

$$Z_k(x_1, x_2) = \min_{d(x_1, x_2) \in D(x_1, x_2)} \left\{ \sum_{i \in d(x_1, x_2)} t_{mpk}(r_{i\beta}^{m_\beta}) + \alpha_{m_\beta m_{\beta+1}}^k \right\} \quad (1)$$

gdzie:

$$\alpha_{m_\beta m_{\beta+1}}^k = \begin{cases} p_{ki\beta}^{m_\beta}, & \text{jeżeli } \beta = d \\ Q_{kx}^{m_\beta}, & \text{jeżeli } \beta = 0 \\ Q_{ki\beta}^{m_\beta} + p_{ki\beta}^{m_\beta}, & \text{jeżeli } 0 < \beta < d \text{ i } m_\beta \neq m_{\beta+1} \\ 0, & \text{jeżeli } 0 < \beta < d \text{ i } m_\beta = m_{\beta+1} \end{cases} \quad (2)$$

$Z_k(x_1, x_2)$  określa taką drogę przewozu  $k$ -tego rodzaju ładunku z punktu  $x_1$  do punktu  $x_2$  dla której sumaryczne koszty względne, związane z przewozem, załadunkiem, wyładunkiem, przeladunkiem jednostki ładunku wszystkimi dostępnymi gałęziami transportu będą minimalne.

Bezpośrednie zastosowanie algorytmu wyboru drogi najkrótszej w przypadku wyżej określonego zadania nie przyniesie spodziewanego rezultatu z powodu rozmiarów zadania. Specyfika tego zadania powoduje, że do jego rozwiązania można zastosować jedynie metody heurystyczne [2].

Biorąc pod uwagę realność rejonu sieci transportowej, uwzględnienie jej realne połączenia pozwoli wyłączyć z rozważań warianty przewozów z góry określone jako nieoptymalne, a także nieoptymalne warianty przewozów niektórymi gałęziami transportu.

Po dokonaniu takiej eliminacji zbior  $D(x_1, x_2)$  będzie zawierał niewielką liczbę dróg.

W myśl zaproponowanych heurystyk należy wykonać następujące kroki:

- podzielić sieć transportową na mniejsze regiony;
- określić możliwe (dopuszczalne) drogi przewozu w regionie na bazie istniejących gałęzi transportu i z uwzględnieniem realnych połączeń sieci transportowej.

Liczba regionów, ich wielkość i granice określa się na podstawie poziomu rozwoju, gęstości zaludnienia, podziału administracyjnego i realnie funkcjonujących gałęzi transportu.

Określenie dróg przewozu uwzględnia dopuszczalną liczbę operacji ładunkowych. Na przykład, jeżeli przewozy w danym regionie zdominowane są przez płynącą w nim rzekę, to w analizie dróg przewozu nie uwzględniamy przeladunku z transportu wodnego na inną gałąź transportu i odwrotnie.

Proponowany algorytm określania minimalnych względnych kosztów transportu składa się z następujących kroków:

**Krok 1.** Wybór typu ładunku  $k$ , punktu nadania  $x_1$  i odbioru  $x_2$ ,  $k \in K$ ,  $x_1 \in V$ ,  $x_2 \in V$ .

**Krok 2.** Określenie regionów, do których należy  $x_1$  i  $x_2$ . Określenie dróg przewozu według geograficznego położenia punktów nadania i odbioru ładunku.

**Krok 3.** Określenie minimalnych względnych kosztów transportu jednostki  $k$ -tego typu ładunku z punktu  $x_1$  do punktu  $x_2$ , dla określonych w kroku 2, dróg przewozu.

**Krok 4.** Analiza wyników obliczeń. Jeżeli określono względne koszty transportu pomiędzy wszystkimi nadawcami i odbiorcami – kończymy obliczenia, w przypadku przeciwnym – przechodzimy do kroku 1.

Pierwsze trzy kroki algorytmu można rozwiązać drogą ekspercką. W praktyce niniejszy algorytm powinien wyglądać następująco. Po kroku zerowym określamy rodzaj ładunku, „region nadawcy” -  $X_1$  i „region odbiorcy” -  $X_2$ . Realizujemy krok 2. W kroku 3 wybieramy  $x_1 \in X_1$  i  $x_2 \in X_2$  i określamy  $Z_k(x_1, x_2)$  dla  $k$  – rodzaju ładunku. Krok 3 powtarzamy dopóty, dopóki nie określimy wartości  $Z_k(x_1, x_2)$  dla wszystkich wymaganych  $x_1 \in X_1$  i  $x_2 \in X_2$ .

W przypadku komputerowego wariantu obliczeń kroku 2 należy określić współczynniki ciężenia punktów regionu do strefy przewozów następująco. Określamy minimalne względne koszty transportu od punktu  $x_1 \in X_1$  do  $x_2 \in X_2$ . Koniecznym staje się określenie możliwości (prawdopodobieństwa) przewozu (drogi) z minimalnymi względnymi kosztami transportu przez punkt  $x_3 \in X_3$ .

Oznaczmy:  $a_i$  – centrum  $i$ -tego regionu,  $r(a_i, a_j)$  – odległość pomiędzy centrami regionów  $X_i$  i  $X_j$ ,  $k^*$  – minimalny dopuszczalny współczynnik ciężenia w strefie przewozów,  $0 < k^* < 1$ . Wtedy punkty  $x_3, x_3 \in X_3$ , uczestniczą w procesie obliczeń minimalnych względnych kosztów transportu z punktu  $x_1$  do punktu  $x_2$ , jeżeli:

$$\frac{r(a_1, a_2)}{r(a_1, a_3) + r(a_3, a_2)} \geq k^* \quad (3)$$

Współczynnik  $k^*$  określany jest metodą ekspercką, na bazie struktury sieci transportowej, tj. obliczany jest dla najbardziej niekorzystnego odchylenia odcinka  $[a_1, a_2]$  od drogi przewozu z  $x_1$  do  $x_2$ .

Najbardziej racjonalna realizacja kroku 2 oparta jest na algorytmie wyznaczania najkrótszych dróg dla grafu rozszerzonego (wielowarstwowego). Graf rozszerzony, uwzględniający dopuszczalne gałęzie transportu dla przewozów z  $x_1$  do  $x_2$   $k$ -tego rodzaju ładunku powstaje następująco:

- każdy wierzchołek grafu (węzeł transportowy, który obsługuje  $S$  gałęzi transportu,  $L < S < P$  dzieli się na  $S$  wierzchołków do obsługi jednej gałęzi transportu. Uzyskane w ten sposób wierzchołki (miejsca obsługi ładunku każdej gałęzi transportu) łączą się łukami z wagami, równymi sumie kosztów operacji ładunkowych w danej gałęzi transportu dla rodzaju ładunku występującego w tym wierzchołku. Ponadto, każdy wierzchołek po dzieleniu zachowuje łuki incydentalne z innymi wierzchołkami tej samej gałęzi transportu;
- każdy wierzchołek, który jest punktem nadania lub odbioru ładunku zostaje zdublowany. Pierwszy wierzchołek jest punktem nadania lub odbioru, zaś drugi – węzłem transportowym. Wierzchołek drugi jest incydentalny ze wszystkimi łukami istniejącymi do momentu podziału. Wagi łuków i ich kierunek określają koszt załadunku lub wyładunku analizowanego rodzaju ładunku w poszczególniej gałęzi transportu;
- wagi łuków określają koszty przewozu poszczególną gałęzią transportu pomiędzy wierzchołkami (punktami) przy zadanych odległościach. Tak więc każdemu punktowi sieci transportowej połączonemu z  $S$  gałęziami transportu odpowiada  $S$  nowych wierzchołków, jeżeli ten punkt jest nadawcą lub odbiorcą ładunku to jemu odpowiada  $S+1$  wierzchołek w rozszerzonym grafie sieci transportowej.

W odniesieniu do grafu rozszerzonego sieci stosuje się procedurę wyznaczania najkrótszych odległości pomiędzy jego wierzchołkami. Wyznaczanie dróg o minimalnych względnych kosztach transportu odbywa się za pomocą przekształcenia odwrotnego, tj. zapamiętywana jest droga przewozu ładunku, punktu przeladunku z jednej gałęzi transportu na drugą gałąź, pośrednie punkty przewozu. Zauważmy, że takie podejście może gwarantować jednocześnie określenie  $Z_k(x_1, x_2)$  dla wszystkich  $x_1 \in X_1$  i  $x_2 \in X_2$ , gdzie  $k$  – rodzaj ładunku przy wyznaczaniu najkrótszych odległości pomiędzy wszystkimi wierzchołkami grafu.

Rozwiązanie zadania transportowego określa punkt nadania, punkt odbioru i wielkość przewozu każdego typu ładunku lub grupy ładunków zamienianych. Informacja powyższa oraz drogi przewozu ładunków z minimalnymi kosztami względnymi określają wielkości przewozów poszczególnymi gałęziami transportu oraz tabelę korespondencji ładunków. Tabela korespondencji służy do planowania przewozów każdej gałęzi transportu oraz określania perspektyw ich

rozwoju. W rozwiązaniu zadania transportowego należy uwzględnić zdolności przepustowe elementów sieci transportowej, obrazujące poziom rozwoju transportu w analizowanym rejonie. Zdolność przepustowa drogi z  $x_1$  do  $x_2$  dla  $k$ -rodzaju ładunku określana jest jako minimum zdolności przepustowych dróg sieci transportowej z minimalnymi względnymi kosztami transportu  $Z_k(x_1, x_2)$ .

Schemat struktury algorytmu wyznaczania względnych kosztów transportu pokazano na rys.1. Znaczenia funkcjonalne poszczególnych bloków są następujące:

1. Pod parametrami i danymi rejonu rozumiane są: jego struktura geograficzna punkty nadania i odbioru, pośrednie węzły transportowe.
2. Dla zmniejszenia ogólnej liczby wszystkich możliwych wariantów przewozu odrzuca się drogi, które „prawdopodobnie” nie będą uwzględnione w analizie.
3. Wprowadza się regiony nadania i odbioru ładunków.
4. Wprowadza się punkty nadania danego regionu i punkt odbioru danego regionu.
5. Optymalny wariant przewozu danego rodzaju ładunku pomiędzy zadanymi punktami zawiera:
  - optymalną drogę przewozu (punkty przeładunku z jednej gałęzi transportu na drugą)
  - względne koszty transportu jednostki ładunku.
6. Otrzymane wyniki obliczeń zapisywane są do bazy danych.
7. Zapis wyników obliczeń dokonywany jest na podstawie oddzielnej procedury.
8. Blok ostatni realizuje kontynuację lub zakończenie obliczeń.

## ZAKOŃCZENIE

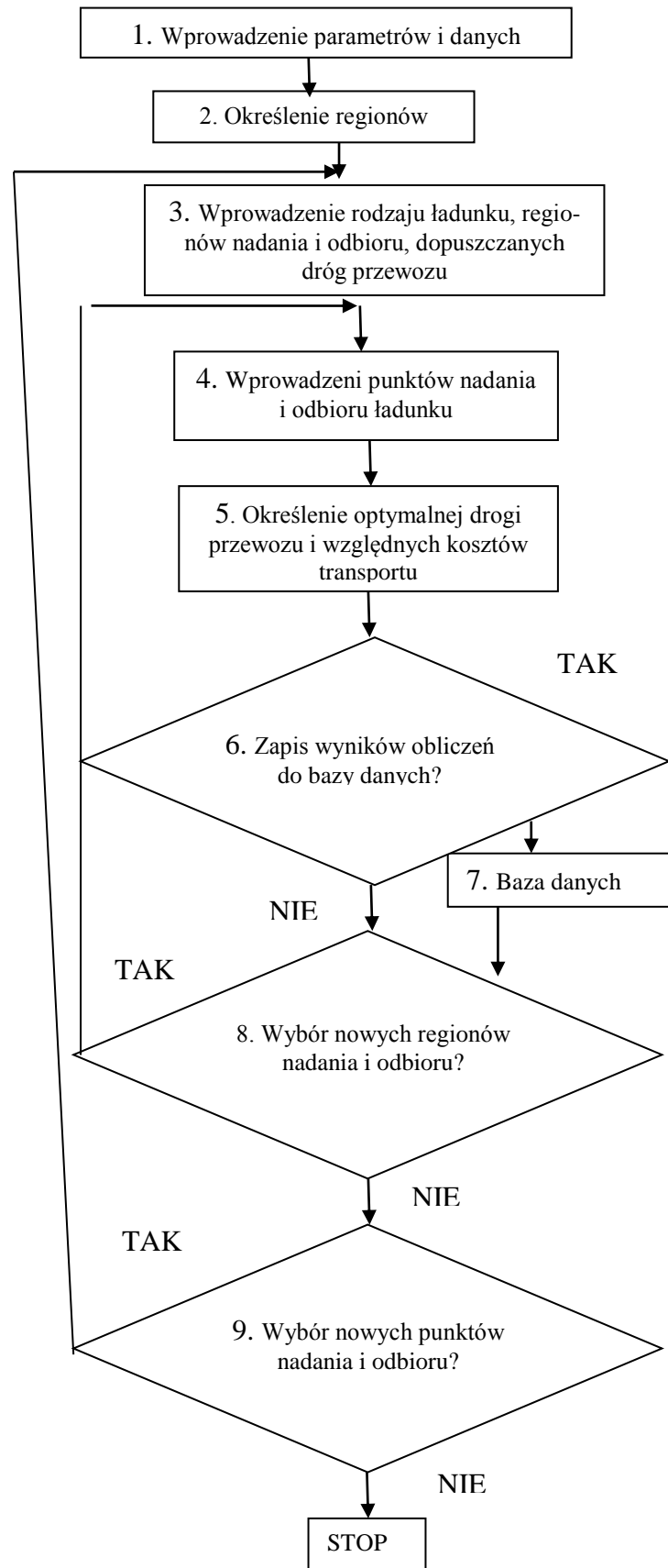
Wyznaczanie względnych kosztów transportu może również być oparte na innych kryteriach, takich jak: jakość przewozów, czas dostawy ładunku i inne.

Rozwiązanie zadania transportowego w ujęciu sieciowym bez określenia względnych kosztów transportu pomiędzy nadawcami i odbiorcami również może dać rezultat podobny do przedstawionego wyżej. Jednak w tym przypadku ograniczeniem jest rozmiar zadania, co nie pozwala uwzględnić wszystkich punktów rejonu sieci transportowej.

Wszystkie tego typu zadania określają optymalną lub racjonalną tabelę korespondencji ładunków.

## BIBLIOGRAFIA

1. Айзенберг Е.Б., Мамаев Э.А., Ющенко М.Н.: Моделирование производственно-транспортной системы региона // Вопросы создания АСПР - Вып. 85 - М, 1999.
2. Cisowski T.: Wspomaganie decyzji w zarządzaniu potokami transportowymi na kolei. Technika Transportu Szynowego, Nr 1-2/2011
3. Морозов В.Н. : Системная организация мультимодальных транспортных коридоров: автореф. Дисс.канд. техн. Наук / Морозов В.Н. - М.: 2000, 24с.



Rys.1. Schemat algorytmu wyznaczania względnych kosztów transportu

### Transport planning including several branches of transport

*The paper proposes a heuristic algorithm for determining the minimum relative costs of transport, including several modes of transport for the transport of the type of cargo between the two pre-defined points of the transport network, with the given cost cargo operations.*

*This algorithm allows simultaneous determination of the volume of transport for the individual modes of transport and sets out a table of correspondence loads.*

Autor:

Prof. ndzw. dr hab. inż. **Tadeusz Cisowski** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Wydział Lotnictwa, e; mail t.cisowski@wsosp.pl