

Paweł Hanczar

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

PLANOWANIE PRZEWOZÓW W WARUNKACH STREFOWEGO SYSTEMU ROZLICZEŃ

Streszczenie: W referacie rozważono problemy planowania transportu zewnętrznego w sytuacji stosowania strefowego systemu rozliczania kosztów. W pierwszej części artykułu został zaprezentowany sposób rozliczania kosztów transportu bazujący na liczbie i strefach zaopatrywanych odbiorców. Następnie przeanalizowano możliwości rozwiązania tego zagadnienia wykorzystujące metody programowania liniowego, a także podejście przybliżone. Referat kończy prezentacja planu dostaw minimalizującego koszty uzyskanego przy zastosowaniu opracowanych algorytmów.

Słowa kluczowe: dystrybucja, modele optymalizacyjne, strefowy system rozliczania kosztów dostaw

1. Wstęp

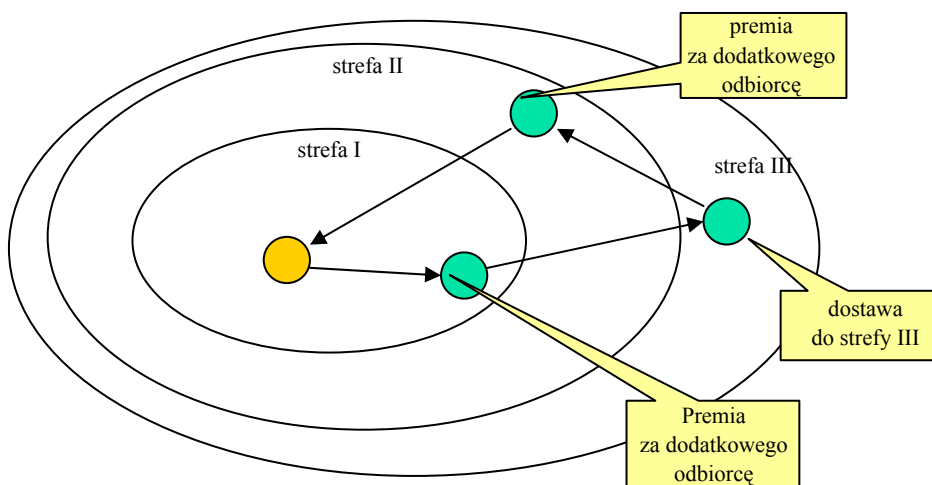
Strefowy system rozliczania kosztów dostaw jest stosowany w dystrybucji bardzo często. Główną przyczyną jego popularności jest duża łatwość użycia. Koszty transportu zależą tutaj od wagi ładunku oraz strefy, do której jest kierowana dostawa. Określenie kosztów dostawy według opisywanego systemu wymaga jedynie odczytania wielkości opłaty z odpowiednio przygotowanej tabeli. W odniesieniu do ładunków typu LTL (*less-than-truckload*), kiedy to dostawca może w jednym kursie obsłużyć więcej niż jednego odbiorcę, koszty dostawy ponoszone przez odbiorcę pozostają bez zmian. W takich sytuacjach dostawca obniża koszty realizacji dostaw dzięki łączeniu w jednej trasie dostaw do więcej niż jednego odbiorcy.

Postępująca specjalizacja w zakresie świadczenia usług dystrybucyjnych prowadzi do sytuacji, w których przedsiębiorstwa zlecają realizację dostaw zewnętrznym firmom transportowym. Zastosowanie taryfy strefowej jest wtedy bardziej korzystne dla firmy transportowej, gdyż, jak już wspomniano, odpowiednie planowanie tras dostaw umożliwia obsługę kilku odbiorców w ramach jednej trasy, pomimo że każdy ładunek opłacany jest według taryfy strefowej. Ze względu na to, że koszty transportu stanowią jedną z ważniejszych pozycji kosztowych, firmy próbują

ją wprowadzać indywidualne rozwiązania w tym obszarze. Przykładem mogą być tutaj strategie mieszane polegające na korzystaniu z usług firm transportowych rozliczających się według różnych typów taryf transportowych [Schoebel 2008] czy też stosowanie w rozliczeniach taryf bardziej korzystnych dla firmy zlecającej transport niż dla firmy transportowej.

2. Taryfa strefowa uwzględniająca liczbę odbiorców

Jedną z najprostszych modyfikacji standardowej taryfy strefowej polega na uwzględnieniu w rozliczeniach najdalszej obsługiwanej strefy oraz liczby odbiorców, do których jest dostarczany towar. Firma zlecająca transport płaci wtedy standardową stawkę strefową wyłącznie za dostawę do najdalszego odbiorcy oraz stałą kwotę za każdego dodatkowo obsługiwane klienta (rys. 1). Ponadto ustala się, jak bardzo oddalone mogą być lokalizacje obsługiwane w jednej trasie.



Rys. 1. Zmodyfikowana taryfa strefowa

Źródło: opracowanie własne.

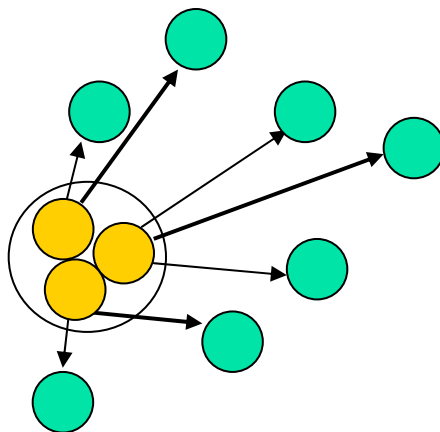
Przedstawiony sposób rozliczeń zapewnia, analogicznie jak w ramach klasycznej taryfy strefowej, dużą łatwość w wyznaczaniu kosztów dostaw ponoszonych przez odbiorców oraz możliwość bezpośredniego powiązania przychodów za zrealizowane dostawy z wydatkami firm transportowych. Z drugiej jednak strony tak zdefiniowana taryfa wymaga skomplikowanego sposobu ustalania tras dostaw. Im lepszy plan dostaw, tym niższe koszty ich realizacji, co przy stałym przychodzie (każdy odbiorca opłaca transport zgodnie ze stawką bez względu na sposób realizacji dostawy) bezpośrednio przekłada się na zysk przedsiębiorstwa.

Przedstawione w dalszej części artykułu rozważania dotyczą nie tylko takich układów, jak zaprezentowane powyżej powiązanie dostawcy z firmą transportową i odbiorcami. Mają one zastosowanie także podczas planowania dostaw przez firmy korzystające z transportu zewnętrznego.

3. Zasady zrównoważonego rozwoju

Opisywany problem jest zbliżony do dwóch zagadnień rozważanych bardzo gruntownie w literaturze. Pierwsze z nich to zagadnienie przydziału (*general assignment problem*), drugie to wyznaczanie tras dostaw (*vehicle routing problem*). Dostosowanie wymienionych zagadnień do prezentowanej sytuacji wymaga jednak kilku modyfikacji. W ramach pierwszego sformułowania należy uwzględnić ładowność pojazdu oraz zmodyfikować funkcję celu. W drugim zagadnieniu jest niezbędna modyfikacja funkcji celu. Dodatkowo należy pamiętać, że wielkość rozwiązywanych zadań dla drugiego sformułowania jest mocno ograniczona – nie więcej niż około 100 lokalizacji. Ze względu na to, że na początkowym etapie badań trudno jednoznacznie stwierdzić, które podejście pozwoliłoby uzyskać najlepsze wyniki, w dalszych badaniach rozważono równoległe wykorzystanie obu przedstawionych podejść.

Jako pierwsze zostanie rozważone sformułowanie bazujące na modyfikacji zagadnienia przydziału. Koncepcja użycia tego podejścia polega na przydzieleniu wszystkich odbiorców do tras (część klasyczna), dodatkowo należy zapewnić, że w żadnej trasie nie będzie przekroczona ładowność pojazdu, oraz zagwarantować, że wartość funkcji celu będzie obliczana zgodnie z warunkami podanymi w opisie problemu (rys. 2).



Rys. 2. Problem planowania dostaw w strefach jako zadanie przydziału

Źródło: opracowanie własne.

W modelu zaprezentowanym wzorami (1)-(6) wykorzystuje się dwie grupy zmiennych decyzyjnych: x_{ij} oraz z_j . Pierwsza to zmienna binarna, która określa, czy odbiorca i jest obsługiwany w trasie j . Natomiast druga to koszt obsługi najdalszego odbiorcy w trasie j . Ponadto przyjęto następujące oznaczenia parametrów: c_i to koszt dostawy do odbiorcy i , q_i to zapotrzebowanie odbiorcy i , d_{ik} to odległość lokalizacji i i k oraz d_{\max} to maksymalna odległość pomiędzy odbiorcami w jednej trasie.

$$\min \sum_{j=1}^m z_j \quad (1)$$

$$z_j - c_i x_{ij} \geq 0 \quad \text{dla każdego } i, j \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i x_{ij} \leq Q \quad \text{dla każdego } j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 1 \quad \text{dla każdego } i \quad (4)$$

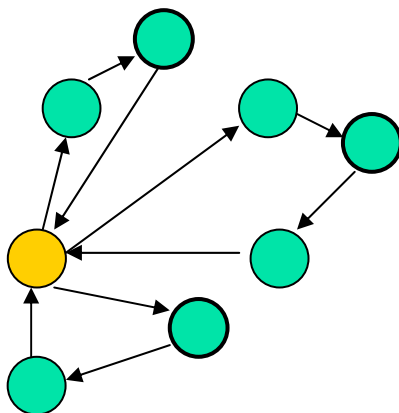
$$d_{ik} (x_{ij} + x_{kj} - 1) \leq d_{\max} \quad \text{dla każdego } i, k, j \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{dla każdego } i, j \quad (6)$$

Funkcja celu (1) wraz z ograniczeniem (2) zapewnia, że koszt zrealizowania wszystkich dostaw będzie równy sumie kosztów dostaw do najdalszej lokalizacji w każdej trasie. Ograniczenie (3) zapewnia, że ładowność pojazdu na żadnej trasie nie zostanie przekroczona. Ograniczenie (4) gwarantuje, że odbiorca zostanie obsłużony dokładnie raz. Ograniczenie (5) zostało wprowadzone do modelu w celu zapewnienia, że odległość pomiędzy każdą parą odbiorców w jednej trasie nie przekroczy zadanej odległości maksymalnej. Ostatnie ograniczenie (6) gwarantuje, że zmienna decyzyjna x_{ij} będzie zmienną binarną.

Przedstawione sformułowanie zostało użyte do rozwiązania losowych zadań testowych. Najtrudniejsze rozwiązane zadanie składało się z 16 miast, a czas znajdowania rozwiązania wyniósł 550 sekund. Dodatkowo przebieg procesu optymalizacji uniemożliwiał skrócenie czasu znajdowania rozwiązania, gdyż we wszystkich rozwiązywanych zadaniach zaobserwowano dużą różnicę pomiędzy przybliżeniem liniowym zadania całkowitoliczbowego. Nie podjęto próby rozwiązania zadania rzeczywistego za pomocą zaprezentowanego sformułowania.

W drugiej kolejności zostanie rozważone sformułowanie bazujące na modyfikacji zagadnienia wyznaczania tras dostaw. Koncepcja użycia tego podejścia polega na wygenerowaniu tras dostaw (analogicznie jak w podstawowej postaci problemu wyznaczania tras dostaw), lecz przy zmienionej postaci funkcji celu. Koszt obsługi trasy powinien wynosić tyle samo, ile koszt obsługi strefy najdalszego odbiorcy w trasie (rys. 3).



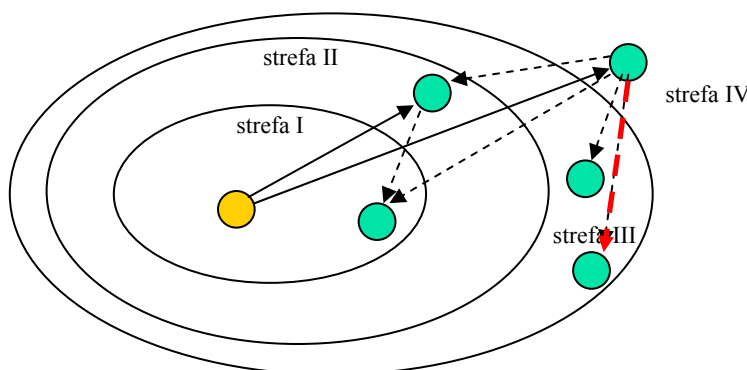
Rys. 3. Problem planowania dostaw w strefach jako wyznaczenie tras dostaw

Źródło: opracowanie własne.

W zadaniu wyznaczania tras dostaw wartość funkcji celu jest sumą długości połączeń użytych w rozwiązaniu. Powoduje to, że planowana poprzednio wyłącznie modyfikacja funkcji celu w modelu wyjściowym okazała się niemożliwa. Model zaprezentowany w dalszej części został opracowany od podstaw, a jedyną częścią wspólną ze sformułowaniem wyznaczania tras dostaw jest sposób zdefiniowania zmiennej decyzyjnej x_{ij} . Zmienna ta w wyjściowym sformułowaniu (model wyznaczania tras dostaw) określa, czy odcinek (i, j) został użyty w rozwiązaniu optymalnym. Przyjmuje wartość 1, gdy pojazd korzysta z połączenia (i, j) w rozwiązaniu oraz zero w pozostałych przypadkach. W nowym sformułowaniu interpretacja zmiennej jest inna, gdyż połączenia i ich wagi zostały wykorzystane w wyznaczaniu wartości funkcji celu. W nowym sformułowaniu rozważa się połączenia skierowane. Zostały wyróżnione dwa typy połączeń. Pierwszy z nich to połączenia od centrum dystrybucji do odbiorcy, którym przypisano wagę równą kosztowi obsługi strefy danego odbiorcy. Drugi typ to połączenia pomiędzy odbiorcami. Połączeniom tego typu przypisano wagę równą kosztowi obsługi dodatkowej lokalizacji w trasie. W lokalizacji każdego odbiorcy musi się kończyć dokładnie jedno połączenie, co oznacza, że będzie on obsługiwany dokładnie raz. Ponadto od odbiorców połączonych bezpośrednio z centrum dystrybucji mogą rozpoczynać się połączenia do innych odbiorców oddalonych od odbiorcy mniej niż d_{\max} oraz należących do tej samej lub bliższej strefy niż dany odbiorca. Takie sformułowanie modelu gwarantuje, że koszt obsługi trasy będzie kosztem obsługi najdalej położonego odbiorcy w trasie (rys. 4).

W modelu zaprezentowanym wzorami (7)-(11), jak wspomniano już wcześniej, wykorzystuje się zmienną decyzyjną x_{ij} . Przyjmuje ona wartość 1, gdy odcinek $\langle i, j \rangle$ jest użyty w rozwiązaniu, oraz zero w pozostałych przypadkach. Dodatkowo przyjęto następujące oznaczenia parametrów: c_i to koszt dostawy do odbiorcy i , q_i

to zapotrzebowanie odbiorcy i oraz L to maksymalna liczba odbiorców obsługiwanych w jednej trasie. W sformułowaniu modelu bezpośrednio nie wykorzystuje się parametru d_{\max} (jak w poprzednim podejściu), gdyż jest ono wykorzystywane podczas przygotowywania modelu. Jeśli odległość pomiędzy odbiorcami przekracza d_{\max} , to połączenia takie nie jest uwzględniane podczas procesu optymalizacji. Takie podejście powoduje zmniejszenie rozmiaru modelu, co może mieć duży wpływ na możliwości jego rozwiązywania.



Rys. 4. Sposób sformułowania modelu zapewniający możliwość wyznaczenia wartości funkcji celu

Źródło: opracowanie własne.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1 \quad \text{dla każdego } j > 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq Lx_{0i} \quad \text{dla każdego } i > 0 \quad (9)$$

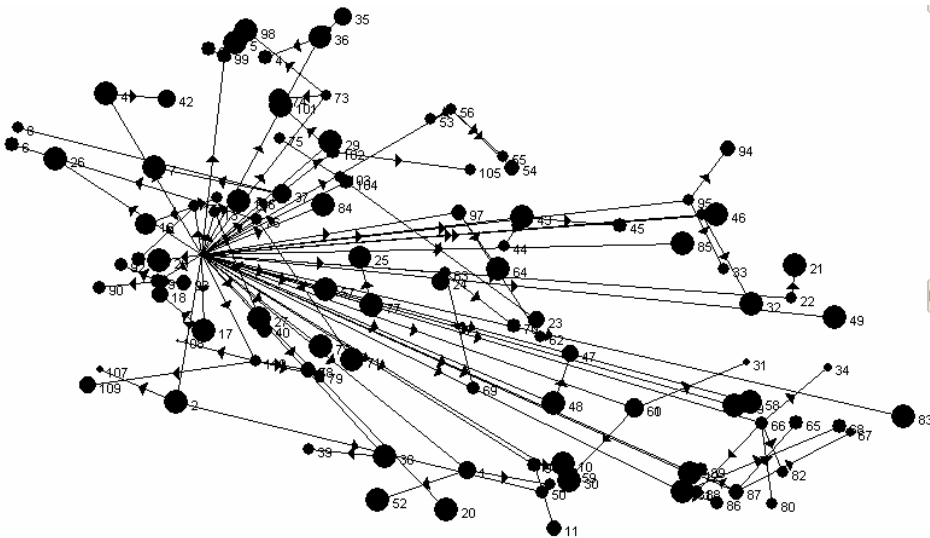
$$\sum_{j=1}^n q_j x_{ij} + q_i x_{0i} \leq Q \quad \text{dla każdego } i > 0 \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \text{dla każdego } i, j \quad (11)$$

Wartość funkcji celu (7) jest sumą wag odcinków użytych w rozwiązaniu. Zaprezentowany wcześniej sposób definiowania połączeń i ich wag gwarantuje, że wartość funkcji celu jest zgodna z warunkami zadania. Ograniczenie (8) zapewnia, że każdy odbiorca (z wyjątkiem centrum dystrybucji, które w modelu oznaczono indeksem zero) będzie obsługiwany dokładnie raz. Ograniczenie (9) powoduje, że połączenia rozpoczynające się od odbiorcy (interpretowane jako obsługa dodatkowej

lokalizacji w trasie) są dopuszczane tylko od odbiorców obsługiwanych bezpośrednio z centrum dystrybucji (połączenie x_{0i}). Dodatkowo ograniczenie to zapewnia, że liczba obsługiwanych dodatkowo lokalizacji nie przekroczy L . Ograniczenie (10) gwarantuje, że ładowność pojazdu nie zostanie przekroczona na żadnej z tras. Ostatnie ograniczenie (11) zapewnia, że zmienna decyzyjna x_{ij} będzie zmienną binarną.

Przedstawione sformułowanie zostało przetestowane na losowo generowanych zadaniach. Model doskonale radzi sobie z rozwiązywaniem zadań składających się nawet z 100 miast. Czas rozwiązania tak skomplikowanych zadań wyniósł około 10 minut. Ponadto stwierdzono, że przebieg procesu optymalizacji umożliwił skrócenie czasu znajdowania rozwiązania. We wszystkich rozwiązywanych zadaniach zaobserwowano, że różnica pomiędzy przybliżeniem liniowym zadania całkowitoliczbowego już na początku rozwiązywania problemu jest bardzo mała. Ustawienie dokładności rozwiązania na poziomie 1% spowodowało, że zadania zawierające nawet 120 odbiorców były rozwiązywane w ciągu kilku sekund.



Rys. 5. Graf rozwiązania rzeczywistego problemu strefowego planowania dostaw

Źródło: opracowanie własne.

Następnie model ten został użyty do rozwiązania zadania rzeczywistego uwzględniającego 110 miast. Rozwiązanie zadania z zadaną dokładnością na poziomie 1% uzyskano w ciągu 2 sekund, co w porównaniu z jednym dniem pracy dwóch osób odpowiedzialnych za planowanie tras stanowi dużą oszczędność. Koszt realizacji dostaw w znalezionym rozwiązaniu jest o 2% mniejszy niż w rozwiązaniu proponowanym przez przedsiębiorstwo. Tak mała różnica jest najprawdopodobniej spowodowana subiektywnym podejściem do ograniczenia maksymal-

nej odległości odbiorców obsługiwanych w jednej trasie oraz możliwością przeniesienia do planowych tras odbiorców z przyszłych okresów (czyli wcześniejsza realizacja dostawy po uzgodnieniu z odbiorcą). W modelu założenie jest spełnione dla każdej trasy, w rzeczywistości osoby planujące trasy mają tutaj pewną możliwość wydłużania tego dystansu. Tak więc poluzowanie ograniczenia, o którym mowa, oraz możliwość przeniesienia odbiorcy do bieżącego okresu w celu zwiększenia załadunku pojazdu znacznie ułatwiają proces planowania dystrybucji. Dokładna ocena jakości proponowanych rozwiązań w stosunku do rozwiązań wyznaczanych przez dział logistyki wymaga przeanalizowania większej liczby planów dystrybucji. Graf wyznaczonego rozwiązania zaprezentowano na rys. 5.

4. Zakończenie

O zastosowaniu proponowanych rozwiązań optymalizacyjnych bardzo często decyduje możliwość oprogramowania i integracji algorytmu rozwiązywania z działającym w przedsiębiorstwie systemem informatycznym. W omawianym przypadku zaproponowany model został zaimplementowany w wersji wykorzystującej komercyjne oprogramowanie CPLEX oraz w wersji działającej z darmowym solverem COIN-MP. Na etapie implementacji przedsiębiorstwo nie podjęło jeszcze decyzji, czy zdecyduje się na zakup oprogramowania komercyjnego.

Oprogramowanie zostało zintegrowane z systemem SAP R3 przy wykorzystaniu standardowych metod, takich jak tzw. punkty wyjścia do rozwiązań klienckich (*user-exit*) oraz zdalne wywołanie funkcji (*remote function call*) pozwalające na wywoływanie zewnętrznych programów. Taki sposób integracji zapewnił pełny komfort korzystania (użytkownik końcowy nie wie, że w chwili planowania dostaw uruchamiane są zewnętrzne procedury) oraz umożliwił wykorzystanie profesjonalnego oprogramowania optymalizacyjnego (CPLEX, COIN-MP).

Zaprezentowane badania pokazały ponadto, że w obszarze optymalizacji modele uwzględniające specyficzne warunki zadania pozwalają uzyskiwać rozwiązania bliskie optymalnemu dla zadań rzeczywistych. Stawiają natomiast pod znakiem zapytania wszelkiego typu podejścia uniwersalne.

Literatura

- Laporte G., *The vehicle routing problem. An overview of exact and approximate algorithms*, "European Journal of Operations Research" 1992 no 59, s. 345-358.
- Schoebel A., *Optimization in Public Transportation: Stop Location, Delay Management and Tariff Zone Design in a Public Transportation Network (Springer Optimization and its Applications)* Springer, New York 2008.
- Toth P., Vigo D., *An overview of vehicle routing problems*, [w:] P. Toth, D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem*, SIAM, Philadelphia 2000, s. 1-23.

TRANSPORTATION SERVICE PLANNING IN THE ZONE TARIFF SYSTEM

Summary: The paper concerns a specific situation where a business wants to outsource transportation services in the zone tariff system. In the first part, the main problem is introduced. Then the author presents the main body of his research where he considers two mixed integer linear programming models. In the next part, the obtained solution for the real life instance is explained. In the last part, the integration possibilities of the optimization model with ERP software are presented.